



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7817  
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

## DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMCONDICIONADOR UNIFICADO DE ENERGIA

MAURÍCIO AREDES

COPPE/UFRJ

JOÃO A. MOOR  
NETO

COPPE/UFRJ

LUÍS F. C.  
MONTEIRO

COPPE/UFRJ

MARIA JOVITA V.  
SIQUEIRA

BANDEIRANTE ENERGIA  
S. A.

### RESUMO

Este artigo apresenta os aspectos gerais relativos ao desenvolvimento e implementação de um Condicionador Unificado de Energia UPQC (Unified Power Quality Conditioner) para sistemas trifásico a três fios. O circuito de controle foi simplificado com o objetivo de torná-lo o mais compacto possível, reduzindo o esforço computacional realizado pelo processador digital de sinais DSP (Digital Signal Processor). O controle empregado permite que o UPQC compense, em tempo real, harmônicos e desbalanços de tensão e corrente, bem como o fator de potência. Os aspectos gerais relativos à operação do equipamento bem como sua montagem, são apresentados. Por fim são mostrados os resultados experimentais obtidos com o protótipo laboratorial de 4.5 kVA do equipamento em questão, utilizando um processador digital de sinais (DSP) de ponto fixo.

### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de energia, DSP, Filtros ativos.

### 1.0 INTRODUÇÃO

Os parâmetros de qualidade da energia elétrica distribuída, até poucas décadas passadas, limitavam-se apenas à verificação da frequência da tensão de suprimento e seu valor eficaz.

Com o avanço da tecnologia dos dispositivos semicondutores de potência, foi possível inserir o seu uso em equipamentos industriais, permitindo o avanço do processo de automatização nas

indústrias. Contudo, devido às características não-lineares presentes nos semicondutores de potência, estes equipamentos industriais passaram a ser um dos responsáveis pela poluição cada vez mais presente no sistema elétrico. Estes mesmos semicondutores de potência podem também ser encontrados nos equipamentos eletro / eletrônicos presentes nas residências, o que contribui ainda mais para o aumento da poluição no sistema elétrico.

A poluição mencionada está relacionada à presença de harmônicos no sistema de potência, gerando perdas consideráveis para as empresas distribuidoras de energia elétrica, além de perda de qualidade da tensão entregue aos consumidores.

Se por um lado os modernos processos automatizados e equipamentos eletro-eletrônicos em geral necessitam de um suprimento de energia de boa qualidade, por outro lado, eles mesmos constituem fontes de não-linearidades nas redes de distribuição, contribuindo sensivelmente com a perda de qualidade da tensão de suprimento. Pode-se imaginar o problema em um parque industrial com vários consumidores com processos modernos de fabricação.

Também cabe ser ressaltado que os desequilíbrios nas formas de ondas das tensões de suprimento é um outro tipo de distúrbio que pode refletir em grandes problemas ao sistema elétrico e aos consumidores.

Neste contexto, tem sido feito investimentos em soluções que possam atenuar os problemas de harmônicos e desequilíbrios no sistema elétrico.

Os filtros ativos são equipamentos que podem compensar, em tempo real, harmônicos e desbalanços de tensões e correntes. Deste modo, é apresentada a conceituação geral da filtragem ativa e do UPQC, bem como os aspectos gerais a respeito da implementação de um protótipo de 4.5 kVA de um UPQC trifásico a três fios. No algoritmo de controle simplificado desenvolvido para o UPQC, o número total de pontos de medições foi reduzido de dezesseis para onze. No controle tradicional para UPQC normalmente são utilizados dezesseis pontos de medições envolvendo tensões e correntes. São apresentados resultados experimentais obtidos em um protótipo de 4.5 kVA controlado por um DSP de ponto fixo.

**2.0 FILTROS ATIVOS**

Em 1976, L. Gyugyi e E.C. Strycula introduziram os conceitos básicos dos filtros ativos. Estes podem ser divididos em duas grandes classes:

- Filtro Ativo Série e,
- Filtro Ativo Paralelo.

