unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

APLICAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA NA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA USANDO AS DEFINIÇÕES DE BUCHHOLZ-GOODHUE

Mirely Cristina Baldin

DO
1210001448

Ilha Solteira - SP

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"APLICAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA NA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA USANDO AS DEFINIÇÕES DE BUCHHOLZ-GOODHUE."

Proc. 063/04-NPD 24

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"
SERVIÇO TÉC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO

DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
27/02/04	31.03.04
REGISTRADO POR	TOMBO
Aiza	Tc. 1448
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação Autor R$ 10,00	B177a

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica (ME).

CD
Sys 214453
Sys 56107

ALUNA: MIRELY CRISTINA BALDIN

ORIENTADOR: DALGERTI LELIS MILANESE

1210001448

ILHA SOLTEIRA, NOVEMBRO DE 2003.

BCpIS - FEIS • UNESP

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da FEIS/UNESP

Baldin, Mirely Cristina

B177a Aplicação da teoria da potência complexa instantânea na compensação de potência reativa em sistemas elétricos de potência usando as definições de Buchholz-Goodhue / Mirely Cristina Baldin . -- Ilha Solteira : [s.n.], 2003

72 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2003

Orientador: Dalgerti Lelis Milanese

Bibliografia: p. 70-72

1. Energia-Qualidade. 2. Eletrônica de potência. 3. Fator de potência.

30404002

APLICAÇÃO DA TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA NA COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA USANDO AS DEFINIÇÕES DE BUCHHOLZ-GOODHUE

Mirely Cristina Baldin

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho
Coordenador do Programa de Pós–Graduação
em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Dalgerti Lelis Milanese - orientador

Prof. Dr. Milton Itsuo Samesima

Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

Ilha Solteira-SP, novembro de 2003.

FEIS - UNESP

"Em cada minuto uma escolha.
Em cada escolha um resultado.
Em cada resultado uma experiência.
Experimentar é viver.
No emaranhado das sensações,
o reconhecimento do poder de criar
nossas próprias vivências,
nos limites das leis da vida.
Para uns é um jogo, para outros é
carregar a espada da luta no fio do destino."

(O Fio do Destino – Zíbia M. Gasparetto)

BCpIS - FEIS • UNESP

A Deus, pelo Dom da vida, sabedoria, e que me deu forças para superar os momentos difíceis e não esmorecer.

Aos meus pais pelo incentivo, por me ensinaram o valor de consciência e dignidade, que renunciaram a seus sonhos em favor dos meus. Estes, que não foram somente pais, mas amigos.

A pessoas especiais como minha irmã Milene e ao Fabricio que, com muito afeto, sempre depositaram muita confiança em mim.

Ao Professor Dalgerti pela orientação, confiança , paciência depositada em mim. Pela amizade que conquistamos neste tempo que trabalhamos juntos.

Aos Professores do Departamento, pela atenção e dedicação.

Aos Funcionários da Pós-Graduação e do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS/UNESP, pelo auxilio que foi prestado.

Aos amigos que conquistei, pelos anos que passamos juntos lutando pelo mesmo propósito.

À UNESP, Universidade Estadual Paulista, que proporcionou a realização deste.

A CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

BCpIS - FEIS • UNESP

"Aplicação da Teoria da Potência Complexa Instantânea na Compensação de Potência Reativa em Sistemas Elétricos de Potência usando as definições de Buchholz-Goodhue".

O objetivo deste trabalho é aplicar o método dos vetores espaciais instantâneos e da potência complexa instantânea no cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue, do fator de potência trifásico e demais índices de avaliação de qualidade de energia em sistemas de potência.

Estudos anteriores, feitos com a aplicação desses vetores, resultou no desenvolvimento da teoria da potência complexa instantânea, caracterizando estes como uma poderosa ferramenta para a análise de sistemas elétricos em quaisquer regimes de operação.

A norma IEEE1459/2000 sugere as grandezas de Buchholz-Goodhue como as mais apropriadas para os casos de sistemas trifásicos desequilibrados e não-senoidais. Milanez e Emanuel demonstram que estas grandezas podem ser obtidas através de vetores espaciais instantâneos.

Neste sentido, foi desenvolvido o "software" de um instrumento digital para obter os resultados destas grandezas. Dois instrumentos digitais foram utilizados, o Matlab e alguns recursos pré-existentes do Labview, entre eles os filtros Butterworth e Chebyshev, os quais selecionaram as componentes fundamentais das ondas analisadas.

Com os resultados encontrados, foi possível verificar a validade da proposta dos vetores espaciais instantâneos e da potência complexa instantânea para o cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue.

Como estes conceitos aplicam-se a sistemas trifásicos em geral, demonstra-se a potencialidade dos mesmos como um método alternativo e promissor para trabalhos de pesquisa futuros e para o desenvolvimento de sistemas de controle e monitoração de sistemas elétricos de potência.

I- Introdução..... **1**

II- Conceituação e Definições de Potência Elétrica em Sistemas Elétricos Trifásicos Operando em quaisquer Regimes..... **4**

II. 1- A Potência Complexa Instantânea -Teoria e Propriedades..... **4**

II. 1.1- Representação Vetorial de Tensões e Correntes em Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente Senoidal..... **4**

II. 1.2- Representação Vetorial de Tensões e Correntes em Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente Não-Senoidal e Transitório... **5**

II. 1.3- Novos Conceitos de Potência Elétrica - Teoria da Potência Elétrica Instantânea..... **8**

II.2- Conceitos de Potência Elétrica Propostos por Akagi..... **10**

II.3- A Compensação da Potência Complexa Instantânea **16**

II.3.1- Método de Compensação da Potência Complexa Instantânea..... **17**

II.4- Definições Convencionais da Potência Elétrica para Sistemas Trifásicos..... **19**

II.4.1- Potência Aparente Aritmética..... **19**

II.4.2- Potência Aparente Vetorial..... **21**

II.4.3- A Utilização dos Vetores Espaciais Instantâneos no cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue..... **23**

III- Desenvolvimento do "Software" para Instrumentação Digital..... **30**

III.1- Sistema Trifásico Desequilibrado e com Formas de onda não-senoidal..... **30**

III.2- O Sistema Compensado utlizando-se o Método de Akagi..... **37**

III.3- Compensação das Componentes Harmônicas do Sistema..... **40**

III.4- A Compensação de Akagi e das Componentes Harmônicas..... **40**

III.5- Resultados para um Caso Ideal de Correntes e Tensões Equilibradas..... **40**

IV- Apresentação dos Resultados do Caso Estudado..... **41**

IV.1- Sistema Trifásico Desequilibrado e com Formas de onda não-senoidal..... **41**

IV.2- O Sistema Compensado utlizando-se o Método de Akagi..... **49**

IV.3- Compensação das Componentes Harmônicas do Sistema..... **52**

IV.4- A Compensação de Akagi e das Componentes Harmônicas..... **59**

IV.5- Resultados para um Caso Ideal de Correntes e Tensões Equilibradas..... **60**

V- Concepção de um Instrumento Digital e Gerador de Sinais para Filtros Ativos Compensadores..... **67**

VI- Conclusão..... **69**

VII- Referências Bibliográficas..... **70**

I- INTRODUÇÃO

Desenvolve-se nesse trabalho uma aplicação dos conceitos de potência elétrica apresentados por Akagi e Nabae [1] e Milanez [2], com a utilização de vetores espaciais instantâneos, à análise do fluxo de energia em Sistemas Elétricos Trifásicos.

Estudos anteriores [2], com a aplicação desses vetores, resultaram no desenvolvimento da teoria da potência complexa instantânea, constatando-se que os mesmos constituem uma poderosa ferramenta para a análise de sistemas elétricos operando em quaisquer regimes.

As definições usuais de potência aparente para sistemas trifásicos, como por exemplo, as potências aritmética e vetorial, apresentam resultados não satisfatórios quando aplicadas em sistemas desequilibrados com formas de onda não-senoidal, como mostrado na norma IEEE1459/2000 [3]. Esta norma sugere que a tensão, a corrente e a potência aparente efetiva de Buchholz-Goodhue, bem como as demais grandezas correlatadas, são as mais apropriadas para estes casos. Milanez e Emanuel [4] demonstram que estas grandezas de Buchholz-Goodhue podem ser obtidas através de vetores espaciais instantâneos.

Pretende-se neste trabalho, aplicar o método dos vetores espaciais instantâneos e da potência complexa instantânea, no cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue e do fator de potência trifásico, visando-se uma melhor conceituação destas e o aprofundamento das técnicas de compensação das potências ativas e reativas baseada nos métodos de Akagi, Nabae e Watanabe [1, 5-9].

Foi desenvolvido o "software" de um instrumento digital, o qual foi simulado no Simulink, para obter os resultados das grandezas de Buchholz-Goodhue. Alguns recursos pré-existentes do Labview foram utilizados, entre eles os filtros Butterworth e Chebyshev, para selecionar as componentes fundamentais das ondas analisadas.

Assim, para atender os objetivos desta dissertação, a estrutura deste foi dividida da seguinte forma:

No capítulo II, apresentam-se os vetores espaciais instantâneos que são utilizados para definir a potência complexa instantânea, a partir de seus conceitos e propriedades. Faz-se um breve comentário sobre os conceitos da potência elétrica propostos por Akagi e descreve-se o seu método de compensação da potência elétrica instantânea. Adicionalmente, apresenta-se também, a definição convencional da potência elétrica para sistemas trifásicos.

No capítulo III, descreve-se a metodologia utilizada para os cálculos; e os resultados numéricos e gráficos podem ser vistos no capítulo IV.

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

No capítulo IV, o caso proposto e estudado foi o de um sistema de potência trifásico com quatro condutores, em regime permanente não-senoidal, desequilibrado.

Finalmente, no capítulo V mostra-se o esquema para o projeto de um instrumento digital de medição de todas as grandezas de Buchholz-Goodhue com os displays gráficos auxiliares para a análise e monitoramento de Sistemas Elétricos Trifásicos com o Gerador de Sinal para controle de filtros ativos de compensação de potência reativa.

GLOSSÁRIO:

- ***Potência Instantânea Monofásica:*** é a taxa de transferência de energia monofásica dada pelo produto dos valores instantâneos da tensão e corrente.

- ***Potência Ativa Instantânea Monofásica:*** é a taxa de transferência de energia monofásica que é convertida em trabalho, ou calor, que inclui a taxa da energia que oscila entre os elementos armazenadores de energia e as fontes externas e está relacionada com a realização de trabalhos externos ao sistema elétrico.

- ***Potência Reativa Instantânea Monofásica:*** é a taxa de energia monofásica transferida entre os elementos internos armazenadores de energia do sistema elétrico (nos sistemas trifásicos trata-se da taxa de energia transferida, também, entre fases).

- ***Potência Instantânea Trifásica:*** é a soma das potências instantâneas monofásicas; é definida a partir das grandezas instantâneas de tensão e corrente, no caso particular de um sistema trifásico as componentes reativas das 3 fases se cancelam e a potência instantânea trifásica vem a ser igual à potência ativa trifásica.

- ***Potência Real (Potência Ativa Trifásica):*** é a potência que é trocada entre os elementos armazenadores de energia do circuito elétrico e as fontes externas, as quais estão relacionadas com a variação da energia armazenada, ou a potência que flui através do sistema, sendo absorvida pela carga, transformada em calor ou em trabalho, ou perdida na forma de calor no sistema de distribuição.

- ***Potência Reativa:*** é o valor de pico da potência reativa instantânea em casos senoidais.

- ***Potência Imaginária:*** é uma grandeza proporcional a energia armazenada dentro do circuito elétrico. Quando a energia armazenada é constante, a potência imaginária se torna a potência reativa convencional em sistemas elétricos trifásicos e constata-se que ela é a envoltória da Potência Reativa Instantânea monofásica (não tem significado físico esclarecido até o presente momento).

II- Conceituação e Definições de Potência Elétrica em Sistemas Trifásicos Operando em quaisquer Regimes.

II.1- A Potência Complexa Instantânea – Teoria e Propriedades

Apresenta-se neste capítulo uma revisão das formas de representação da tensão e da corrente para os circuitos de corrente alternada, inicialmente para os casos de regime permanente senoidal, para uma melhor conceituação do que são os vetores espaciais instantâneos.

II.1.1- Representação Vetorial Convencional de Tensões e Correntes em Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente Senoidal

Consideremos os vetores girantes convencionais utilizados na representação da tensão e da corrente em circuitos monofásicos, em regime permanente senoidal, na forma exponencial complexa, em função do tempo, fixados num sistema de coordenadas α-β, no plano complexo.

Os vetores girantes convencionais de tensão e corrente podem ser definidos, respectivamente, como:

$$\tilde{V} = \dot{V}\, e^{j\omega t}, \tag{II.1}$$

$$\tilde{I} = \dot{I}\, e^{j\omega t}. \tag{II.2}$$

Ambos possuem amplitudes e velocidades angulares constantes.

As projeções desses vetores no eixo real são definidas pelas expressões a seguir, as quais representam a variação senoidal de seus valores instantâneos:

$$v = V\cos(\omega t + \alpha_v) = \mathrm{Real}\,\{\tilde{V}\}, \tag{II.3}$$

$$i = I\cos(\omega t + \alpha_I) = \mathrm{Real}\{\tilde{I}\}. \tag{II.4}$$

As amplitudes complexas que aparecem em (II.1) e (II.2), denominadas fasores, são respectivamente, representadas por:

$$\dot{V} = V e^{j\alpha_V}, \tag{II.5}$$

$$\dot{I} = I e^{j\alpha_I}. \tag{II.6}$$

Onde α_V e α_I são os ângulos de fase iniciais.

Usualmente as amplitudes desses fasores são tomadas em valores eficazes, ou seja, os seus valores máximos divididos por $\sqrt{2}$:

$$V_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}}. \tag{II.7}$$

A figura II.1, a seguir, ilustra a representação desses vetores no plano complexo α-β. Observa-se que suas extremidades descrevem trajetórias circulares. Para sistemas trifásicos, utilizam-se estes vetores para representar as respectivas grandezas em cada fase. Desta forma são necessários três vetores de tensão e três vetores de corrente, para representar simultaneamente estas grandezas nas três fases.

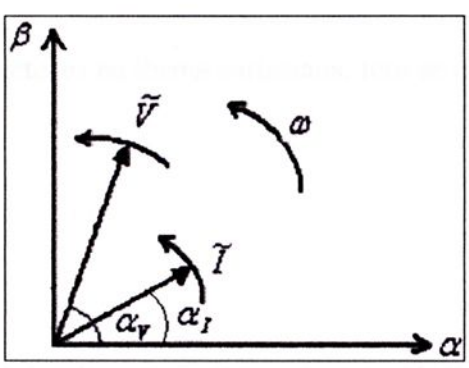


Figura II.1- Representação no plano complexo α-β, dos vetores temporais, $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$, para os circuitos em regime permanente senoidal.

II.1.2- Representação Vetorial de Tensões e Correntes em Circuitos de Corrente Alternada em Regime Permanente Não-Senoidal e Transitório

Apresenta-se-á a seguir os vetores tensão e corrente operando em quaisquer regimes, considerando-se, agora, suas amplitudes e velocidades angulares, variáveis em função do tempo; obtendo-se assim, uma definição mais abrangente.

Para estes casos, esses vetores têm a denominação de vetores espaciais instantâneos, ou por simplicidade, vetores espaciais, por serem originalmente definidos num plano complexo coincidente com um plano geométrico perpendicular aos eixos das máquinas elétricas de corrente alternada [2].

Sejam, portanto, os vetores de tensão e corrente representados na forma polar no plano complexo α-β:

$$\tilde{V} = V e^{j\phi_V}, \tag{II.8}$$

$$\tilde{I} = I e^{j\phi_I}, \tag{II.9}$$

e suas velocidades angulares dadas pelas seguintes expressões:

$$\omega_V = \frac{d\phi_V}{dt}, \tag{II.10}$$

$$\omega_I = \frac{d\phi_I}{dt}. \tag{II.11}$$

Escrevendo-se esses vetores na forma cartesiana, tem-se as seguintes expressões:

$$\tilde{V} = V_\alpha + jV_\beta, \tag{II.12}$$

$$\tilde{I} = I_\alpha + jI_\beta. \tag{II.13}$$

Desde que o eixo real do plano complexo seja coincidente com o eixo de referência da tensão e corrente da fase a, os valores instantâneos destas na fase a são obtidos pela projeção dos vetores acima no eixo real:

$$\mathrm{v} = \mathrm{Real}\{\tilde{\mathrm{V}}\}, \tag{II.14}$$

$$\mathrm{i} = \mathrm{Real}\{\tilde{\mathrm{I}}\}. \tag{II.15}$$

Por sua vez, fazendo-se o eixo real coincidir respectivamente com os eixos de referência das fases a, b e c de um sistema trifásico, tem-se respectivamente os valores instantâneos das tensões ou as correntes nestas fases.

Destaca-se nesta representação que, um único vetor espacial representa simultaneamente as grandezas correspondentes nas três fases. Ao contrário do caso convencional onde são necessários três vetores para esta finalidade, como já observado.

Como aplicação, esta abordagem é empregada na análise das potências desenvolvidas no processo transitório das máquinas elétricas, no estudo do modelo matemático da máquina, e em sistemas elétricos trifásicos sem o condutor neutro em geral.

A seguir, apresenta-se uma ilustração dos mesmos (Figura II.2), com destaque para suas trajetórias que são aleatórias para casos genéricos, de tensão e corrente. Para os casos de regime permanente desequilibrado e/ou não-senoidais, estas são fechadas, e para os casos de regime permanente senoidal e equilibrados, estas são circulares.

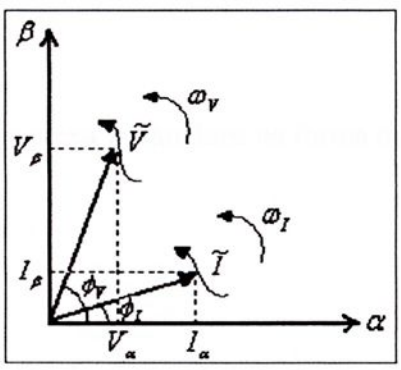


Figura II.2- Representação no plano complexo α-β, dos vetores espaciais instantâneos $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$.

Os vetores espaciais instantâneos $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ acima representados, são definidos pela transformação linear, no plano complexo α-β, na forma a seguir:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3}(v_a + a\,v_b + a^2\,v_c)\,, \tag{II.16}$$

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + a\,i_b + a^2\,i_c)\,. \tag{II.17}$$

Observa-se que estes vetores são obtidos a partir dos valores instantâneos das grandezas correspondentes de fase.

