



SCQ/006

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

STE 1

INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA - SCQ

**RESPOSTA A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO ESPONTÂNEOS EM
REGULADORES ELETRÔNICOS DE TENSÃO E FONTES CHAVEADAS**

Kleber R. de Andrade Jr.
kleberjr@coelce.com.br
Companhia Energética do Ceará

Ruth P.S. Leão
rleao@gpec.ufc.br
Universidade Federal do Ceará

RESUMO

Dentre os fenômenos responsáveis pela variação na qualidade de energia elétrica, o afundamento de tensão tem se destacado, em especial no setor industrial, por suas características e efeitos. Um dos problemas mais comumente enfrentados pela indústria é a interrupção involuntária da produção ocasionada pela má operação de equipamentos e dispositivos digitais quando frente a distúrbios elétricos no fornecimento da energia. O objetivo deste artigo é apresentar o resultado do monitoramento e avaliação da resposta de fontes chaveadas e reguladores eletrônicos de tensão quando submetidos a afundamentos de tensão espontâneos. Os afundamentos espontâneos são eventos reais que ocorrem no sistema elétrico de forma não controlada. Os equipamentos foram monitorados por um período de quatro meses e foram registrados trinta ocorrências durante o monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE: Afundamento de Tensão, Monitoramento de Distúrbios, Tolerância de Tensão.

1.0 INTRODUÇÃO

Um considerável número de equipamentos elétricos opera adequadamente dentro de uma faixa relativamente estreita de variação de tensão, corrente e frequência. A preocupação com a variação da qualidade de energia elétrica tem crescido com a proliferação de equipamentos sensíveis. Para fazer face à variações na tensão de fornecimento, os reguladores eletrônicos de tensão têm sido largamente utilizados como instrumentos de interface para proteger, em especial, os computadores pessoais e seus periféricos. As fontes chaveadas, por sua vez, estão presentes nos equipamentos baseados em microprocessadores, como

computadores pessoais, controladores lógicos, unidades terminais remotas e acionamentos controlados. A avaliação da resposta de reguladores eletrônicos de tensão e de fontes chaveadas aos afundamentos de tensão é objeto deste artigo.

Os afundamentos de tensão podem, dependendo da magnitude e duração, provocar interrupções intempestivas em equipamentos eletrônicos sensíveis, dentre os quais se encontram os computadores pessoais.

Segundo Mark Waller (1) a faixa de variação de tensão típica tolerada pelas fontes chaveadas está em torno de 80-135V ou 90-140V para uma tensão de alimentação de 110V. Esta janela varia de um fabricante a outro. Um bom regulador de tensão tem, de forma aproximada, a mesma faixa de regulação da fonte chaveada. Com base no pressuposto de que a faixa de regulação de uma fonte chaveada é equivalente a de um regulador de tensão, necessitariam os equipamentos alimentados por fontes chaveadas de recursos adicionais de controle de tensão?

Este artigo apresenta o resultado do monitoramento e o desempenho de fontes chaveadas e reguladores eletrônicos de tensão quando submetidos a afundamentos de tensão espontâneos. O estudo busca mensurar a faixa de regulação dos reguladores de tensão de uso comum no mercado local e de fontes chaveadas de uso em PCs, a fim de checar a necessidade do uso dos reguladores de tensão como dispositivos de interface para os PCs e seus periféricos.

Para a avaliação da resposta dos reguladores de tensão e das fontes chaveadas, a geração dos afundamentos de

tensão foi obtida da própria rede da concessionária, refletindo eventos reais, espontâneos e aleatórios ocasionados no sistema de potência.

O período de monitoramento foi de quatro meses. Os distúrbios de tensão foram monitorados pelo equipamento comercial 3720 ACM da Power Measurement (2), o qual forneceu as formas de ondas, registros de eventos, registro de valores instantâneos de tensão, e curvas de tendências de variação de RMS.

