

*Instituto de Eletrônica de Potência, Departamento de Engenharia elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina*

*Caixa Postal: 5119 | Cep: 88040-970 Florianópolis, SC, Brasil  
Emails: aniel@inep.ufsc.br, ivobarbi@inep.ufsc.br*

**Abstract** — This paper presents a three-phase four-wire active filter applied as a power redistributor to compensate power unbalance among the phases of the distribution transformer. It provides the compensation of the fundamental negative sequence component, harmonic and neutral currents, implying the improvement of power quality indexes and reliability of the distribution power system.

**Keywords** — Active filters, Power Redistribution, Park and Clarke transformation, p-q theory, instantaneous active and reactive currents.

**Resumo** — Este artigo propõe a aplicação de um conversor trifásico a quatro-fios como redistribuidor de potência para a compensação de desequilíbrios de potência entre fases de transformadores de distribuição. Promovendo a compensação de componentes de seqüência negativa, correntes harmônicas e de neutro, tendo como reflexo o aumento dos índices de qualidade e confiabilidade da energia distribuída.

**Palavras-chave** — Filtros ativos, Redistribuidor de potência, Transformadas de Park e Clarke, Teoria p-q, correntes ativas e reativas instantâneas.

## 1 Introdução

O setor de distribuição de energia elétrica busca a qualidade de seus serviços, ou seja, visa atender às normas de qualidade exigidas pelo órgão regulador, com o menor custo possível para as concessionárias (Knolseisen, A. B., 2001).

Grande parte dos custos totais da energia deriva dos recursos dispensados à distribuição, seja devido à necessidade de expansão do mercado consumidor, substituição de partes antigas da rede, manutenção dos equipamentos ou perdas nos mesmos. Assim, a melhoria da eficiência deste setor é de considerável importância econômica (Knolseisen, A. B., 2001, CHEN, T. H.; CHERNG, J. T., 2000).

O sistema de distribuição possui natureza dinâmica, a demanda da carga não é constante no tempo e o carregamento das fases é assimétrico. Estes fatos tornam o planejamento da expansão essencial para assegurar que as contínuas mudanças de padrão de demanda e fator de utilização dos equipamentos sejam satisfeitas pelos sistemas adicionais ou modificados, que obedecem a metas de qualidade claramente definidas.

A aplicação de compensadores estáticos no sistema de energia elétrico é uma prática que se intensificou com o desenvolvimento dos filtros ativos trifásicos. O princípio básico foi proposto na década de 70, mas se popularizou na década de 80 com o trabalho de Akagi e Nabae (Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., 1984).

Em sistemas de distribuição, pode-se citar a aplicação dos DSTATCOMs (Distribution Static Synchronous Compensators), DVRs (Dynamic Voltage Restorer) e UPQCs (Unified Power Quality Conditioner), (Ghosh, A., Ledwich, G., 2003, Ghosh, A., Joshi, A., 2004).

Este trabalho tem como objetivo propor um equipamento que não compensará reativos, visto que a potência necessária seria demasiadamente elevada, o termo “redistribuidor” será empregado durante o trabalho, uma vez que o principal objetivo do conversor é redistribuir e equilibrar o fluxo de potência complexa fornecida pelo sistema ao transformador de distribuição.

Como vantagens desta proposta, pode-se citar (Knolseisen, A. B., 2001):

- Postergação dos investimentos, sendo este um dos principais benefícios para a concessionária;
- Redução das perdas elétricas devido à eliminação de correntes de neutro dos transformadores;
- Equilíbrio das quedas de tensão no enrolamento secundário dos transformadores;
- Aumento da capacidade de atendimento ao consumidor, em função do melhor fator de utilização dos equipamentos;
- Aumento da confiabilidade e qualidade do atendimento, advindo das vantagens anteriormente citadas.

O trabalho possui também como objetivo fomentar a discussão da aplicação da eletrônica de po-

tência como ferramenta de auxílio à solução de problemas do sistema de distribuição e de ações híbridas entre equipamentos convencionais e eletrônicos, aliando as vantagens de cada um destes.

