



IV SBQEE

Porto Alegre/RS, 12 a-17 de agosto de 2001

Homepage: <http://www.ee.pucrs.br/~sbqee>



Avaliação de Diferentes Técnicas de Análise de Sistemas Eléctricos com Formas de Onda Não-Sinusoidais

Henrique J. Ribeiro da Silva *
Instituto Sup. Eng^a do Porto
henrique@dee.isep.ipp.pt

Júlio S. Martins
Universidade do Minho
jmartins@dei.uminho.pt

João L. Afonso
Universidade do Minho
lafonso@dei.uminho.pt

RESUMO

Uma das áreas de grande prioridade no âmbito das redes eléctricas tem sido a da filtragem ou compensação de harmónicos. Para além das técnicas clássicas de compensação usando filtros passivos, o avanço dos dispositivos de estado sólido tem vindo a afirmar a utilização de filtros activos, série e paralelos.

Este trabalho faz a análise e avaliação de alguns dos principais algoritmos – teoria p-q de *Akagi*, método FBD de *Depenbrock*, método do referencial síncrono ou da transformação de Park, método da tensão instantânea de *Staudt*, e método de decomposição de correntes de *Czarnecki* –, para análise de sistemas eléctricos com formas de onda não-sinusoidais.

Foram utilizados o *Matlab/Simulink* e *Power System Blockset* como ferramentas de simulação de sistemas eléctricos com um filtro activo controlado por esses métodos, fazendo-se a análise e comparação dos resultados obtidos.

Palavras-Chave: Qualidade de Energia Eléctrica, Filtros Activos, Compensação de Harmónicos, Correção de Factor de Potência, Simulações.

1 - INTRODUÇÃO

No início dos anos 70 sobrevieram dois acontecimentos que concorreram para a constante preocupação que desde então o conteúdo harmónico das redes eléctricas tem suscitado entre a comunidade electrotécnica: o embargo petrolífero, que teve como consequência a busca da eficiência energética; e o domínio da técnica de controle de velocidade de motores com dispositivos do estado sólido. A proliferação de cargas não-lineares, que desde então se tem verificado, tem conduzido ao aumento do conteúdo harmónico existente e consequentemente ao agravamento das perturbações da rede eléctrica.

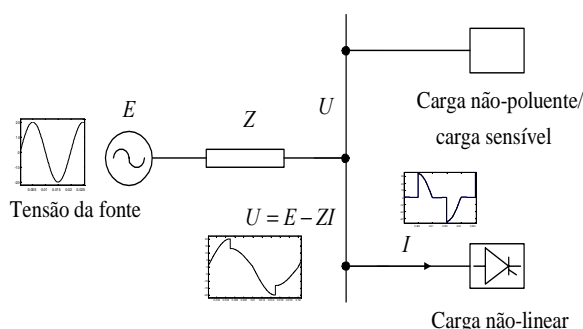


Fig.1 - Acção das cargas poluidoras sobre a qualidade da tensão.

Os efeitos negativos dos harmónicos podem ser integrados em duas categorias:

- Efeitos instantâneos e
- Efeitos de longa duração.

- Efeitos instantâneos:

Estes efeitos estão associados a falhas, mau funcionamento ou degradação do desempenho dos equipamentos ou dispositivos, sendo um dos motivos a perda de sincronismo por alteração da passagem por zero da onda de tensão. Os aparelhos de regulação, equipamentos electrónicos e computadores são particularmente sensíveis a estes tipos de problemas.

Elevadas amplitudes dos harmónicos com frequências próximas da frequência de controle podem perturbar o funcionamento de relés detectores de picos usados em grandes redes de energia para controle centralizado.

- Efeitos de longa duração

Estes efeitos são sobretudo de natureza térmica, originando perdas adicionais e sobreaquecimento, envelhecimento prematuro, e mesmo avaria de condensadores, máquinas rotativas e transformadores.

* Dept. Electrotecnia – Instituto Superior de Engenharia do Porto – 4200-072 Porto – Portugal
Tel.: +351 228340500 – Fax: +351 228321159

2 - NORMALIZAÇÃO

No âmbito da Comunidade Europeia, no sentido da harmonização da legislação sem a qual ficaria afectada a livre troca de bens e serviços, várias directivas foram publicadas tendentes a eliminar as diferenças na legislação desses Estados.

Uma dessas directivas é a Directiva de Conselho nº 85/374 sobre responsabilidade por produtos defeituosos. O seu Artº 2º define a electricidade como um produto, e como tal tornou-se necessário definir as suas características, resultando a norma europeia EN 50160.

2.1 – NE/EN 50160

“Características da Tensão Fornecida pelas Redes Públicas de Distribuição” – Esta norma, publicada pelo CENÉLEC (Comité Europeu de Normalização Electrotécnica), define, no ponto de fornecimento ao consumidor, as características principais da tensão para as redes públicas de abastecimento de energia em Baixa Tensão e Média Tensão [1].

