



SCQ/019  
21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

STE

INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA

### MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DISTÚRBIOS UTILIZANDO ANALISADORES DA QUALIDADE DE ENERGIA

Nelson C. de Jesus\*; João A.M. Neto; Laerte L. Piesanti; Edson L. Batista

UNIJUÍ - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

#### RESUMO

O monitoramento da qualidade de energia é um procedimento essencial para caracterizar o desempenho de sistemas elétricos e, por conseguinte, estabelecer índices e critérios para a identificação de perturbações, as quais causam grande impacto principalmente em consumidores industriais com modernos processos automatizados. Este informe técnico faz considerações sobre variações na qualidade de energia e apresenta métodos para a identificação das causas desses fenômenos, através da técnica de monitoramento.

#### PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento. Diagnóstico. Perturbações. Qualidade de energia. Analisadores.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente a qualidade de energia é uma preocupação constante que envolve tanto empresas de energia elétrica, quanto os consumidores e fabricantes de equipamentos. As concessionárias são responsáveis principalmente pela distribuição e fornecimento dos níveis de tensão do sistema. Os consumidores podem ser afetados de modo bastante significativo, ou por outro lado, perturbarem da mesma forma o sistema elétrico. Além disso, os fabricantes por muitas vezes definirem padrões e limites incompatíveis aos exigidos pela legislação federal vigente, também fazem parte deste contexto. Para determinar normas e índices de desempenho é necessário um minucioso levantamento do sistema elétrico. Isto vem sendo realizado através de medições estratégicas e sistemáticas com analisadores específicos em vários países. Medições e levantamento dos níveis da qualidade de energia elétrica também fornecem importantes

resultados para investigações e diagnóstico de distúrbios, obtendo-se eventos relacionados as tensões e correntes do sistema.

A partir de inúmeros casos práticos estudados, observam-se problemas e causas típicas que podem ser correlacionados. Entretanto, eventos com as mesmas características não necessariamente indicam o mesmo tipo de origem das perturbações. A análise da qualidade de energia usualmente envolve a combinação de sistemas de monitoramento, simulações, testes em laboratório e verificação de dados estatísticos. Para realizar-se uma análise dos diversos problemas que afetam a qualidade de energia também deve existir cooperação entre as partes envolvidas. De um modo geral, os sistemas de monitoramento podem ser utilizados com os seguintes objetivos:

- Monitoramento para caracterizar o desempenho do sistema

A performance dos sistemas deve ser inicialmente determinada para estabelecer uma base de dados com os reais níveis de qualidade de energia. A partir das características encontradas, as medições servem como subsídios para identificar eventuais áreas de problemas e assegurar níveis adequados de desempenho.

- Monitoramento para caracterizar problemas específicos

Inúmeros problemas na qualidade da energia podem ser resolvidos através de medições de curta duração. Este procedimento reflete um modo relativo do monitoramento da qualidade da energia, mas freqüentemente pode identificar a causa da incompatibilidade entre equipamentos e o sistema.

- Monitoramento como parte na melhoria da qualidade de energia

Serviços para a melhoria da qualidade de energia são executados por engenheiros, consultores e empresas de energia elétrica. Os resultados de um monitoramento contínuo e programado permitirão uma oferta de contratos diferenciados em relação aos níveis de qualidade fornecidos aos consumidores. Também neste caso, o monitoramento torna-se fundamental para estabelecer padrões e verificar os reais limites e áreas de operação.

## 2.0 - TIPOS DE VARIAÇÕES

É importante compreender os tipos de variações na qualidade da energia que podem causar problemas em cargas sensíveis. Basicamente, na área de monitoramento tem-se eventos classificados como distúrbios e variações em regime permanente (3).

Os distúrbios são medidos através de um ajuste limite para desvios e anomalias nas tensões e correntes. Tensões transitórias podem ser detectadas quando a magnitude excede o valor especificado (*threshold*). Variações na tensão RMS como afundamentos e interrupções podem ser verificadas da mesma forma. As variações em regime permanente incluem as variações normais da tensão RMS, desbalanço, distorção harmônica e flicker. Essas variações devem ser medidas pela amostragem da tensão e/ou corrente no período de monitoramento e, usualmente, são divididas em variações de curta e longa duração limitadas em relação a um minuto.

