



V SBQEE

Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica

17 a 20 de Agosto de 2003

Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 12 113

Tópico: Aplicações de Novas Tecnologias

APLICAÇÃO TECNOLÓGICA DE EQUIPAMENTO DE CONDICIONAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Benedito Donizeti Bonatto
Elektro Eletricidade e Serviços S.A.

Ernesto Alberto Mertens Jr*
Elektro Eletricidade e Serviços S.A.

Luis Fernando Souza Dias
Elektro Eletricidade e Serviços S.A.

Shiguematsu Nosaki
Elektro Eletricidade e Serviços S.A.

Evaldo Serra da Silva
Elektro Eletricidade e Serviços S.A.

Maurício Aredes
COPPE/UFRJ

Edson H. Watanabe
COPPE/UFRJ

Sandoval Carneiro Jr.
COPPE/UFRJ

Hermann W. Dommel
Microtran Power System Analysis Corp.

RESUMO

As variações momentâneas de tensão têm sido apontadas como um dos principais fenômenos que mais afetam processos industriais automatizados, sendo responsáveis pela maioria dos problemas de qualidade da energia elétrica. Equipamentos baseados em Eletrônica de Potência podem oferecer soluções a estes problemas. Através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a Elektro está testando um dispositivo visando a mitigação destes fenômenos. Portanto, este artigo apresenta os resultados preliminares da aplicação deste dispositivo junto a um grande cliente industrial, com o propósito de proporcionar o condicionamento da energia elétrica, objetivando a compensação de distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica fornecida ao cliente. 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

Variações de tensão de curta duração, Condicionador de energia, Custom Power Controllers.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais fenômenos que afetam a qualidade de energia na concessionária Elektro têm sido as variações de tensão de curta duração e elas representam cerca de 90 % das reclamações de clientes industriais [1-4].

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 (VTCD's), 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 [1-9].

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" [10], no qual previu-se a avaliação e aplicação de dispositivos de condicionamento de energia elétrica para estes casos. Este artigo apresenta os resultados preliminares da aplicação de um dispositivo junto a um grande cliente industrial, com histórico de reclamações de perturbações caracterizadas por variações transitórias na tensão, com a conseqüente paralisação do seu

Elektro Eletricidade e Serviços S. A.

* Rua Ary Antenor de Souza, 321- CEP: 13053-024 - Campinas - SP - BRASIL

Tel.: +55 (0XX19) 3726 1477 - FAX: +55 (0XX19) 3726 1351 - E-mail: ernesto.mertens@elektro.com.br

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, 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. A fonte para o suprimento da energia necessária para a correção de variações de tensão ou interrupções de curta-duração de até 13 segundos, é proveniente de uma massa girante (energia cinética), ou seja, a partir de um volante de inércia (*"Flywheel Technology"*), associado a uma máquina elétrica, que permite a conversão rápida de energia cinética para energia elétrica, ou vice-versa, com uso de avançados dispositivos de acionamento baseados em eletrônica de potência.

2. CONDICIONADOR DE ENERGIA BASEADO EM "FLYWHEEL"

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). 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.

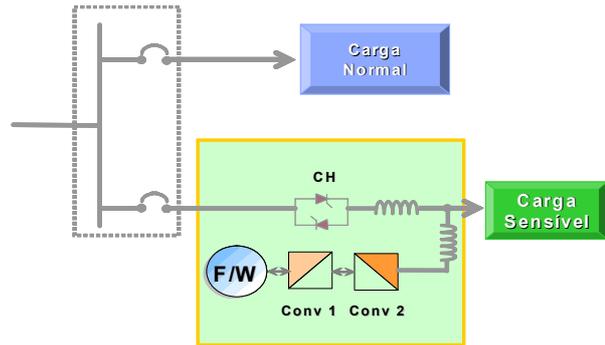


Figura 1 – Condicionador de energia baseado em "Flywheel".

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 $\frac{1}{4}$ 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.