Sendo "a" o vetor unitário:

$$\mathrm{a} = \mathrm{e}^{\mathrm{j}\frac{2\pi}{3}} = \cos(\frac{2\pi}{3}) + \mathrm{j}\,\mathrm{sen}(\frac{2\pi}{3}) = -\frac{1}{2} + \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2}\,. \tag{II.18}$$

II.1.3- Novos Conceitos de Potência Elétrica – Teoria da Potência Complexa Instantânea

Utilizando os vetores espaciais instantâneos para as representações de tensão e corrente, como visto na seção anterior, para circuitos operando em quaisquer regimes de operação, e considerando que esses são funções complexas do tempo, Milanez [2], definiu a potência complexa instantânea pelo produto dos vetores tensão e corrente, no plano complexo α-β, para um sistema trifásico, sem o condutor neutro, como mostra a expressão a seguir:

$$\widetilde{S} = \frac{3}{2}\widetilde{V}\,\widetilde{I}^{*}. \tag{II.19}$$

Escrevendo-se a potência complexa instantânea na forma cartesiana temos:

$$\widetilde{S} = P + jQ. \tag{II.20}$$

Ao módulo de $\widetilde{S}$, dá-se o nome de potência aparente instantânea.

A potência real é definida tomando-se a parte real de $\widetilde{S}$:

$$\mathrm{P} = \text{Real}\ \{\widetilde{\mathrm{S}}\}. \tag{II.21}$$

E a potência imaginária é definida, tomando-se a parte imaginária de $\widetilde{S}$:

$$\mathrm{Q} = \text{Imaginária}\ \{\widetilde{\mathrm{S}}\}. \tag{II.22}$$

Tendo os vetores espaciais instantâneos de tensão e corrente na forma cartesiana, ou seja, as expressões (II.12) e (II.13), vamos substituí-los na expressão da potência complexa instantânea (II.19), e obteremos no plano complexo α-β, a seguinte equação:

$$\widetilde{S} = \frac{3}{2}(V_{\alpha} + jV_{\beta})\,(I_{\alpha} - jI_{\beta}), \tag{II.23}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

lembrando que:

$$I^* = I_\alpha - jI_\beta . \tag{II.24}$$

Realizando-se o produto indicado em (II.23) a potência complexa será dada por:

$$\widetilde{S} = \frac{3}{2}[(V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) + j(V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta)] . \tag{II.25}$$

Como a potência real é definida tomando-se a parte real de $\widetilde{S}$, tem-se:

$$\text{P} = \text{ Real } \{\widetilde{S}\} = \frac{3}{2}(V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta), \tag{II.26}$$

ou, em termos das variáveis instantâneas trifásicas, demonstra-se, facilmente, que a potência real vem a ser a soma das potências instantâneas por fase, dada por:

$$P = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c . \tag{II.27}$$

A potência imaginária é definida tomando-se a parte imaginária de $\widetilde{S}$, então:

$$\text{Q} = \text{ Imaginária } \{\widetilde{S}\} = \frac{3}{2}(V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta), \tag{II.28}$$

ou, em termos das variáveis instantâneas trifásicas, demonstra-se que é dada como:

$$Q = \sqrt{3}(v_b i_a - v_a i_b) . \tag{II.29}$$

Define-se o fator de potência instantâneo pela relação:

$$FPI = \frac{P}{S}, \tag{II.30}$$

onde S é o módulo de $\widetilde{S}$, ou seja, a potência aparente instantânea e demonstra-se que:

$$FPI = \cos\phi\,; \tag{II.31}$$

sendo ϕ, o ângulo de defasagem entre o vetor espacial instantâneo de tensão $\widetilde{V}$ e o vetor espacial instantâneo de corrente $\widetilde{I}$.

Uma das vantagens de utilizar-se os vetores espaciais instantâneos é a representação geométrica no plano complexo, além da simplificação dos cálculos através da utilização da álgebra exponencial complexa; evitando dessa forma a manipulação de expressões trigonométricas extensas.

Verifica-se que as potências real e imaginária podem também ser obtidas pelas seguintes expressões:

$$P = \frac{3}{2} V\, I\, \cos\phi\,, \tag{II.32}$$

$$Q = \frac{3}{2} V\, I\, \operatorname{sen}\phi\,, \tag{II.33}$$

Em regime permanente senoidal e equilibrado, V e I são constantes, as potências real e imaginária equivalem às potências ativas e reativas trifásicas convencionais, e o fator de potência instantâneo equivale ao fator de potência trifásico convencional.

II.2- Conceitos de Potência Elétrica Propostos por Akagi

Akagi [1] e Milanez [2] propuseram novos conceitos de potência ativa e reativa instantâneas para sistemas trifásicos, válidos para quaisquer regimes, assim como para formas de ondas genéricas de tensão e corrente. A teoria de Akagi denominada de "Teoria da Potência Reativa Instantânea" foi desenvolvida para solucionar os problemas da compensação de potência reativa em sistemas não-lineares. Ela torna-se diferente da teoria de Milanez, denominada de "Teoria da Potência Complexa Instantânea" pelo fato da primeira utilizar uma abordagem matemática baseada em relações matriciais e não utilizar a representação vetorial no plano complexo e a álgebra exponencial complexa.

As definições de potência de Akagi e Milanez são iguais em termos das variáveis trifásicas. Porém, os significados físicos são de difíceis interpretação através da abordagem matemática utilizada por Akagi.

Serão utilizadas neste trabalho, letras minúsculas para as variáveis tensão, corrente e potência nas transformações de Akagi, e maiúsculas nas transformações de Milanez para melhor comparação destas duas abordagens.

Akagi utiliza a transformação das variáveis trifásicas de um sistema trifásico sem o condutor neutro para um sistema bifásico; o qual aqui denominaremos α'-β', pela seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \tag{II.34}$$

Esta transformação é invariante em potência devido a constante $\sqrt{\frac{2}{3}}$ adotada.

Para as correntes i_a, i_b, i_c a expressão similar pode ser escrita:

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \tag{II.35}$$

Milanez, por outro lado, utiliza a transformação das variáveis trifásicas em variáveis bifásicas de um sistema que designou α-β, pela seguinte equação matricial:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \tag{II.36}$$

e para as correntes:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \qquad \text{(II.37)}$$

Estas transformações estão sintetizadas nas transformações (II.16) e (II.17), onde as fases α e β estão associadas aos eixos real e imaginário de um plano complexo designado também por α e β. Observe-se que Akagi não associou as fases α' e β' do seu sistema bifásico, com um plano complexo como fez Milanez.

A constante $\frac{2}{3}$ adotada faz com que esta última transformação seja variante em potência, portanto as expressões de potência correspondentes apresentam a constante $\frac{3}{2}$. Porém esta transformação possibilita a recuperação das variáveis trifásicas pela projeção do vetor correspondente nos eixos de referência das fases a, b, c, como citado na seção II.1.2.

Segundo Akagi, as potências real, p, e imaginária, q, na forma matricial, são dadas pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha'} & v_{\beta'} \\ v_{\beta'} & -v_{\alpha'} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{\alpha'} \\ i_{\beta'} \end{bmatrix}. \qquad \text{(II.38)}$$

Donde podem ser obtidas as correntes:

$$\begin{bmatrix} \mathrm{i}_{\alpha'} \\ \mathrm{i}_{\beta'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{v}_{\alpha'} & \mathrm{v}_{\beta'} \\ \mathrm{v}_{\beta'} & -\mathrm{v}_{\alpha'} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \mathrm{p} \\ \mathrm{q} \end{bmatrix}^{-1}. \qquad \text{(II.39)}$$

A potência real em termos das variáveis das fases a, b, c e α', β' é dada respectivamente por:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \text{ e} \qquad \text{(II.40)}$$

$$p = v_{\alpha'} i_{\alpha'} + v_{\beta'} i_{\beta'}, \qquad \text{(II.41)}$$

e a potência imaginária da seguinte forma:

$$q = \sqrt{3}\,(-v_a\, i_b + v_b\, i_a) \text{ e} \tag{II.42}$$

$$q = -v_{\alpha'}\, i_{\beta'} + v_{\beta'}\, i_{\alpha'}. \tag{II.43}$$

Comparando-se essas expressões de potência com as expressões (II.26), (II.27), (II.28) e (II.29) obtidas por Milanez, verifica-se que são iguais a menos das constantes $\frac{3}{2}$ e $\sqrt{3}$.

As expressões para obter as componentes da potência ativa e reativa instantâneas são definidas para as fases α' e β', segundo Akagi, da seguinte forma:

Componentes da potência ativa instantânea:

- Potência ativa instantânea da fase α':

$$p_{\alpha'} = \frac{v_{\alpha'}^{\,2}}{v_{\alpha'}^{\,2} + v_{\beta'}^{\,2}}\,, \tag{II.44}$$

- Potência ativa instantânea da fase β':

$$p_{\beta'} = \frac{v_{\beta'}^{\,2}}{v_{\alpha'}^{\,2} + v_{\beta'}^{\,2}}\,. \tag{II.45}$$

Componentes da potência reativa instantânea:

- Potência reativa instantânea da fase α':

$$q_{\alpha'} = \frac{-v_{\alpha'}\, v_{\beta'}}{v_{\alpha'}^{\,2} + v_{\beta'}^{\,2}}\,, \tag{II.46}$$

- Potência reativa instantânea da fase β':

$$q_{\beta'} = \frac{v_{\alpha'}\, v_{\beta'}}{v_{\alpha'}^{\,2} + v_{\beta'}^{\,2}}\,. \tag{II.47}$$

A partir desses equacionamentos Akagi faz as seguintes considerações:

- A soma das potências ativa, p_α, e p_β, nos circuitos trifásicos é igual à potência ativa trifásica instantânea; conforme (II.40) e (II.41).
- As componentes das potências reativas são iguais e de sinais contrários, e não contribuem para transferência de energia entre a fonte e a carga; foram denominadas, portanto, de potência reativa instantânea (II.46) e (II.47).

Milanez demonstra que as componentes de potência acima mencionadas podem ser obtidas, opcionalmente, dos vetores espaciais instantâneos ilustrados na Figura II.3 onde se decompõe o vetor de corrente em suas componentes em fase e quadratura com o vetor tensão.

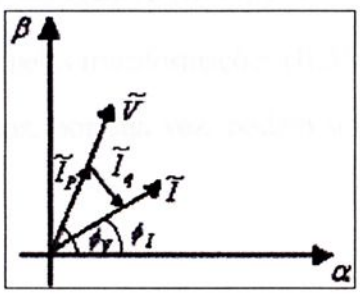


Figura II.3– Decomposição do vetor espacial instantâneo corrente $\tilde{I}$ em suas componentes de fase e quadratura com o vetor tensão.

As potências reativas instantâneas podem ser obtidas da seguinte equação, da qual são componentes (serão designadas aqui letras maiúsculas para estas potências):

$$P_q = \text{Real}\{\tilde{V}\,\tilde{I}_q^*\} = 0, \qquad \text{(II.48)}$$

onde $\tilde{I}_q$ é a componente de $\tilde{I}$ em quadratura com $\tilde{V}$,

e P_q é a potência real devida à $\tilde{I}_q$.

Sendo que :

$$P_q = Q_\alpha + Q_\beta = 0, \qquad \text{(II.49)}$$

onde: Q_α é a potência reativa instantânea da fase α,

e Q_β é a potência reativa instantânea da fase β.

Utilizando esta decomposição vetorial Milanez demonstra que as duas parcelas da potência reativa instantânea, podem ser dadas por:

$$Q_\alpha = \frac{-V_\alpha V_\beta}{-V_\alpha{}^2 - V_\beta{}^2} Q, \tag{II.50}$$

$$Q_\beta = \frac{V_\alpha V_\beta}{-V_\alpha{}^2 - V_\beta{}^2} Q, \tag{II.51}$$

onde Q é a potência reativa total.

As expressões (II.50) e (II.51) são iguais a (II.46) e (II.47) destacando-se que V_α, V_β, $v_{\alpha'}$ e $v_{\beta'}$ são obtidas respectivamente pelas transformações (II.34) e (II.36).

As potências ativas instantâneas, por sua vez, podem ser obtidas a partir da seguinte expressão:

$$P_p = \mathrm{Re}\,al\{\tilde{V}\,\tilde{I}_p^*\}, \tag{II.52}$$

onde $\tilde{I}_p$ é a componente de $\tilde{I}$ em fase com $\tilde{V}$ e

P_p é a potência real devido à $\tilde{I}_p$.

Da mesma forma que a potência reativa instantânea, a potência real P_p pode ser decomposta em duas parcelas como é expresso a seguir:

$$P_p = P_\alpha + P_\beta, \tag{II.53}$$

onde: P_α é a potência ativa instantânea da fase α,

e P_β é a potência ativa instantânea da fase β.

Onde:

$$P_\alpha = \frac{-V_\alpha{}^2}{-V_\alpha{}^2 - V_\beta{}^2} P \text{ e} \tag{II.54}$$

$$P_\beta = \frac{-V_\beta{}^2}{-V_\alpha{}^2 - V_\beta{}^2} P. \tag{II.55}$$

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

A potência real P é a soma das potências reais P_p e P_q dadas respectivamente pelo produto do vetor tensão com as componentes em fase e quadratura do vetor corrente, ou alternativamente, pelo produto do vetor tensão e o vetor corrente total. Obviamente, a parcela de potência P_q é nula (resultado do produto de uma tensão por uma corrente em quadratura). Porém, suas componentes descrevem a taxa de energia que está fluindo entre as fases α e β do sistema bifásico transformado, e são termos importantes no cálculo da corrente de compensação como mostrado na próxima seção.

II.3- A Compensação da Potência Complexa Instantânea

Nesta seção e nas seguintes, considerando-se as equivalências das tensões, correntes e potências utilizadas por Akagi e Milanez, conforme apresentados na seção anterior, passar-se-ão a serem utilizados os vetores espaciais instantâneos e seus componentes, os quais são representados em letras maiúsculas.

Akagi projetou um compensador, que fornece uma corrente $\widetilde{I}_{cq}$, sendo esta de sinal contrário a corrente $\widetilde{I}_q$ fornecida à carga. Portanto, tem-se a seguinte expressão:

$$\widetilde{I}_{cq} = -\widetilde{I}_q . \tag{II.56}$$

Sendo que as suas componentes nas fases α e β podem ser calculadas de acordo com a expressão:

$$\begin{bmatrix} I_{cq_\alpha} \\ I_{cq_\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -Q \end{bmatrix}. \tag{II.57}$$

Conforme ilustração na figura II.4.

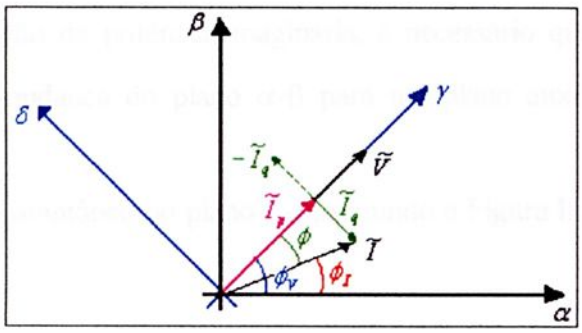


Figura II. 4- Decomposição do vetor espacial instantâneo $\tilde{I}$ na direção do vetor espacial instantâneo $\tilde{V}$ e em quadratura, e representação do plano auxiliar γ-δ com o eixo γ na direção de $\tilde{V}$.

Por não fornecer potência ativa o compensador não necessita de elementos armazenadores de energia.

Considerando a expressão (II.33):

$$Q = \frac{3}{2} V\, I\, \text{sen}\,\phi\,,$$

Milanez demonstrou também que as projeções da corrente $\tilde{I}_q$ respectivamente nos eixos α e β são expressos por:

$$I_{q\alpha} = \frac{-V_\beta}{V^2}\, V\, I\, \text{sen}\,\phi\,, \qquad \text{(II.58)}$$

$$I_{q\beta} = \frac{-V_\alpha}{V^2}\, V\, I\, \text{sen}\,\phi\,, \qquad \text{(II.59)}$$

II.3.1- Método de Compensação da Potência Complexa Instantânea

Foi desenvolvido neste trabalho o método apresentado nesta seção, adequado à implementação digital das sub-rotinas para a geração de sinais de referência para um compensador ativo. Embora possa ser compensada também a potência real, limita-se aqui, à compensação da potência imaginária.

Para a compensação da potência imaginária, é necessário que $\widetilde{I}$ fique em fase com $\widetilde{V}$, para isso, fez-se a mudança do plano α-β para um plano auxiliar γ-δ, como mostra a Figura II.4.

O vetor espacial instantâneo no plano α-β, segundo a Figura II.4 é dado por:

$$\widetilde{V} = V\ e^{j\phi_V}, \tag{II.60}$$

Conseqüentemente, sua amplitude será dada por:

$$V = \widetilde{V}\ e^{-j\phi_V}. \tag{II.61}$$

E o vetor espacial instantâneo de corrente no plano α-β, na forma exponencial complexa é dado por:

$$\widetilde{I}_{\alpha,\beta} = I\ e^{j\phi_I}, \tag{II.62}$$

multiplicando-se os dois termos da expressão acima por $e^{-j\phi_V}$, tem-se:

$$\widetilde{I}_{\alpha,\beta}\, e^{-j\phi_V} = I\ e^{j\phi_I}\, e^{-j\phi_V}. \tag{II.63}$$

Porém, o mesmo vetor no plano γ-δ, representa-se por:

$$\widetilde{I}_{\alpha,\beta}\, e^{-j\phi_V} = \widetilde{I}_{\gamma,\delta}. \tag{II.64}$$

Substituindo as expressões (II.64) e (II.62) na equação (II.63), tem-se o vetor espacial instantâneo corrente no plano complexo γ-δ:

$$\widetilde{I}_{\gamma,\delta} = \widetilde{I}_{\alpha,\beta}\, e^{-j\phi_V}. \tag{II.65}$$

Transformando esse vetor na forma cartesiana, tem-se a seguinte expressão:

$$\widetilde{I}_{\gamma,\delta} = \widetilde{I}_p + j\widetilde{I}_q . \qquad \text{(II.66)}$$

Onde I_p e I_q são as projeções do vetor espacial instantâneo corrente no plano complexo γ-δ, respectivamente iguais a:

$$I_p = \text{Real}\{\widetilde{I}_{\gamma,\delta}\}, \qquad \text{(II.67)}$$

$$I_q = \text{Imaginária}\{\widetilde{I}_{\gamma,\delta}\}. \qquad \text{(II.68)}$$

A corrente compensada será a corrente da carga menos a corrente de compensação fornecida pelo filtro ativo.

$$\widetilde{I}_{comp} = \widetilde{I}_{\alpha,\beta} - \widetilde{I}_q . \qquad \text{(II.69)}$$

É evidente que não há fornecimento de potência real nesta compensação, não necessitando assim de armazenadores de energia, para esta função, como demonstrou Akagi. Sendo assim, o compensador corrige a defasagem entre $\widetilde{V}$ e $\widetilde{I}$ [1].

Portanto, a compensação proposta consiste num controle da velocidade instantânea da corrente $\widetilde{I}$ o que pode ser obtido por filtros sem armazenadores de energia.

Os filtros com armazenadores de energia compensam as variações da amplitude da corrente, que traduzem o fornecimento de energia aos campos elétricos e magnéticos por fontes externas.

O sistema ideal será aquele em que depois da compensação, as trajetórias dos vetores espaciais instantâneos tensão e corrente fiquem circulares.

II.4- Definições Convencionais da Potência Elétrica para Sistemas Trifásicos Desequilibrados com Formas de Onda Não-Senoidais.