Para análise de fenômenos em regime permanente, os seguintes parâmetros podem ser importantes (1):

- Magnitude;
- Freqüência;
- Espectro;
- Modulação;
- Impedância da fonte;
- Energia.

Para eventos do tipo transitório, as seguintes características são relevantes (1):

- Tempo de Elevação;
- Amplitude;
- Duração;
- Espectro;
- Freqüência;
- Taxa de ocorrência;
- Impedância da fonte;
- Energia.

Deve-se confrontar os resultados das medições com os limites estabelecidos pelos fabricantes. A Tabela 1 apresenta algumas especificações considerando determinados limites de operação dos equipamentos eletrônicos (4).

TABELA 1 - Limites de Operação de Equipamentos Eletrônicos

EVENTOS	Tolerância normal	Tolerância crítica
Varição de Tensão	(-12% a +10%)	(-5% a 5%)
Desvio de Freqüência	47 - 63 [Hz]	59.5 - 60.5 [Hz]
Impulsos	100 - 300 [V]	50 - 100 [V]
Interrupção	20 [ms]	4 [ms]
Tensão Neutro-Terra	3 - 5 [V]	1 [V]
Distorção Harmônica da Tensão	10 - 20%	3 - 10%

## 3.0 - MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE ENERGIA

O monitoramento da qualidade de energia deve ser realizado seguindo um planejamento e organização de procedimentos de análise. Vários tipos de problemas podem ser solucionados a partir de um monitoramento que, primordialmente, envolva medições com instrumentação apropriada.

O principal objetivo no diagnóstico de problemas com qualidade da energia é identificar a fonte dos distúrbios. Somente após a identificação de sua origem pode-se determinar qual a melhor opção para mitigar os problemas correlacionados. Durante a investigação, deve-se estabelecer onde e por quanto tempo as medições serão executadas, bem como analisar as características do sistema como um todo.

As principais ferramentas utilizadas durante o monitoramento e diagnóstico em campo são analisadores da qualidade da energia (PQ), testes de circuitos, multímetros, sensores de temperatura (infravermelho), etc. Deve-se ainda realizar uma inspeção visual e física do sistema e instalações. Inicialmente, verifica-se a qualidade de energia no tocante à regulação e estabilidade da tensão em regime permanente. Em função da diversidade das faixas limites adotadas na operação dos modernos equipamentos utilizados na melhoria e automação de processos, o monitoramento da tensão por um longo período se faz necessário, sendo importante no levantamento do perfil das tensões de suprimento.

O primeiro passo no processo de investigação é monitorar a tensão na entrada da carga sensível, verificando a qualidade da energia "vista" pelo próprio equipamento. Se variações de tensão fora da faixa limite ou perturbações são registradas nesse ponto, a próxima fase é identificar corretamente a origem dos distúrbios, ou seja, se estes estão localizados no sistema ou internamente à instalação do consumidor.

Este tem sido o principal objetivo de engenheiros e consultores durante investigações sobre qualidade de energia. Para quaisquer eventos, a linha de divisão entre a concessionária e o consumidor é o ponto de medição, e os dados registrados neste local podem ser decisivos na determinação e solução de diversos problemas. Por esta razão, monitoramentos são

freqüentemente realizados no ponto de acoplamento comum (PAC), pois os respectivos resultados das medições podem identificar a direção e propagação dos distúrbios, quando utilizados instrumentos e analisadores apropriados.

As variações nos valores eficazes da tensão, os desvios nas formas de onda dos eventos e os distúrbios transitórios/momentâneos podem ser registrados pelos equipamentos analisadores da qualidade de energia. Alguns desses equipamentos tem a capacidade de gravar informações que podem indicar a direção de origem das perturbações.