2.0 AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Dentre os fenômenos responsáveis pela variação na qualidade de energia elétrica, o afundamento de tensão tem se destacado, em especial no setor industrial, por suas características e efeitos.

Os afundamentos de tensão são reduções de curta duração no valor eficaz da tensão. São considerados como o tipo de distúrbio de tensão mais danoso para a indústria em decorrência do número de ocorrências e dos prejuízos associados. Os afundamentos de tensão mostram-se mais danosos que as interrupções cuja probabilidade de ocorrência é maior para os afundamentos, de seis a dez vezes mais comuns, visto que compreendem uma larga faixa de variação na magnitude da tensão (0,9pu a 0,1pu) enquanto que a interrupção acontece para valores menores que 0,1pu. Os afundamentos são danosos também pelo largo alcance, em contraposição às interrupções cujos efeitos são localizados.

O afundamento de tensão se caracteriza por sua magnitude, duração e valor eficaz no tempo (2,3).

De acordo com a recomendação do IEEE Std 1159-1995 (5), as variações na tensão de curta duração podem ser, quanto a duração, divididas em instantânea (0,5 ciclos a 30 ciclos), momentânea (30 ciclos a 3s) e temporária (3s a 1min). O afundamento de tensão momentâneo é o mais comum dos afundamentos.

As principais causas de afundamentos são os curto-circuitos e partida de grandes motores (3). A duração de afundamentos de tensão devido à partida de motores de indução é em geral maior do que aquela devido aos curto-circuitos, na faixa de segundos a dezenas de segundos para a partida de motores e na ordem de alguns ciclos para os curto-circuitos.

A resposta de equipamentos sensíveis ao afundamento de tensão pode ser avaliada pela aplicação de afundamentos controlados e espontâneos. No afundamento de tensão controlado é possível inferir sobre a magnitude, duração, e o ângulo de fase para o início do distúrbio. Os afundamentos espontâneos são

eventos reais que ocorrem no sistema elétrico de forma não controlada.

3.0 FONTES CHAVEADAS

O método mais comum para mitigar afundamentos de tensão e interrupções de curta duração consiste na instalação de equipamento adicional de interface entre o sistema supridor e o equipamento ou parte do sistema que se deseja proteger contra os distúrbios.

Os equipamentos de mitigação constituem o único mecanismo em que o consumidor tem controle sobre a condição de incompatibilidade entre a carga e o suprimento. As mudanças no suprimento de energia bem como melhorias na imunidade de equipamentos sensíveis estão completamente fora do controle do usuário final (4,6).

Todas as técnicas modernas de condicionamento de energia estão baseadas em dispositivos de eletrônica de potência, com as fontes chaveadas sendo a principal unidade funcional dos condicionadores. A maioria dos métodos modernos de mitigação de afundamentos de tensão nos equipamentos de interface contém uma fonte de modo chaveado (3).

Uma fonte chaveada é um dispositivo eletrônico o qual pode gerar saída(s) de tensão ou corrente regulada. O termo regulada define uma unidade que mantém uma tensão (ou corrente) de saída constante para uma especificada faixa de variação na tensão ou frequência de entrada e para uma dada faixa de variação na corrente de carga (7). O chaveamento é obtido por algum interruptor eletrônico, em geral, um transistor bipolar ou MOSFET – *Metal Oxide Field Transistor*.

Uma fonte chaveada consiste essencialmente de um retificador e estágio de filtro na entrada, seguida por um conversor CC-CC, com saída filtrada e alisada. A regulação da tensão de saída é normalmente obtida pela técnica PWM – *Pulse Width Modulation*. A regulação pode também ser obtida por largura de pulso constante e frequência variável. Os tipos mais comuns de fontes são os conversores CC-CC *buck* (abaixador), *boost* (elevador), *buck - boost* (abaixador-elevador), e Cúk.