São apresentadas nesta seção as definições da potência elétrica para sistemas trifásicos segundo a norma IEEE [3], para o caso geral e usualmente o mais problemático, que vem a ser o sistema trifásico não senoidal e desequilibrado.

II.4.1- Potência Aparente Aritmética (com resolução de Budeanu's) (VA)

Num sistema trifásico não senoidal e desequilibrado a potência aparente aritmética é dada pela soma das potências aparente por fase, como mostra a expressão a seguir:

$$S_A = S_a + S_b + S_c, \tag{II.70}$$

as potências aparentes por fase, são dadas pelas raízes quadradas das respectivas somas das potência ativa ao quadrado, reativa de Budeanu's ao quadrado e a potência de distorção de Budeanu's ao quadrado:

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_{Ba}^2 + D_{Ba}^2}\ ; \tag{II.71}$$

$$S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_{Bb}^2 + D_{Bb}^2}\ ; \tag{II.72}$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_{Bc}^2 + D_{Bc}^2}\ ; \tag{II.73}$$

a potência ativa (W), P, é dada pela soma da potência ativa fundamental mais a potência ativa harmônica:

$$P = P_1 + P_H, \tag{II.74}$$

sendo que a potência ativa fundamental é obtida por três vezes o produto da tensão e corrente fundamentais e pelo cosseno do ângulo formado pela corrente com eixo α, é:

$$P_1 = 3\, V_1\, I_1 \cos\beta_1, \tag{II.75}$$

a potência ativa harmônica é obtida por três vezes a somatória da tensão e corrente harmônica e pelo cosseno do ângulo formado entre a tensão e corrente:

$$P_H = 3\sum_{h\neq 1} V_h\, I_h \cos\theta_h\ , \tag{II.76}$$

onde $\theta_h = \alpha_h - \beta_h$ é o ângulo de defasagem entre tensão e corrente de ordem h.

A potência reativa Budeanu's (var), Q_B, vem a ser a soma da potência reativa fundamental e da potência reativa de Budeanu's harmônica:

$$Q_B = Q_1 + Q_{BH}, \tag{II.77}$$

a potência reativa fundamental é obtida por três vezes o produto da tensão e corrente fundamentais e pelo seno do ângulo formado pela corrente:

$$Q_1 = 3V_1 I_1 \operatorname{sen}(-\beta_1), \tag{II.78}$$

a potência reativa harmônica de Budeanu's é obtida por três vezes a somatória da tensão e corrente harmônica e pelo seno do ângulo formado entre a tensão e corrente:

$$Q_{BH} = 3\sum_{h\neq 1} V_h I_h \operatorname{sen}\theta_h . \tag{II.79}$$

E a potência de distorção de Budeanu's (var), D_B, é obtida pela raiz quadrada das respectivas somas das potência aparente ao quadrado, ativa ao quadrado e a potência reativa de Budeanu's ao quadrado:

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}, \tag{II.80}$$

conseqüentemente: $S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$.

Esta solução não é satisfatória para os casos de sistemas desequilibrados e com formas de onda não-senoidal.

O fator de potência $FP_A = \dfrac{P}{S_A}$ mantém o seu significado. Porém a desvantagem desta definição origina da diferença entre as potências: $[Q_{Ba} + Q_{Bb} + Q_{Bc}]^2 + [D_{Ba} + D_{Bb} + D_{Bc}]^2$ e $S_A^2 - P^2$; pois $S_A^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$.

II.4.2- Potência Aparente Vetorial (VA), com resolução de Budeanu's

Usando a mesma notação da potência aparente aritmética para obter a potência aparente vetorial, temos que a potência aparente aritmética é a raiz quadrada da soma da potência ativa ao quadrado, potência reativa de Budeanu's e da potência de distorção de Budeanu's, como é mostrado na expressão a seguir:

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2}\,, \tag{II.81}$$

sendo que a potência ativa é a soma das potências ativas por fase:

$$P = P_a + P_b + P_c, \tag{II.82}$$

a potência reativa de Budeanu's é a respectiva soma das potências reativas de Budeanu's por fase:

$$Q_B = Q_{Ba} + Q_{Bb} + Q_{Bc}, \tag{II.83}$$

e a potência de distorção de Budeanu's é a soma das potências de distorção de Budeanu's por fase:

$$D_B = D_{Ba} + D_{Bb} + D_{Bc}. \tag{II.84}$$

Em sistemas equilibrados a potência aparente aritmética, S_A, é igual a potência aparente vetorial, S_V; mas para sistemas desequilibrados a potência aparente aritmética é diferente da potência vetorial, ou seja, $S_A \neq S_V$.

Além disso, para sistemas desequilibrados os fatores de potência aritmético, $FP_A = P/S_A$, e vetorial, $FP_V = P/S_V$, são diferentes, o fator de potência vetorial é em geral, maior que o aritmético, $FP_V \geq FP_A$, e a condição de linearidade não é obedecida nem por S_A nem por S_V [10].

Tanto a definição da potência aparente aritmética como a vetorial nos levam a resultados diferentes; elas não são proporcionais as verdadeiras perdas que ocorrem no sistema elétrico de potência.

Não existe na literatura científica uma conceituação adequada para estas definições em termos da aplicabilidade sob o ponto de vista físico e econômico.

II.4.3- A UTILIZAÇÃO DOS VETORES ESPACIAIS INSTANTÂNEOS NO CÁLCULO DAS GRANDEZAS DE BUCHHOLZ-GOODHUE

As definições usuais de potência aparente para sistemas trifásicos, como exemplos, a potência aritmética e vetorial, apresentam resultados não satisfatórios quando aplicadas em sistemas desequilibrados com forma de onda não senoidal, como mostrado na norma IEEE 1459/2000 [3], que apresenta as definições de tensão, corrente e potência aparente efetiva de Buchholz-Goodhue como as mais apropriadas para todos os casos, tanto de sistemas equilibrados e senoidais como os casos desequilibrados e não senoidais.

Foi demonstrado que estas grandezas podem ser obtidas através dos vetores espaciais instantâneos [11].

As potências aparente aritmética e vetorial, mostradas anteriormente, apresentam resultados não satisfatórios, sob o ponto de vista de não manterem uma correspondência linear entre os seus quadrados e as perdas por efeitos Joule, magnéticas e dielétricas nos sistemas de distribuição.

Observa-se que estas grandezas utilizam os valores eficazes das grandezas de fase.

Portanto, nova proposta apresentada em [3] e [12], não recomenda o uso destas, mas sim as definições de Buchholz-Goodhue. A tensão eficaz, V_e, e a corrente eficaz, I_e, em um sistema trifásico a 3 condutores são dadas por:

$$V_e = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}\,, \tag{II.85}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}\,, \tag{II.86}$$

ambos representam os valores eficazes de fase de um sistema trifásico equivalente equilibrado, no qual são produzidas as mesmas perdas que as tensões e correntes verdadeiras.

Estas expressões não permitem uma interpretação imediata de seus significados físicos. Utilizando os vetores espaciais instantâneos tem-se uma nova abordagem e uma melhor compreensão destas grandezas.

Considerando-se o vetor tensão definido por [13-16]:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3}(v_a + a v_b + a^2 v_c), \tag{II.87}$$

e o vetor corrente:

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + a i_b + a^2 i_c), \tag{II.88}$$

O vetor tensão e corrente também podem ser calculados a partir das componentes de seqüência positiva e negativa como é mostrado a seguir:

$$\tilde{V} = \tilde{V}^+ + \tilde{V}^-, \tag{II.89}$$

$$\tilde{I} = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^-, \tag{II.90}$$

onde conforme demonstrado em [4], a tensão e corrente de seqüência positiva e negativa tem os seus módulos respectivamente iguais a:

$$V^+ = \frac{\left[\left|\tilde{V}\right|_M + \left|\tilde{V}\right|_m\right]}{2\sqrt{2}}, \tag{II.91}$$

$$V^- = \frac{\left[\left|\tilde{V}\right|_M - \left|\tilde{V}\right|_m\right]}{2\sqrt{2}}, \tag{II.92}$$

$$I^+ = \frac{\left[\left|\tilde{I}\right|_M + \left|\tilde{I}\right|_m\right]}{2\sqrt{2}}, \tag{II.93}$$

$$I^- = \frac{\left[\left|\tilde{I}\right|_M - \left|\tilde{I}\right|_m\right]}{2\sqrt{2}}, \tag{II.94}$$

onde, $\left|\tilde{V}\right|_M$ e $\left|\tilde{I}\right|_M$ são os valores máximos extraídos do módulo da tensão e corrente respectivamente;

e $\left|\widetilde{V}\right|_m$ e $\left|\widetilde{I}\right|_m$ são os valores mínimos extraídos do módulo da tensão e corrente respectivamente.

Considerando-se que a amplitude do vetor corrente varia periodicamente em um sistema com carga desequilibrada e não senoidal, define-se uma corrente eficaz que produz o mesmo efeito térmico no sistema de transmissão que as correntes originais, da seguinte forma:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_t^{t+T} \left|\widetilde{I}\right|^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_t^{t+T} I_{dc}^2\, dt}\ , \tag{II.95}$$

ou, considerando-se as perdas por efeito Joule:

$$\frac{1}{T}\int^{+T} R\left|\widetilde{I}\right|^2 dt = \frac{1}{T}\int^{+T} R\left(I_\alpha^2 + I_\beta^2\right) dt\ . \tag{II.96}$$

Com relação à tensão, o mesmo raciocínio pode ser empregado para obter-se:

$$P_{vazio} = R_e\left|\widetilde{I}_0\right|^2 = R_e\left(I_{\alpha_0}^2 + I_{\beta_0}^2\right) = \frac{\left|\widetilde{V}\right|^2}{R_e} = \frac{\left(V_\alpha^2 + V_\beta^2\right)}{R_e}, \tag{II.97}$$

onde P_{vazio} são perdas em vazio que são as perdas dielétricas e magnéticas e R_e é uma resistência equivalente onde se dissipam as perdas dielétricas e magnéticas do sistema.

A tensão efetiva é dada por:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T} \left|\widetilde{V}\right|^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T} \left(V_\alpha^2 + V_\beta^2\right) dt}\ . \tag{II.98}$$

As perdas por efeito Joule podem ser colocadas também em termos das variáveis trifásicas:

$$P_R = \frac{3}{2}R|I|^2 = \frac{3}{2}R\left(I_\alpha^2 + I_\beta^2\right) = R\left(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2\right). \tag{II.99}$$

Demonstra-se em [11] que o valor eficaz da amplitude do vetor corrente, pode ser obtido da seguinte forma:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T}\left|\tilde{I}\right|^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T}\left(I_\alpha^2 + I_\beta^2\right)dt} = \sqrt{\frac{2}{T}\int^{+T}\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}dt}, \qquad \text{(II.100)}$$

e relaciona-se com a corrente efetiva de Buchholz-Goodhue da seguinte forma:

$$I_e = \sqrt{2}\sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}, \qquad \text{(II.101)}$$

e o valor eficaz da amplitude da tensão:

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T}\left|\tilde{V}\right|^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int^{+T}\left(V_\alpha^2 + V_\beta^2\right)dt} = \sqrt{\frac{2}{T}\int^{+T}\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{3}dt}, \qquad \text{(II.102)}$$

tem a seguinte relação com a tensão efetiva:

$$V_e = \sqrt{2}\sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}. \qquad \text{(II.103)}$$

Portanto o valor eficaz da corrente e da tensão definidos utilizando-se os vetores espaciais instantâneos vem a ser $\sqrt{2}$ vezes o valor eficaz respectivo proposto por Buchholz-Goodhue.

Para um sistema trifásico a 4 condutores, a tensão e a corrente efetivas são definidas segundo as seguintes expressões:

$$V_e = \sqrt{\frac{<\left|\tilde{V}\right|^2> + (V_0)^2}{2}}, \qquad \text{(II.104)}$$

$$I_e = \sqrt{\frac{<\left|\tilde{I}\right|^2>}{2} + 4(I_0)^2}, \qquad \text{(II.105)}$$

onde o valor médio da tensão e corrente, representado pelo símbolo < >, é definido por:

$$RMS\{|\tilde{V}|\} = \sqrt{<|\tilde{V}|^2>} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |\tilde{V}|^2 dt}\,, \tag{II.106}$$

$$RMS\{|\tilde{I}|\} = \sqrt{<|\tilde{I}|^2>} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T |\tilde{I}|^2 dt}\,, \tag{II.107}$$

sendo que, $T = \frac{2\pi}{\omega}$ corresponde a um ciclo.

Para obtenção de V_0, v_0, são utilizadas as seguintes expressões:

$$V_0 = \sqrt{<v_0^2>}\,, \tag{II.108}$$

$$v_0 = \frac{v_a + v_b + v_c}{3}. \tag{II.109}$$

As projeções de $\tilde{V}$ nos eixos real, V_α, e imaginário, V_β, são respectivamente iguais a:

$$V_\alpha = \frac{2v_a - v_b - v_c}{3} = \text{Real}\{\tilde{V}\}, \tag{II.110}$$

$$V_\beta = \frac{v_b - v_c}{\sqrt{3}} = \text{Imaginária}\{\tilde{V}\}. \tag{II.111}$$

Para obtenção de I_0, i_0, I_N, são utilizadas as seguintes expressões:

$$I_0 = \sqrt{<i_0^2>}\,, \tag{II.112}$$

$$i_0 = \frac{I_N}{3}, \tag{II.113}$$

$$I_N = i_a + i_b + i_c\,. \tag{II.114}$$

As projeções de $\tilde{I}$ nos eixos real, I_α, e imaginário, I_β, são iguais a:

$$I_\alpha = \frac{2i_a - i_b - i_c}{3} = \text{Real}\{\tilde{\text{I}}\}, \tag{II.115}$$

$$I_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}} = \text{Imaginária}\{\tilde{\text{I}}\}. \tag{II.116}$$

Uma vez obtida a tensão efetiva e a corrente efetiva, determina-se a potência aparente efetiva, que é dada pelo produto de ambas, como mostra a expressão a seguir:

$$S_e = 3\,V_e\,I_e = \frac{3}{2}\sqrt{[<\left|\tilde{V}\right|^2> + (V^0)^2]\,[<\left|\tilde{I}\right|^2> + (I^0)^2]}\,. \tag{II.117}$$

O desequilíbrio da potência aparente é dado por:

$$S_u = \sqrt{S_e^2 - S^{+^2}}\,, \tag{II.118}$$

onde, S^+ é a potência aparente de seqüência positiva e é igual a $S^+ = \sqrt{(P^+)^2 + (Q^+)^2}$.

O desequilíbrio da potência aparente fundamental será dado por:

$$S_{u1} = \sqrt{S_{e1}^2 - S_1^{+^2}}\,, \tag{II.119}$$

onde, S_1^+ é a potência aparente fundamental de seqüência positiva e é igual a $S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2}$ e S_{e1} é a potência aparente efetiva fundamental e é igual a $S_{e1} = 3\,V_{e1}\,I_{e1}$.

O desequilíbrio da carga será dado pela razão, S_{u1}/S_1^+.

Calcula-se a porcentagem de desequilíbrio da tensão e da corrente da seguinte maneira:

$$\%VU = 100\,\frac{V^-}{V^+} = 100\,\frac{\left|\tilde{V}\right|_M - \left|\tilde{V}\right|_m}{\left|\tilde{V}\right|_M + \left|\tilde{V}\right|_m}, \tag{II.120}$$

$$\%IU = 100\,\frac{I^-}{I^+} = 100\,\frac{\left|\widetilde{I}\right|_M - \left|\widetilde{I}\right|_m}{\left|\widetilde{I}\right|_M + \left|\widetilde{I}\right|_m}. \qquad \text{(II.121)}$$

A relação da potência aparente efetiva e a potência real fornecem o fator de potência efetivo de Buchholz-Goodhue.

$$FP_e = \frac{\overline{P}}{S_e}. \qquad \text{(II.122)}$$

O fator de potência de Buchholz-Goodhue apresenta resultados mais satisfatórios que o fator de potência convencional, pois em circuitos puramente resistivos, mas desequilibrados o fator de potência de Buchholz-Goodhue apresenta valores inferiores à unidade, evidenciando desta forma que valores de fator de potência diferente da unidade não estão apenas relacionados com a existência de potência reativa nos circuitos.

III- Desenvolvimento do "Software" para Instrumentação Digital

O trabalho foi desenvolvido através de simulações digitais, utilizando-se os "software" Matlab com Simulink e Labview.

Neste capítulo mostram-se as técnicas utilizadas para o cálculo de cada grandeza considerada nos capítulos anteriores. No próximo capítulo serão apresentados os resultados encontrados.

III.1- Sistema Trifásico Desequilibrado e com Formas de Onda Não-Senoidal

Os sinais de tensões e correntes (ditos sinais de entrada) processados como mostram os diagramas de blocos da figura III.1 e seguem-se, foram gerados digitalmente, e podem ser obtidos, através de conversão analógica-digital, do sistema elétrico real a ser analisado.

No capítulo V mostra-se uma concepção de um instrumento digital proposto.

A figura III.1 mostra como são sintetizadas as tensões V_A, V_B e V_C (v_A, v_B e v_C) e as correntes I_A, I_B e I_C (i_A, i_B e i_C) no diagrama de blocos do Simulink:

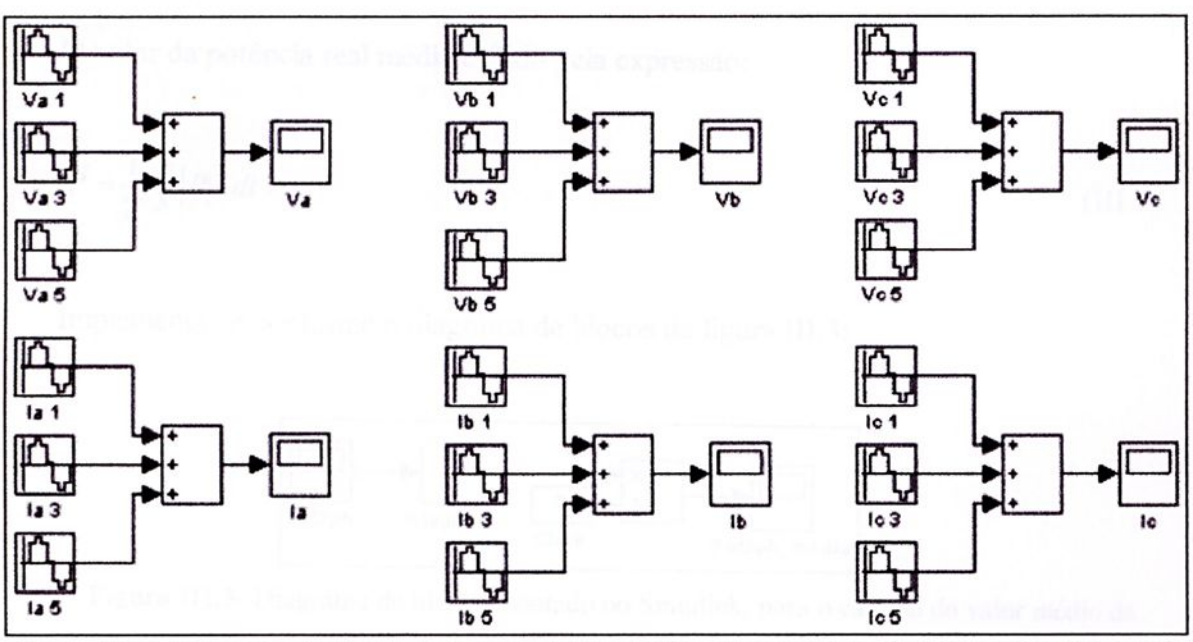


Figura III.1- Diagrama de blocos montado no "Simulink" para a obtenção das correntes e tensões de fase.