Na averiguação de um problema de qualidade de energia, é importante monitorar o sistema, no mínimo, até a ocorrência do mesmo, o que pode acarretar períodos muito longos. Em casos específicos, tornam-se interessantes medições simultâneas com mais de um analisador, localizados em pontos estratégicos do sistema sob análise. Uma maneira de obter indícios sobre os distúrbios é verificar a sua intensidade para diferentes pontos de medição. A Figura 1 mostra os resultados da tensão RMS e dos impulsos ocorridos durante as medições.

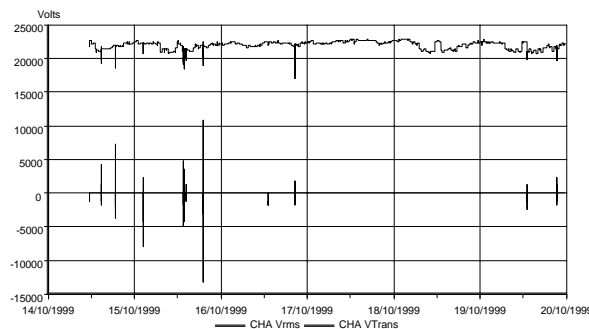


FIGURA 1 - Medições das tensões RMS e transitórias

Um método de análise freqüentemente utilizado para avaliar o impacto de variações de tensão sobre equipamentos sensíveis, baseia-se na comparação da intensidade e duração dos distúrbios com os limites de operação adotados por fabricantes de computadores, a Curva CBEMA - Computer Business Manufacturers Association. Atualmente, esta curva foi readequada e denomina-se Curva ITIC - Information Technology Industry Council, conforme ilustra a Figura 2.

Os valores obtidos durante as medições também podem ser comparados com os limites dos demais equipamentos sensíveis utilizados nas mais diversas aplicações (CLP's, ASD's, Relés, etc).

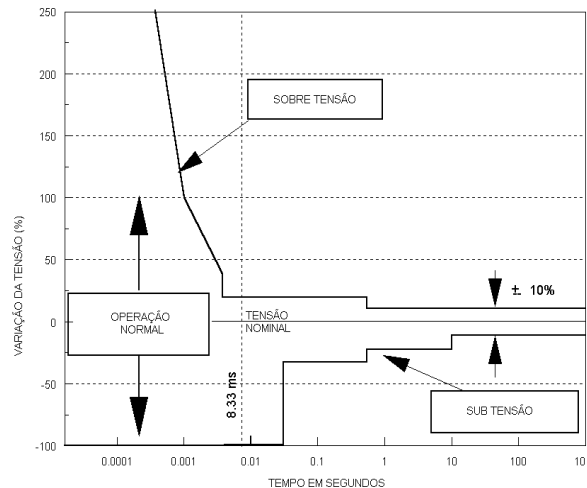


FIGURA 2 - Curva ITIC

A Figura 3 mostra os resultados de uma medição de longa duração (3), comparando-se as variações de tensão obtidas. Deve-se ressaltar que os resultados podem ser utilizados para uma análise geral dos eventos ocorridos. Para tanto, utiliza-se métodos estatísticos e através de gráficos como histogramas e 3D, observa-se o comportamento e as principais características do sistema monitorado.

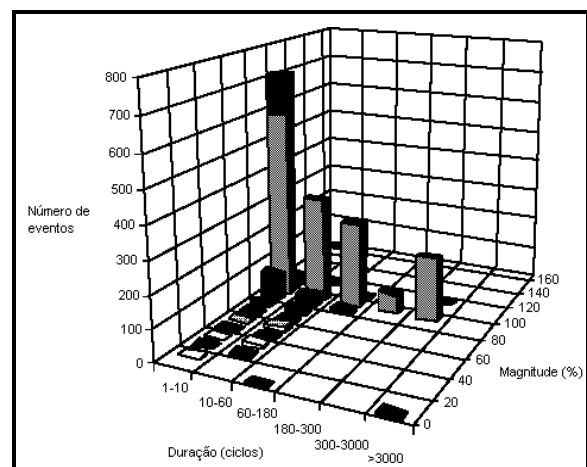


FIGURA 3 - Intensidade, duração e número de ocorrências de variações na tensão RMS