## 2 Conceito de Redistribuição de Potência

A proposta deste trabalho é apresentar um equipamento capaz de proporcionar a redistribuição da potência entre as fases de um sistema de forma dinâmica (Chen, Z., 2000). Para tanto, há a necessidade de uma melhor explanação a respeito dos conceitos envolvidos.

Na Figura 1 é ilustrado um sistema alimentando cargas desbalanceadas, enfatizando a redistribuição de potência entre as fases devido à transferência de potência complexa.

Os valores das impedâncias de carga foram determinados de forma arbitrária. As impedâncias do filtro (Z) foram calculadas para compensarem os desequilíbrios da carga. Os elementos capacitivos e indutivos compensam a potência reativa, e os resistivos compensam as potências ativas.

Deve-se observar que no terceiro ramo do filtro (Z) da Figura 1 a resistência RA3 é positiva e, portanto, dissipa energia do sistema. Entretanto, resistências RA1 e RA2 são negativas, comportando-se como fontes de tensão controladas por corrente. Considerando um “acoplamento” fictício entre as resistências, o qual possibilita a transferência de energia entre as mesmas, a resultante de energia ativa no filtro é nula. Esta consideração possui apenas caráter didático e visa a uma melhor compreensão do conceito de redistribuição de potência.

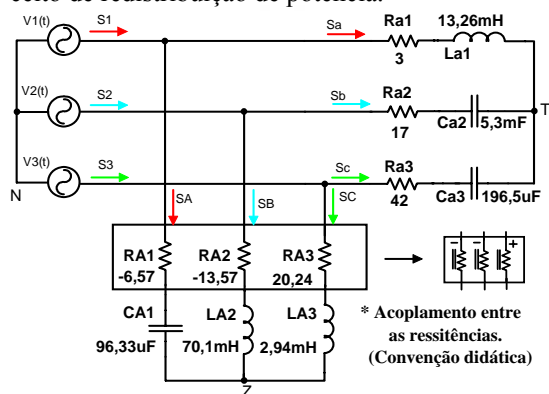


Figura 1 - Cargas desbalanceadas enfatizando a redistribuição de potência entre as fases devido à transferência de potência ativa.

Uma analogia interessante pode ser obtida entre a atuação de um filtro ativo quando processa potências ativas entre as fases e o “acoplamento resistivo” definido acima. Quando o filtro ativo compensa desequilíbrios de cargas, ele deve equilibrar o sistema transferindo energia de uma fase à outra. Durante este processo, a energia é armazenada no capacitor de saída através de um dos ramos de entrada. Em seguida, é drenada do capacitor por outro ramo.

A Fig. 2 apresenta as formas de onda obtidas no exemplo da Fig. 1 para as correntes nas três fases, considerando tensões equilibradas, sendo que o equilíbrio das potências pode ser obtido indiretamente através das correntes.

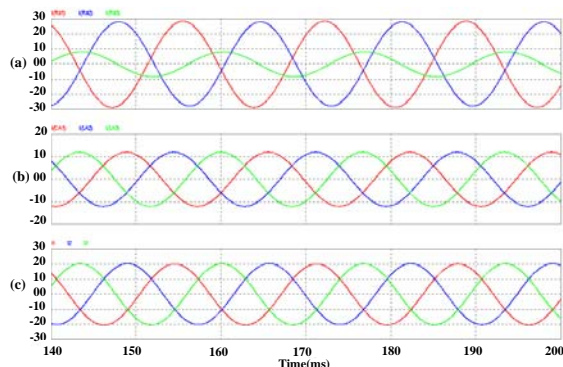


Figura 2 - Formas de onda das correntes nas três fases para: (a) Carga, (b) Filtro passivo e (c) Entrada.