3. HISTÓRICO

Dentre os clientes da Elektro com histórico de reclamações de distúrbios do tipo "Variações de Tensão de Curta Duração", que são os afundamentos e elevações de tensão, selecionou-se para aplicação do dispositivo de condicionamento um cliente do ramo de laticínios, suprido na tensão de 13,8 kV, através de um circuito aéreo nu. A Figura 2 apresenta o registro das variações rápidas de tensão, através das respectivas magnitudes e durações dos eventos, verificadas num dado período, durante o ano de 2003, na barra de 13,8 kV da subestação que supre o cliente. Estes resultados foram obtidos através de monitora-

mento na barra da S/E. Este registro mostra que a tensão nesta barra “afundou” 7 vezes abaixo de 90% e, por uma vez, atingiu os 110%. O menor tempo de afundamento registrado foi de 10 ms e o maior de 3 s. Para muitas aplicações esta qualidade de energia elétrica seria perfeitamente aceitável. No entanto, em cargas sensíveis, como no caso em estudo, mesmo estes poucos “afundamentos”, já seriam suficientes para grandes perdas. Alguns destes “afundamentos” podem ser responsáveis por paradas de toda a unidade produtiva. No caso em questão cada parada corresponde a, no mínimo, 5 horas sem produção.

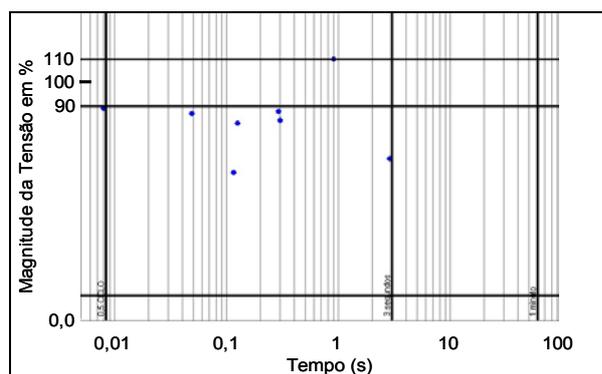


Figura 2 – Magnitudes versus duração das variações de tensão registradas na barra da S/E.

4. ANÁLISE E RESULTADOS DE MEDIÇÕES

A seguir apresentam-se os resultados de medições efetuadas na entrada e saída do condicionador de energia, desde sua instalação, efetuada em 12 de fevereiro de 2003. O analisador de qualidade de energia utilizado nestas medições foi o TOPAS 1000 do fabricante LEM.

4.1 REGULAÇÃO DE TENSÃO

Como se pode observar na Figura 3, 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 365 V, mas a saída fica mantida em 378 V constantes. No gráfico da Figura 4 verifica-se o perfil de corrente de carga na entrada e na saída do condicionador, demonstrando a grande variabilidade da carga.

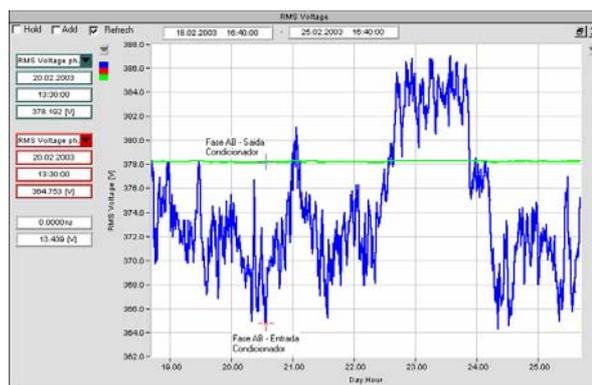


Figura 3 - Perfil de tensão RMS – Fase AB.

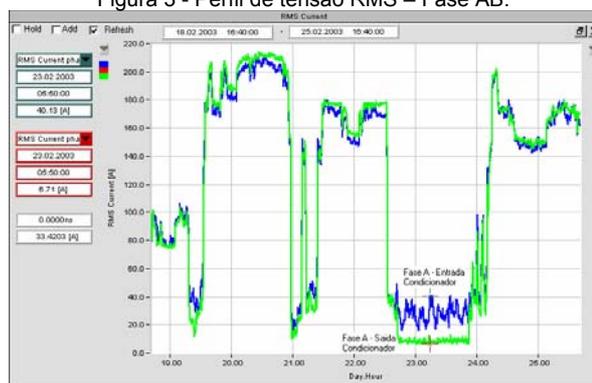


Figura 4 - Perfil de corrente RMS – Fase A.

4.2 DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

A seguir é mostrada uma avaliação da distorção harmônica total de tensão (THD_v), 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 (Figura 5 e Figura 6).

Verifica-se uma semelhança de distorção harmônica total - THD_v, 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.

