

# Eletrônica de Potência e Qualidade da Energia Elétrica: Pesquisas Cooperativas na ELEKTRO, COPPE/UFRJ e UBC – Resultados Práticos

B. D. Bonatto, E.A. Mertens Jr., L. F. S. Dias, S. Nosaki, E. H. Watanabe, M. Aredes, S. Carneiro Jr. e H. W. Dommel

## RESUMO

Este artigo descreve os principais atividades da Fase II (de abril de 2001 a março de 2002) e Fase III (de abril de 2002 a julho de 2003) do projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico (P&D) intitulado “O Impacto de Dispositivos Eletrônicos de Potência na Qualidade da Energia Elétrica”, realizado pela ELEKTRO, COPPE/UFRJ e UBC. Este projeto está integrado ao programa anual de P&D da ELEKTRO e tem como objetivo global determinar o impacto da introdução tecnológica de novos dispositivos de condicionamento de energia (“Custom Power Controllers”) para melhoria da qualidade de fornecimento de energia elétrica aos clientes. Portanto, este artigo apresenta os resultados da aplicação, em projeto piloto, de um equipamento de condicionamento de energia elétrica junto a um grande cliente industrial. Resultados experimentais obtidos na planta industrial são apresentados mostrando a performance do dispositivo em regime permanente e durante a correção de afundamentos de tensão. Destaca-se ainda que se trata do primeiro equipamento do gênero instalado no Brasil.

## PALAVRAS-CHAVE

qualidade da energia elétrica, eletrônica de potência, variações de tensão de curta duração, equipamentos de condicionamento de energia elétrica, “EMTP – Electromagnetic Transients Program”, “custom power technology”.

## I. INTRODUÇÃO

Um dos principais fenômenos que afetam a qualidade de energia na concessionária Elektro têm sido as variações de tensão de curta duração (VTCD's) e elas representam cerca de 90 % das reclamações de clientes industriais [1-8].

Este projeto de P&D tem o suporte financeiro da ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A.

B. D. Bonatto concluiu seus estudos de doutoramento (Ph.D.) em engenharia elétrica na UBC – The University of British Columbia, em Vancouver, B. C., Canadá, como bolsista da CAPES – Brasília/Brasil. Atualmente, está prestando serviços na ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A. (e-mail: benedito.bonatto@elektro.com.br).

E. H. Watanabe, M. Aredes e S. Carneiro Jr. são professores doutores da COPPE/UFRJ – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ. (e-mail: watanabe@coe.ufrj.br, aredes@coe.ufrj.br, sandoval@dee.ufrj.br).

E. A. Mertens Jr., L. F. S. Dias e S. Nosaki são empregados da ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S. A., Rua Ary Antenor de Souza, N. 321 – Jardim Nova América, CEP 13503-024, Campinas-SP (e-mail: Ernesto.Mertens@elektro.com.br, Luis.Dias@elektro.com.br, Shigumatsu.Nosaki@elektro.com.br).

H. W. Dommel, autor do EMTP – Electromagnetic Transients Program, é “Professor Emeritus” do “Department of Electrical and Computer Engineering” da UBC – The University of British Columbia. Dr. Dommel é também presidente da Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, B. C., Canadá. (e-mail: hermannnd@ece.ubc.ca).

Considerando a importância do tema e carência nas alternativas de solução técnica e economicamente viáveis para os casos das variações de tensão de curta duração, vêm-se investindo nestes últimos anos em pesquisas e busca de conhecimentos quanto ao monitoramento, diagnóstico e propostas de soluções para uma diversidade de casos práticos de problemas de qualidade da energia elétrica [1-12]. Muitas pesquisas tem sido direcionadas ao desenvolvimento de novos dispositivos, teorias e modelos de simulação computacional de fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica, e especialmente à interação dinâmica entre sistemas elétricos e eletrônicos de potência [13-26].

Com a aprovação pela CSPE/ANEEL (Comissão de Serviços Públicos de Energia do Estado de São Paulo / Agência Nacional de Energia Elétrica) vêm-se, então, desenvolvendo desde abril de 2000 o Projeto de P&D “O Impacto de Dispositivos Eletrônicos de Potência na Qualidade da Energia Elétrica” [11], no qual previu-se a avaliação e aplicação em projetos piloto de dispositivos de condicionamento de energia elétrica para estes casos. Este artigo apresenta uma síntese dos resultados práticos da aplicação tecnológica de um equipamento de condicionamento de energia elétrica [1] junto a um grande cliente industrial, com histórico de reclamações de perturbações caracterizadas por variações transitórias na tensão, com a conseqüente paralisação do seu processo de produção automatizado, ocasionando assim, prejuízos e problemas com a retomada do processo.