Na Fig. 3 são apresentadas as potências instantâneas trifásicas (Aredes, M., 1996). A Fig. 3 (a) corresponde às potências da carga, em que o desequilíbrio provoca o surgimento de componentes de sequência negativa (parcela oscilatória) tanto na potência ativa trifásica instantânea como na potência imaginária instantânea. Para que o filtro equilibre o sistema, este deverá compensar a parcela oscilatória das duas potências, o que se observa na Fig. 3 (b). Na Fig. 3 (c) visualizam-se as potências instantâneas de entrada que conforme desejado, possuem valores constantes.



Figura 3 - Potências instantâneas trifásicas. (a) Carga, (b) filtro e (c) entrada.

## 3 Desvio Padrão do Desbalanço de Potência

O balanceamento da potência complexa total é baseado no equilíbrio da potência complexa em cada uma das fases do transformador de distribuição trifásico. Conforme é apresentado em (Knolseisen, A. B., 2001), o desbalanço das potências complexas de cada uma das três fases do transformador de distribuição é dado pelas expressões (1), (2) e (3).

$$\Delta_s = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{p=1}^3 (S_p - S_0)^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \frac{S_a + S_b + S_c}{3} \quad (2)$$

$$\Delta_s (\%) = \frac{\Delta_s}{S_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

Onde  $S_0$  e  $S_p$  representam o carregamento médio e o carregamento da fase p no transformador, com p assumindo os valores das fases a, b e c. Com  $\Delta_s = 0$ , o transformador encontra-se perfeitamente balanceado.

#### 4 Conversor Redistribuidor

Analisando o índice de desequilíbrio  $\Delta_s$  que é uma característica inerente a sistemas radiais, pode se projetar o conversor a ser aplicado como redistribuidor de potência complexa. O projeto deste conversor é função de  $\Delta_s$ , uma vez que o conversor deverá compensar justamente o desequilíbrio.

Analisando (1) matematicamente, podem-se obter informações mais significativas a seu respeito. As diferenças entre as potências complexas das fases a, b e c e o valor médio são dadas por (4). Substituindo (4) em (1) tem-se (5).

$$\begin{cases} \Delta_{SA} = |S_0 - S_a| \\ \Delta_{SB} = |S_0 - S_b| \\ \Delta_{SC} = |S_0 - S_c| \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta_s = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot (\Delta_{SA}^2 + \Delta_{SB}^2 + \Delta_{SC}^2)} \quad (5)$$

Considerando a fase A como sendo a de maior desequilíbrio temos dois casos extremos possíveis:

- Maior dispersão: Quando uma das fases possui valor igual à média e, portanto chega-se a (6).

$$\Delta_{SA} = \sqrt{3/2} \cdot \Delta_s \cong 1,225 \cdot \Delta_s \quad (6)$$

- Menor dispersão: Duas fases possuem valores iguais e, portanto chega-se a (7).

$$\Delta_{SA} = \sqrt{2} \cdot \Delta_s \cong 1,414 \cdot \Delta_s \quad (7)$$

Através dos resultados das análises anteriores, pode-se estabelecer que, conhecendo o índice de desequilíbrio de um sistema qualquer, pode-se determinar certamente a faixa de operação para a fase com a maior dispersão de potência, sendo esta compreendida no intervalo (8).

$$\sqrt{3/2} \leq \frac{\Delta_{SA}}{\Delta_s} \leq \sqrt{2} \quad (8)$$

Esta simples análise permite estimar a potência do conversor a ser utilizado como redistribuidor de potência. O valor de  $\Delta_{SA} = \sqrt{2} \cdot \Delta_s$  foi adotado como situação de operação extrema, e a partir desta, obtém-se (9).

$$S_{Redist.} = 3 \cdot \Delta_{SA} = 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \Delta_s \cong 4,24 \cdot \Delta_s \quad (9)$$

Deve-se observar que a máxima potência processada pelo conversor é igual a dois terços da potência prevista no projeto. Isto pode ser explicado uma vez que, quando uma das fases processa sua máxima capacidade, as outras duas juntas devem processar a

mesma quantidade. A expressão (10) apresenta o cálculo da potência complexa processada pelo conversor em função de  $\Delta_s$ .