A sub-rotina para o cálculo, da potência real e imaginária, através das equações (II.27) e (II.28), é apresentada no diagrama de blocos da figura III.2 a seguir:

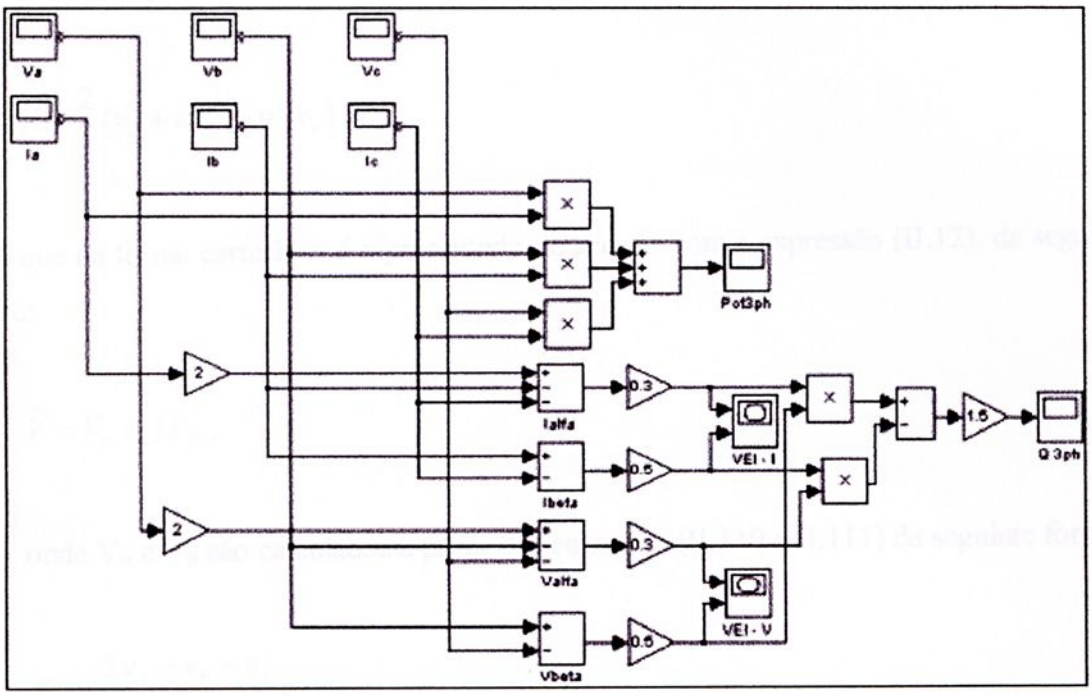


Figura III.2- Diagrama de blocos montado no Simulink para o cálculo da Potência Real e Imaginária.

O valor da potência real média é dado pela expressão:

$$\overline{P} = \frac{1}{T}\int_0^T |P|^2 \, dt \,. \qquad \text{(III.1)}$$

Implementa-se conforme o diagrama de blocos da figura III.3:

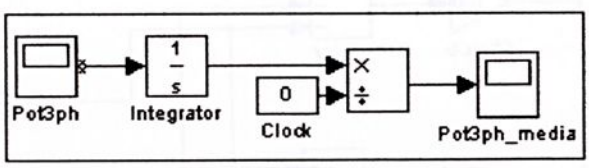


Figura III.3- Diagrama de blocos montado no Simulink, para o cálculo do valor médio da potência real $\overline{P}$.

Tendo calculado a $\overline{P}$, calcula-se agora o vetor espacial instantâneo tensão e corrente de acordo com as expressões obtidas no capítulo II.

O vetor espacial instantâneo tensão é calculado a partir da expressão (II.87) abaixo:

$$\widetilde{V} = \frac{2}{3}(v_a + a\,v_b + a^2\,v_c),$$

que na forma cartesiana é representado de acordo com a expressão (II.12), da seguinte maneira:

$$\widetilde{V} = V_\alpha + j.V_\beta,$$

onde V_α e V_β são calculados a partir das equações (II.110 e II.111) da seguinte forma:

$$V_\alpha = \frac{2\,v_a - v_b - v_c}{3},$$

$$V_\beta = \frac{v_b - v_c}{\sqrt{3}}.$$

onde:

V_α e V_β - são respectivamente as componentes de $\widetilde{V}$, no eixo α e no eixo β.

E o diagrama de blocos é apresentado na figura III.4:

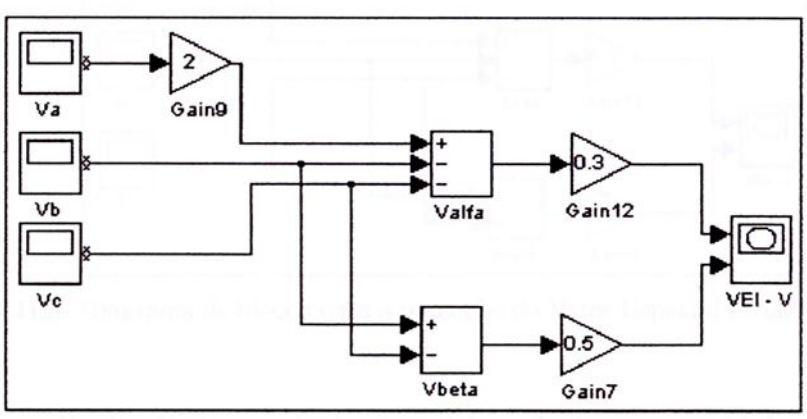


Figura III.4 - Diagrama de blocos para a obtenção do Vetor Espacial Instantâneo Tensão.

De maneira semelhante é calculado o vetor espacial instantâneo corrente, conforme a equação (II.88) do capítulo II.

$$\widetilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + a\,i_b + a^2\,i_c),$$

que na forma cartesiana é representado de acordo com a expressão (II.13), da seguinte maneira:

$$\widetilde{I} = I_\alpha + j.I_\beta,$$

onde I_α e I_β são calculados a partir das expressões (II.115 e II.116), da seguinte forma:

$$I_\alpha = \frac{2\,i_a - i_b - i_c}{3},$$

$$I_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}},$$

onde:

I_α e I_β - são respectivamente as componentes de $\widetilde{I}$, no eixo α e no eixo β.

E o diagrama de blocos apresenta-se na figura III.5:

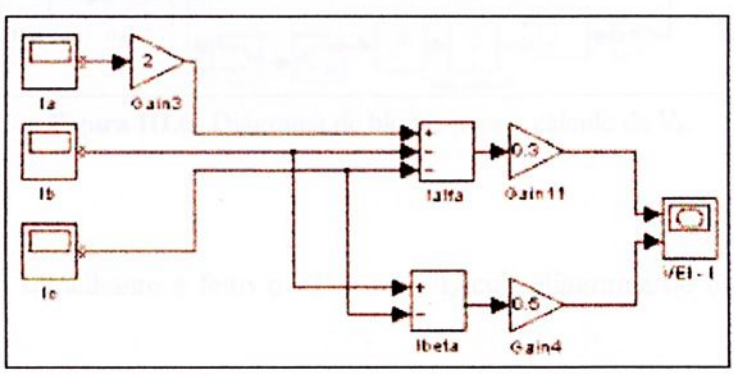


Figura III.5- Diagrama de blocos para a obtenção do Vetor Espacial Instantâneo Corrente.

Para o cálculo de V_e e I_e é necessário calcular-se o módulo do Vetor Espacial Instantâneo tensão e corrente elevadas ao quadrado $\left|\widetilde{V}\right|^2$ e $\left|\widetilde{I}\right|^2$, conforme as equações (II.104 e II.105) do capítulo II, pois:

$$V_e = \sqrt{\frac{<|\widetilde{V}|^2> + (V^0)^2}{2}},$$

$$I_e = \sqrt{\frac{<|\widetilde{I}|^2>}{2} + 4.(I^0)^2},$$

sendo: $<|\widetilde{V}|^2>$ o valor médio de $|\widetilde{V}|^2$ e $<|\widetilde{I}|^2>$ o valor médio de $|\widetilde{I}|^2$.

E o seu respectivo diagrama de blocos é apresentado na figura III.6:

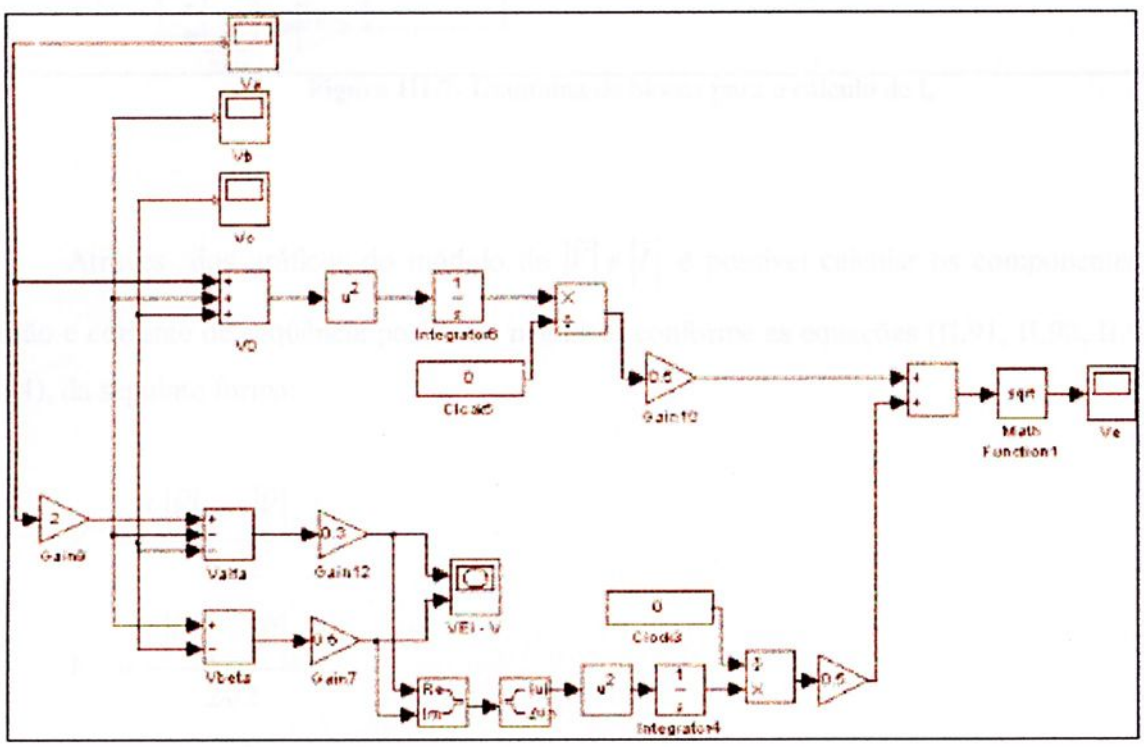


Figura III.6- Diagrama de blocos para o cálculo de V_e.

De maneira semelhante é feito o cálculo de I_e cujo diagrama de blocos é apresentado na figura III.7:

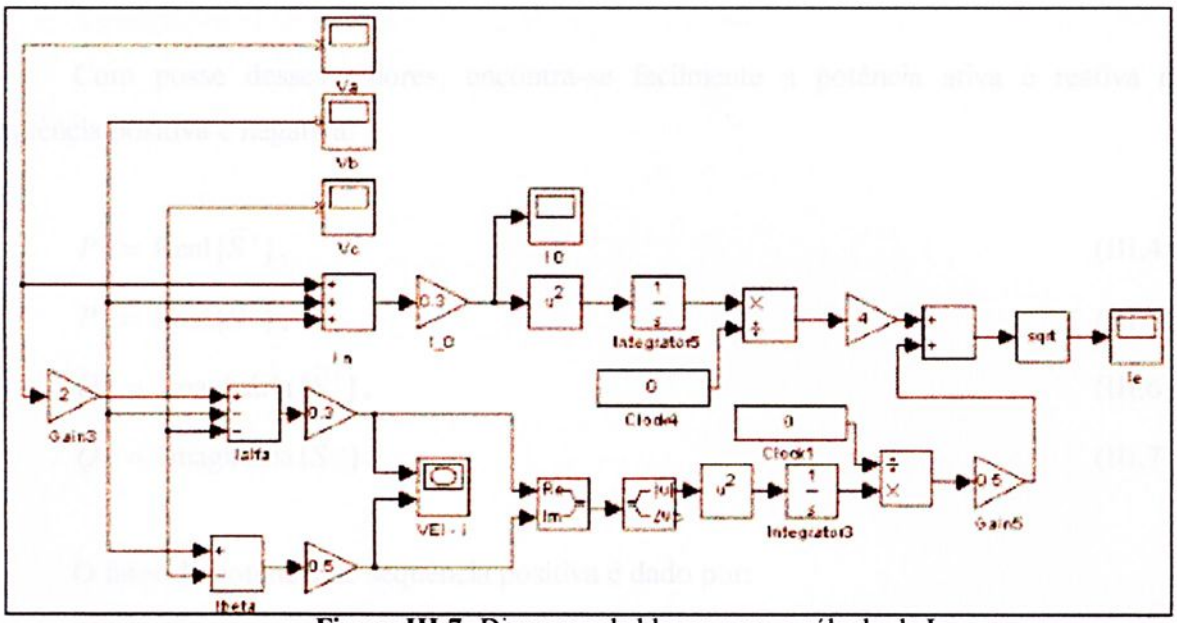


Figura III.7- Diagrama de blocos para o cálculo de I_e.

Através dos gráficos do módulo de $|\tilde{V}|$ e $|\tilde{I}|$ é possível calcular os componentes de tensão e corrente de seqüência positiva e negativa, conforme as equações (II.91, II.92, II.93 e II.94), da seguinte forma:

$$V^{+} = \frac{(|\tilde{V}|_M + |\tilde{V}|_m)}{2\sqrt{2}},$$

$$V^{-} = \frac{(|\tilde{V}|_M - |\tilde{V}|_m)}{2\sqrt{2}},$$

$$I^{+} = \frac{(|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m)}{2\sqrt{2}},$$

$$I^{-} = \frac{(|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m)}{2\sqrt{2}},$$

Através dessas é possível calcular as potências aparentes de seqüência positiva e negativa:

$$S^{+} = 3\,V^{+}\,I^{+}, \qquad \text{(III.2)}$$

$$S^{-} = 3\,V^{-}\,I^{-}. \qquad \text{(III.3)}$$

Com posse desses valores, encontra-se facilmente a potência ativa e reativa de seqüência positiva e negativa:

$$P^{+} = \text{Real}\{\widetilde{S}^{+}\}, \tag{III.4}$$

$$P^{-} = \text{Real}\{\widetilde{S}^{-}\}, \tag{III.5}$$

$$Q^{+} = \text{Imaginária}\{\widetilde{S}^{+}\}, \tag{III.6}$$

$$Q^{-} = \text{Imaginária}\{\widetilde{S}^{-}\}. \tag{III.7}$$

O fator de potência de seqüência positiva é dado por:

$$FP^{+} = \frac{P^{+}}{S^{+}}. \tag{III.8}$$

Calculados V_e e I_e calculam-se a partir destes a potência aparente efetiva, a partir da expressão (II.117), de acordo com o diagrama de blocos da figura III.8:

$$S_e = 3\, V_e\, I_e.$$

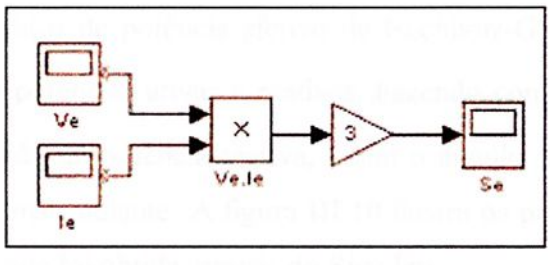


Figura III.8- Diagrama de blocos para o cálculo de S_e.

O fator de potência efetivo é calculado a partir da razão da potência real média e a potência aparente efetiva (conforme a equação II.122):

$$FP_e = \frac{\overline{P}}{S_e}.$$

Cujo diagrama de blocos para sua obtenção é apresentado na figura III.9.

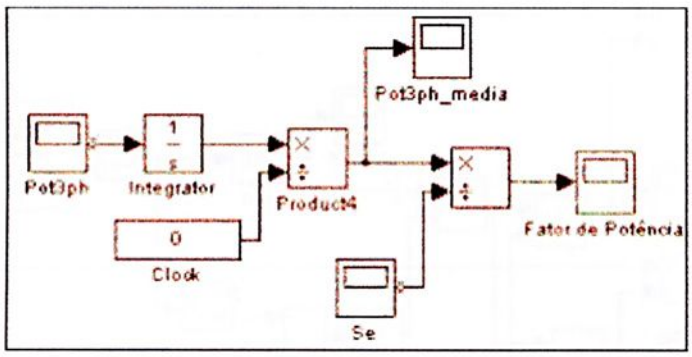


Figura III.9- Diagrama de blocos para o cálculo do fator de potência.

III.2- Obtenção da Corrente de Compensação Utilizando-se o Método apresentado na Seção II.3.1.

O objetivo dessa seção é mostrar a influência da compensação proposta por Akagi, sobre as grandezas de Buccholz-Goodhue.

Considerando-se que o fator de potência efetivo depende do desequilíbrio do sistema, bem como das potências ativa e reativa fundamentais e harmônicas, desenvolveu-se uma técnica baseada no controle vetorial (da amplitude e ângulo), para otimizar o fator de potência.

Para melhorar o fator de potência efetivo de Buchholz-Goodhue é necessário que se faça à compensação das potências ativas e reativas. Fazendo com que $\tilde{I}$ fique em fase com $\tilde{V}$ teremos a compensação da potência reativa, assim o ângulo formado entre $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ será nulo como mostraremos mais adiante. A figura III.10 ilustra os procedimentos para obtenção da corrente compensada que foi obtida através do Simulink.