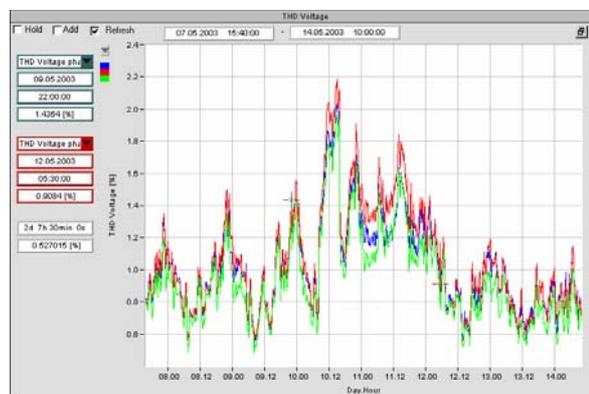


Figura 5 - Perfil de Distorção Harmônica Total – Entrada.

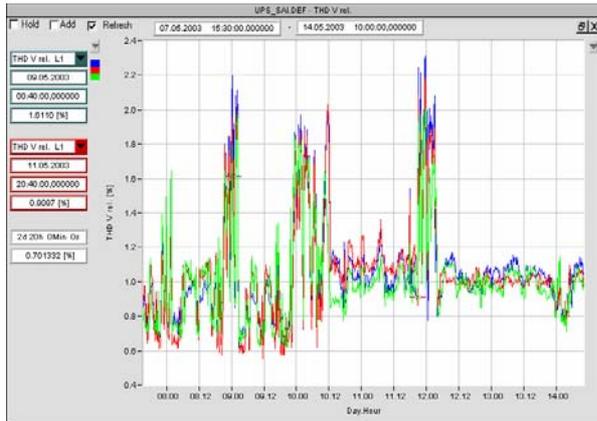


Figura 6 - Perfil de Distorção Harmônica Total – Saída.

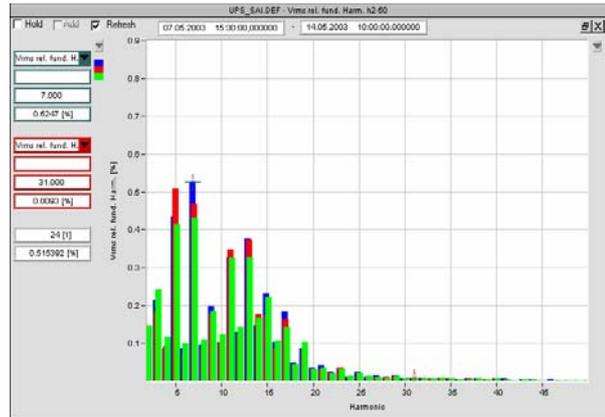


Figura 8 - Espectro Harmônico Tensão - Saída condicionador.

4.2.1 Harmônicas Individuais

Os gráficos das Figuras 7 e 8 apresentam os espectros harmônicos das tensões na entrada e na 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.

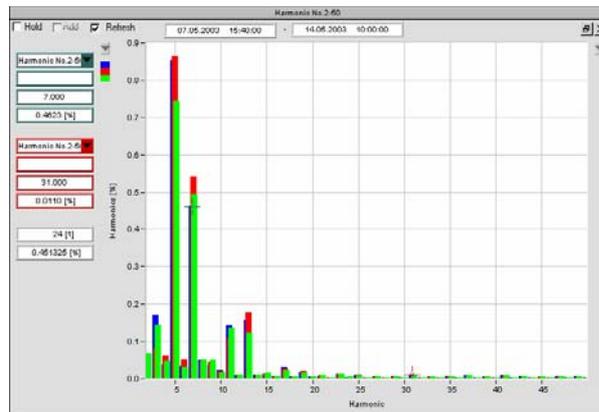


Figura 7 - Espectro Harmônico de Tensão - Entrada do condicionador.

4.3 COMPENSAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

Observa-se nos gráficos das Figuras 9 e 10, 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).