As fontes atuais usadas em PCs são descendentes diretas do projeto dos computadores IBMs. Os fabricantes de computadores desenvolveram diversos projetos com formas e tamanhos especiais e diferentes esquemas de chaveamento On/Off. Pode se dizer, no entanto, que todas as fontes têm projetos básicos iguais.

A Figura 1 apresenta uma configuração simplificada de uma fonte chaveada para computador (4).

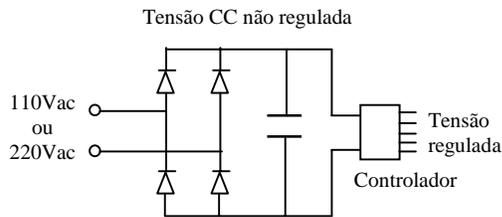


Figura 1 - Configuração Simplificada de Fonte Chaveada de Computador

O capacitor conectado ao barramento CC de tensão não regulada reduz a tensão de *ripple* na entrada do regulador de tensão. O diodo retificador conduz durante o tempo em que a tensão CA ultrapassa a tensão CC do capacitor, permanecendo sem conduzir no intervalo restante quando o capacitor estará descarregando no sentido da carga. Em condições normais de operação o capacitor é carregado duas vezes a cada ciclo, e descarrega durante o restante do ciclo. A quantidade de carga e descarga do capacitor é a mesma. O controlador ou regulador de tensão converte a tensão não regulada CC em tensão CC regulada. Se a tensão CA cai, a tensão não regulada no lado CC do retificador cai. O controle de tensão é capaz de manter a tensão de saída constante para uma certa faixa de variação na tensão de entrada. Se a tensão no barramento CC torna-se muito baixa o regulador de tensão CC também iniciará uma queda na tensão de saída com possível ocorrência de erro na operação. Alguns computadores detectam uma subtensão na entrada do regulador e enviam um sinal para um desligamento controlado do computador.

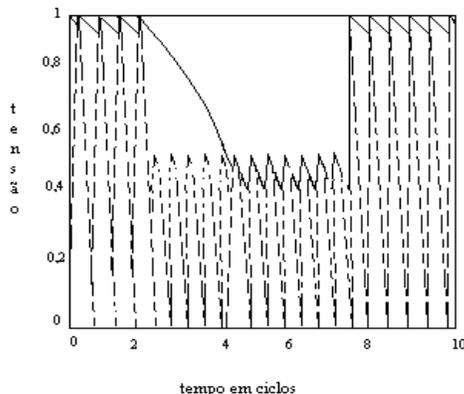


Figura 2 - Efeito de um Afundamento de Tensão no Barramento CC de um Retificador Monofásico

A Figura 2 mostra o efeito de um afundamento de tensão de 50% de magnitude na tensão de entrada sobre a barra de tensão CC não regulada. A figura apresenta a tensão no barramento CC antes, durante, e após o afundamento de tensão. A linha pontilhada representa o valor absoluto da tensão CA e a linha sólida representa a tensão na barra CC (4).

Com a tensão CA abaixo da tensão CC, o capacitor continuará descarregando até que a tensão no capacitor caia abaixo da tensão CA (condição de afundamento) e um novo ponto de equilíbrio é alcançado. Visto estar a tensão na barra CC mais baixa do que o normal, o capacitor irá descarregar de forma mais rápida porque a energia armazenada é menor. O descarregamento do capacitor depende apenas da carga conectada ($\tau=RC$), não da tensão CA da fonte de alimentação. Desta forma todos os afundamentos de tensão levarão ao mesmo decaimento inicial na tensão CC para R de carga constante. A duração do decaimento na barra CC será definida pela profundidade do afundamento da tensão CA. Quanto mais acentuado o afundamento mais tempo será necessário até que o capacitor tenha descarregado o suficiente e volte a ser carregado pela fonte CA (6).