As premissas básicas que direcionaram a instalação do dispositivo neste cliente, foram:

- Viabilidade técnico-econômica favorável (devido ao custo elevado das paradas do processo industrial);
- Histórico das variações de tensão de curta duração (VTCD's) observadas no mesmo;
- Postura de cooperação no Projeto de P&D.

Um equipamento da Sotreq / Caterpillar, denominado por simplicidade de condicionador de energia de 250 kVA, 380 V utilizando “Flywheel Technology”, integra as funções de regulação de tensão, correção de fator de potência, filtragem ativa de harmônicas e UPS (“Uninterruptible Power Supply”), permitindo desse modo a correção de uma grande variedade de distúrbios. Este equipamento foi instalado de forma inédita no Brasil em fevereiro de 2003, como projeto piloto em um cliente industrial.

Outro equipamento de condicionamento de energia elétrica com tecnologia UPS-No Break Off-Line da S&C foi instalado também de forma inédita no Brasil em junho de 2003, como projeto piloto em outro cliente industrial e encontra-se em fase de avaliação de desempenho operacional.

Assim, uma avaliação determinística do impacto de dispositivos eletrônicos de potência na melhoria da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores finais, e melhoria na confiabilidade do sistema elétrico com base em experiência operacional e maturação científica se tornou possível através deste projeto de P&D.

## II. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Monitoramentos da qualidade da energia elétrica efetuados em instalações de clientes industriais tem possibilitado o diagnóstico preciso das causas de perturbações no sistema elétrico ou industrial e suas consequências na operação de cargas sensíveis, tipicamente em processos de fabricação automatizados.

As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's) são frequentemente citadas como as responsáveis por paralisações em sistemas automatizados. Porém nem sempre elas são as reais causadoras de paradas, pois muitas vezes tem-se outros fenômenos associados a estas oscilações.

O artigo “Impacto de Variações de Frequência versus Variações de Tensão de Curta Duração”, publicado no XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica [2], apresenta um caso onde após análise detalhada das medições verificou-se que variações na frequência foram as responsáveis pelas paradas.

O problema é que na maioria das vezes em que há uma variação de frequência, ocorre também uma variação na tensão, dificultando a identificação da real causa. Outro ponto é que já existe uma cultura de se atribuir as paradas às variações de tensão de curta duração. Isto ocorre devido ao fato de muitas vezes não se efetuar o monitoramento de outros fenômenos simultaneamente, entre eles a frequência, levando-se a induzir que a causa principal esteja ligada às variações momentâneas da tensão.

O hábito de se utilizar a curva CBEMA / ITIC com os respectivos registros de duração e magnitude, sem associar estes eventos a outros fenômenos, pode induzir a erros de avaliação de sensibilidade de determinadas cargas, pois muitas vezes atribui-se uma determinada sensibilidade a uma carga em função dos registros de variações de tensão de curta duração, mas a real causa pode estar associada a um outro fenômeno.

Portanto, deve-se usar com cautela estas informações, e sempre que possível o monitoramento de qualidade da energia deve abranger o maior número de fenômenos possíveis de serem registrados simultaneamente.

## III. CONDICIONADOR DE ENERGIA BASEADO EM “FLYWHEEL TECHNOLOGY”

A figura 1 mostra o diagrama de blocos do sistema de eliminação de afundamentos de tensão utilizado. Este condicionador de energia é baseado na filosofia do compensador paralelo e é composto por dois conversores associado a um sistema de armazenamento de energia em “flywheel” (F/W).

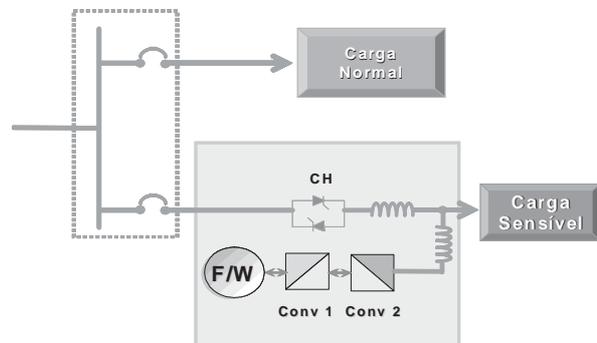


FIGURA 1 – Condicionador de energia baseado em “Flywheel”.