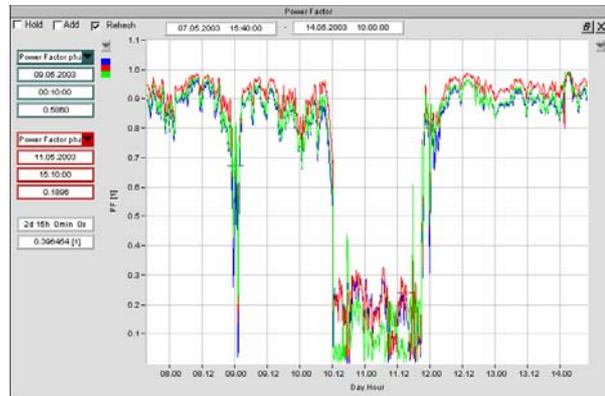


Figura 9 - Fator de Potência na Entrada do Condicionador.

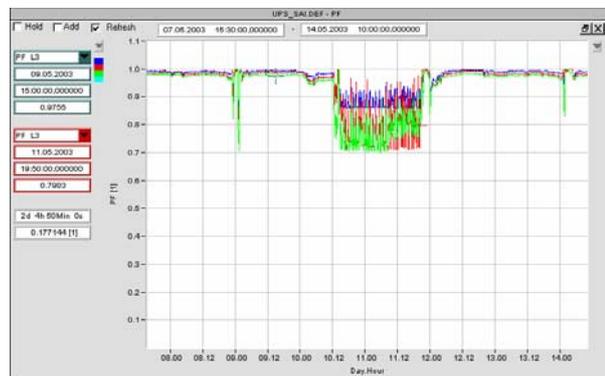


Figura 10 - Fator de Potência na Saída do Condicionador.

4.4 EVENTO DE VTCD REGISTRADO

No dia 13/02/03, ocorreu uma perturbação no sistema elétrico (afundamento de tensão), resultando no evento registrado na Figura 11, 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 11 e 12 os detalhes da citada ocorrência, permitindo uma comparação entre a tensão de entrada no dispositivo e a tensão de saída, ou seja, a recebida pelas cargas.

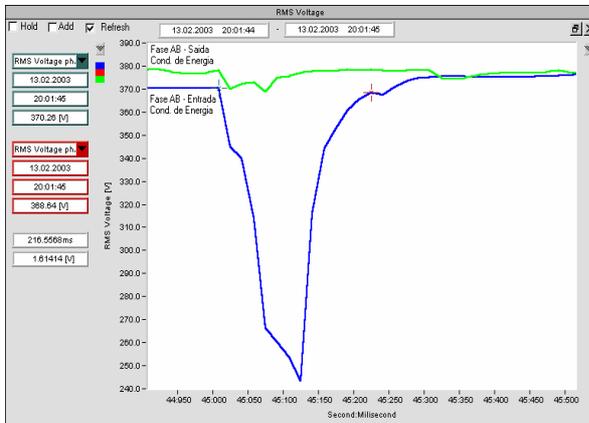


Figura 11 – Perfil RMS das tensões de entrada e saída do condicionador – Fase AB.

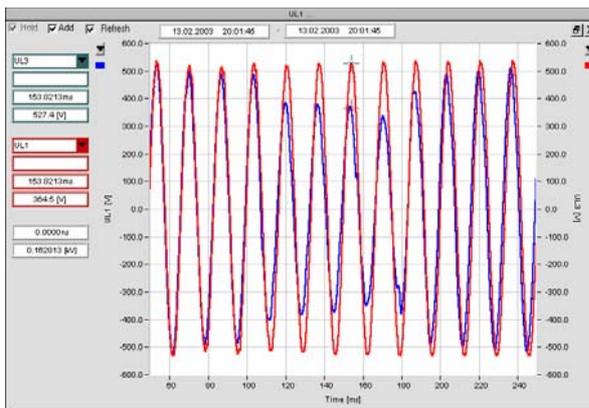


Figura 12 – Oscilografia das tensões de entrada e saída do condicionador – Fase AB.

Demonstra-se a seguir nas Figuras 13 e 14, os registros de corrente durante o citado evento. 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.

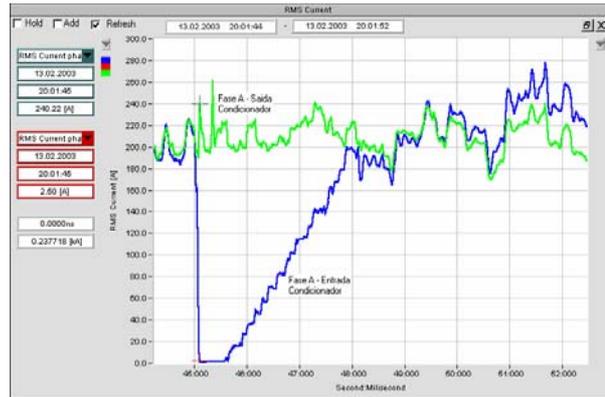


Figura 13 – Perfil RMS de Corrente da Fase A.