Dentro de uma faixa de tensão de entrada, o regulador da fonte chaveada irá manter a tensão de saída constante, independente da tensão de entrada. Portanto, a potência de saída do regulador da fonte é independente da tensão de entrada e a carga conectada ao barramento CC pode ser considerada como uma carga de potência constante (4).

O desligamento intempestivo de um computador durante um afundamento de tensão é atribuído à queda da tensão no barramento CC níveis abaixo de um valor mínimo de tensão de entrada, V_{MIN} , para o qual o regulador da fonte pode operar corretamente. O computador não desligará para $V > V_{MIN}$, onde V representa a tensão no barramento CC (desprezada a tensão de *ripple*) que é igual à magnitude da tensão de afundamento no lado CA. Quando a magnitude do afundamento for $V < V_{MIN}$, a tensão CC só será menor que V_{MIN} se a duração do afundamento exceder um certo valor de tempo t_{MAX} . Conhecida a tensão CC mínima, pode-se calcular o tempo máximo de duração do afundamento de tensão que o equipamento pode tolerar.

$$t_{MAX} = (V_{MIN}^2 - 1/4\epsilon) \cdot T \quad (1)$$

A tensão CC mínima depende do projeto do controlador de tensão, podendo variar entre 50% e 90%.

A susceptibilidade de equipamentos eletrônicos de baixa potência que possuem fonte chaveada é semelhante à dos computadores pessoais. A consequência de interrupções intempestiva é que pode ser bastante diferente. Um computador que controla toda uma linha de produção de um processo industrial, quando levado ao desligamento devido a um afundamento de tensão pode trazer consequências como perda de produção ou diminuição da qualidade do produto. Já um computador pessoal pode trazer o inconveniente de perda de dados e conseqüente trabalho adicional para o usuário.

4.0 REGULADORES ELETRÔNICOS DE TENSÃO

Do ponto de vista da qualidade da energia constata-se que existe um número significativo de afundamentos de tensão durante o período de uso de um computador, o que leva a se pensar em uma proteção contra estes distúrbios.

Muitos dos distúrbios de baixa frequência podem ser tratados através da aplicação adequada de reguladores de tensão, exceto as interrupções. Existem diversos tipos de reguladores em uso atualmente, os quais podem ser divididos em reguladores a estado sólido e reguladores eletromecânicos. Os reguladores de tensão eletromecânicos não são porém adequadas para proteger cargas eletrônicas sensíveis contra variações rápidas na tensão.

Os reguladores com mudança automática de taps são projetados para manter a tensão de saída para variações na tensão de entrada, transferindo taps em um transformador de potência, do tipo isolador ou auto-transformador, durante a passagem por zero da onda de corrente. Alguns modelos fazem a mudança de tap no cruzamento por zero da tensão, o que causa um transitório, exceto se a carga possuir fator de potência unitário.

O número de taps define a faixa de regulação possível. Um bom regulador deve ter pelo menos quatro taps para baixo e dois taps para cima. Os taps são normalmente em degraus de 4-10%, dependendo de cada projeto. O tempo de resposta para a regulação varia de 1 a 2 ciclos. O tempo real, quando se considera o tempo do sensor e o da estabilidade do sistema de controle, fica em torno de 3 a 5 ciclos.

A maior vantagem do trocador de taps é a de que apenas as impedâncias do transformador, ou auto-transformador, e a dos interruptores estáticos estão presentes no circuito. O trocador de taps também possui capacidade elevada de sobrecarga de curta duração que ocorre no *inrush* na partida de CPUs, por exemplo. Na configuração com um transformador de isolamento o trocador de taps fornece isolamento de modo comum e boa regulação de tensão.