O filtro ativo série se comporta como gerador de tensão controlada, produzindo uma tensão de compensação  $v_c$  em série com a tensão  $v_s$  no ponto de entrega da rede de distribuição a um consumidor especial. Com isto, a tensão compensada  $v_L$  entregue à carga sensível não conterá os harmônicos e desbalanços presentes na tensão  $v_s$ . Idealmente, a tensão  $v_L$  será uma senóide pura e balanceada. A Fig. 1 ilustra o princípio básico de compensação de tensão.

De forma dual, o filtro ativo paralelo atua como uma fonte de corrente controlada que injeta uma corrente de compensação  $i_c$  que se soma à corrente da carga não-linear  $i_L$ , cancelando as distorções e desbalanços desta, de tal sorte que a corrente drenada da fonte  $i_s$  tenha uma forma de onda senoidal e balanceada. A Fig. 3 ilustra o princípio básico de compensação de corrente.

Em situações em que as correntes drenadas pela carga não-linear e as tensões de suprimento

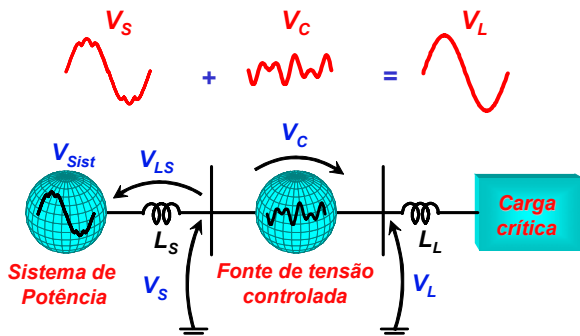


Fig. 1 Princípio de compensação ativa de tensão.

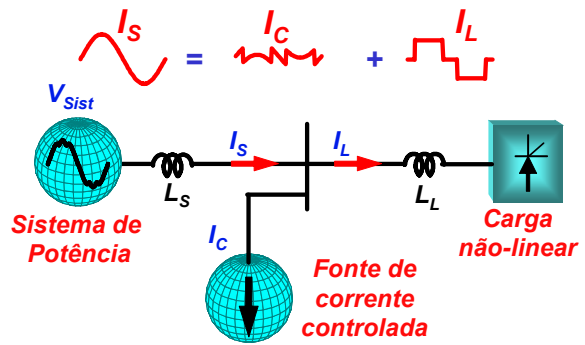


Fig. 2 Princípio da atuação conjunta das compensações ativa de tensão e corrente.

apresentem simultaneamente desbalanços e / ou harmônicos, uma combinação de filtro ativo série com o filtro ativo paralelo, o qual é conhecido como UPQC, pode ser utilizada, conforme ilustrado na Fig2. Neste caso, a corrente compensada  $i_s$  e a tensão compensada  $v_L$  são ondas puramente senoidais e balanceadas. Além disso, o controle do filtro ativo paralelo, força com que a corrente compensada esteja em fase com a tensão, compensando assim o fator de potencia da carga.

Existem compensadores que combinam filtros ativos com filtros passivos, sendo denominados filtros híbridos. Apesar de necessitarem de um menor investimento para a sua montagem, pois é possível uma redução das potencias nominais dos filtros ativos, estes compensadores híbridos não tem a mesma capacidade de compensação que o condicionador UPQC apresenta.

A topologia do equipamento UPQC desenvolvido está ilustrada na Fig. 5. Pode-se verificar os dois conversores bi-direcionais conectados por meio de um elo cc. O controle do filtro ativo paralelo força uma troca de energia entre os conversores eletrônicos de potência e o sistema elétrico,

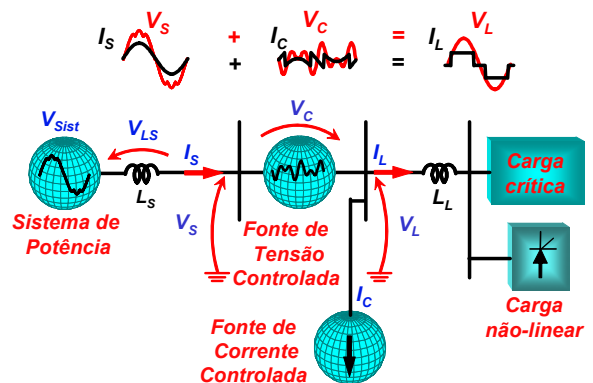


Fig. 3 Princípio de compensação ativa de corrente.