Tab. 1 - Valores das tensões harmónicas nos pontos de fornecimento até à ordem 25, expressas em percentagem da tensão nominal U_N .

Harmónicos ímpares				Harmónicos pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Nota: Os valores correspondentes aos harmónicos de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicados nesta tabela

Além disso, a taxa total de distorção harmónica da tensão fornecida (até à ordem 40) não deverá ultrapassar 8%.

2.2 - CEI/IEC 61000

A série 61000 de normas CEI (Comissão Electrotécnica Internacional) [2-4] diz respeito à compatibilidade electromagnética e compreende as seguintes partes:

1 - Generalidades - Considerações gerais, definições, terminologia, etc: 61000-1-x.

2 - Ambiente - Descrição do ambiente, características do ambiente onde vai ser instalado o equipamento, níveis de compatibilidade: 61000-2-x.

3 - Limites - Limites de emissão, definindo os níveis de perturbação permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica, limites de imunidade: 61000-3-x.

4 - Ensaio e medidas - Técnicas de medida e técnicas de ensaio de modo a assegurar a conformidade com as outras partes da norma: 61000-4-x

5 - Guias de instalação e de atenuação - Providencia guias para a aplicação em equipamentos, tais como filtros, equipamentos de compensação, descarregadores de sobretensões, etc, para resolver problemas de qualidade da energia: 61000-5-x.

6 - Normas gerais e de produto - Definem os níveis de imunidade requeridos pelos equipamentos em geral ou para tipos específicos de equipamentos: 61000-6-x.

Tab. 2 - Níveis de compatibilidade para as tensões harmónicas individuais em redes públicas de BT.

Harmónicos ímpares não múltiplos de 3		Harmónicos ímpares múltiplos de 3		Harmónicos pares	
Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 0,5 x 25/n				

Tab. 3 Níveis de compatibilidade para harmónicos

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção harmónica total	5%	8%	10%

Classe 1 - Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede eléctrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos

de automação e de protecção, certos computadores, etc.

Classe 2 - Esta classe aplica-se aos PAC (Ponto de Acoplamento Comum à rede pública) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.

Classe 3 - Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Por exemplo, esta classe deve ser considerada quando uma das seguintes condições é satisfeita:

- a maior parte das cargas são alimentadas através de conversores;
- existem máquinas de soldar;
- ocorrem arranques (partidas) frequentes de motores de grande potência;
- as cargas variam rapidamente.

2.3 - ANSI/IEEE 519 – 1992

De acordo com esta norma, presentemente em revisão, as empresas distribuidoras são responsáveis pela manutenção da qualidade da tensão em todos os seus sistemas [5].

A norma estipula os limites de distorção para os diferentes níveis de tensão a observar nas redes eléctricas:

Tab. 4 - Limites máximos de distorção.

Tensão nominal no PAC U_n	Distorção harmónica individual (%)	Distorção harmónica total (%)
$U_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV < $U_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$U_n > 161$ kV	1,0	1,5

3 - FILTROS ACTIVOS

Os filtros activos são equipamentos especiais que utilizam conversores estáticos para gerar correntes ou tensões que permitam compensar os harmónicos produzidos pelas cargas não-lineares, ou que impeçam que tensões harmónicas sejam aplicadas às cargas sensíveis.

3.1 - Classificação dos Métodos de Controle

Os métodos de controle dos filtros activos têm um grande impacto quer na obtenção dos objectivos de compensação quer ainda na fixação da potência do filtro e no comportamento do

mesmo nos regimes transitório e estacionário. Basicamente, as diferentes abordagens quanto a extrair as correntes ou tensões de compensação das grandezas distorcidas medidas podem ser agrupadas em duas classes de técnicas:

- análise no domínio da frequência e
- análise no domínio do tempo.

A abordagem no domínio da frequência envolve a utilização da transformada de Fourier e da sua análise enquanto que no domínio do tempo são usados os conceitos tradicionais de análise de circuitos e as transformações algébricas associadas a mudanças de sistemas referenciais.

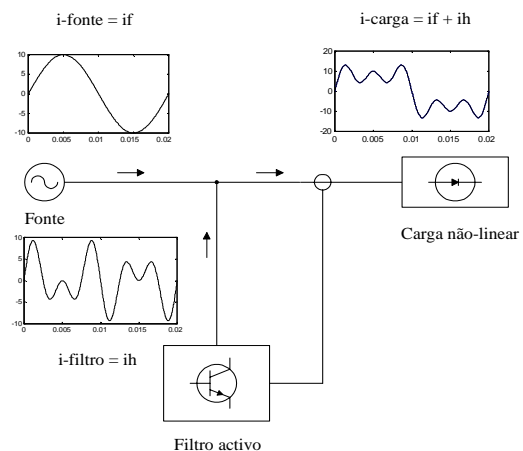


Fig.2 - Princípio de acção do filtro activo.