Em condições normais a carga é alimentada diretamente pela rede e a corrente passa pelos tiristores da chave CH. O conversor 1 (Conv 1) normalmente não opera. O conversor 2 (Conv 2) está permanentemente conectado ao sistema e funciona como filtro ativo, compensador de reativos e regulador de tensão. Com isto a carga sensível está sempre alimentada com tensão regulada e “limpa” de distorções. Quando ocorre um afundamento momentâneo de tensão o conversor 2 continua a manter a regulação de tensão garantindo uma tensão na carga maior que na rede. Esta ação corta o tiristor da chave CH que estava em condução, isolando a rede da carga. Com isto, naturalmente, o conversor 2 assume o fornecimento de energia para a carga sensível, sem interrupções ou afundamentos. Não havendo energia vindo da rede o conversor 1 retira energia do flywheel e entrega-a ao conversor 2, através do elo CC comum aos dois conversores. Este processo ocorre em cerca de ¼ de ciclo. O “flywheel” tem energia armazenada para um tempo total de 13 segundos. Este tempo, apesar de pequeno, é suficiente para a grande maioria dos fenômenos de afundamentos momentâneos de tensão que são, da ordem de 2 segundos no máximo. O “flywheel” da figura 1 é composto por um rotor girando a 7200 rpm, com mancais mecânicos associados a mancais eletromagnéticos e encapsulados de tal forma a operar no vácuo. O sistema como um todo apresenta eficiência de 97%. Tão logo a tensão da rede é restabelecida os tiristores da chave CH são ativados e a rede passa a suprir energia à carga sensível e a energia do “flywheel” é restabelecida, através de um suprimento adicional de energia da rede ao condicionador. O tempo de recarga do “flywheel” pode chegar a 150 segundos. Como os afundamentos de tensão são, na maioria dos casos, limitados a eventos com duração de 2 segundos o “flywheel” tem energia para alguns eventos em seqüência, o que, contudo, é pouco provável. De toda maneira, em até 150 segundos após um evento, o sistema está com plena carga para nova atuação.

## A. Regulação de Tensão

Como se pode observar na figura 2, o condicionador de energia possui a função de regulação de tensão, em regime permanente, mantendo a tensão de saída regulada em  $\pm 2\%$  da tensão nominal de 380 V. Neste gráfico, que apresenta a tensão de regime permanente ao longo de uma semana, pode-se visualizar a eficiência do dispositivo na regulação de tensão, através da comparação entre os valores de entrada e saída. Nestas medidas a tensão de entrada chega a cair até 365V, mas a saída fica mantida em 378V constantes. No gráfico da figura 3 verifica-se o perfil de corrente de carga na entrada e na saída do condicionador, demonstrando a grande variabilidade da carga.

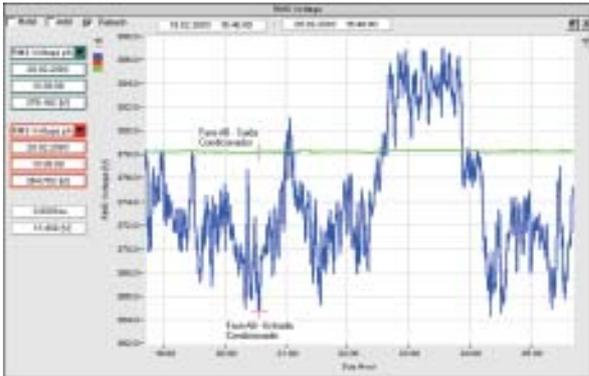


FIGURA 2 - Perfil de Tensão RMS – Fase AB.

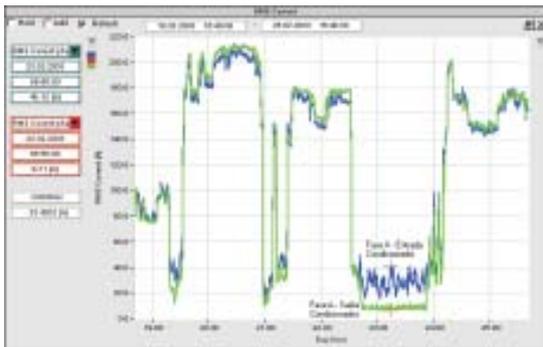


FIGURA 3 - Perfil de corrente RMS – Fase A.

## B. Distorção Harmônica de Tensão

A seguir é mostrada uma avaliação da distorção harmônica total de tensão (THDv), visando verificar, se a tensão regulada que supre a carga possui um nível de distorção harmônica maior ou menor que a da tensão de entrada (fig. 4 e fig. 5).