regulando assim a tensão do elo cc. O UPQC pode ser analisado em termos de seus dois inversores, bem como, de seu sistema de

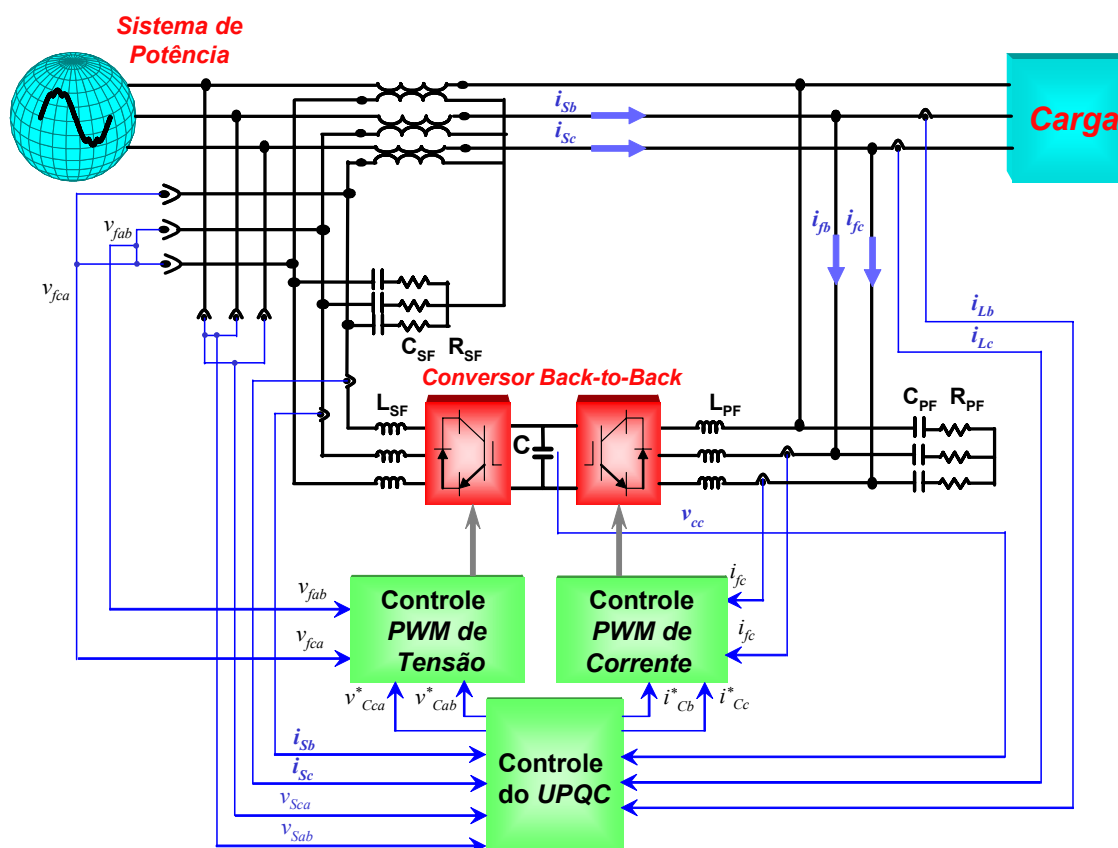


Fig. 4 Diagrama elétrico trifilar do UPQC.

controle. Neste sistema trifásico a três fios, o número de pontos medições de correntes e tensões considerados foi de onze. Deste modo, circuito de potência e o controle deste condicionador devem ser adequados para estas condições.

## 2.1 Circuito de potência

A configuração do circuito de potência do UPQC é ilustrada na Fig. 5. É importante comentar que no bloco “Controle do UPQC” não constam as correntes e tensões utilizadas nos controles dos filtros ativos série e paralelo.