3.2 - Potência trifásica instantânea

A potência trifásica instantânea entregue por uma fonte a uma carga tem por expressão:

$$p_3(t) = v_a(t) \cdot i_a(t) + v_b(t) \cdot i_b(t) + v_c(t) \cdot i_c(t) \quad (1)$$

em que $v_a(t)$, $v_b(t)$, $v_c(t)$ representam as tensões da carga em relação ao neutro, e $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ as correntes na carga. No entanto, para as tensões dadas, não existe somente um conjunto de correntes de linha produzindo a mesma potência trifásica instantânea. Logo, coloca-se a seguinte questão: qual o conjunto óptimo de correntes para uma dada potência instantânea? Uma possível resposta é o conjunto de correntes que minimiza as perdas na linha:

$$P_{perdas}(t) = R_a \cdot i_a(t)^2 + R_b \cdot i_b(t)^2 + R_c \cdot i_c(t)^2 \quad (2)$$

onde R_a , R_b , R_c representam as resistências da linha trifásica.

Por outro lado é sabido que para um sistema sinusoidal equilibrado (balanceado) em tensões e correntes a potência instantânea é constante e, como tal, igual à potência activa já que este valor corresponde ao valor médio da potência

instantânea. Logo, o melhor conjunto de correntes pode ser aquele que conduz a um valor constante de potência instantânea trifásica.

4 - ANÁLISE DE ALGUNS MÉTODOS DE CONTROLE DE FILTROS ACTIVOS

4.1 - Teoria p-q

A teoria p-q ou teoria da potência instantânea foi proposta pelo *Prof. Horofumi Akagi, da Universidade de Okayama, Japão* [6, 7]. Esta teoria apresenta as seguintes potências:

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (\text{potência instantânea de seqüência zero}) \quad (3)$$

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (\text{potência real instantânea}) \quad (4)$$

$$q \equiv v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (\text{potência imaginária instantânea}) \quad (5)$$

- por definição

em que as grandezas de índices 0 , α e β correspondem às tensões e correntes originais após transformação de Concordia ou de Clarke Normalizada, segundo a seguinte equação matricial, para as tensões e correntes da carga:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

As transformações algébricas como as de Fortescue, Concordia ou Park são muito usadas na análise de circuitos trifásicos devido a várias propriedades interessantes, como sejam a da invariância da potência instantânea e a de, para certas matrizes de impedâncias (matrizes circulantes), produzirem desacoplamento entre componentes (fases).

As potências p_0 , p e q são grandezas em geral variáveis com o tempo e como tal podem considerar-se como a soma de dois termos - um constante e outro alternado.

Com este método de compensação pretende-se que a fonte forneça apenas o valor médio da potência real instantânea (\bar{p}), e que o filtro activo forneça à carga a potência imaginária instantânea (q), a potência de seqüência zero (p_0) e a parte alternada da potência real instantânea (\tilde{p}). As correntes nas coordenadas 0 , α e β a serem produzidas pelo filtro para a compensação dessas potências podem ser obtidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} i_{c0} &= i_0 \\ i_{c\alpha} &= i_\alpha - i_{s\alpha} \\ i_{c\beta} &= i_\beta - i_{s\beta} \end{aligned} \quad (8)$$

onde $i_{s\alpha}$ e $i_{s\beta}$ correspondem às correntes na fonte nas coordenadas α - β quando a fonte apenas entrega uma potência constante ($\bar{p} + \bar{p}_0$) ao conjunto constituído pela carga e filtro activo.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{p} + \bar{p}_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

A compensação do valor médio da potência de seqüência zero (\bar{p}_0) da forma aqui apresentada foi proposta pelo *Prof. Watanabe* [8] e pelo *Prof. Aredes* [9], da *Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil*.

Através do inverso de (7) obtém-se as correntes de compensação nas fases a , b , c , e posteriormente no neutro:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$i_{cn}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*)$$

4.2 - Método FBD

O método FBD (Fryse-Buchholz-Depenbrock), foi proposta pelo *Prof. Manfred Depenbrock, da Universidade de Bochum, Alemanha*, [10]. Este método decompõe as correntes que alimentam uma carga em componentes potentes (*power currents*) e não-potentes (*powerless currents*). O objectivo é compensar integralmente as correntes que não produzem potência mas que são responsáveis por que o factor de potência seja menor que a unidade. Para tal o método propõe-se a determinar uma condutância equivalente da carga dada pela relação entre a potência média consumida e o quadrado da tensão eficaz colectiva:

$$G = \frac{\bar{P}_\Sigma}{V_\Sigma^2} \quad (11)$$

onde \bar{P}_Σ é o valor médio da potência colectiva instantânea, isto é, corresponde à potência activa trifásica para um sistema de três fases. V_Σ é a tensão eficaz colectiva definida do seguinte modo para um sistema trifásico:

$$V_\Sigma = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \quad (12)$$

onde V_a , V_b , V_c são os valores eficazes das tensões nas fases a , b e c .