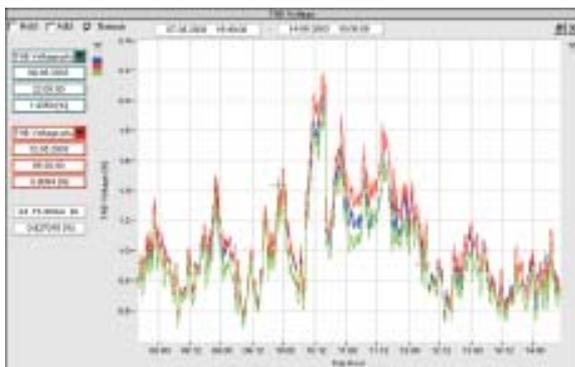


FIGURA 4 - Perfil de Distorção Harmônica Total – Entrada.

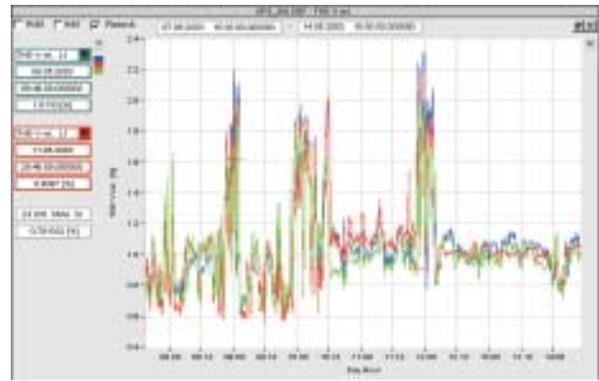


FIGURA 5 - Perfil de Distorção Harmônica Total – Saída.

Verifica-se semelhança na distorção harmônica total - THDv, tanto na entrada como saída do condicionador, o que, em primeira análise, induz a um questionamento quanto à real capacidade do condicionador na função de filtragem ativa.

### 1) Harmônicas Individuais

Os gráficos das figuras 6 e 7 apresentam os espectros harmônicos das tensões na entrada e na saída do condicionador respectivamente.

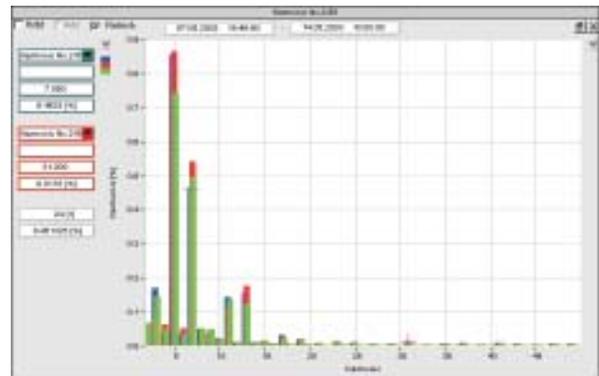


FIGURA 6 - Espectro Harmônico de Tensão - Entrada do condicionador.

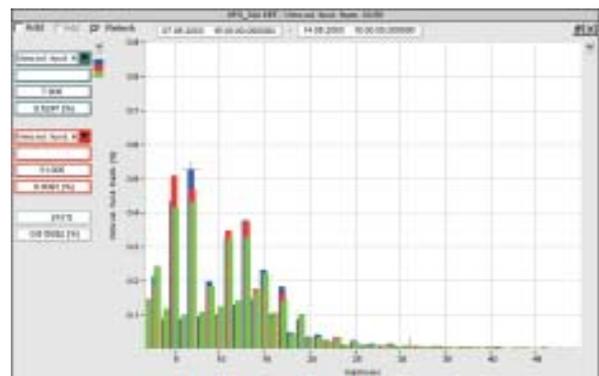


FIGURA 7 - Espectro Harmônico de Tensão - Saída do condicionador.

Observa-se nestas figuras que o equipamento efetuou uma distribuição das harmônicas individuais, ou seja, reduziu a amplitude das harmônicas de baixa frequência, e provocou uma elevação nas componentes de maior frequência. Nota-se claramente uma redução nas amplitudes das 5ª e 7ª harmônicas e pequena elevação nas demais. Portanto, deve-se considerar a função de filtragem ativa como secundária, uma vez que o mesmo se propõe, como

função primária, a reduzir os efeitos das variações momentâneas de tensão, na frequência fundamental. Este efeito nos harmônicos é, provavelmente, devido ao chaveamento PWM do conversor do condicionador de energia.

### C. Compensação de Potência Reativa

Na seqüência observa-se nos gráficos das figuras 8 e 9, o perfil do fator de potência verificado na semana em análise. Deduz-se que o compensador funcionou na maior parte do tempo realizando a função de regulação da tensão de saída. O que ocorre é que neste tipo de compensador paralelo, a regulação da tensão é realizada através de injeção controlada de corrente reativa capacitiva (para elevar a tensão de saída) ou indutiva (para reduzir a tensão de saída).