Ambos os conversores são alimentados por fonte de tensão (comumente chamado de VSC – Voltage Sourced Converter).

Os dois conversores de potência apresentam técnicas de comutação baseadas no controle PWM (Pulse Width Modulation). Esta técnica de comutação permite a geração de correntes e tensões semelhantes às calculadas, em tempo real, pelos controles paralelo e série, respectivamente.

Devido as suas características da comutação dos semicondutores empregada, as correntes e tensões de compensação geradas pelos

conversores de potência paralelo e série, respectivamente, contêm componentes em altas frequências. Deste modo, é importante que a frequência de comutação dos conversores seja, pelo menos, 10 vezes maior que a maior do que a componente de maior frequência que se deseja gerar.

A utilização dos filtros passivos RLC é necessária para minimizar o impacto destas altas frequências que irão surgir sobre as tensões e correntes de compensação dos filtros ativos série e paralelo, respectivamente.

## 2.2 Circuito de Controle

O controle integrado do UPQC é composto por três partes, sendo um controle para o filtro ativo série, outro controle para o filtro ativo paralelo e por fim um controle de amortecimento [4]. O algoritmo adotado para o controle integrado do UPQC, poderá ter características distintas, sendo importante definir os três controles para que seja possibilitado ao condicionador operar dentro dos padrões desejados.

As tensões de referência  $v_{ab\_ref}$ ,  $v_{ca\_ref}$  e as correntes de referência  $i_{b\_ref}$ ,  $i_{c\_ref}$  são determinadas em tempo real e utilizadas no controles de comutação PWM dos conversores

de tensão e corrente, respectivamente. A expressão (1) representa a relação entre as tensões na carga  $v_L$ , compensação  $v_C$  e na fonte  $v_S$ . A expressão (2) mostra a relação entre as correntes na carga  $i_L$ , compensação  $i_C$  e na fonte  $i_S$ . As referências descritas estão de acordo com as ilustradas na Fig. 5.

$$v_L = v_C + v_S \quad ; \quad (1)$$

$$i_S = i_C + i_L \quad (2)$$

O controle do Filtro Ativo de Potência Série deverá atuar visando:

- Compensar as distorções presentes nas tensões de suprimento e desbalanços (seqüência negativa) na freqüência fundamental;
- Promover um isolamento harmônico entre a rede de suprimento e a carga, gerando uma resistência controlada, amortecendo as correntes harmônicas que fluem pelos transformadores do Filtro Ativo de Potência Série;

O controle do Filtro Ativo Paralelo será projetado de tal forma este tenha como características:

- Compensação de distorções existentes nas correntes exigidas pela carga e desbalanços na freqüência fundamental existentes nestas correntes;
- Regulação do fator de potência por meio da compensação da potência reativa (imaginária) da carga;
- Regular a tensão no elo CC dos conversores.

### 3.0 ESTRATÉGIA DE CONTROLE DO UPQC

Como foi relatado na seção 2.0, o equipamento UPQC consiste em uma combinação dos filtros ativos série e paralelo para a compensação simultânea das tensões de suprimento, que podem estar já distorcidas e desequilibradas e das correntes de carga do consumidor especial 000. O circuito de controle do UPQC é constituído de três controles, conforme mostra a Fig. 5.

Estes equipamentos podem ser utilizados em sistemas de distribuição, próximo das cargas que geram correntes harmônicas, as quais podem afetar outras cargas sensíveis, conectadas ao mesmo barramento. O UPQC pode compensar não somente as correntes harmônicas e desequilibradas da carga não-linear como também harmônicos a desbalanços das tensões no ponto de acoplamento comum. Com isto, a qualidade da energia oferecida às cargas sensíveis melhora consideravelmente [5] [6].