#### 4.0 - IDENTIFICAÇÃO DE PERTURBAÇÕES

Medições com analisadores específicos da qualidade de energia fornecem importantes informações para interpretar-se eventos e diagnosticar severos problemas de qualidade da energia. Os resultados mostram que casos típicos e exemplos estudados podem servir como referência para outras análises. A seguir, apresenta-se algumas considerações sobre a origem de distúrbios na qualidade de energia elétrica.

##### 4.1 - Origem de Afundamentos

A origem dos distúrbios nos valores RMS pode ser deduzida da interação entre os níveis das tensões e correntes medidas no circuito em análise. Variações de curta duração freqüentemente são severas e de grande impacto. As correntes solicitadas durante energizações podem ser elevadas e causar queda momentânea na tensão em todo o alimentador. Os valores da impedância da fonte e do sistema determinarão qual a área do sistema, em relação à estabilidade de tensão, será vulnerável aos afundamentos de tensão consequentes das correntes *Inrush*.

Registros simultâneos das tensões e correntes no circuito apresentam “fortes” indícios sobre a localização das variações na tensão. Se nenhum aumento é detectado na corrente, é provável que a variação de tensão tenha se originado a montante do ponto de medição. Uma exceção a essa regra ocorre com determinadas cargas do tipo potência constante, como fontes de potência chaveadas, transformadores ferromagnéticos e motores acionando determinadas cargas. Durante um afundamento relativamente longo, a corrente aumenta com o decréscimo da tensão para cargas do tipo potência constante. Para afundamentos de curta duração, a corrente pode diminuir ou tender a zero. Porém, se a corrente no circuito aumenta ligeiramente e diminui (ou tende a zero) durante o afundamento de tensão, então a origem relatada é provavelmente a fonte (4), (5). Apresentam-se a seguir três regras básicas para análise da origem das subtensões de curta duração (Voltage Sags) (7):

**Regra 1 - A origem de um afundamento de tensão é interna ao ponto de monitoramento, quando a corrente aumenta durante o início do evento.** A Figura 4 mostra as tensão e corrente de uma das fases durante a energização de uma indústria que experimentou uma redução momentânea nas tensões de linha.

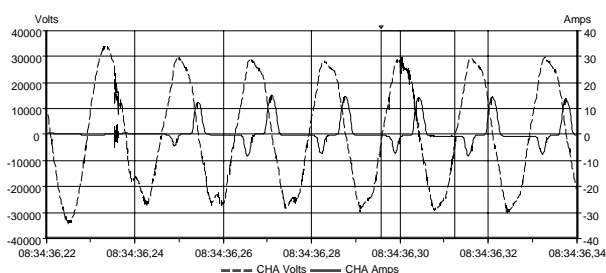


FIGURA 4 - Tensões e correntes durante energização

**Regra 2 - A origem de um afundamento de tensão é interna ao ponto de medição, ou no mesmo circuito, quando ocorre um aumento da tensão neutro-terra durante o seu início.** Muitos afundamentos de tensão são devidos a faltas no sistema elétrico ou aumento significativo da corrente de carga. A corrente de neutro resultante produzirá um aumento do potencial entre os condutores de neutro e terra. Este aumento de tensão será proporcional a corrente de neutro e à impedância deste condutor, desde o ponto de medição até a

ligação neutro-terra ( $V=R.I$ ). Portanto, quando diagnosticado problemas com afundamentos em que se verifica uma elevação da tensão neutro-terra no início da subtensão (Figuras 5 e 6), geralmente a origem do afundamento é interna ao ponto de medição. Exceções à regra ocorrem quando o neutro é distribuído ou quando conexões incorretas entre neutro e terra são realizadas.