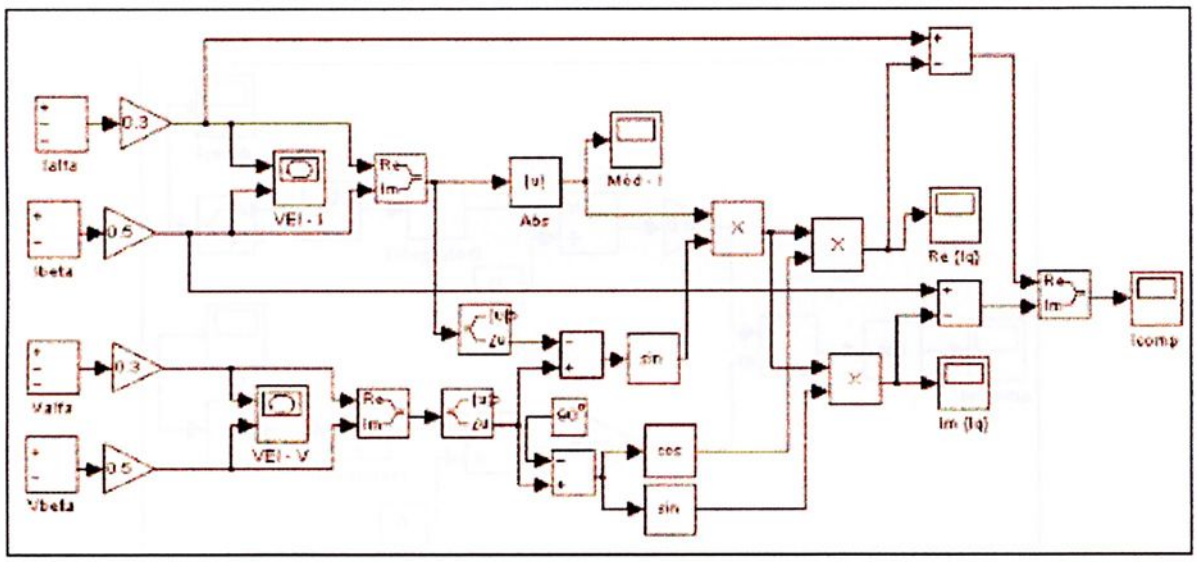


Figura III.10- Diagrama de blocos para o cálculo de I_{comp}.

Para provar que $\tilde{V}$ está em fase com $\tilde{I}$, foi calculado o ângulo formado entre eles, o diagrama da figura III.11 ilustra os procedimentos adotados:

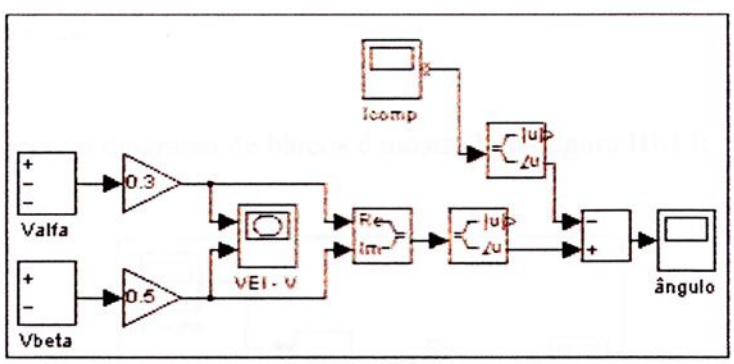


Figura III.11- Diagrama de blocos para o cálculo do ângulo formado entre $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$.

A corrente efetiva compensada é calculada a partir da expressão (II.105) e é implementada da seguinte maneira:

$$I_{e\,comp} = \sqrt{\frac{<|\tilde{I}|^2>}{2} + 4(I^0)^2}\ .$$

Analogamente, o diagrama da figura III.12, ilustra:

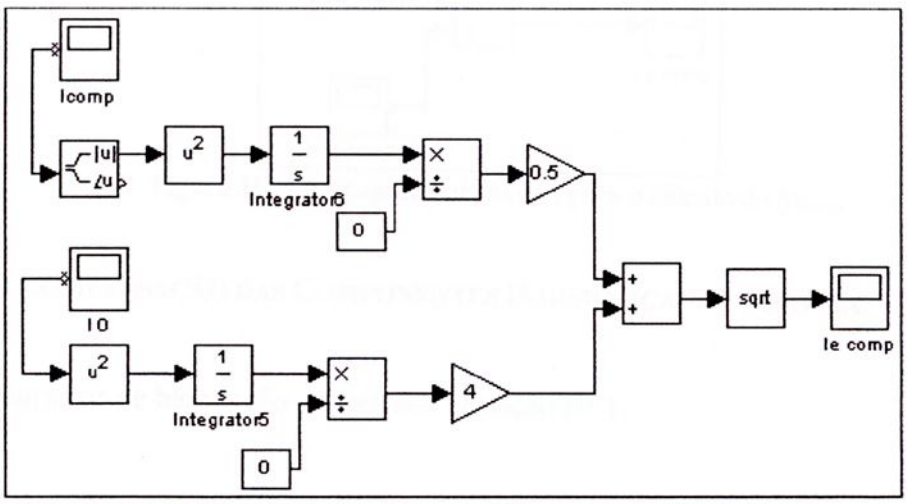


Figura III.12- Diagrama de blocos para o cálculo de $I_{e\,comp}$.

Tendo a corrente efetiva compensada e a tensão efetiva, obtém-se a potência aparente efetiva compensada, que é obtida da seguinte forma:

$$S_{e\,comp} = 3V_e\, I_{e\,comp}\,. \qquad \text{(III.9)}$$

E o seu respectivo diagrama de blocos é mostrado na figura III.13:

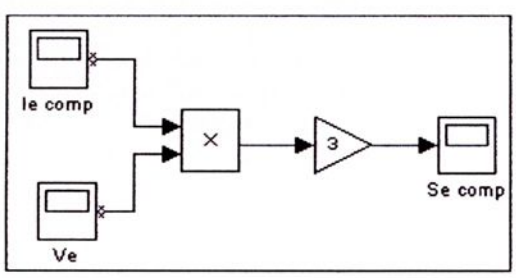


Figura III.13- Diagrama de blocos para o cálculo de $S_{e\,comp}$.

Portanto, o cálculo do fator de potência efetivo compensado é mostrado no diagrama de blocos da figura III.14:

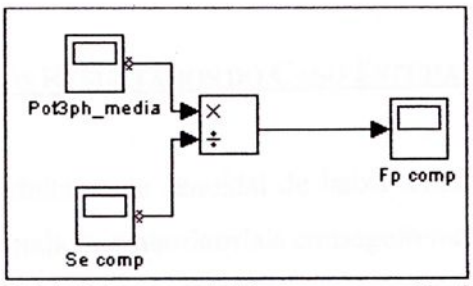


Figura III.14- Diagrama de blocos para o cálculo do fp_{comp}.

III.3- Compensação das Componentes Harmônicas do Sistema

Os diagramas de blocos são os mesmos da seção III.1.

III.4- A Compensação de Akagi e das Componentes Harmônicas

Os mesmos diagramas de blocos foram utilizados, lembrando que o que foi mudada foram às tensões e correntes de entrada, pois agora elas estão filtradas.

III.5- Resultados para um Caso Ideal de Correntes e Tensões Equilibradas

Os mesmos diagramas de blocos da seção III.1 foram utilizados, lembrando que o que foi mudado foram às tensões e correntes de entrada, pois agora elas são equilibradas e senoidais.

IV- Apresentação dos Resultados do Caso Estudado

Um sistema trifásico perfeitamente senoidal de baixa tensão e equilibrado é incomum nos dias de hoje. Somente em condições laboratoriais conseguiremos essas condições ideais.

No caso de um sistema desequilibrado as correntes fasoriais trifásicas, I_a, I_b e I_c não tem a mesma amplitude e não estão defasadas de 120° entre si. As cargas desbalanceadas levam a correntes assimétricas, o que podem por sua vez, causar tensões assimétricas. Também podem ocorrer casos em que a tensão fasorial não é simétrica provocando correntes assimétricas até mesmo quando a carga é perfeitamente balanceada.

IV.1- Sistema Trifásico Desequilibrado e com Formas de Onda Não-Senoidal

O sistema estudado é o sistema trifásico não senoidal e desequilibrado, cujo circuito equivalente é apresentado na figura IV.1:

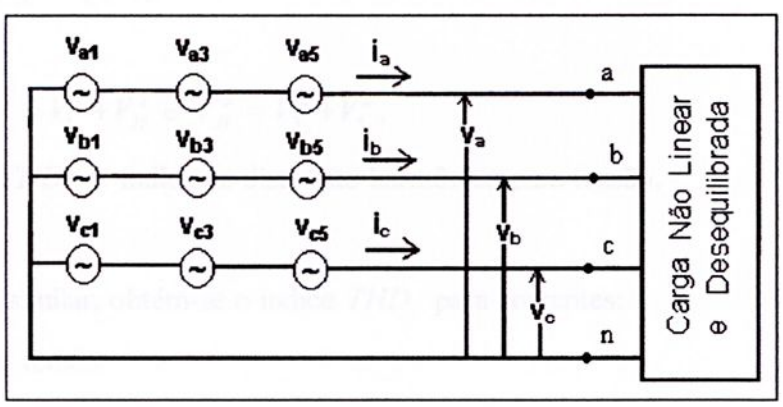


Figura IV.1- Circuito Equivalente

Suas componentes harmônicas de tensão, corrente e a freqüência são mostradas na tabela IV.1 abaixo.

Este é o caso apresentado na referência [4] cujos resultados foram comparados com os aqui obtidos.

	Ordem Harmônica		
	1	**3**	**5**
V_A (V)	$90\angle 0°$	$1\angle -15°$	$4\angle 155°$
V_B (V)	$95\angle -118°$	$0.6\angle -25°$	$2\angle 260°$
V_C (V)	$98\angle 124°$	$0.8\angle -5°$	$5\angle -30°$
I_A (A)	$10\angle -20°$	$3\angle -75°$	$2\angle 88°$
I_B (A)	$8\angle -130°$	$2\angle -85°$	$1\angle 190°$
I_C (A)	$7\angle 95°$	$2\angle -60°$	$3\angle -50°$
Freqüência	377 rad/s	1131 rad/s	1885 rad/s

Tabela IV.1- Tensões e Correntes para o caso estudado.

As distorções encontradas foram obtidas das seguintes expressões:

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1},$$

onde: $V^2 = V_1^2 + V_H^2$ e $V_H^2 = V_3^2 + V_5^2$,

e $THD_V \equiv$ índice de distorção harmônica para tensão.

De forma similar, obtém-se o índice THD_I para correntes:

Na fase A, temos:

$V_H = 4{,}116\ V$,

$V = 90{,}062\ V$ e

$THD_V = 0{,}046 = 4{,}6\%$.

$I_H = 3{,}538\ A$,

$I = 9{,}711\ A$ e

$THD_I = 0{,}364 = 36{,}4\%$.

Na fase B, temos:

$V_H = 3{,}961\ V$,

$V = 95{,}066\ V$ e

$THD_V = 0{,}042 = 4{,}2\%$.

$I_H = 1{,}738\ A$,

$I = 8{,}015\ A$ e

$THD_I = 0{,}217 = 21{,}7\%$.

Na fase C, temos:

$V_H = 5{,}041\ V$,

$V = 98{,}078\ V$ e

$THD_V = 0{,}051 = 5{,}1\%$.

$I_H = 3{,}582\ A$,

$I = 7{,}208\ A$ e

$THD_I = 0{,}497 = 49{,}7\%$.

O tempo da simulação foi de 0,05 segundos.

As formas de onda das tensões e correntes de entrada são mostradas nos gráficos das figuras IV.2 e IV.3 a seguir:

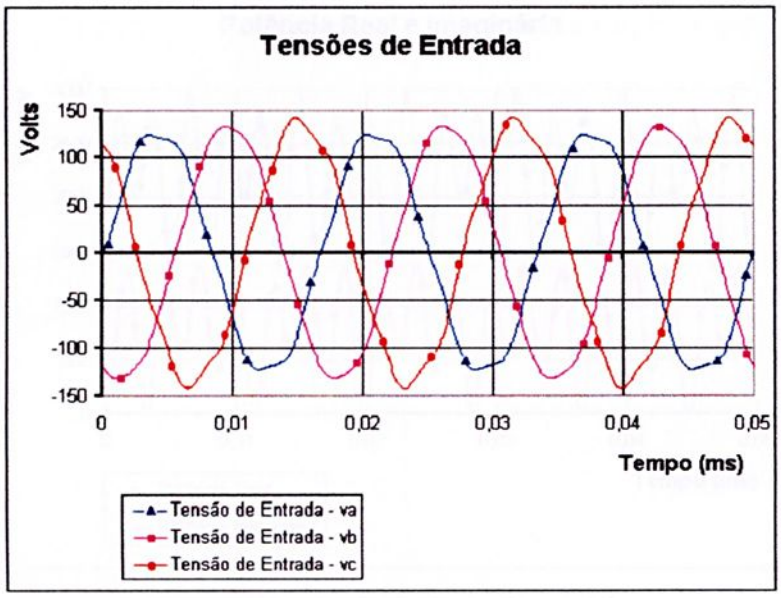


Figura IV.2- Tensões v_A, v_B e v_C.

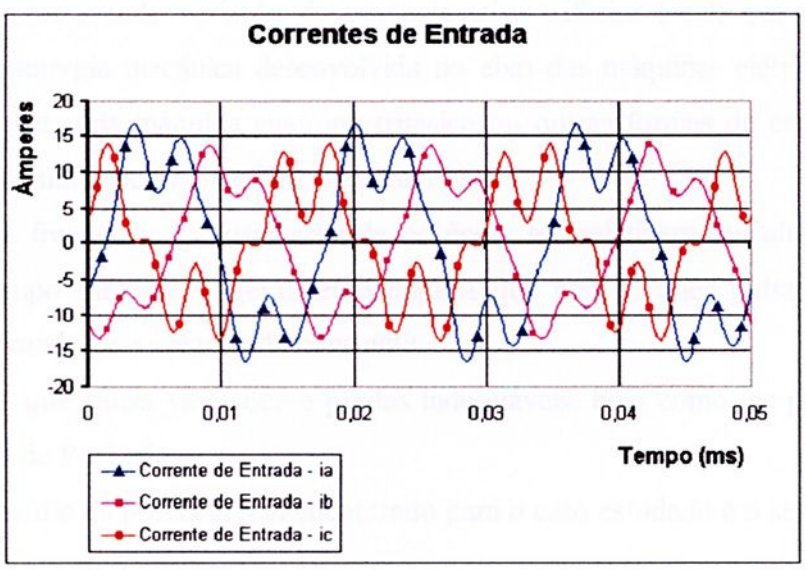


Figura IV.3- Correntes i_A, i_B e i_C.

Observa-se que as tensões e correntes apresentam formas de ondas distorcidas, poderá ser observado mais a diante que essa tensão e corrente produzirão um vetor com trajetórias irregulares, devido às harmônicas presentes e ao desequilíbrio.

Através do "software" Simulink foi possível calcular-se a potência real e imaginária, cujos resultados gráficos de P e Q são ilustrados na figura IV.4 a seguir:

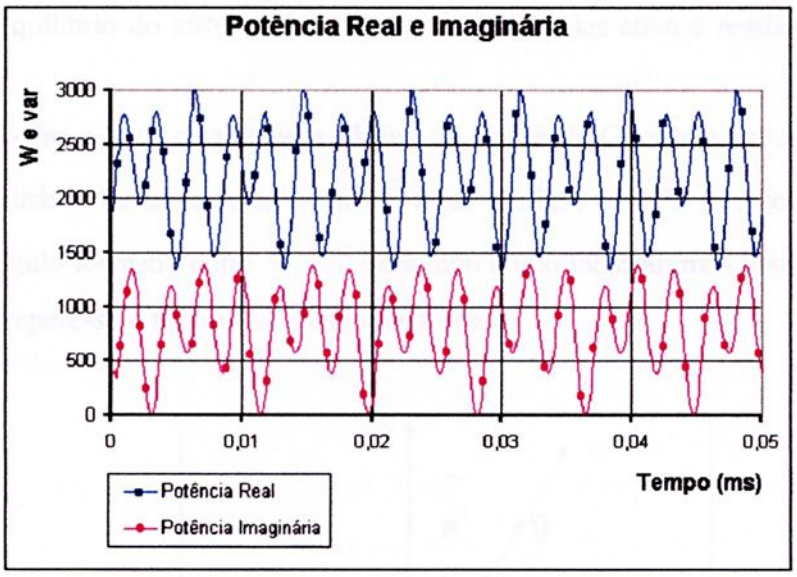


Figura IV.4- Potência Real e Imaginária.

Nota-se uma grande variação da potência ativa trifásica (real) que está relacionada com a troca de energia mecânica desenvolvida no eixo das máquinas elétricas (no caso de fonte de tensão ser uma máquina síncrona trifásica ou outras formas de energia, como por exemplo, energia química como é o caso das baterias).

Devido à freqüência da oscilação da potência ser relativamente alta (em relação à constante de tempo mecânica), geralmente implica que haja torques pulsantes no eixo da máquina considerando-se a velocidade constante.

Fato este que causa vibrações e perdas indesejáveis, bem como, as perdas por efeito Joule no Sistema de Potência.

O valor médio da potência real encontrado para o caso estudado é o seguinte:

$$\overline{P} = 2209{,}45\ W\ .$$

A seguir apresenta-se a figura IV.5 com a trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo tensão representada no plano complexo α-β:

depende do desequilíbrio do sistema, bem como das potências ativa e reativa fundamentais e harmônicas.

Para melhorar o fator de potência efetivo de Buchholz-Goodhue fez-se a compensação da potência imaginária. Fazendo-se com que $\tilde{I}$ fique em fase com $\tilde{V}$ teremos a compensação desta, assim o ângulo formado entre $\tilde{V}$ e $\tilde{I}$ será nulo como mostraremos mais adiante.

A seguir repete-se a figura II.4 como ilustração.

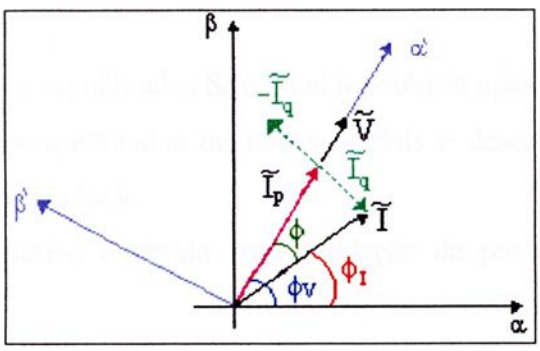


Figura IV.9- Decomposição do vetor espacial instantâneo $\tilde{I}$ na direção do vetor espacial instantâneo $\tilde{V}$ em relação as suas componentes de fase e quadratura no plano complexo α'-β'.

Feita a compensação, o gráfico encontrado através da simulação é ilustrado na figura IV.10:

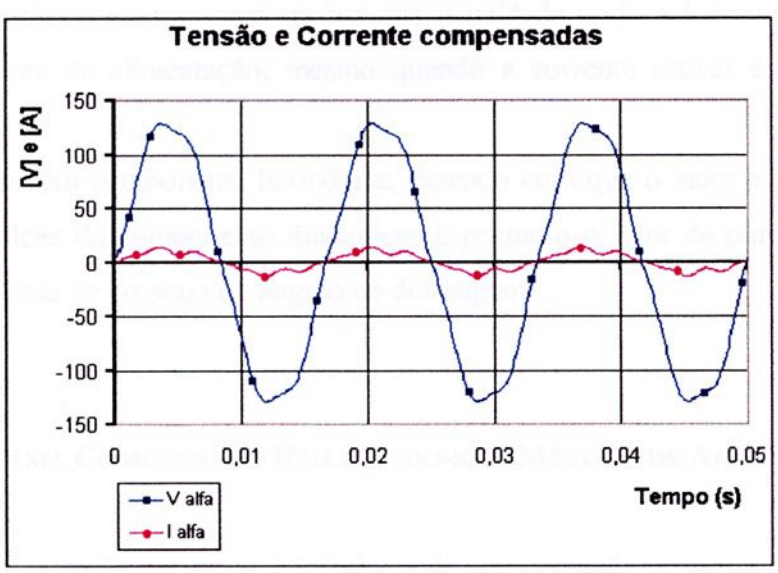


Figura IV.10- Tensão e Corrente Compensadas, V_α e I_α.