Em uma montagem real, o UPQC pode ser desenvolvido com o uso de dois conversores de potência, acoplados em um elo de tensão CC,

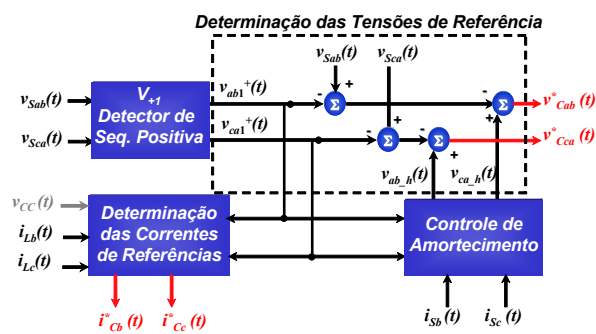


Fig. 5 Diagrama elétrico trifilar do UPQC.

além do circuito de controle envolvendo aquisição, condicionamento dos sinais de referência e controle via DSP.

### 4.0 PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

A Fig. 6 mostra uma foto do protótipo do condicionador UPQC trifásico a três fios de 4.5 kVA implementado em laboratório.

Os dois conversores série e paralelo correspondem ao principal componente do circuito de potência do condicionador UPQC. Os conversores em questão têm a função de sintetizar as tensões (conversor série) e correntes (conversor paralelo) de compensação determinada pela estratégia de controle e processadas no controlador digital (DSP).

Circuito Série:

- Três transformadores monofásicos com relação de tensão 127V//127V e potência nominal de 2.5 kVA, cada;
- Reatores ( $L_s$ ) na saída do conversor série de 1.0 mH cada;
- Capacitores ( $C_s$ ) no filtro RC, na saída do conversor série, de 20  $\mu$ F cada;
- Resistores ( $R_s$ ) no filtro RC, na saída do conversor série, de 2  $\Omega$  cada.

Circuito paralelo:

- Reatores ( $L_p$ ) na saída do conversor paralelo de 1.5 mH cada;



Fig. 6 UPQC Implementado em bancada

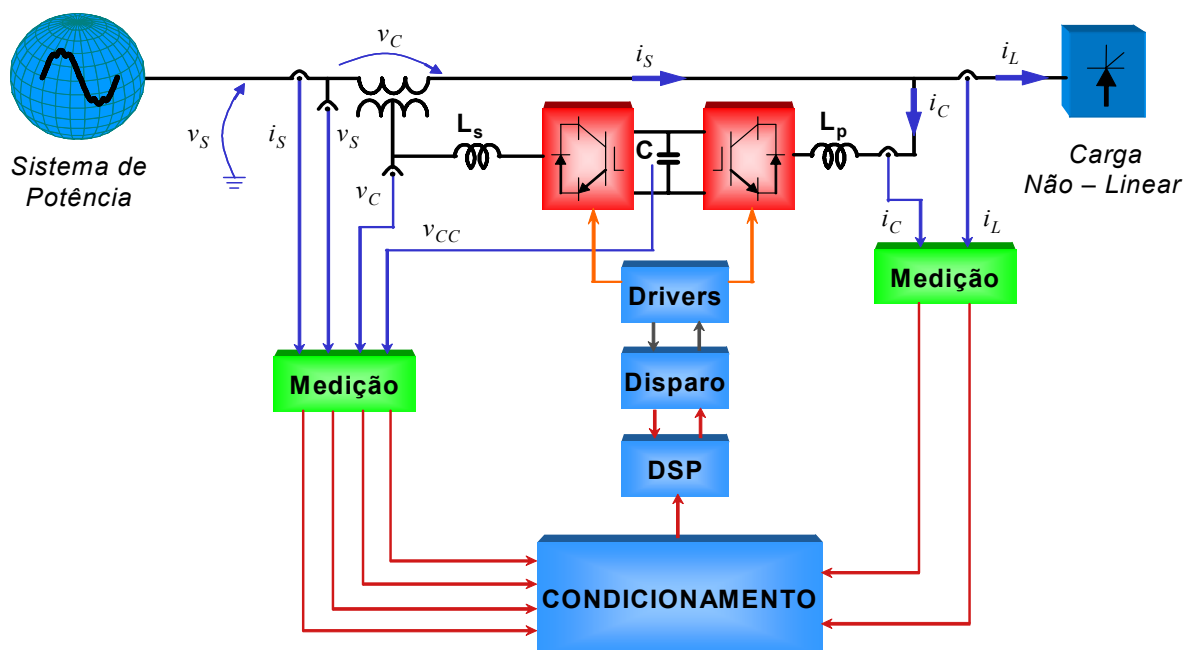


Fig. 7 Diagrama elétrico trifilar do UPQC.