Com a evolução dos componentes semicondutores, as mudanças dos taps passaram a ser feitas eletronicamente através de interruptores estáticos. A Figura 3 mostra um diagrama simplificado de um regulador com chaveamento de taps feitos por SCR (*Silicon-Controlled Rectifiers*). Este circuito combina a vantagem de redução do ruído com a rápida ação de interrupção, sacrificando contudo a vulnerabilidade do SCR e da regulação no lado da carga (1). Em uma configuração em que os taps eletrônicos estão colocados no secundário do transformador a ação dos

interruptores cria ruídos que podem atingir diretamente o computador. Estando os SCR no primário do transformador, tornam-se mais vulneráveis por estarem diretamente conectados à fonte alimentadora, sacrificando a regulação por não estarem junto à carga.

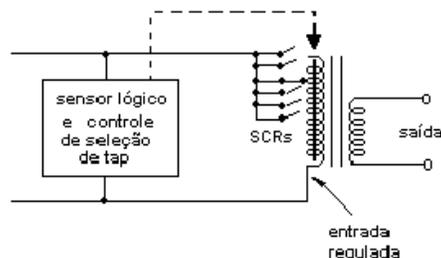


Figura 3 - Chaveamento por Tap com Entrada Regulada

O circuito sensor mostrado na Figura 3 toma uma amostra da tensão de saída para fazer o disparo do chaveamento, ou seja, o circuito sensor aguarda que a tensão caia a zero antes de acionar o chaveamento, porém como ainda há uma certa corrente, visto que o computador possui fator de potência indutivo, tal interrupção pode criar transitórios de chaveamento que podem interferir na operação do computador. O sistema sensor de passagem da corrente por zero foi a resposta para tal problema, reduzindo bastante o ruído criado.

5.0 MONITORAMENTO

No monitoramento das fontes chaveadas e dos reguladores eletrônicos foi utilizado o monitor de energia, tipo 3720ACM da Power Measurement. As medições foram realizadas no período de final de novembro/1999 a início de abril/2000.

O ponto de ajuste de afundamento de tensão foi fixado em 0,9pu, ativado a partir dos valores em tempo real das tensões na saída da fonte chaveada e do regulador de tensão.

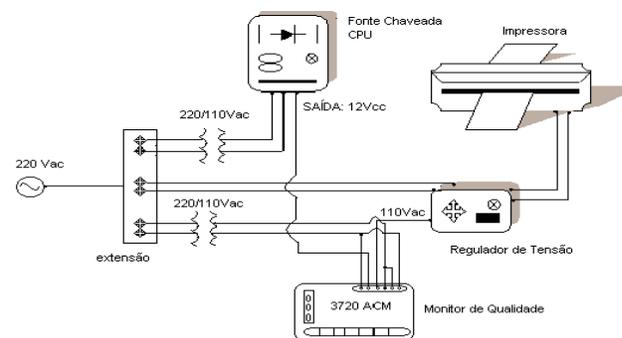


Figura 5 - Diagrama Esquemático das Ligações para Monitoramento de Fontes Chaveadas e de Reguladores de Tensão

A Figura 5 mostra o esquema montado da bancada de testes, onde aparecem o monitor de distúrbios, PC,

impressora, e os transformadores auxiliares. O monitor de distúrbios e o PC são alimentados em 110V através de um transformador abaixador 220/110V. O regulador de tensão é alimentado em 220V, o qual é ligado em série à impressora que opera em 110V. O regulador de tensão não foi instalado em série com a fonte (PC), mas usado como condicionador de energia para uma impressora à jato de tinta, que tem à semelhança do PC uma fonte chaveada, com a finalidade de não sobrepor a atuação dos dois, regulador e fonte chaveada do PC.

Nas entradas do monitor de distúrbios foram acessadas a tensão da rede CA, a tensão de saída do regulador eletrônico, e a tensão CC de saída da fonte chaveada, que durante todo o período de monitoramento permaneceu alimentando um PC tipo desktop Pentium com frequência do *clock* de 100MHz.

Para a realização dos testes foram utilizados três conjuntos de fontes chaveadas e reguladores eletrônicos diferentes, sendo utilizadas as fontes instaladas em PCs existentes em operação, juntamente com reguladores de 1kVA. O local do monitoramento foi nas dependências onde estavam sendo utilizados os computadores. O período de monitoramento para cada bancada de testes foi em média de 40 dias, onde ocorreram em média 10 registros de afundamentos de tensão em cada bancada de teste.