As correntes de compensação para as 3 fases são dadas por:

$$\begin{aligned} i_{ca}(t) &= G \cdot v_a(t) - i_a(t) \\ i_{cb}(t) &= G \cdot v_b(t) - i_b(t) \\ i_{cc}(t) &= G \cdot v_c(t) - i_c(t) \end{aligned} \quad (13)$$

4.3 - Método do Referencial Síncrono (Park)

Este método faz uso da transformação de Park, sendo utilizado, entre outros, pelo *Prof. Gil Marques, da Universidade Técnica de Lisboa, Portugal* [11]. As componentes de Park de um sistema trifásico de correntes, por exemplo, podem determinar-se mediante a aplicação da transformada de Clarke, que faz passar um sistema de três correntes i_a , i_b e i_c para um sistema de duas coordenadas i_α e i_β e posteriormente, por rotação do sistema referencial de um ângulo θ , para as componentes de Park i_d e i_q . No caso de existir uma componente homopolar (de seqüência zero), esta virá representada ao longo de um terceiro eixo ortogonal ao plano de d - q e de valor dado pela transformação:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Com esta transformação obtém-se o termo fundamental da corrente na porção contínua das componentes d e q transformadas. Esta pode ser extraída, por exemplo, mediante a utilização de filtros passa-baixo.

A potência instantânea é dada pela expressão:

$$p(t) = v_0 \cdot i_0 + v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q \quad (15)$$

Com vista a minimizar as perdas na linha define-se uma potência reactiva instantânea que é necessário compensar:

$$\vec{q}(t) = \begin{bmatrix} v_q \cdot i_0 - v_0 \cdot i_q \\ v_0 \cdot i_d - v_d \cdot i_0 \\ v_d \cdot i_q - v_q \cdot i_d \end{bmatrix} \quad (16)$$

A natureza vectorial desta expressão obriga a que todos os seus termos tenham de tornar-se nulos caso se pretenda compensar toda a potência reactiva instantânea:

$$\vec{q}(t) = \vec{0} \Rightarrow \begin{aligned} v_q \cdot i_0 - v_0 \cdot i_q &= 0 \\ v_0 \cdot i_d - v_d \cdot i_0 &= 0 \\ v_d \cdot i_q - v_q \cdot i_d &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

4.4 – Método de Staudt

Ao contrário dos métodos anteriormente vistos, o proposto pelo *Prof. Volker Staudt, da Universidade de Bochum, Alemanha* [12] recorre à transformada de Fourier para extrair a componente fundamental da tensão da carga. Costuma aparecer referido como método da corrente instantânea quando aplicado à compensação de correntes.

O princípio algorítmico consiste de duas partes:

- 1ª - manter a tensão a montante (no PAC) do filtro activo (do tipo série) sinusoidal – considerando o caso da tensão da fonte ser de componente fundamental a corrente ministrada é o quociente da diferença entre as tensões da fonte e a montante (no PAC) pela impedância equivalente da fonte, logo sinusoidal;
- 2ª - gerar uma tensão de frequência fundamental para compensar a potência reactiva associada a essa ordem.

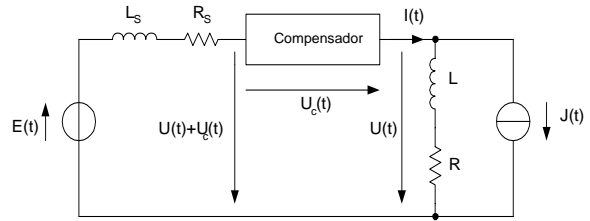


Fig. 3 - Estrutura do filtro activo série e tensões de interesse.

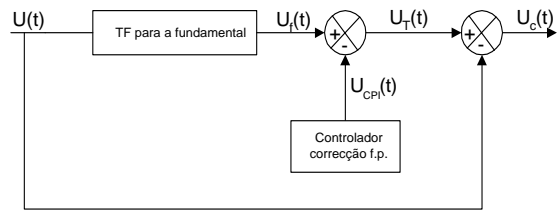


Fig. 4 - Estrutura do algoritmo de Staudt.

4.5 - Método de Czarnecki

O método de decomposição de correntes sugerido pelo *Prof. Leszek Czarnecki, da Universidade Estadual de Louisiana, E.U.A.*, é em muitos aspectos semelhante ao método FBD, embora sendo tratado no domínio da frequência [13]. A corrente i de um circuito alimentado com tensão v é decomposta em três parcelas mutuamente ortogonais:

$$i = i_a + i_s + i_r \quad (18)$$

em que i_a é a componente activa da corrente; i_s , a componente dispersa (*scattered*), e i_r , a componente reactiva. Para circuitos trifásicos ainda se define uma componente desequilibrada (desbalanceada). A diferença entre as correntes i e i_a define a componente i_{na} , não-activa, passível de compensação.