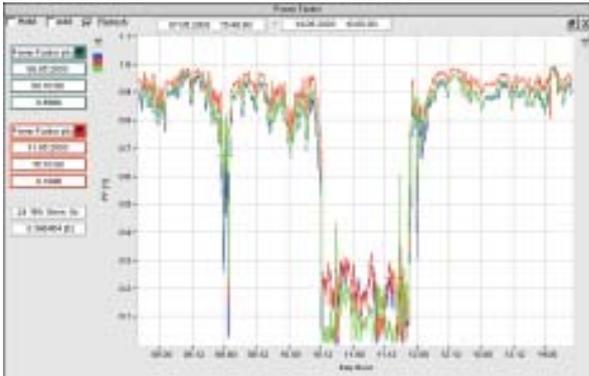


FIGURA 8 - Fator Potência na Entrada do Condicionador.

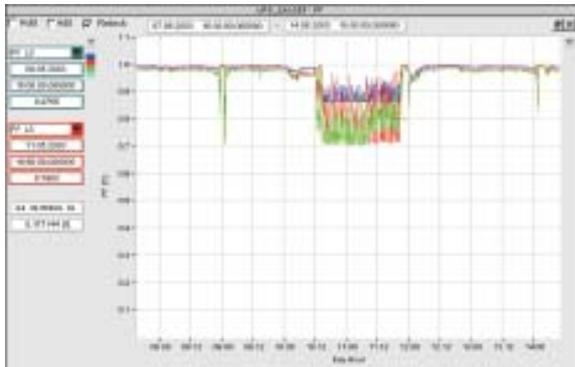


FIGURA 9 - Fator Potência na Saída do Condicionador.

### D. Evento de VTCD Registrado

No dia 13/02/03, ocorreu uma perturbação no sistema elétrico (afundamento de tensão), resultando no evento registrado na figura 10, que apresenta as tensões RMS de entrada e saída do condicionador de energia. Para este evento, verificou-se que o dispositivo operou adequadamente, ou seja, o setor da fábrica protegido pelo condicionador, não sofreu conseqüências, enquanto que outros setores da planta industrial sentiram a perturbação com a conseqüente paralisação da produção.

Demonstra-se nas figuras 10 e 11 os detalhes da citada ocorrência, permitindo uma comparação entre a tensão de entrada no dispositivo e a tensão de saída, ou seja, recebida pelas cargas.

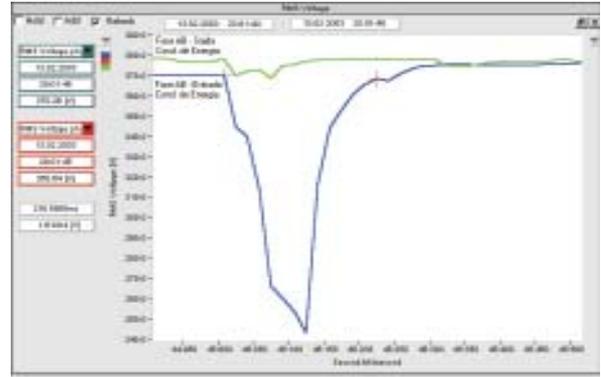


FIGURA 10 – Perfil RMS das tensões de entrada e saída do condicionador - Fase AB.

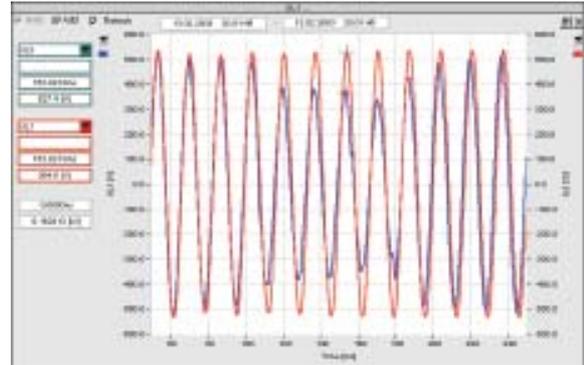


FIGURA 11 – Oscilografia das tensões de entrada e saída do condicionador – Fase AB.

Demonstra-se a seguir nas figuras 12 e 13, os registros de corrente durante o citado evento.