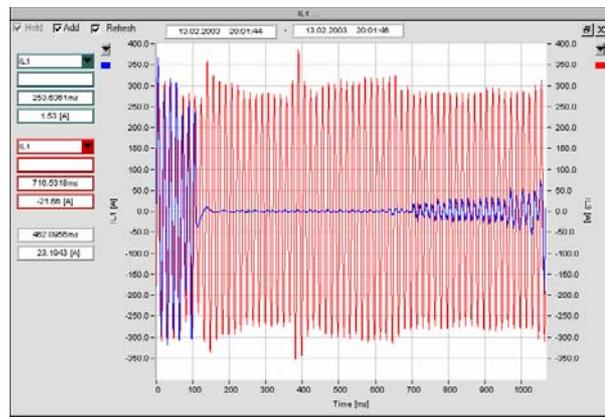


Figura 14 – Oscilografia da corrente da Fase A.

4.5 DISTÚRBO OPERACIONAL

Quando da ocorrência de um surto de corrente gerado pela carga protegida, mediu-se 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 15 e 16 uma ocorrência deste tipo:

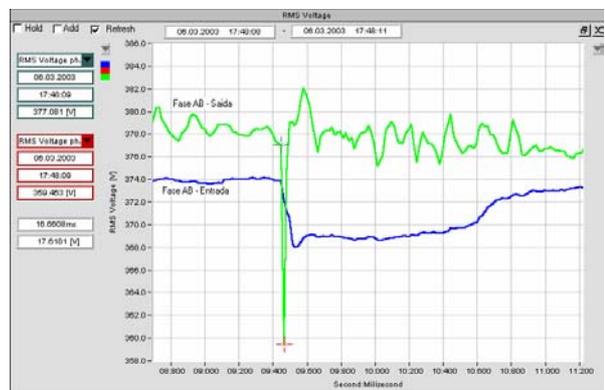


Figura 15 - Perfil de tensão RMS – Fase AB – Entrada e Saída.

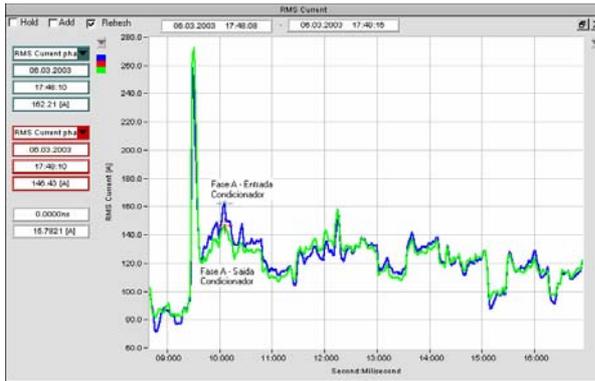


Figura 16 - Perfil de corrente RMS – Fase A – Entrada e saída

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

5. CONCLUSÕES

O presente artigo apresenta os resultados de operação de um dispositivo de condicionamento de energia elétrica, baseado em conversores e armazenamento de energia em massa girante. 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 de pasteurização com consequente início do ciclo de limpeza da linha 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). Contudo, 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.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] 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*, Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 19 - 23 de novembro de 2000.
- [3] 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*, Brasília - DF, Brasil, 8-12 Agosto de 1999.
- [4] 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*, Escola Politécnica da USP, Cidade Universitária, São Paulo - SP, Brasil, 8 - 13 de setembro de 1998.
- [5] 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*, Porto Alegre – RS, Brazil, August 12-17, 2001.
- [6] 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, Apr. 1993, pp. 697-703.
- [7] 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.
- [8] M. Aredes, "Active Power Line Conditioners," *Dr.-Ing. Thesis*, Technische Universität Berlin, Berlin, March 1996.
- [9] 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.
- [10] B. D. Bonatto, E. H. Watanabe, E. A. Mertens Jr., H. W. Dommel, L. F. S. Dias, M. Aredes, S. Carneiro Jr. e 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*, Brasília – DF, Brasil, 6 - 7 de novembro de 2001.