Assim como para o método FBD, a carga é representada por uma condutância equivalente (G_e), dada pelo quociente entre a potência activa (média) consumida (P) e o quadrado da tensão eficaz (da fase ou colectiva, consoante os casos):

$$i_a = G_e \cdot v \quad G_e = \frac{P}{V^2} \quad (19)$$

As correntes dispersas e reactivas têm as seguintes equações de definição:

$$i_s = (G_0 - G_e)U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (G_n - G_e)U_n e^{jn\omega_1 t}$$

$$i_r = \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} j B_n U_n e^{jn\omega_1 t} \quad (20)$$

O circuito equivalente é representado na Fig.5, para uma rede monofásica, onde as tensões de expoente c correspondem aos complementos para a tensão de alimentação dos termos contínuos, de 1ª ordem, e assim por diante.

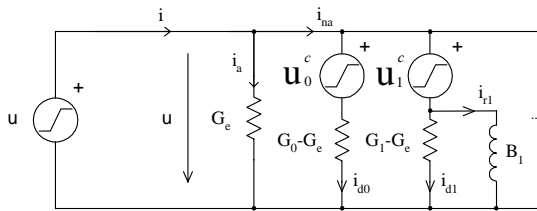


Fig. 5 Circuito monofásico equivalente para o método Czarnecki.

5 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

No intuito de avaliar o desempenho dos 3 principais métodos aqui apresentados para o controle de filtros activos (teoria p-q, método FBD, e método do referencial síncrono - Park), realizaram-se várias simulações com diferentes situações de carga e tensão de alimentação.

Utilizou-se o *Matlab/Simulink* e *Power System Blockset* [14] para implementar um sistema eléctrico constituído por fonte de alimentação (com impedância de linha), filtro activo paralelo e carga. Esse sistema é representado na figura seguinte:

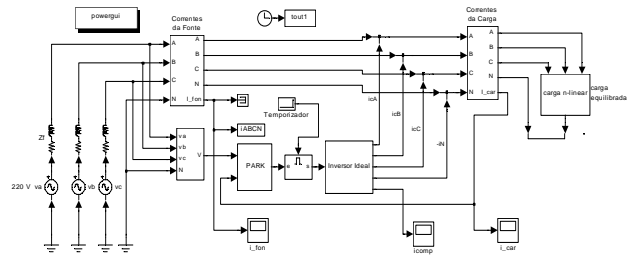


Fig. 6 Sistema eléctrico simulado.

5.1 - Carga equilibrada e fonte sinusoidal

Para esta situação usou-se uma carga com o seguinte espectro de correntes:

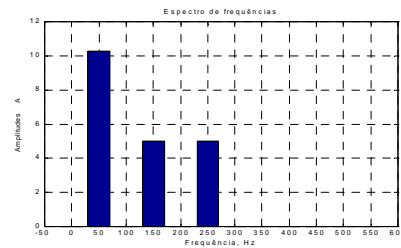


Fig. 7 - Espectro das correntes na carga (equilibrada).

As correntes da fonte, após compensação, para teoria p-q, método FBD e método Park apresentaram os seguintes espectros:

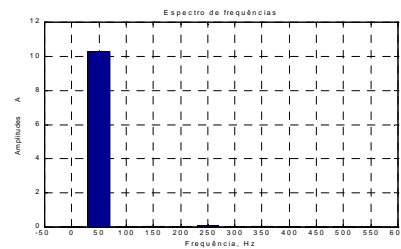


Fig. 8 - Corrente da fonte (compensada): teoria p-q.

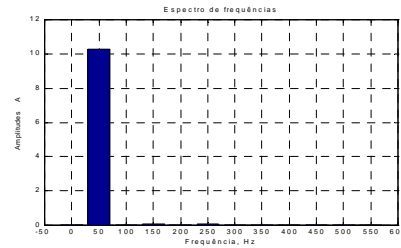


Fig. 9 - Corrente da fonte (compensada), método FBD.

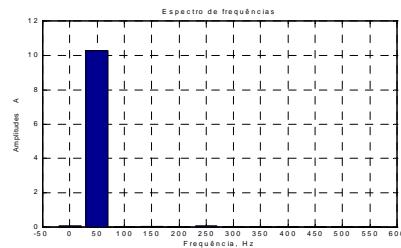


Fig. 10 - Corrente da fonte (compensada): método Park.

Para este caso os 3 métodos apresentam resultados semelhantes, compensando os harmônicos de corrente e tornando as correntes sinusoidais na fonte.

5.2 - Carga desequilibrada e fonte simétrica sinusoidal

Neste caso, usou-se uma carga trifásica desequilibrada, que consome as correntes mostradas na Fig. 11 (correntes nas 3 fases e neutro). As correntes nas fases *b* e *c* são sinusoidais, mas a corrente na fase *a* apresenta 3º harmônico, para além da componente fundamental, conforme é ilustrado na Fig. 12.

Pela análise dos resultados apresentados nas figuras 13 a 18, conclui-se que, ainda para este caso os 3 métodos de controle apresentam resultados idênticos: as correntes na fonte passam a ser todas sinusoidais e ficam em fase com as tensões de cada fase. A corrente no neutro é tornada nula.