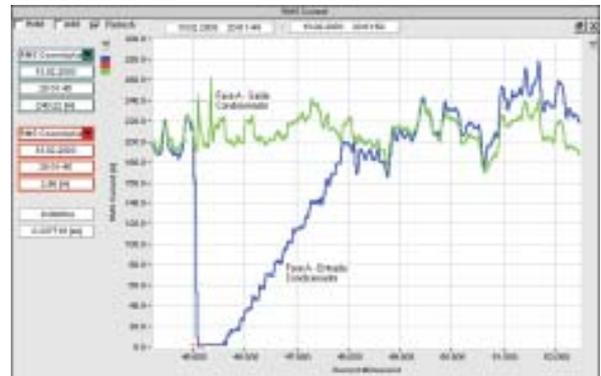


FIGURA 12 – Perfil RMS de Corrente da Fase A.

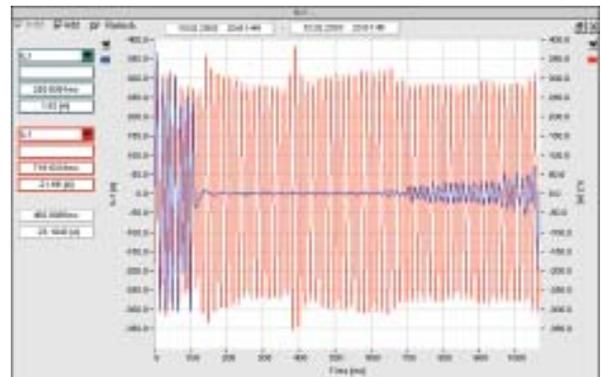


FIGURA 13 – Oscilografia da corrente da Fase A.

Fica claro nestas figuras que a corrente de entrada vai a zero durante o afundamento, enquanto a corrente na carga é mantida, garantindo o funcionamento normal da carga.

### E. Distúrbio Operacional

Quando da ocorrência de um surto de corrente gerado pela carga protegida, foi medida uma queda de tensão, resultando em um afundamento maior na tensão de saída do condicionador, com relação à tensão de entrada. Este fenômeno tem duração muito rápida, em torno de 3 ciclos, e deve-se à presença de reatores em série com a rede. A seguir mostra-se nas figuras 14 e 15 uma ocorrência deste tipo:

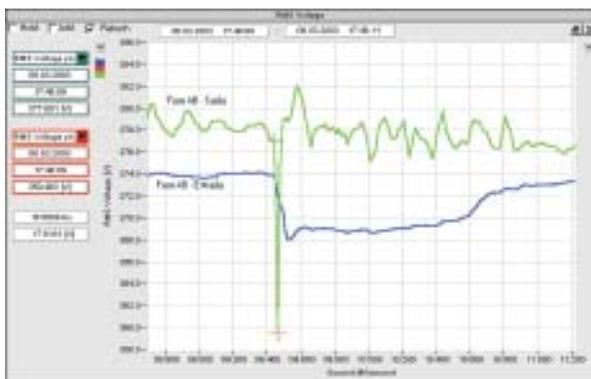


FIGURA 14 - Perfil de tensão RMS – Fase AB – Entrada e Saída.

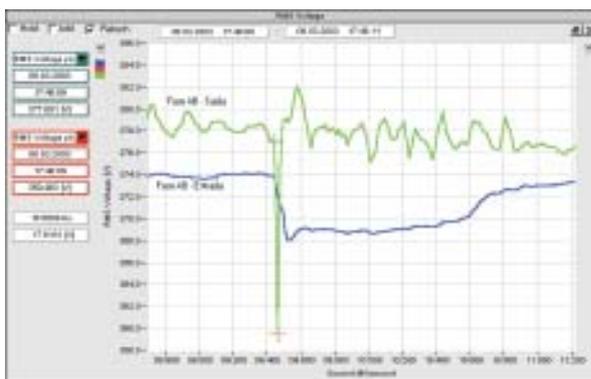


FIGURA 15 - Perfil de corrente RMS – Fase A – Entrada e Saída.

Destaca-se também que este tipo de ocorrência, em nenhum momento ofereceu risco operacional para as cargas protegidas.

## IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os principais resultados das atividades de pesquisa e desenvolvimento tecnológico executadas nas fases II e III do projeto de P&D da ELEKTRO, “O Impacto de Dispositivos Eletrônicos de Potência na Qualidade da Energia Elétrica”.

Monitoramentos da qualidade da energia em clientes industriais tem possibilitado o diagnóstico preciso das causas de perturbações no sistema elétrico ou industrial e suas consequências na operação de cargas sensíveis, tipicamente em processos industriais automatizados.

“Custom power technology” para a minimização de problemas de qualidade da energia elétrica em clientes foi investigada com a aplicação em projeto piloto de equipamentos de condicionamento de energia elétrica.