- Capacitores ( $C_P$ ) do filtro passivo RC, na saída do conversor paralelo, de  $20 \mu\text{F}$  cada;
- Resistores ( $R_P$ ) no filtro RC, na saída do conversor série, de  $5.0 \Omega$  cada.

A Fig. 8 apresenta o diagrama unifilar do condicionador UPQC, aonde foi incluído o seu circuito de controle. Este circuito é composto por placas de medição e condicionamento, DSP, placa de disparo e os *drivers* dos conversores.

As placas de medição fazem a reprodução das tensões e correntes lidas para escalas inferiores, de tal forma que na saída destas placas estas medições estas tensões e correntes estão reproduzidas por tensões com amplitude máxima de  $\pm 10 \text{ V}$ .

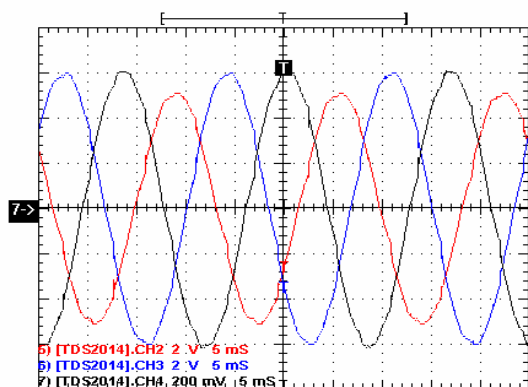


Fig. 8 Diagrama Unifilar do UPQC Desenvolvido

Entretanto, antes de serem processadas pelo DSP estes sinais devem estar limitados a uma excursão variando entre 0 a 3 V. Com isto se faz necessário o uso de placas que façam o

condicionamento destas tensões antes de serem usadas pelo DSP.

O processador de sinal (DSP) irá fazer a conversão analógico/digital das tensões já condicionadas e, então utilizá-las no algoritmo de controle do UPQC que irá fornecer os disparos dos IGBTs. Neste caso, foi utilizado o DSP TMS320F2812 da Texas instruments.

Os sinais digitais emitidos pelo DSP são enviados a uma placa de placa de disparo (representada na Fig. 8 como disparo). A placa de disparo faz a conversão do sinal digital para o sinal óptico e então o transmite, por meio de cabos fibra ótica, para os *drivers* dos inversores do UPQC. Nestes *drivers*, são incluídos circuitos que determinam possíveis falhas de operação, quando então são enviados sinais de erro de volta para a placa de disparo.

## 5.0 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A seguir são apresentados alguns resultados experimentais obtidos partir do protótipo do condicionador UPQC de 4.5 kVA.

Uma ponte conversora de seis pulsos não controlada foi adotada como carga não-linear.

No lado CC deste retificador foi conectada uma resistência de  $20 \Omega$  em série com uma indutância de 10 mH. Já no lado CA do retificador foi incluída da uma indutância de 1.8 mH.

Na Fig.9 estão mostradas as formas de ondas das tensões de linha medidas na carga antes da operação do condicionador UPQC.

Do mesmo modo, as correntes medidas na fonte do sistema antes da operação do UPQC estão mostradas na Fig. 10.

A Figura 11 apresenta as formas de ondas das tensões de linha com o condicionador UPQC em operação.

Por fim, a Figura 10 ilustra as formas de ondas das correntes da fonte com o condicionador UPQC em operação.