$$\begin{cases} S_{Proc} = \Delta_{SA} + \Delta_{SB} + \Delta_{SC} \\ \Delta_{SA} = \Delta_{SB} + \Delta_{SC} = \sqrt{2} \cdot \Delta_s \\ S_{Proc} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \Delta_s \cong 2,828 \cdot \Delta_s \end{cases} \quad (10)$$

#### 5 Conversor Trifásico com Grampeamento do Ponto Médio e Estrutura de Controle

##### 5.1 Conversor Trifásico com Grampeamento do Ponto Médio

Com o intuito de apresentar resultados de simulação que visam a ilustrar os enunciados subseqüentes equacionaram-se o conversor trifásico com grampeamento do ponto médio, apresentado na Figura 4, a partir da transformação dq0. Onde se obteve as funções de transferência deste conversor, sendo estas entre as correntes de entrada e as razões cíclicas e entre a tensão de saída e as correntes de entrada na base dq0. Conforme as equações (11) e (12).

Sendo  $V_s$  a tensão no barramento CC,  $R_s$  a resistência série equivalente para cada um dos três ramos de entrada do conversor,  $L$  o valor de cada uma das indutâncias de entrada,  $V_{pk}$  o valor de pico da tensão de entrada,  $C_s$  a capacitância dos capacitores de saída,  $\eta$  o rendimento do conversor e  $S_p$  a potência complexa processada pelo mesmo.

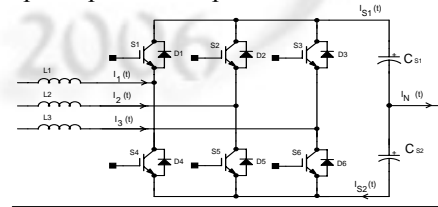


Figura 4 - Conversor trifásico com grampeamento do ponto médio.

$$\begin{cases} \frac{i_0(s)}{\tilde{d}_0(s)} = -\frac{V_s}{L \cdot s + R_s} \\ \frac{i_d(s)}{\tilde{d}_d(s)} = -\frac{V_s}{L \cdot s + R_s} \\ \frac{i_q(s)}{\tilde{d}_q(s)} = -\frac{V_s}{L \cdot s + R_s} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{V_s(s)}{i_d(s)} = \frac{\sqrt{6} \cdot V_{pk}}{s \cdot V_s \cdot C_s} \cdot \left[ 1 - \left[ \frac{2 \cdot S_p \cdot (1 - \eta) \cdot (2 \cdot R_s + s \cdot L)}{3 \cdot V_{pk}^2} \right] \right] \\ \frac{V_s(s)}{i_q(s)} = -2 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{S_p}{V_{pk} \cdot V_s} \cdot \left[ \frac{L \cdot s + 2 \cdot R_s}{s \cdot C_s} \right] \\ \frac{V_s(s)}{i_0(s)} = \frac{\sqrt{3}}{s \cdot C_s} \end{cases} \quad (12)$$

##### 5.2 Estrutura de Controle

O diagrama de blocos da Figura 5 apresenta o conversor aplicado em paralelo com uma carga a quatro

- fios. O conversor pode compensar tanto o desequilíbrio como as componentes harmônicas das correntes da carga.

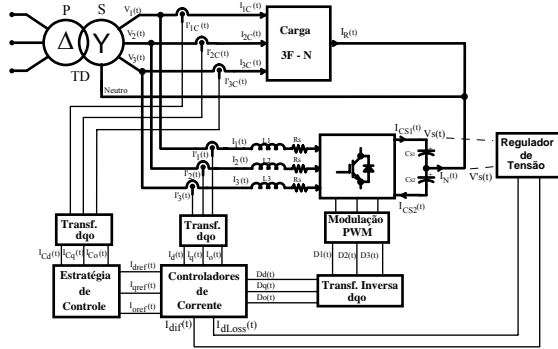


Figura 5 - Diagrama de blocos do sistema de proposto.