Apresentou-se os resultados de operação de um dispositivo de condicionamento de energia elétrica, baseado em conversores e armazenamento de energia em massa girante (“Flywheel Technology”). O comportamento do compensador para proteção contra afundamentos momentâneos de tensão instalado em uma unidade industrial, tem se mostrado bastante satisfatório. Ele tem atendido ao seu propósito principal que é evitar o desligamento do processo industrial de produção, devido a afundamentos de tensão de curta duração e também de interrupções de curta duração (até 13 segundos).

O dispositivo proporciona uma certa função de filtragem nos harmônicos de tensão provenientes da rede, atenuando-os e evitando sua propagação até a carga protegida pelo compensador. Por outro lado, ele ainda ajuda a confinar os harmônicos de corrente gerados pela carga protegida já que oferece uma impedância adicional em série com a rede, tal que sua soma resulta num valor expressivamente maior que a impedância equivalente oferecida pelo conversor PWM shunt. Contudo, a instalação do reator série reduz a potência de curto circuito no ponto de entrega, ou seja, no ponto onde é conectada a carga protegida. Com isso, surtos de corrente nessa carga causam quedas de tensão expressiva nos terminais do reator série, causando uma queda brusca na tensão de saída, além dos valores verificados na tensão da rede (tensão de entrada compensador). Todavia, foi verificado que a duração do afundamento na tensão de saída é inferior à duração do surto de corrente. Isso indica que o controlador do compensador atua em harmonia com a relação dos valores de reatâncias dos filtros de linha (série) e filtros do conversor (shunt), buscando um ajuste rápido da tensão de saída.

Por fim, a função de filtragem ativa do compensador não ficou devidamente evidenciada com os dados de medições disponíveis e merece uma análise mais profunda no futuro. Já a compensação de reativos e a regulação de tensão, apresentaram boa eficiência, mantendo a carga em condições operacionais em regime permanente suficientemente otimizadas.

A simulação computacional de fenômenos transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos e sistemas da eletrônica de potência através de programas baseados no EMTP – Electromagnetic Transients Program requer dados detalhados de configuração dos sistemas e dispositivos, que via de regra, não foram disponibilizados pelos fabricantes de equipamentos condicionadores de energia elétrica.

A metodologia científica e empresarial proposta e em execução neste projeto tem possibilitado uma real transfe-

rência de conhecimentos tecnológicos aos técnicos e engenheiros da ELEKTRO e ao mesmo tempo uma interação proativa entre universidade e empresa, com benefícios estratégicos para ambos e obviamente para o país.

O desenvolvimento e sistematização de metodologias de análise dos processos de aplicação da inovação tecnológica “Custom Power Controllers” e a estruturação de critérios e procedimentos de gestão tecnológica e transferência ao mercado dos benefícios do projeto são temas de pesquisa estratégica na ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A..