A seguir serão apresentadas as telas de monitoramento da mais severa ocorrência registrada – afundamento de tensão de na bancada de teste 2.

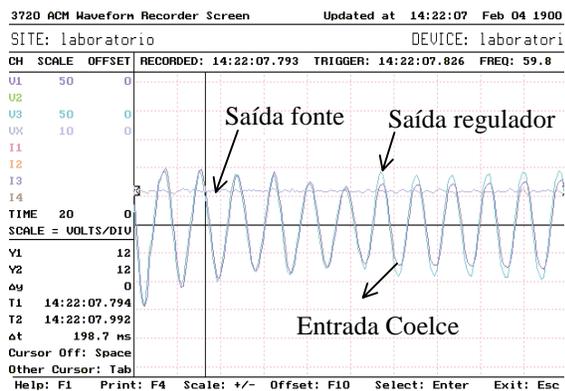


Figura 6 - Forma de Onda da Tensão de Entrada e da Tensão de Saída do Regulador de Tensão e da Fonte Chaveada

A tela de forma de onda mostrada na Figura 6 apresenta um total de dois ciclos pré-evento e dez ciclos pós- evento, com a tensão V1 (Entrada Coelce) medindo a tensão na rede da concessionária rebaixada de 220/110V, a tensão V3 medindo a tensão na saída do regulador, e Vx medindo a tensão CC na saída da fonte chaveada. A condição de afundamento de tensão

teve duração de 198,7ms ($\cong 12$ ciclos). A forma de onda Vx permaneceu inalterada durante o afundamento.

A tela de registro “high speed snapshot”, Figura 7, mostra os valores RMS das tensões da rede (V1) e da saída do regulador (V3) a cada dois ciclos, durante toda a duração do afundamento de tensão - ativação e desativação do ponto de ajuste correspondente a 0,9pu ou $0,9 \times 110 = 99Vca$ no secundário do transformador.

3720 ACM SNAPSHOT LOG 8 Screen Updated at 08:10:10			
SITE: laboratoriu			
DATE	TIME	V RMS	V U RMS
00/02/04	14:22:00.529	67	76
00/02/04	14:22:08.496	67	76
00/03/04	14:22:08.462	67	76
00/02/04	14:22:08.429	67	76
00/02/04	14:22:08.395	67	76
00/02/04	14:22:00.362	66	75
00/02/04	14:22:08.328	66	75
00/03/04	14:22:08.295	66	75
00/02/04	14:22:08.261	66	75
00/02/04	14:22:08.228	66	75
00/02/04	14:22:00.194	65	74
00/02/04	14:22:08.161	65	74
00/03/04	14:22:08.127	64	73
00/02/04	14:22:00.094	64	73
00/02/04	14:22:08.061	63	72
00/03/04	14:22:08.027	61	71
00/02/04	14:22:07.994	58	68
00/02/04	14:22:07.960	55	64

Figura 7 – Registro Tabular de Afundamento de Tensão

A magnitude do afundamento mais severo registrado na tela da Figura 7 foi de $(55/110) \times 100\% = 50\%$ na tensão de entrada e de 58% na saída do regulador.

A Figura 8 mostra a resposta do regulador para a condição de afundamento de tensão na entrada.

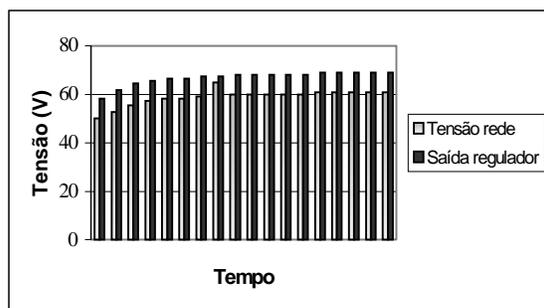


Figura 8 - Gráfico de Barras da Resposta de Regulação de Tensão do Regulador Eletrônico

A Tabela 1 descreve as ocorrências do sistema de potência que deram origem aos afundamentos mais severos obtidos em cada bancada de testes durante o período de quatro meses de monitoramento.