A estratégia de controle utilizada neste trabalho, consiste na compensação das correntes instantâneas (Verdelho, P., Marques, G., 1997). Mesmo que as tensões não sejam perfeitamente equilibradas, contendo componente de seqüência positiva, negativa e zero, as correntes serão equilibradas.

Todo o controle deste conversor ocorrerá na base dq0 (transformadas de Park e Clarke) (13), deve-se aplicar esta transformação às correntes do mesmo, segundo a Figura 7 (a). Estas correntes irão realimentar os compensadores de corrente da Figura 7 (b).

$$T_{dq0} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin(\omega \cdot t) & \sin(\omega \cdot t - 120^\circ) & \sin(\omega \cdot t + 120^\circ) \\ \cos(\omega \cdot t) & \cos(\omega \cdot t - 120^\circ) & \cos(\omega \cdot t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Realiza-se a medição da tensão total e da tensão no capacitor  $C_{S2}$ , as quais alimentarão o bloco regulador de tensão, composto por dois compensadores distintos. O primeiro promove o controle da tensão total nos capacitores de saída, compensando assim as perdas no conversor. O sinal de saída deste compensador é denominado corrente de perdas  $I_{dLoss}(t)$ . O segundo corrige o desequilíbrio de tensão nos capacitores. O sinal de saída deste compensador é denominado corrente diferencial  $I_{Dif}(t)$ .

Estas duas correntes serão aplicadas aos compensadores de corrente, sendo  $I_{dLoss}(t)$  adicionada a  $I_{dref}(t)$  e  $I_{Dif}(t)$  adicionada a  $I_0(t)$ . O regulador de tensão é representado na Figura 6 (a), onde se têm os ganhos aplicados a cada uma das tensões e os filtros passa-baixa que visam a eliminar as componentes alternadas da tensão.

Os sinais de saída dos compensadores de corrente são as razões cíclicas na base dq0. Antes de serem aplicadas ao bloco modulador, devem passar pela transformada inversa dq0, ver Figura 6 (b), gerando as razões cíclicas  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$  e  $d_3(t)$ .

Tanto os compensadores de tensão quanto os de corrente são compensadores PI.

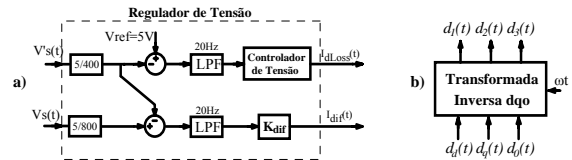


Figura 6 - (a) Regulator de tensão; (b) Transformada inversa dq0.

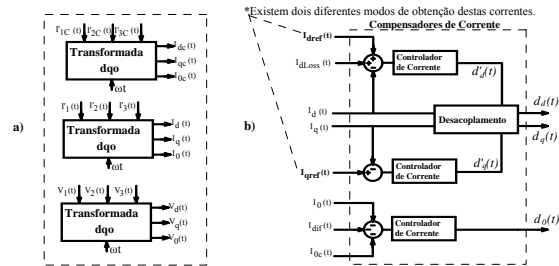


Figura 7 - (a) Transformada dq0 das correntes de carga, correntes do conversor e tensões de entrada; (b) Compensadores de corrente.

A estratégia de controle adotada define as correntes de referência. Primeiramente, as correntes de carga devem ser medidas e convertidas para a base dq0. A Figura 8 mostra as correntes de referência sendo calculadas a partir das correntes da carga. As correntes  $\tilde{I}_{dc}(t)$  e  $\tilde{I}_{qc}(t)$  são as parcelas alternadas das componentes de seqüência  $d$  e  $q$  respectivamente, sendo que a inversão do sinal das mesmas deve-se ao fato de que o conversor as suprirá em sentido oposto ao da carga.

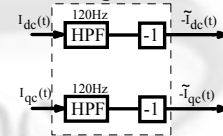


Figura 8 - Estratégias de controle considerando as correntes como referência.