## V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., L. F. S. Dias, S. Nosaki, E. S. da Silva, M. Aredes, E. H. Watanabe, S. Carneiro Jr. e H. W. Dommel, “Aplicação Tecnológica de Equipamento de Condicionamento de Energia Elétrica”, artigo aceito para publicação no *V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE'03)*, Aracaju – SE, Brasil, 17 - 20 de agosto de 2003.
- [2] E. A. Mertens Jr., E. S. da Silva, B. D. Bonatto e L. F. S. Dias, “Impacto de Variações de Freqüência versus Variações de Tensão de Curta Duração”, artigo aceito para publicação no *XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Uberlândia-MG, Brasil, 19-24 de outubro de 2003.
- [3] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., E. S. da Silva, L.F.S. Dias, and S. Nosaki, “A Case of Power Quality Analysis at Sensitive Load”, *International Conference on Electricity Distribution - CIDEL*, Buenos Aires, Argentina, November 15-19, 2002.
- [4] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., E. S. da Silva, and L. F. S. Dias, “Power Quality Assessment at Sensitive Loads”, *IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference (IEEE/PES T&D 2002 Latin America)*, São Paulo –SP, Brazil, March 18-22, 2002.
- [5] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., F. A. Fernandes, e L. F. S. Dias, “A Qualidade da Energia Elétrica em Consonância com a Segurança Industrial”, *XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (XIV SENDI)*, Foz do Iguazú - PR, Brasil, 19 - 23 de novembro de 2000.
- [6] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr. e F.A. Fernandes, “Diagnóstico da Qualidade da Energia Elétrica em Clientes Industriais - Estudo de Caso”, *III Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE'99)*, Brasília - DF, Brasil, 8 - 12 Agosto de 1999.
- [7] B. D. Bonatto, B.D., E. A. Mertens Jr., e F. A. Fernandes, “Diagnóstico da Qualidade de Energia Elétrica no Sistema de Distribuição”, *III Conferência Latino-Americana de Distribuição de Energia Elétrica (III CONLADIS)*, Escola Politécnica da USP, Cidade Universitária, São Paulo - SP, Brasil, 8 - 13 de setembro de 1998.
- [8] L. E. O. Pinheiro, B. D. Bonatto, R. Torrezan, e F. A. Fernandes, “Monitoramento da Qualidade de Energia Elétrica Fornecida: Casos Práticos, Soluções e a Visão de Planejamento”, *XIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (XIII SENDI)*, São Paulo - SP, Brasil, 11 - 16 de maio de 1997.
- [9] L. E. O. Pinheiro, O. S. I. Komukai, B. D. Bonatto, e E. Yoshida, “Medições para Monitoramento da Qualidade de Energia em Sistema de Distribuição”, *I Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica (I SBQEE)*, UFU, Uberlândia - MG, Brasil, 10 - 13 de junho de 1996.
- [10] B. D. Bonatto, H. W. Dommel, E. A. Mertens Jr., and F. A. Fernandes, “Power Quality Analysis based on EMTP Simulations – Harmonics Case Study”, *5th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP'99)*, Foz do Iguassu – PR, Brazil, Volume 1, pp. 135-140, September 19-23, 1999.
- [11] B. D. Bonatto, E. H. Watanabe, E. A. Mertens Jr., H. W. Dommel, L. F. S. Dias, M. Aredes, S. Carneiro Jr., and S. Nosaki, “Eletrônica de Potência e Qualidade da Energia Elétrica: Pesquisas Cooperativas na ELEKTRO, COPPE/UFRJ e UBC”, *I Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (I CITENEL)*, Brasília – DF, Brasil, 6 - 7 de novembro de 2001.
- [12] B. D. Bonatto, H. W. Dommel, E. H. Watanabe, M. Aredes, S. Carneiro Jr., E. A. Mertens Jr., S. Nosaki, and L. F. S. Dias, “Custom Power Applications for the Improvement of the Quality of Power - Literature Review”, *IV Brazilian Seminar about the Quality of Power (SBQEE'01)*, Porto Alegre –RS, Brazil, August 12-17, 2001.
- [13] B. D. Bonatto, “EMTP Modelling of Control and Power Electronic Devices”, Ph.D. Thesis, The University of British Columbia (UBC), Department of Electrical and Computer Engineering, October 2001.
- [14] M. Aredes, E. H. Watanabe, B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., L. F. S. Dias and S. Nosaki, “Comparative Analysis of Shunt Active Filter Models in the EMTP/ATP and SABER Programs”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2003)*, New Orleans, USA, October xx-xx, 2003.
- [15] B. D. Bonatto and H. W. Dommel, “Negative Impedances as Power System and Control Elements in EMTP-Type Programs”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2003)*, New Orleans, USA, October xx-xx, 2003.
- [16] B. D. Bonatto and H. W. Dommel, “A Circuit Approach for the Computer Modelling of Control Transfer Functions”, *14th Power System Computation Conference (PSCC'02)*, Sevilla, Spain, June 24-28, 2002.
- [17] B. D. Bonatto, and H. W. Dommel, “Current and Voltage Dependent Sources in EMTP-based Programs”, *International Conference on Power System Transients (IPST'01)*, Rio de Janeiro – RJ, Brazil, Volume I, pp. 299-304, June 24-28, 2001.
- [18] J. Calviño-Fraga and B. D. Bonatto, “Multi-Format Graphical User Interface for EMTP-based Programs”, *International Conference on Power System Transients (IPST'01)*, Rio de Janeiro – RJ, Brazil, Volume II, pp. 692-697, June 24-28, 2001.
- [19] B. D. Bonatto, T. Niimura, and H. W. Dommel, “A Fuzzy Logic Application to Represent Load Sensitivity to Voltage Sags”, *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP'98)*, Volume I, pp. 60-64, Athens, Greece, October 14-16, 1998.
- [20] N. G. Hingorani, “Introducing Custom Power,” *IEEE Spectrum*, pp.41-48, June 1995.
- [21] H. W. Dommel, “Digital Computer Simulation of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-88, pp.388-399, April 1969.
- [22] H. W. Dommel, *EMTP Theory Book*, Second Edition., Vancouver, British Columbia, Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1992, updated in 1996.
- [23] M. Aredes, *Active Power Line Conditioners*, Ph.D. thesis, Technischen Universität Berlin, Berlin, Germany, March 1996.
- [24] H. Akagi, H. Fujita, “A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 3, July 1995, pp. 1570-1575.
- [25] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, no. 3, 1984, pp. 625-630.
- [26] E. H. Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes, “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, April 1993, pp. 697-703.