O fator de potência de seqüência positiva é dado por:

$FP^{+} = 0{,}94$.

Uma vez obtida a tensão e a corrente efetiva, determina-se a potência aparente efetiva.

$S_e = 2901{,}70 \ \ VA$.

Em situações senoidais e equilibradas S_e é igual à potência aparente convencional, mas para condições senoidais e desequilibradas ou não senoidais e desequilibrada S_e permite a computação correta do fator de potência.

O fator de potência efetivo é obtido com a relação da potência real e a potência aparente efetiva.

$FP_e = \ 0{,}76$.

O novo fator de potência apresenta fatos curiosos, como por exemplo, valores inferiores à unidade em casos de circuitos puramente resistivos, porém desequilibrados, evidenciando dessa forma que valores de fator de potência diferente da unidade não estão relacionados apenas com a existência de potência reativa nos circuitos.

O fator de potência sempre será menor que a unidade onde existirem componentes harmônicas na corrente de alimentação, mesmo quando a corrente estiver em fase com a tensão.

A corrente contém componente harmônica, fazendo com que o valor eficaz total seja maior que o valor eficaz da componente fundamental, portanto o fator de potência é menor que o calculado por meio de co-seno do ângulo de defasagem.

IV.2- O Sistema Compensado Utilizando-se o Método de Akagi

O objetivo dessa seção é mostrar a influência da compensação proposta por Akagi [1], sobre as grandezas de Buccholz-Goodhue, considerando-se que o fator de potência efetivo

Com os dados dos gráficos acima é possível calcular os valores de pico das componentes de seqüência positiva e negativa que são:

$$\left|\widetilde{V}\right|_M = 143{,}78\ V,$$

$$\left|\widetilde{V}\right|_m = 125{,}35\ V,$$

$$\left|\widetilde{I}\right|_M = 14{,}96\ A,$$

$$\left|\widetilde{I}\right|_m = 7{,}91\ A.$$

Portanto as componentes de seqüência positiva e negativa são:

$$V^+ = 95{,}15\ V,$$

$$V^- = 6{,}51\ V,$$

$$I^+ = 8{,}08\ A,$$

$$I^- = 2{,}49\ A.$$

Com esses resultados calculam-se as potências aparentes de seqüência positiva e negativa:

$$S^+ = 2306{,}436\ VA,$$

$$S^- = 48{,}629\ VA.$$

Com posse desses valores, encontram-se facilmente a potência ativa e reativa de seqüência positiva e negativa:

$$P^+ = 2160{,}994\ W,$$

$$P^- = 48{,}465\ W,$$

$$Q^+ = 806{,}072\ \text{var},$$

$$Q^- = 3{,}996\ \text{var}.$$

Na seqüência, calcula-se V_e e o valor encontrado é de:

$V_e = 94{,}70 \quad V$,

Também é calculado I_e e o valor encontrado é mostrado abaixo:

$I_e = 10{,}21 \quad A$,

Os respectivos gráficos dos módulos da tensão e corrente são apresentados nas figuras IV.7 e IV.8:

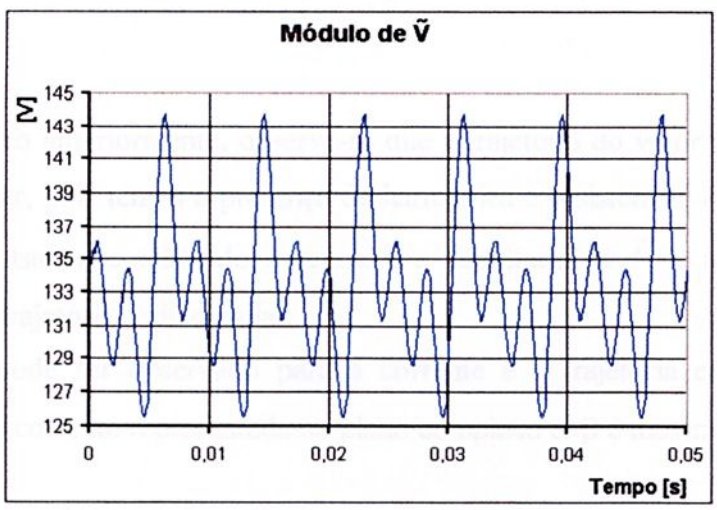


Figura VI.7- Gráfico do $|\tilde{V}|$.

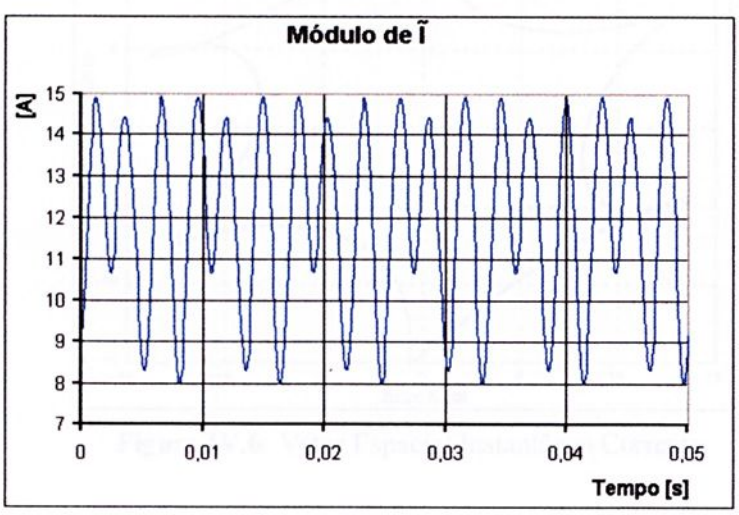


Figura IV.8- Gráfico do $|\tilde{I}|$.

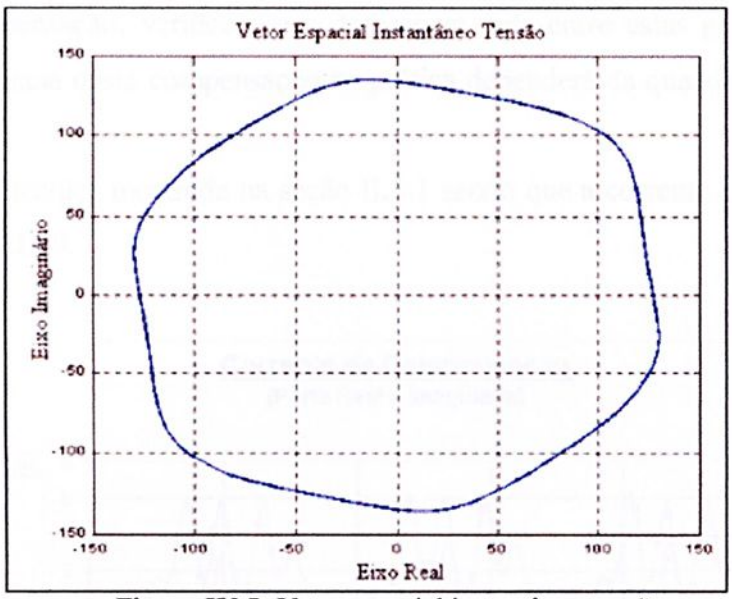


Figura IV.5- Vetor espacial instantâneo tensão.

Como foi dito anteriormente, observa-se que a trajetória do vetor espacial instantâneo tensão não é circular, pois temos a presença de harmônica e o sistema é desequilibrado. Se o sistema fosse um sistema equilibrado e senoidal a amplitude de $\tilde{V}$ e a velocidade seriam constantes, e a sua trajetória seria circular.

O mesmo pode ser observado para a corrente e a trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo corrente representada no plano complexo α-β é mostrada na figura IV.6:

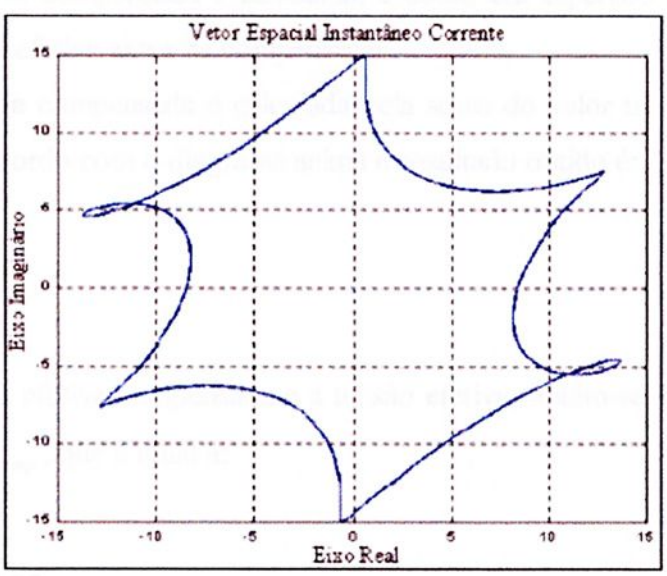


Figura IV.6- Vetor Espacial Instantâneo Corrente.

Após a compensação, verificou-se a defasagem nula entre estas grandezas. Deve-se observar que a eficiência desta compensação na prática dependerá da qualidade do filtro ativo a ser utilizado.

Utilizou-se a técnica mostrada na seção II.3.1 sendo que a corrente de compensação é dada pela expressão II.69.

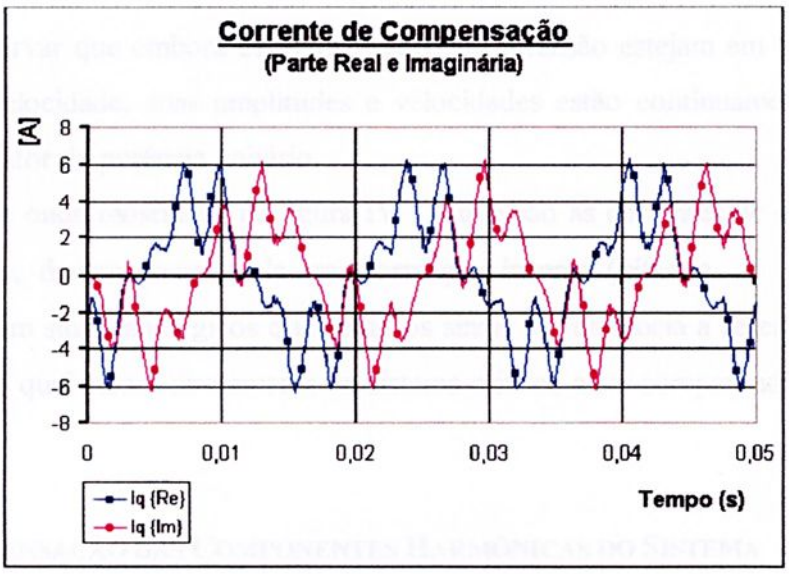


Figura IV.11- Corrente de compensação, $I_q\{\mathrm{Re}\}$ e $I_q\{\mathrm{Im}\}$.

A corrente efetiva compensada é calculada, e como era esperado obtemos um valor menor do que a corrente efetiva antes da compensação.

A corrente efetiva compensada é calculada pela soma do valor médio de I_{comp} com o valor médio de I_0 e de acordo com o diagrama acima o resultado obtido é:

$$I_{e\,comp} = 9{,}71\ A.$$

Tendo a corrente efetiva compensada e a tensão efetiva, obtém-se a potência aparente efetiva compensada, $S_{e\,comp}$, que é igual a:

$$S_{e\,comp} = 2758{,}87\,VA.$$

É fácil notar que $S_{e\,comp}$ é maior que S_e e conseqüentemente o fator de potência efetivo compensado será maior que o fator de potência efetivo convencional.

Portanto, o fator de potência efetivo compensado é:

$$FP_{e\,comp} = 0{,}80\,.$$

Deve-se observar que embora os vetores corrente e tensão estejam em fase, portanto girando à mesma velocidade, suas amplitudes e velocidades estão continuamente variando. Por isto não temos fator de potência unitário.

As formas de onda mostradas na figura IV.11, que são as correntes de compensação, geradas digitalmente, devem passar pela transformação inversa (bifásica → trifásica) e, a seguir, convertidas em sinais analógicos que serão os sinais de referência a serem sintetizados por um filtro ativo, o qual atuará diretamente no sistema elétrico a ser compensado.

IV.3- Compensação das Componentes Harmônicas do Sistema

A filtragem ocorreu utilizando-se os dados da simulação anterior e transferindo para os filtros, dessa forma foi possível obter-se as tensões e correntes de entradas filtradas, isto é, contendo apenas as componentes fundamentais, a partir daí foram calculadas as potências, o fator de potência, os vetores espaciais instantâneos de tensão e corrente, tensão e corrente efetiva e corrente compensada.

A seguir será mostrado como foram realizados esses cálculos e os resultados obtidos.

As formas de onda das correntes depois da filtragem (ou seja, fundamental) são apresentadas na figura IV.12 a seguir:

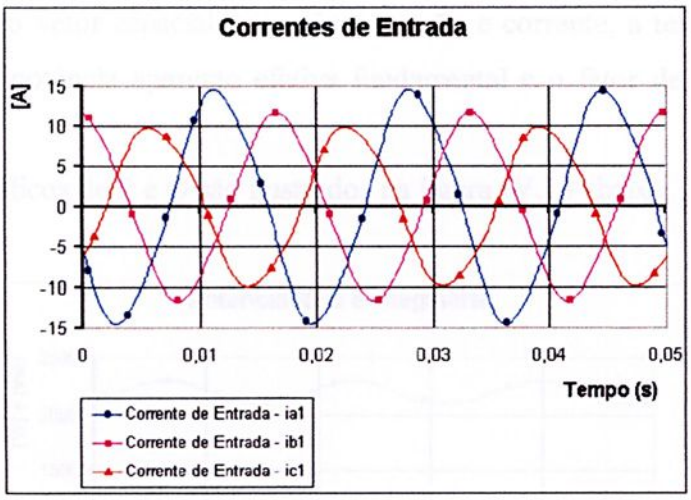


Figura IV.12- Correntes de Entrada i_{a1}, i_{b1} e i_{c1}.

E as formas de onda das tensões depois da filtragem (ou seja, fundamentais) são ilustradas na figura IV.13:

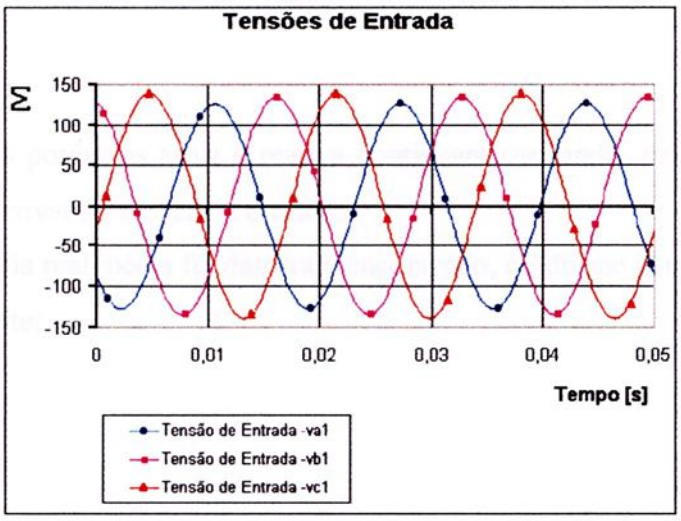


Figura IV.13- Tensões de Entrada v_{a1}, v_{b1} e v_{c1}.

Observa-se que as formas de ondas tanto da tensão como da corrente após aplicação do filtro apresentam-se com poucas distorções. Estas mais acentuadas para as correntes. Estes foram os melhores resultados obtidos da utilização dos filtros Butterworth e Chebyshev integradas no "software" Labview.

Com posse desses valores de entrada utilizando os mesmos diagramas de blocos do capítulo III calculam-se, a potência ativa e reativa trifásica fundamental, o valor médio da

potência ativa trifásica, o vetor espacial instantâneo tensão e corrente, a tensão e a corrente efetiva fundamentais, a potência aparente efetiva fundamental e o fator de potência efetivo fundamental.

Os resultados gráficos de P e Q são ilustrados na figura IV.14 abaixo:

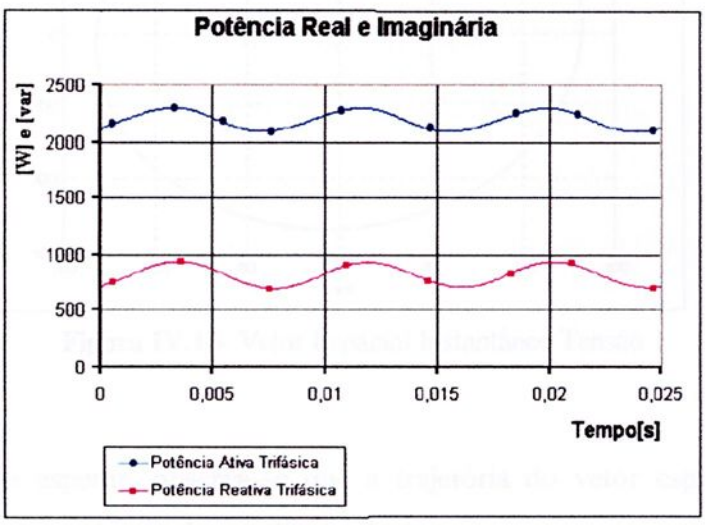


Figura IV.14- Formas de Onda da Potências Ativa e Reativa Trifásicas Fundamentais.

Os contornos das potências ativa e reativa continuam oscilando, mas suas formas de onda são regulares comprovando a eficácia do filtro.

O valor da potência real média fundamental encontrado, conforme já realizado anteriormente, é o seguinte:

$$\overline{P}_1 = 2189{,}28\ W\ .$$

O vetor espacial instantâneo tensão e corrente são calculados da mesma forma que no capítulo III e os resultados gráficos para os vetores espaciais instantâneos tensão e corrente podem ser visualizados nas figuras IV.15 e IV.16.

A trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo tensão representada no plano complexo α-β é apresentado na figura IV.15:

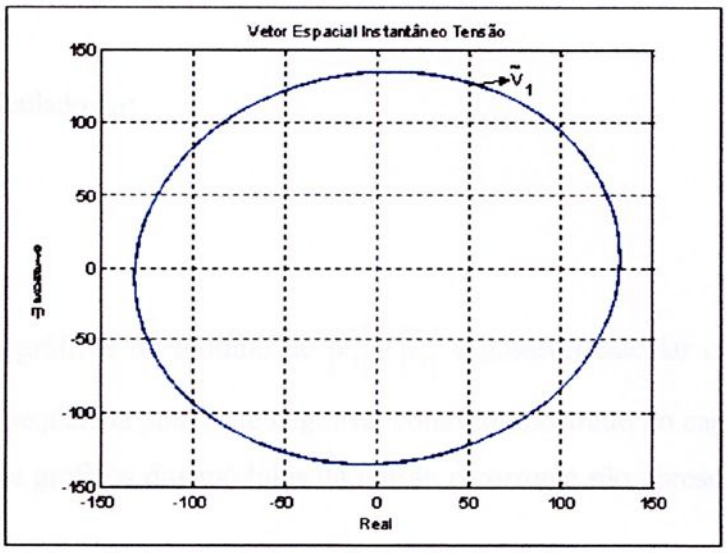


Figura IV.15- Vetor Espacial Instantâneo Tensão.