Como se pode perceber a estratégias de controle promove a compensação apenas da parcela oscilatória da corrente imaginária, sendo esta apenas uma opção de projeto.

## 6 Resultados de Simulação

Com o objetivo de validar as propriedades afirmadas quanto ao desempenho da técnica de controle proposta, são apresentados resultados de simulação. Na Tabela 1 estão os dados utilizados para projeto.

Tabela 1 – Valores definidos para projeto.

Tensão eficaz de entrada ( $V_{ac}$ )	220Vrms
Frequência da rede ( $f_L$ )	60 Hz
Tensão de Saída ( $V_S$ )	800Vcc
Frequência de comutação ( $f_s$ )	20 kHz
Indutor de entrada ( $L$ )	700μH
Capacitor de saída ( $C_S$ )	14,1mF

Tensões desequilibradas aplicadas à carga e ao conversor simulado (14).

$$\begin{cases} V_1(t) = 310 \cdot \sin(\omega t + 8^\circ) \\ V_2(t) = 325 \cdot \sin(\omega t - 117^\circ) \\ V_3(t) = 300 \cdot \sin(\omega t + 123^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

Na Figura 9, têm-se as tensões de entrada, correntes de entrada, correntes de carga e correntes no conversor.

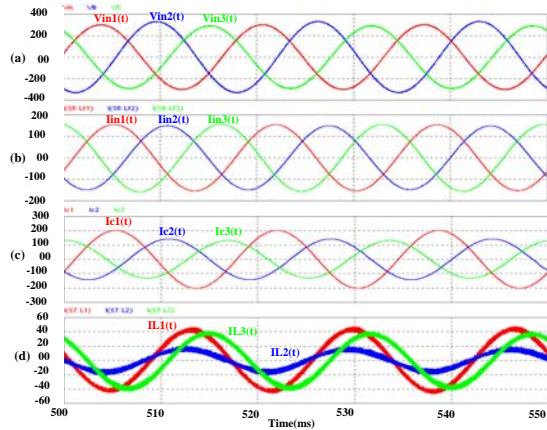


Figura 9 - (a) Tensões de entrada; (b) Correntes de entrada; (c) Correntes de carga e (d) Correntes do conversor.

Na Figura 10, são apresentadas as correntes na base dq0. A corrente de entrada possui correntes de seqüência *d* e *q* com componentes praticamente constantes, enquanto a corrente de seqüência zero é quase nula. O conversor processa a parcela alternada das correntes de carga com a mesma amplitude, porém em oposição de fase.

Na Tabela 2, são apresentadas as taxas de distorção harmônica total das correntes de entrada.

Tabela 2 – Taxas de distorção harmônica total das correntes de entrada

	I <sub>in1</sub>	I <sub>in2</sub>	I <sub>in3</sub>
THD(%)	0,377	0,382	0,441

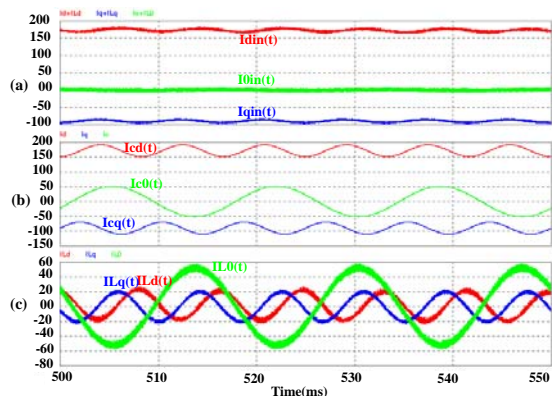


Figura 10 - Correntes na base dq0: (a) Corrente de entrada; (b) Corrente de carga e (c) Corrente do conversor.

Na Figura 11, têm-se as potências instantâneas trifásicas de entrada, na carga e no conversor, tanto ativa quanto reativa. O conversor não compensou satisfatoriamente a parcela alternada presente nas potências instantâneas trifásicas do sistema, apesar de reduzi-la na potência instantânea trifásica ativa.