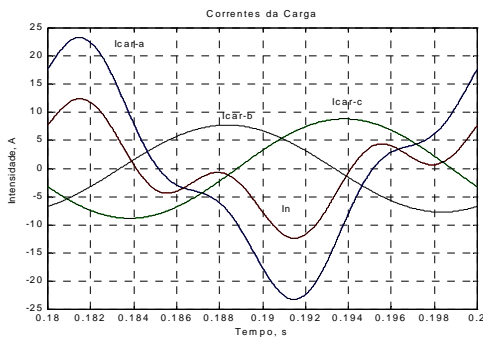


Fig. 11 - Correntes da carga desequilibrada (3 fases e neutro).

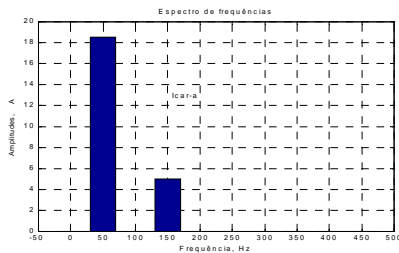


Fig. 12 - Espectro da corrente na fase *a* da carga.

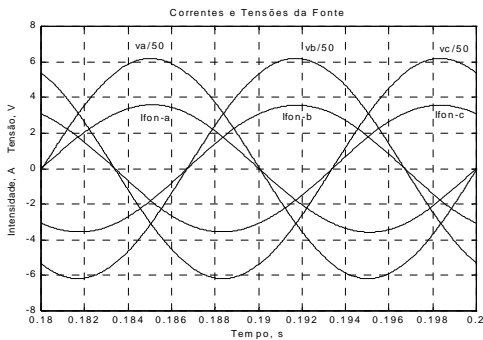


Fig. 13 - Correntes e tensões da fonte após compensação: teoria p-q.

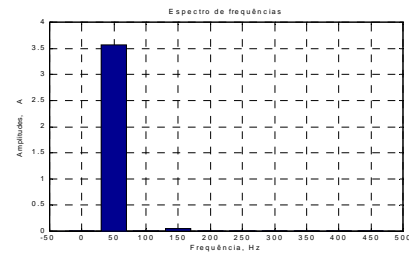


Fig. 14 - Espectro da corrente na fase *a* da fonte: teoria p-q.

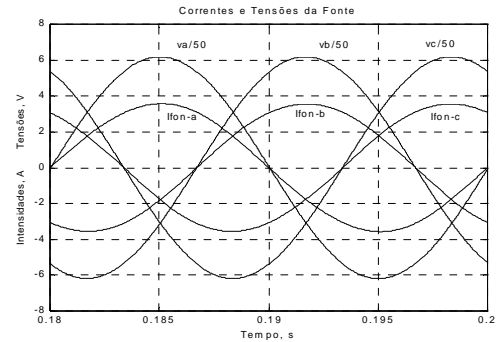


Fig. 15 - Correntes e tensões da fonte após compensação: método FBD.

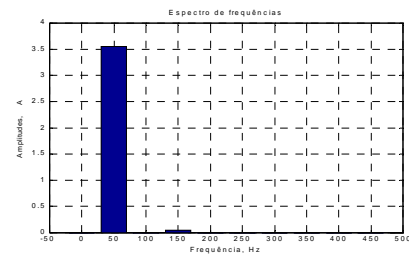


Fig. 16 - Espectro da corrente na fase *a* da fonte: mét. FBD.

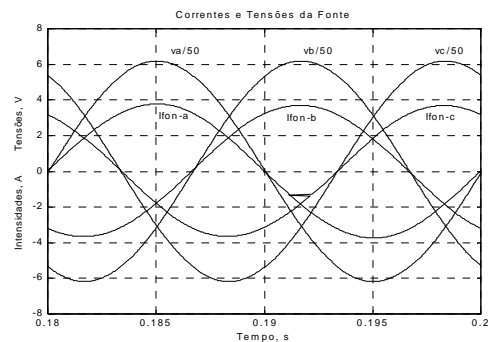


Fig. 17 - Correntes e tensões da fonte após compensação: método Park.

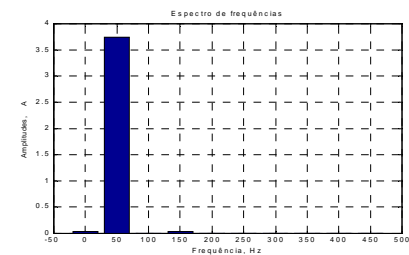


Fig. 18 - Espectro da corrente na fase *a* da fonte: mét. Park.

5.3 - Carga desequilibrada e fonte assimétrica sinusoidal

Para esta situação introduziu-se na tensão da fonte uma componente inversa (sequência negativa) de 70 V eficazes. As correntes nas 3 fases da carga são mostradas na figura seguinte:

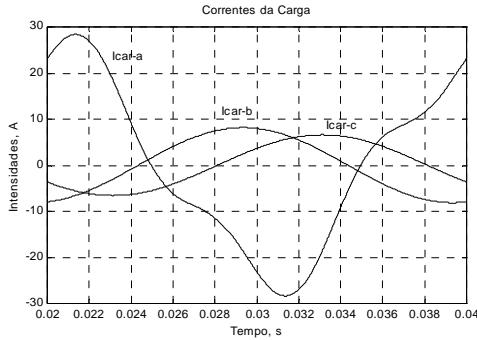


Fig. 19 - Correntes nas 3 fases da carga.