Tabela 1 - Quadro de Afundamentos da Tensão e suas Causas

Dia e hora	Tensão remanescente	Duração do Afundamento
30.11.1999 19: 33 (Bancada 1)	71%	0,500
Causa Afundamento Bancada 1	Abertura do disjuntor de 230kV-SE BNB, provocando oscilação em todo o sistema COELCE. Não houve operação de relés. Apenas sinalização do <i>carrier</i> recepção transferir-trip terminal 1 e 2. Causa não identificada.	
04.02.2000 14: 22 (Bancada 2)	50%	0,630
Causa Afundamento Bancada 2	Abertura do disjuntor de 230kV-SE BNB - atuou o esquema de sobrecarga CE FTZ, devido perda da LT 04M4. Registrada oscilação em todo o sistema COELCE.	
23.02.2000 13:16 (Bancada 3)	55%	0,697
Causa Afundamento Bancada 3	Descarga atmosférica, afetando as SE's PTX e FTS, percorrido todas as LT's 02C3 CLN/PCI, 02S1 DRV/FTS e 02S2 DRV/PTX e nada de anormal.	

6.0 CONCLUSÕES

O artigo apresentou o resultado do monitoramento da resposta de dispositivos condicionadores de energia a distúrbios na tensão de alimentação. Os condicionadores estudados foram fontes chaveadas presentes em computadores pessoais, e reguladores eletrônicos de tensão usados como interface de mitigação de distúrbios de tensão.

Os PCs com suas fontes chaveadas podem ser representativos de uma vasta gama de outros equipamentos sensíveis presentes nos segmentos industrial, residencial, comercial e terciário.

A avaliação dos dados monitorados mostra que para todos os afundamentos de tensão registrados o uso do regulador é irrelevante para a regulação da tensão de saída da fonte chaveada, uma vez que a tensão da fonte

manteve-se inalterada para todos os eventos, sem que houvesse qualquer condicionador adicional.

O uso indiscriminado dos reguladores de tensão para a alimentação dos modernos PCs e seus periféricos pode caracterizar uma redundância, ou uso inadequado deste condicionador, e conseqüentemente, um custo adicional em que tanto pequenos usuários como grandes empresas têm arcado quando da implantação de seus sistemas de informática.

A prática disseminada de uso de reguladores de tensão como interface de proteção de computadores pessoais demonstra ser bastante questionável.

7.0 BIBLIOGRAFIA

- (1) WALLER, Mark. **Surges, Sags and Spikes: Protecting your Personal Computer**. La Cañada, CA-USA: PROMPT Publications, 1989. 220p.
- (2) USER Manual of 3720 ACM da Power Measurements. Canada: Power Measurement, 1994. 230p. MRP 70000-0004.
- (3) DUGAN, Roger C., MCGRANAGHAN, Mark F., BEATY, H. Wayne. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw-Hill, 1996. 260p. ISBN 0-07-018031-8.
- (4) BOLLEN, Math H.J. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000. 543p. ISBN 0-7803-4713-7.
- (5) IEEE Std 1159-1995. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York, NY: IEEE Press, 1995. 70p. ISBN 1-55937-549-3.
- (6) BOLLEN, Math H.J. **IEEE Tutorial on Voltage Sag Analysis**. TP139-0. Piscataway, NJ:IEEE Press, 1999. ISBN 0-7803-4713-7.
- (7) TARTER, Ralph E. **Solid-State Power Conversion Handbook**. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 1993. 719p. ISBN 0-471-57243-8.