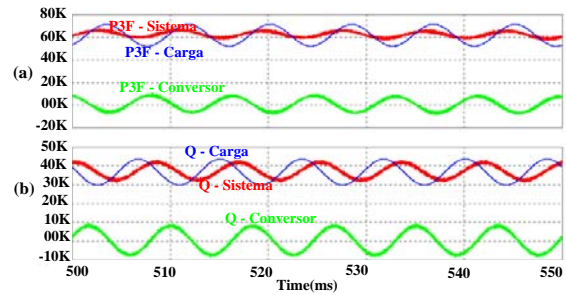


Figura 11 - Potências instantâneas trifásicas: (a) Ativa; (b) Reativa.

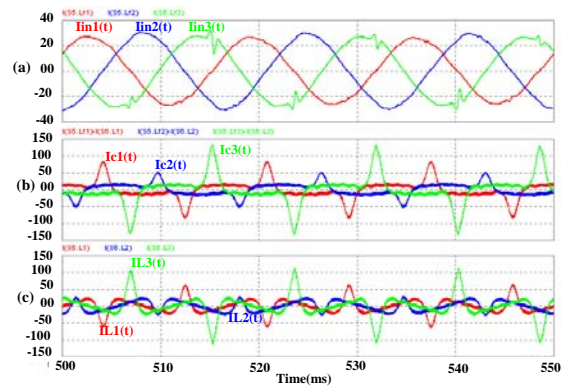


Figura 12 - Cargas não-lineares: Correntes reais: (a) Entrada; (b) Carga e (c) Conversor.

A Figura 12 representa os resultados de simulação da operação do conversor submetido à cargas não-lineares.

Conforme se pode observar esta técnica permite que se separem quais as parcelas que se deseja compensar, sejam elas, componentes reativas, harmônicas, componentes de seqüência negativa ou de seqüência zero.

## 7 Conclusão

Neste artigo apresentou-se um conversor aplicado como redistribuidor de potência. Tendo-se um sistema trifásico equilibrado, o condutor neutro pode ser desprezado e bancos de capacitores poderiam ser utilizados para a correção do fator de deslocamento, ou mesmo conversores híbridos a três fios, nos quais grande parcela da potência seria processada por elementos passivos, incumbindo o conversor da compensação das parcelas dinâmicas. Por sua vez, as componentes harmônicas poderiam ser compensadas por filtros híbridos dedicados.

## Agradecimentos

Os autores reconhecem e agradecem o suporte financeiro e estrutural obtido da CNPq, UFSC e INEP.

## Referências Bibliográficas

Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. (1984). Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy

- Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol. IA-20, p. 625-630.
- Aredes, M. (1996) Active Power Line Conditioners. Dr.-Ing. Thesis. *Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany*.
- Borgonovo, D., Barbi, I., Novaes, Y. R. (2003). A Three-Phase Three-Switch Two-Level PWM Rectifier. *Record of the 34th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Vol. 3, 15-19 June 2003. p. 1075-1079.
- CHEN, T. H.; CHERNG, J. T. (2000). Optimal phase arrangement of distribution transformers connected to a primary feeder for system unbalanced improvement and loss reduction using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*. [S. l.], p. 994-1000, Aug.
- Chen, Z. (2000) Three-Phase Four-Wire System Power Redistribution Using a Power Electronic Converter. *IEEE Power Engineering Review*, October.
- Ghosh, A., Joshi, A (2004). The concept and Operating Principles of a Mini Custom Power Park. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, N° 4, October.
- Ghosh, A., Ledwich, G. (2003). Load Compensating DSTATICOM in weak AC Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, N° 4, October.
- Knolseisen, A. B. (2001). Planejamento de sistemas de distribuição com enfoque na qualidade dos serviços e no desbalanceamento das redes. Dissertação. Mestrado em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico, *Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis*.
- Verdelho, P., Marques, G. (1997). An active power filter and unbalanced current compensator. *IEEE Trans. Ind. Electron*. Vol. 44, June 1997. p. 321-328.