Na sua forma original, o objectivo da teoria $p-q$ é fazer com que a fonte forneça potência constante. Isso pode ser visto na Fig. 20: a partir do momento em que o filtro activo é ligado, em $t=0,04$ s, a potência na fonte torna-se praticamente constante.

Contudo, quando o sistema de tensões não é simétrico (e/ou sinusoidal), as correntes fornecidas não serão sinusoidais, conforme se observa na Fig. 21. É fisicamente impossível obter simultaneamente correntes sinusoidais e potência constante na fonte para o caso em que as tensões não sejam simétricas e sinusoidais. Observa-se, porém, que as correntes na fonte passam a ser equilibradas, apesar de distorcidas, tornando nula a corrente no neutro da fonte.

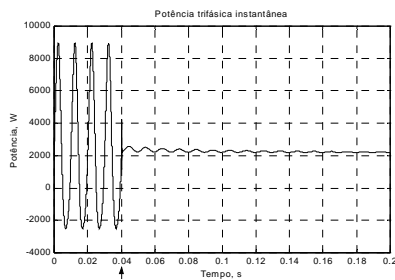


Fig. 20 - Evolução da potência na fonte: teoria $p-q$.

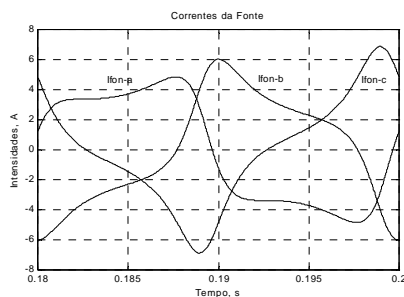


Fig. 21 - Correntes da fonte após compensação: teoria $p-q$.

Quando é aplicado o método FBD, o facto do seu algoritmo representar a carga como uma condutância faz com que as correntes ministradas pela fonte reproduzam as tensões respectivas, pelo que se consegue factor de potência unitário, mas não equilíbrio de correntes (ver Fig. 22). Sendo as tensões na fonte sinusoidais, as correntes na fonte após compensação também serão sinusoidais.

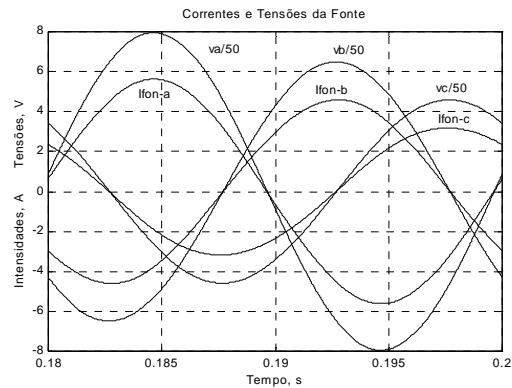


Fig. 22 - Correntes e tensões da fonte após compensação: método FBD.

Como é possível observar pelas próximas figuras (Fig. 23 e Fig. 24) o método do referencial síncrono (Park) apresenta a característica interessante de fazer com que as correntes na fonte tornem-se praticamente sinusoidais e equilibradas, apesar da assimetria das tensões de alimentação.

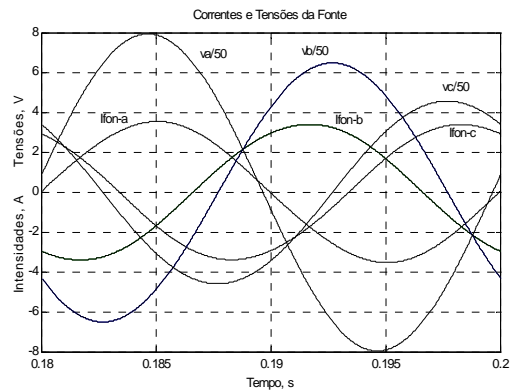


Fig. 23 - Correntes e tensões da fonte após compensação: método Park.

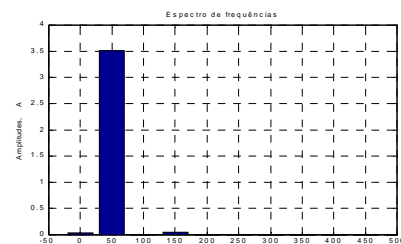


Fig. 24 - Espectro da corrente na fase a da fonte após compensação: método Park.

5.4 - Outros Métodos

5.4.1 - Método Czarnecki

Como já mencionado, este método assemelha-se ao FBD ao representar a carga como uma condutância. O seu interesse é meramente teórico. Com a individualização das correntes dispersa e reactiva é possível projectar filtros passivos – paralelo, para compensar a corrente reactiva e série, para compensar a corrente dispersa.