Como era de se esperar, observa-se que a trajetória do vetor espacial instantâneo tensão é uma elipse devida ainda aos desequilíbrios destas.

O mesmo pode ser observado para a corrente, a trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo corrente representada no plano complexo α-β é a apresentada na figura IV.16 abaixo:

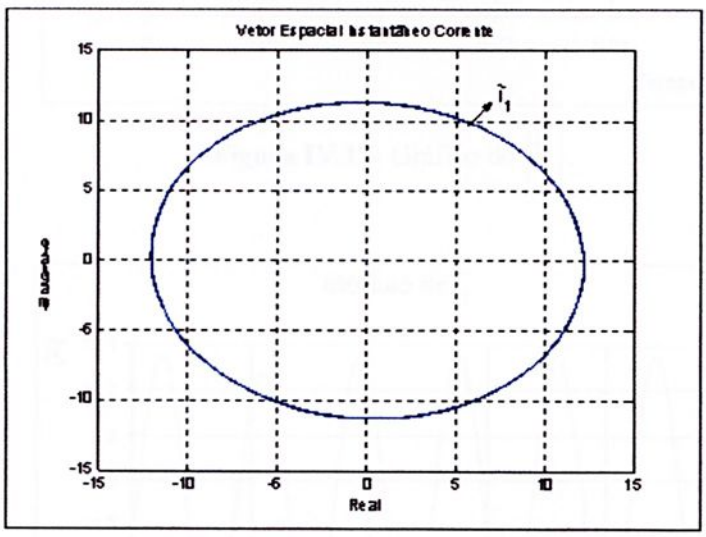


Figura IV.16- Vetor Espacial Instantâneo Corrente.

Da mesma forma como foi feito anteriormente, calcula-se V_{e1} (valor eficaz da amplitude de $\tilde{V}$).

$V_{e1} = 94{,}69 \;\; V$,

também é calculado I_{e1}:

$I_{e1} = 8{,}83 \;\; A$.

Através dos gráficos do módulo de $\left|\tilde{V}_1\right| e \left|\tilde{I}_1\right|$ é possível calcular os componentes de tensão e corrente de seqüência positiva e negativa, como foi mostrado no capítulo III.

Os respectivos gráficos dos módulos da tensão e corrente são apresentados nas figuras IV.17 e IV.18:

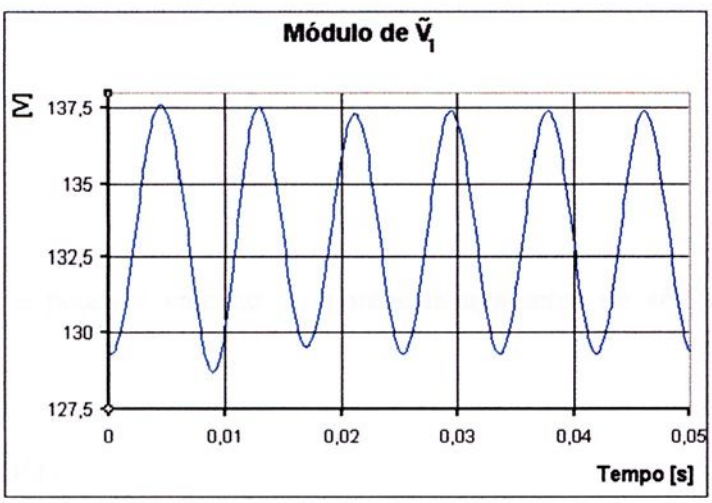


Figura IV.17- Gráfico do $\left|\tilde{V}_1\right|$.

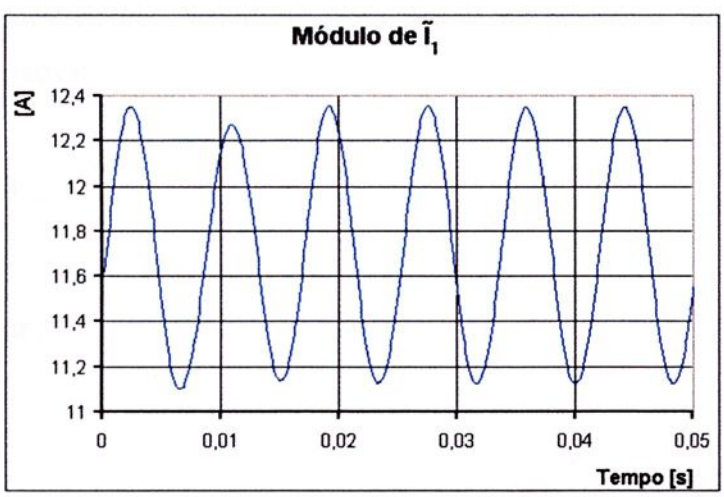


Figura IV.18- Gráfico do $\left|\tilde{I}_1\right|$.

Assim, os valores de pico das componentes de seqüência positiva e negativa são:

$$\left|\widetilde{V}_1\right|_M = 137{,}48\ V,$$

$$\left|\widetilde{V}_1\right|_m = 129{,}22\ V,$$

$$\left|\widetilde{I}_1\right|_M = 12{,}36\ A,$$

$$\left|\widetilde{I}_1\right|_m = 11{,}11\ A.$$

Portanto as componentes de seqüência positiva e negativa são:

$$V_1^+ = 94{,}29\ V,$$

$$V_1^- = 2{,}73\ V,$$

$$I_1^+ = 8{,}29\ A,$$

$$I_1^- = 0{,}31\ A.$$

Através dessas é possível calcular as potências aparentes de seqüência positiva e negativa:

$$S_1^+ = 2344{,}992\ VA,$$

$$S_1^- = 2{,}54\ VA.$$

Com posse desses valores facilmente, encontra-se as potências ativa e reativa de seqüência positiva e negativa:

$$P_1^+ = 2199{,}62\ W,$$

$$P_1^- = -1{,}24\ W,$$

$$Q_1^+ = 812{,}79\ \text{var},$$

$$Q_1^- = -2{,}22\ \text{var}.$$

O fator de potência fundamental de seqüência positiva é dado por:

$FP_1^+ = 0{,}94$.

Os gráficos dos módulos dos vetores espaciais instantâneos das tensões e correntes fundamentais ao quadrado $\left|\tilde{V}_1\right|^2$ *e* $\left|\tilde{I}_1\right|^2$, são mostrados nas figuras IV.19 e IV.20:

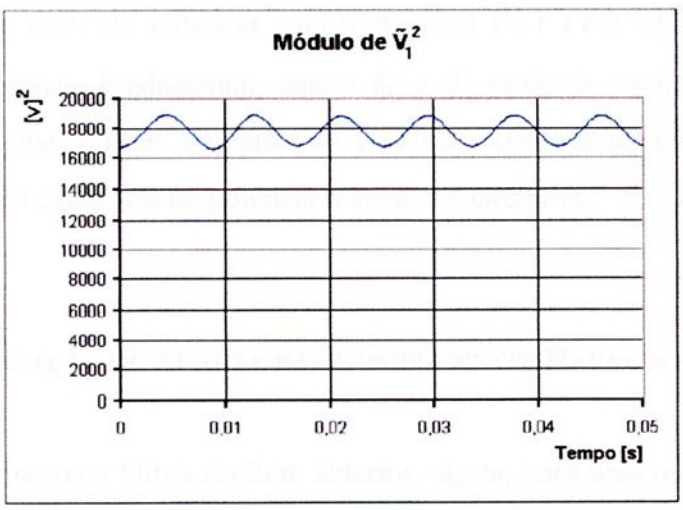


Figura IV.19- Gráfico de $\left|\tilde{V}_1\right|^2$.

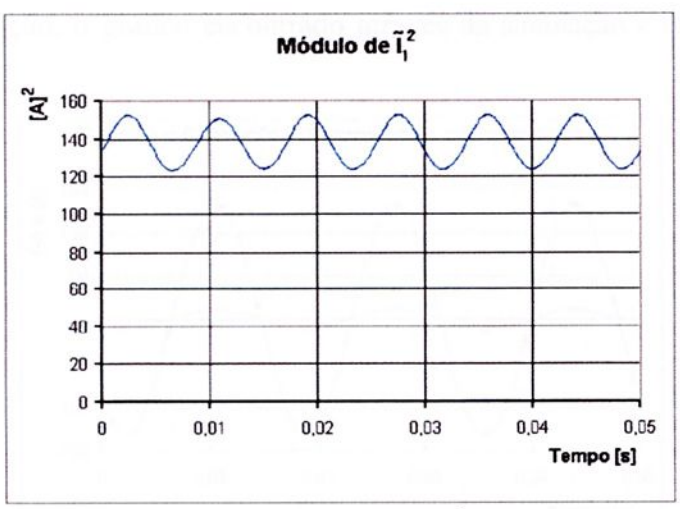


Figura IV.20- Gráfico de $\left|\tilde{I}_1\right|^2$.

Uma vez obtida a tensão e a corrente efetiva, determina-se a potência aparente efetiva fundamental:

$S_{e1} = 2508{,}44\ VA$.

O fator de potência efetivo fundamental é obtido com a relação da potência real média e a potência aparente efetiva fundamental:

$FP_{e1} = 0{,}87$.

Comparando este fator de potência com o do item IV.1 ($FP_e = 0{,}76$), nota-se um aumento do fator de potência fundamental, mas o fator de potência continua menor que a unidade o que reforça que valores de fator de potência diferente da unidade não estão relacionados apenas com a existência de potência reativa nos circuitos.

IV.4- A Compensação de Akagi e das Componentes Harmônicas

Utilizando-se os mesmos filtros do item anterior, agora, para uma otimização máxima do fator de potência depois de ser filtrada as tensões e correntes, será feita a compensação de potência como foi feito no item IV.2..

Feita a compensação, o gráfico encontrado através da simulação é ilustrado na figura IV.21:

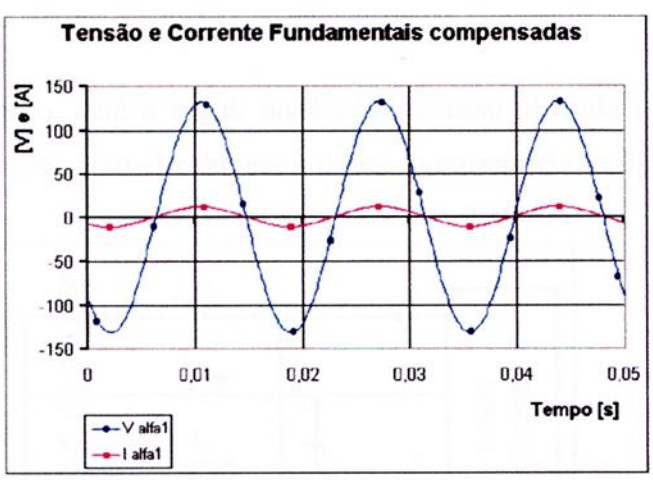


Figura IV.21- Gráfico que ilustra a tensão e corrente fundamentais compensadas, $V_{\alpha 1}$ e $I_{\alpha 1}$.

Verifica-se que as tensões e correntes são senoidais e estão em fase devido à compensação de Akagi. Como $\tilde{V}$ está em fase com $\tilde{I}$ o ângulo formado entre eles é zero.

A corrente fundamental efetiva compensada é:

$$I_{e\ comp1} = 8{,}34\ A.$$

E como era esperado a corrente efetiva fundamental compensada calculada, tem valor menor do que a corrente efetiva antes da compensação.

Tendo a corrente efetiva fundamental compensada e a tensão efetiva fundamental, obtém-se a potência aparente efetiva fundamental compensada:

$$S_{e\,comp1} = 2369{,}37\,VA.$$

É fácil notar que $S_{e\,comp1}$ é maior que S_e e conseqüentemente o fator de potência efetivo fundamental compensado será maior que o fator de potência efetivo convencional.

Portanto, o fator de potência efetivo fundamental compensado é:

$$FP_{e\,comp1} = 0{,}92.$$

IV.5- Resultados para um Caso Ideal de Correntes e Tensões Equilibradas

A título de ilustração, será a seguir analisado um caso ideal de tensões e correntes equilibradas e sem harmônicas, cujo circuito equivalente é apresentado na figura IV.22:

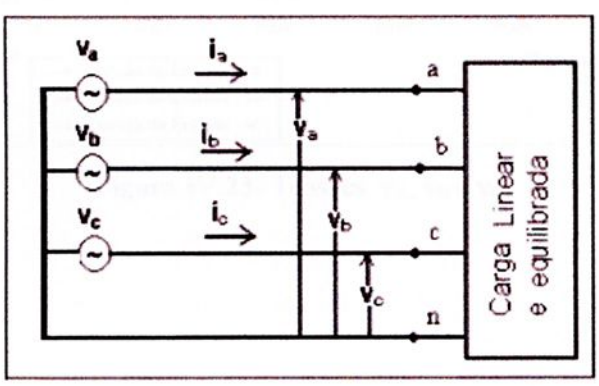


Figura IV.22- Circuito Equivalente.

As componentes de tensão e corrente e a freqüência são mostradas na tabela IV.2, que ilustram um caso típico de um sistema trifásico senoidal e equilibrado.

V_A (V)	$94{,}69\angle 0°$
V_B (V)	$94{,}69\angle -120°$
V_C (V)	$94{,}69\angle 120°$
I_A (A)	$8{,}83\angle 0°$
I_B (A)	$8{,}83\angle -120°$
I_C (A)	$8{,}83\angle 120°$
Freqüência	377 rad/s

Tabela IV.2- Tensões e Correntes para o caso estudado.

O tempo da simulação foi de 0,05 segundos.

As formas de onda das tensões e correntes de entrada são mostradas nos gráficos das figuras IV.23 e IV.24:

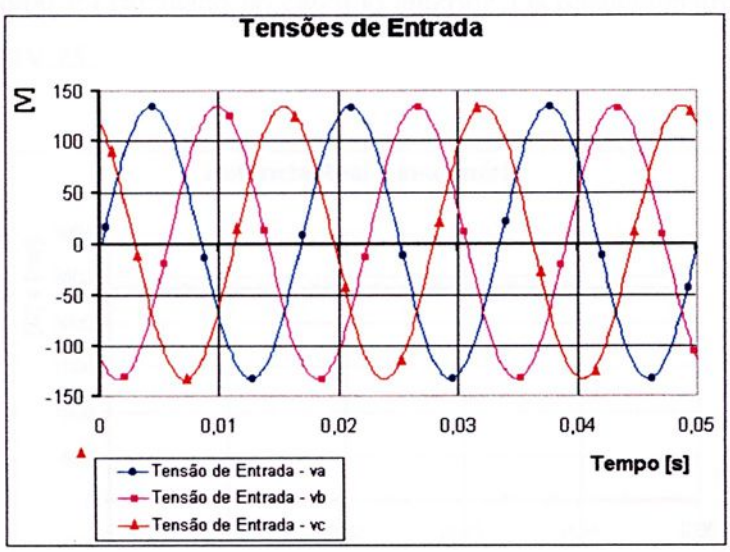


Figura IV.23- Tensões v_A, v_B e v_C.

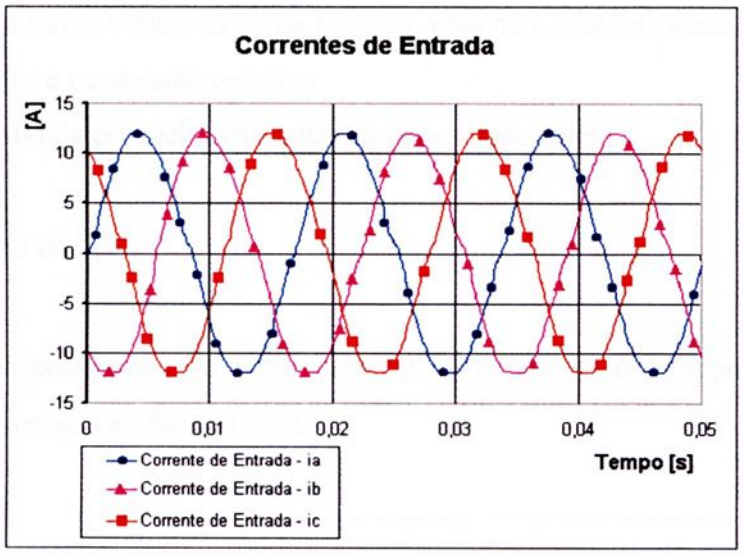


Figura IV.24- Correntes i_A, i_B e i_C.

Observa-se que as tensões e correntes apresentam formas de ondas com distorções desprezíveis, poderá ser observado mais a diante que essa tensão e corrente produzirão um vetor com trajetórias quase perfeitas, devido ao desequilíbrio.

Através do "software" Simulink foi possível calcular-se a potência real e imaginária, da mesma forma como foi calculado no capítulo anterior. Os resultados gráficos de P e Q são ilustrados na figura IV.25:

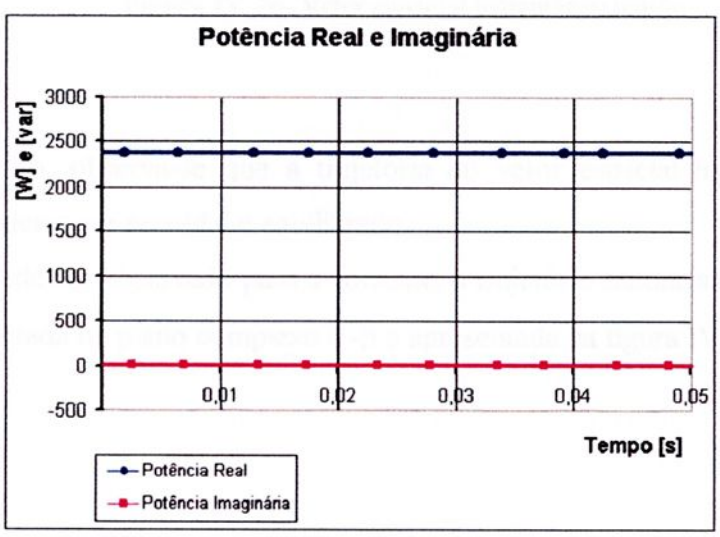


Figura IV.25- Potência Real e Imaginária.

Nota-se que a potência ativa é constante devido o circuito ser senoidal e equilibrado.

A potência reativa obtida na carga foi zero, pois não existem elementos armazenadores de energia, o circuito é puramente resistivo.

O valor médio da potência ativa trifásica para o caso vale:

$\overline{P} = 2374{,}73\ W$.

A trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo tensão representada no plano complexo α-β é mostrado na figura IV.26:

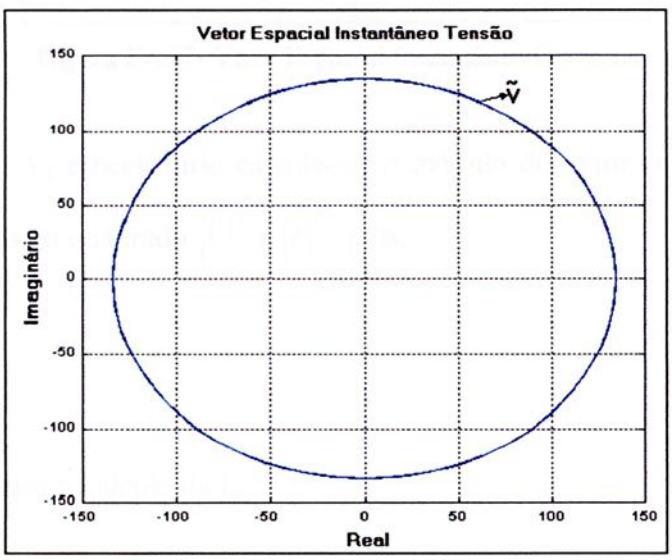


Figura IV.26- Vetor espacial instantâneo tensão.

Como foi dito, observa-se que a trajetória do vetor espacial instantâneo tensão é circular devido o sistema ser senoidal e equilibrado.

O mesmo pode ser observado para a corrente, a trajetória encontrada do vetor espacial instantâneo representada no plano complexo α-β é apresentada na figura IV.27:

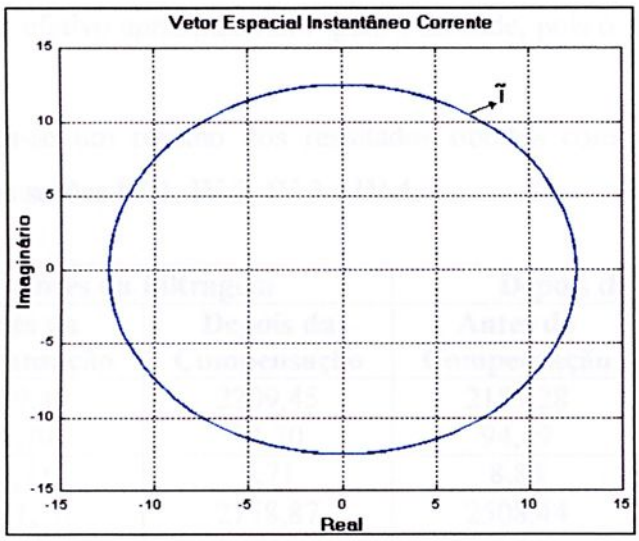


Figura IV.27- Vetor Espacial Instantâneo Corrente.

Para o cálculo de V_e é necessário calcular-se o módulo do vetor espacial instantâneo tensão e corrente elevadas ao quadrado $\left|\tilde{V}\right|^2$ e $\left|\tilde{I}\right|^2$, pois:

$$V_e = 94{,}22 \ \ V,$$

o mesmo é feito para o cálculo de I_e:

$$I_e = 8{,}42 \ \ A.$$

Uma vez obtida a tensão e a corrente efetiva, determina-se a potência aparente efetiva.

$$S_e = 2380{,}05 \ \ VA.$$

Em situações senoidais e equilibradas S_e é igual à potência aparente convencional.

O fator de potência efetivo é obtido com a relação da potência real média e a potência aparente efetiva.

$$FP_e = \frac{P}{S_e} = \ 1{,}0.$$

O fator de potência efetivo apresenta valor igual à unidade, pois o sistema é senoidal e equilibrado.

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados obtidos com as definições mais importantes, mostradas nas seções IV.1, IV.2, IV.3 e IV.4:

	Antes da Filtragem		Depois da Filtragem	
	Antes da Compensação	Depois da Compensação	Antes da Compensação	Depois da Compensação
P [W]	2209,45	2209,45	2189,28	2189,28
V_e [V]	94,70	94,70	94,69	94,69
I_e [A]	10,21	9,71	8,83	8,34
S_e [VA]	2901,70	2758,87	2508,44	2369,37
fp_e	0,76	0,80	0,87	0,92

Tabela IV.3- Componentes apresentadas no caso de um Sistema Trifásico Desequilibrado e com formas de ondas Não Senoidais.

A tabela IV.4 mostra as demais variáveis para o sistema não compensado:

	Antes da filtragem	Depois da filtragem
V^+ [V]	95,15	94,29
V^- [V]	6,51	2,73
I^+ [A]	8,08	8,29
I^- [A]	2,49	0,31
P^+ [W]	2160,99	2199,62
P^- [W]	48,47	-1,24
Q^+ [var]	806,07	812,79
Q^- [var]	3,996	-2,22
S^+ [VA]	2306,44	2344,99
S^- [VA]	48,63	2,54
Fp^+	0,94	0,94
S_U	1760,74	890,67
S_U/S^+	0,76	0,38
%VU	6,84	3,10
%VI	30,82	5,31

Tabela IV.4- Componentes para o sistema não compensado.

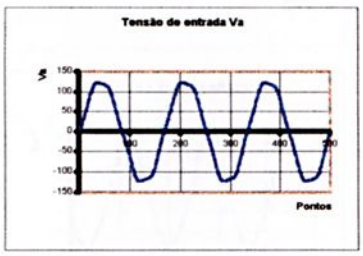
Observa-se uma grande redução nas tensões e correntes de seqüência negativa após a filtragem das harmônicas de 3ª e 5ª ordem, bem como das potências ativa, reativa e aparente de seqüência negativa.

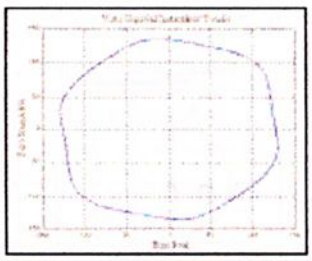
cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 1 12 13 14 15 16 17 18

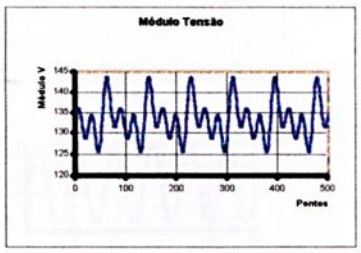
Este fato é justificado pela diminuição da amplitude da oscilações de $\left|\tilde{V}\right|$, $\left|\tilde{I}\right|$ e $\left|\tilde{V}_1\right|$, $\left|\tilde{I}_1\right|$ como podem ser visualizadas nas figuras IV.7 e IV.8 e IV.17 e IV.18 respectivamente. Estas oscilações são expressas nos índices de desequilíbrio %VU e %VI que são também bastante reduzidas.

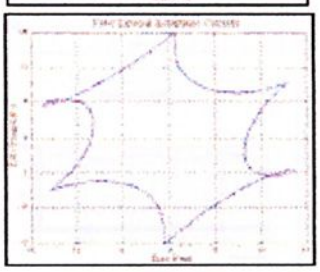
V- Concepção de um Instrumento Digital e Gerador de Sinais para Filtros Ativos Compensadores

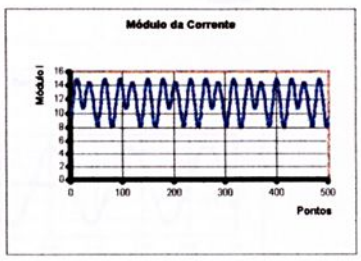
"Layout" dos gráficos e "displays" a serem apresentados na tela do instrumento, antes da Filtragem.

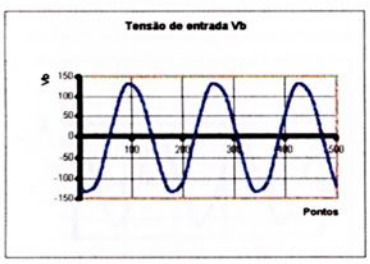


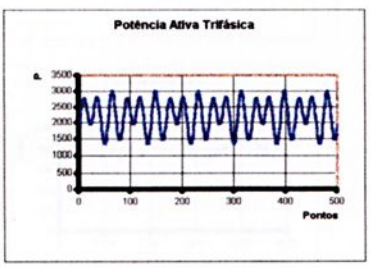


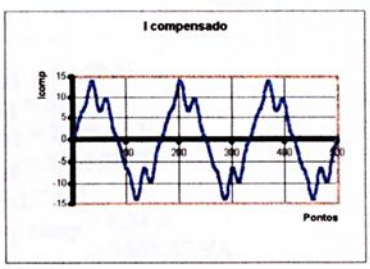


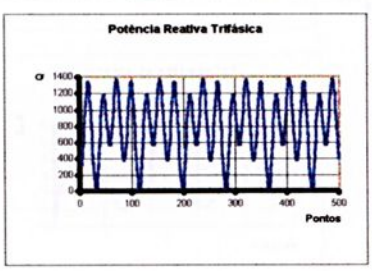


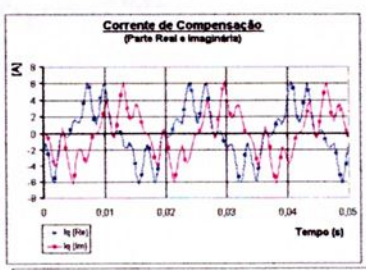


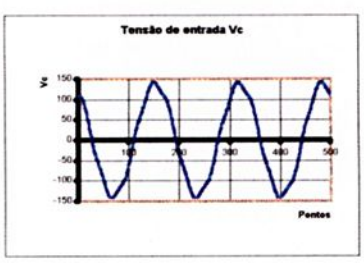




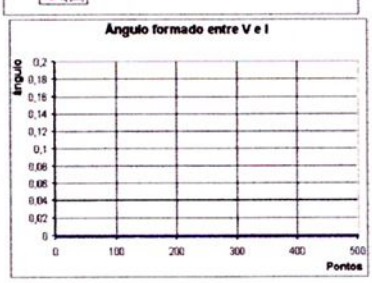


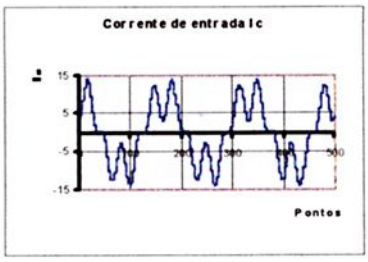




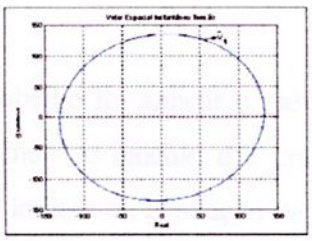


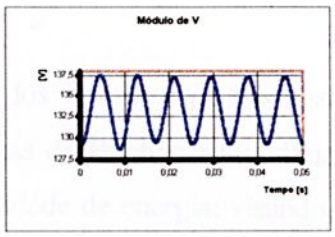
Ve = 94,70 V
Ie = 10,21 A
Se = 2901,70 VA
Pef = 2209,45 W
fp = 0,76
Ie comp = 9,71 A
Se comp = 2758,87 VA
fp comp = 0,80

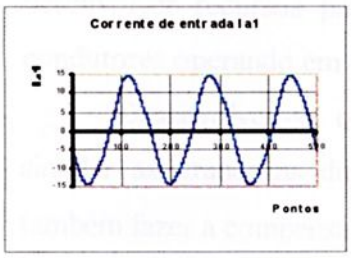


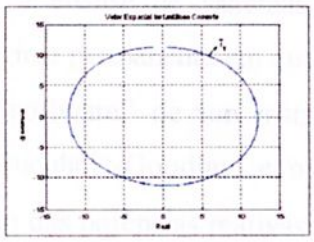


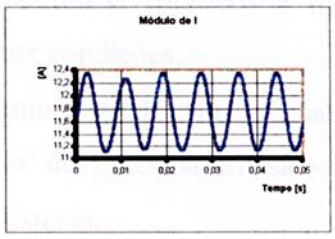
Depois da filtragem:

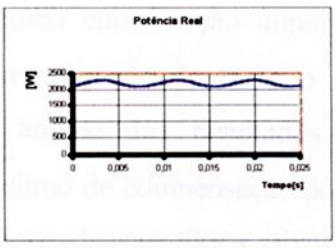


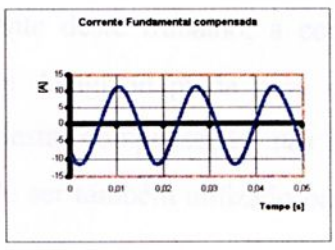


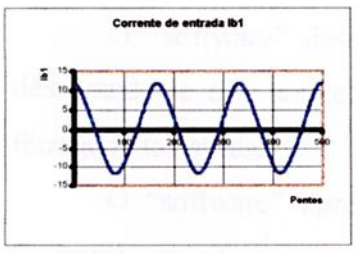


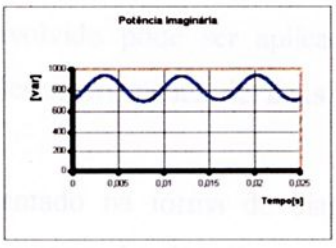




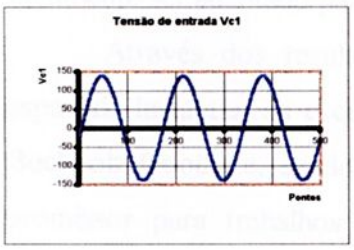


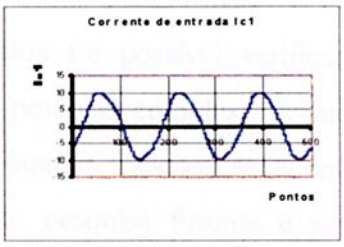






$V_{e1} = 94,69$ V
$I_{e1} = 8,83$ A
$S_{e1} = 2508,44$ VA
$P_{ef} = 2189,28$ W
$fp_{e1} = 0,87$
$I_{e_1\,comp} = 8,34$ A
$S_{e_1 comp} = 2369,37$ VA
$fp_{e_1\,comp} = 0,92$





VI- CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi aplicar o método dos vetores espaciais instantâneos e da potência complexa instantânea no cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue, do fator de potência trifásico e demais índices de avaliação de qualidade de energia; visando, desta forma, desenvolver recursos para a análise de sistemas de potência trifásicos a três ou quatro condutores operando em regime permanente em quaisquer condições.

Desenvolveu-se o "software" de um instrumento digital, com o qual foi possível simular as grandezas de Buchholz-Goodhue e o fator de potência trifásico. Foi possível também fazer a compensação das potências reativas do sistema.

Deve-se destacar, como contribuição importante deste trabalho, a compensação de potência reativa através da aplicação do método de Akagi adaptada para operação com variáveis complexas, e a análise dos resultados desta compensação nas grandezas de Buchholz-Goodhue. O algoritmo de compensação pode ser também utilizado para gerar sinais de referência para serem sintetizadas por filtros ativos.

O "software" desenvolvido pode ser aplicado em ambiente Labview de imediato, destacando-se que houve desenvolvimento de links entre as subrotinas do Labview para a filtragem dos sinais.

O "software" apresentado na forma de diagramas de blocos do Matlab pode ser facilmente ser adaptado para outras plataformas.

Através dos resultados foi possível verificar a validade da proposta dos vetores espaciais instantâneos e da potência complexa instantânea para o cálculo das grandezas de Buchholz-Goodhue, sendo que os mesmos se apresentam como um método alternativo e promissor para trabalhos de pesquisa futuros e para o desenvolvimento de sistemas de controle e monitoração de sistemas elétricos de potência.

Como sugestão para trabalhos futuros fica estender a pesquisa para situações de operação transitórias e projeto de relés digitais para monitoramento, controle e proteção de sistemas de potência.

VII- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] AKAGI, H. & KANAZAWA, Y. & NABAE, A. "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. IA-20, Nº 3, pp. 625-630, May / June 1984.

[2] MILANEZ, D. L. "A Potência Complexa Instantânea aplicada às Máquinas Elétricas Trifásicas", **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)**- Unicamp, Campinas, 102p., 1993.

[3] IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS 1459/2000, "Trial-Use for Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", 42p, 2000.

[4] MILANEZ, D. L. & EMANUEL, A. E., "The Instantaneous Space Phasors: A Powerful Diagnosis Tool". A paper recommended and approved by the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 52, Nº 1, February 143-148, 2003.

[5] NABAE, A. & TANAKA, T. A., New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits. A paper recommended and approved by the IEEE Power System Instrumentation & Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the 1996 IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996, Baltimore, MD.

[6] AREDES, M. & WATANABE, E. H., New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Powers Filters. A paper recommended and approved by the IEEE Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE/PES 1994 Summer Meeting, San Francisco, CA, July 24-28, 1994.

[7] PENELLO, L. F. & WATANABE, E. H. & AREDES, M., Filtro Ativo de Potência Tipo "Shunt" com Seleção da Potência a ser Compensada. In: Congresso Brasileiro de

Automática, 9° Anais da Sociedade Brasileira de Automática, Vitória, ES, pp. 786-791.

[8] WATANABE, E. H. & STEPHAN, R., "Novos Conceitos de Potência Ativa e Reativa em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas", 8° Congresso Brasileiro de Automática – UFPa – Belém, PA, pp. TC50 a TC60.

[9] WATANABE, E. H. & STEPHAN, R. & AREDES, M., "New Concepts of Instantaneous Active e Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads". A paper recommended and approved by the IEEE Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE/PES 1992 Winter Meeting, New York, January 23-30, 1992.

[10] EMANUEL, A.E. , "Apparent Power Definitions for Three-Phase Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.14, N.° 3, July 1995, pp. 1-13.

[11] MILANEZ, D.L. "Texto que Sistematiza as Atividades do Docente Apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP para a obtenção do Título de Livre Docente junto ao Departamento de Engenharia Elétrica", Dezembro de 2000, 66 pp.

[12] IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS, "Practical Definitions for Power Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Load", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, N°1 Jan. 1996, pp. 79-101.

[13] MILANEZ, D. L. & MISKULIN, M. S.- "The Instantaneous Complex Power Applied to Three-Phase Machines"- 28 IAS (IEEE) Annual Meeting- October 3-8, 1993, Toronto, Canada.", Annals, pp. 171-176.

[14] IVANOV-SMOLENSKI, A. V. Máquinas Elétricas – Máquinas de Corrente Alternada. Trad. RODRIGUEZ, L.. Moscou: Mir Publishers, 1984. Vol. 3, 440p. Original Russo.

[15] LEONHARD, W. 30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC-Drives, a Review (Part I). EPE Journal, Vol. 1, n.° 1, July 1991.

[16] LEONHARD, W. 30 Years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC-Drives, a Review (Part II). EPE Journal, Vol. 1, n.° 2, October 1991.

[17] EMANUEL, A. E. "The Buchholz-Goodhue Apparent Power Definition: The Practical Approach for Nonsinusoidal and Unbalanced Systems" – IEEE Power System Instrumentation & Measurements Committee, January 1996.

[18] EMANUEL, A. E. "Introduction to IEEE Trial-Use Standard 1459-2000" – Fellow, IEEE.

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br