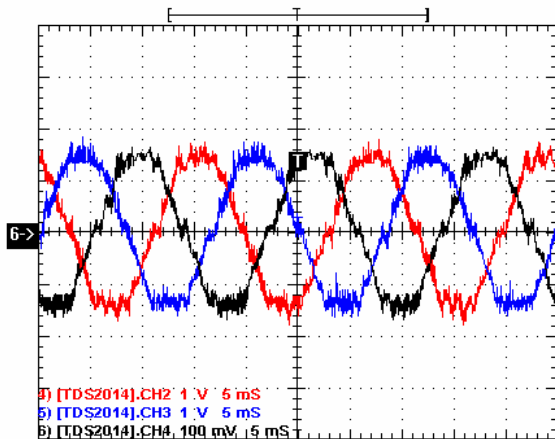


Figura 9 Tensões de Linha não compensadas

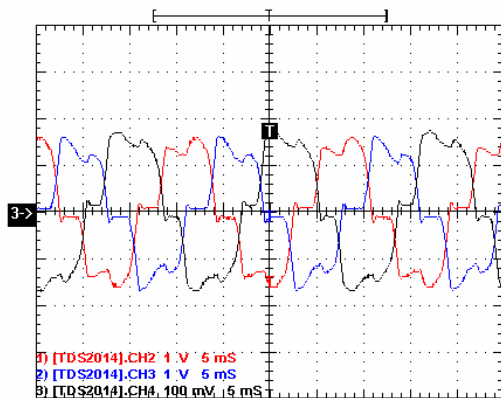


Figura 10 Correntes da Carga não compensadas.

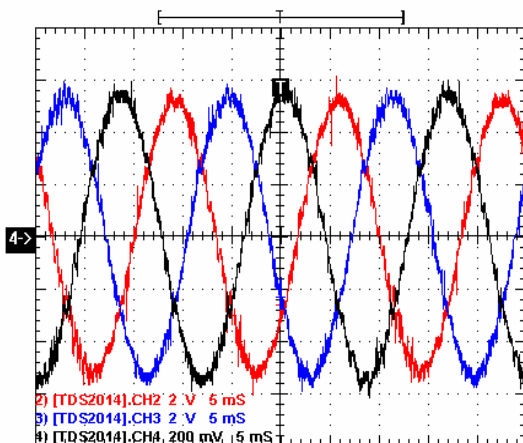


Figura 11 Tensões de Linha Compensadas

## 6.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados experimentais obtidos em protótipo de condicionador UPQC de 4.5 kVA em laboratório. Foi possível comprovar a eficácia deste tipo de equipamento na melhoria da qualidade da energia do sistema. Apesar da melhoria nas tensões e correntes compensadas, o seu rendimento pode ser aperfeiçoado com um melhor ajuste dos componentes passivos (filtros RLC nas saídas dos conversores série e paralelo).

A experiência adquirida no desenvolvimento deste protótipo em laboratório, forneceu suporte para a implementação de um protótipo industrial “cabeça-de-série” do condicionador UPQC a ser testado em campo com o apoio da Bandeirante Energia.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Gyugyi, E. C. Strycula, “Active ac Power Filters”, *Proc. In the IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting* vol. 19-C, 1976, pp. 529-535.
- [2] H. Akagi, H. Fujita, “A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, n°3, July 1995, pp.1570 - 1575.
- [3] H. Akagi, “New Trends in Active Filters,” *EPE'95 – Eur. Conf. Power Electronics*, vol. 0, Spain, Sevilla, September 1995, pp. 0.017 – 0.026.
- [4] L. F. C. Monteiro, M. Aredes, J. A. M. Neto, “A Control Strategy for Unified Power Quality Conditioner,” *Power Electronics Specialists Conference, PESC '88 Record., 19th Annual IEEE*, 11-14 Apr 1988, vol. 2, pp. 1151 -1159.
- [5] M. Aredes, J. Häffner, K. Heumman, “A combined Series and Shunt Active Power Filters,” *IEEE / KTH– Stockholm Power Tech. Conf., SPT PE 07-05-0643*, vol. Power Elect., Sweden, June 1995, pp. 237 – 242.
- [6] M. Aredes, “Active Power Line Conditioners,” *Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) Thesis, Technische Universität Berlin, March, 1996.*