5.4.2 - Método Staudt

Com a algoritmia proposta por Staudt é possível obstar certos problemas de instabilidade que ocorrem no método FBD quando se pretende controlar cargas activas, isto é, quando a resistência (condutância) calculada por este método se torna negativa. O seu desempenho dinâmico não é tão bom quanto o do método FBD.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo referiu-se a problemática da existência de harmónicos na rede e seus prejuízos, bem como a legislação que define seus valores máximos permitidos. Chamou-se a atenção para novos tipos de dispositivos, baseados na electrónica de potência, e utilizados para compensar harmónicos nas redes eléctricas: os filtros activos. Foram ainda feitas comparações entre alguns métodos de controle desses filtros activos.

A comparação entre os 3 métodos mais importantes para o controle dos filtros activos (teoria p-q, método FBD e método Park) permite as seguintes conclusões:

- Para operação com tensão trifásica simétrica e sinusoidal, com quaisquer tipos de carga, os resultados obtidos são totalmente satisfatórios, e semelhantes para os 3 métodos: as correntes na fonte tornam-se sinusoidais e equilibradas.
- Para operação com tensão trifásica sinusoidal, mas assimétrica, os 3 métodos respondem de modo diferente: para a teoria p-q (em sua forma original) após compensação a potência na fonte torna-se constante, mas as correntes da fonte passam a conter harmónicos (embora se tornem equilibradas – a corrente no neutro da fonte desaparece); para o método FBD as correntes na fonte tornam-se praticamente sinusoidais, mas desequilibradas; já para o método Park as correntes na fonte passam a ser praticamente sinusoidais e equilibradas.

Conclui-se assim que o método Park apresenta melhor resposta para a situação em que as tensões do sistema são desequilibradas. Contudo, em termos de implementação, o método Park é algo mais complexo, uma vez que obriga a utilização de um sistema de sincronização (obtido, por exemplo através de um PLL – *phase-locked loop*).

Estes 3 métodos utilizados no controle de filtros activos, embora apresentando abordagens diferentes, podem ser vistos como casos particulares de uma teoria mais geral [15].

Nota: A teoria p-q permite uma estratégia de controle (não descrita neste artigo) que leva a obtenção de correntes sinusoidais e equilibradas na fonte, mesmo em casos onde a tensão trifásica não seja simétrica ou mesmo sinusoidal. Nesse caso, contudo, a potência na fonte após compensação não mais será constante [16].

A teoria p-q permite ainda uma implementação bastante simples em termos de cálculos, possibilitando a utilização de microcontroladores *standard* na implementação do sistema de controle do filtro activo [17, 18].

REFERÊNCIAS

- [1] CENELEC NE/EN 50160: Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Nov. 1994.
- [2] CEI/IEC 61000-2-1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems, 1st. Ed. 1990-05.
- [3] CEI/IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, 1st. Ed. 1990-05.
- [4] CEI/IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, 1st. Ed. 1994-02.
- [5] IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- [6] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, *IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.

- [7] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Trans. Industry Applic.*, vol. 20, May/June 1984.
- [8] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes, New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, no. 2, April 1993, pp. 697-703.
- [9] M. Aredes, E. H. Watanabe, New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 10, no. 3, July 1995, pp. 1649-1656.
- [10] Depenbrock, M., Skudelny, H., Dynamic Compensation of Non-Active Power Using the FBD-Method – Basic Properties Demonstrated by Benchmark Examples, *ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng.*, vol. 4, no. 5, Sept/Oct 1994, pp. 381-388.
- [11] G. D. Marques, "A Comparison of Active Power Filter Control Methods in Unbalanced and Non-sinusoidal Conditions", *IESC, IECON'98, Ago.- Set.*, pp. 444-449.
- [12] V. Staudt, "An Example for Dynamic Compensation of Non-Active Power in the Case of Non-Linear Active Loads", *ETEP*, vol. 6, n. 5, 1996, pp. 345-350.
- [13] L. Czarnecki, "Scattered and Reactive Current, Voltage and Power in Circuits with Non-sinusoidal Waveforms and Their Compensation", *IEEE TIM*, vol 40, N° 3, Jun/91.
- [14] Power System Blockset User's Guide - For Use with Simulink, version 1, TEQSIM International, Hydro-Québec and The MathWorks, Jan. 1998.
- [15] Willems J L – Critical Analysis of the Concepts of Instantaneous Power Current and of Active Current. *ETEP* vol 8, N° 4, Jul/Ago/98.
- [16] J. Afonso, C. Couto and J. Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory", *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, n° 3, Set. 2000, pp. 5-10.
- [17] J. Afonso, "Filtro Ativo Paralelo com Controle Digital para a Melhoria da Qualidade de Energia Eléctrica", Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2000.
- [18] J. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe e J. Martins, "Shunt Active Filter for Power Quality Improvement", *Conference UIE 2000, Lisboa, 2000*, pp. 683- 691.