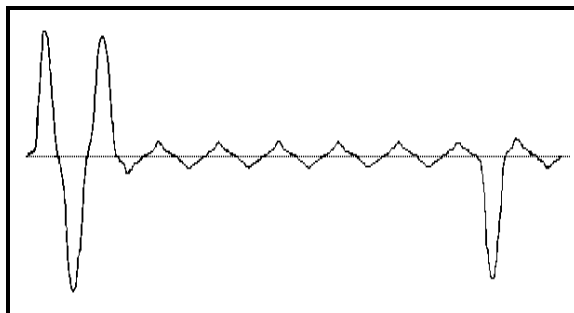


FIGURA 5 - Tensão neutro-terra durante afundamento

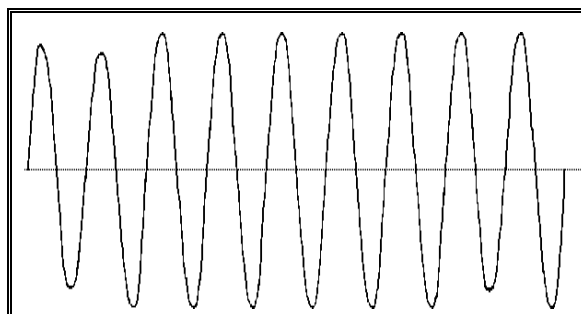


FIGURA 6 - Afundamento de tensão

**Regra 3 - A origem de um afundamento de tensão é provavelmente uma falta fase-terra, se a tensão de linha diminui aproximadamente para este potencial.** Isto porque uma falta fase-fase implica obviamente em uma interrupção de tensão. A Figura 7 ilustra um caso em que o afundamento de tensão foi devido a uma falta fase-terra, ocorrida a jusante do ponto de medição. Neste caso, o curto circuito foi eliminado pela proteção (fusível) do consumidor.

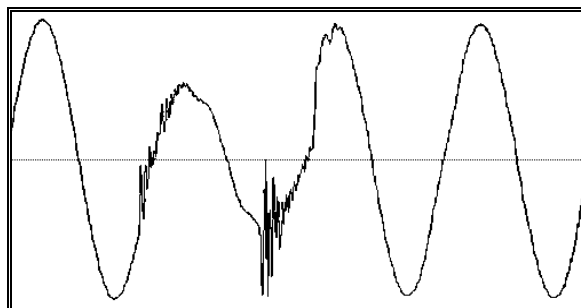


FIGURA 7 - Afundamento de tensão  
4.2 - Origem de Transitórios

Fenômenos transitórios ocorrem no sistema elétrico em função de diversas condições. Muitos transitórios

são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Transitórios podem ser consequência de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores, faltas à terra, operação de dispositivos semicondutores, falhas em condutores e perdas de conexões. Descargas atmosféricas são um caso especial de transitórios, devido aos níveis extremamente altos de energia e rápido tempo envolvido. Os transitórios são divididos em impulsivos e oscilatórios. Os transitórios e demais distúrbios também podem ser classificados quanto ao seu modo de ocorrência, onde têm-se distúrbios de modo comum e normal, dependendo de sua propagação entre os condutores fase, neutro e terra (4).

#### 4.2.1 - Transitórios impulsivos

A determinação da direção dos transitórios impulsivos requer alta sofisticação dos instrumentos de medição, em função da velocidade a qual os dados devem ser capturados e processados. Alguns equipamentos podem fornecer esta informação automaticamente, indicando a origem como fonte ou carga. Quando um impulso de tensão é acompanhado por um simultâneo impulso de corrente, a interação entre estas grandezas pode colaborar na interpretação e identificação dos distúrbios, como aconteceu para as variações nos valores RMS. Neste caso, a polaridade do transitório é um indicador da direção e sentido de propagação da energia. A Tabela 2 mostra a direção dos impulsos em função das respectivas polaridades (4), (6).

TABELA 2 - Polaridade e Origem de Impulsos

TENSÃO	CORRENTE	ORIGEM
+	+	FORNTE
-	-	FORNTE
+	-	CARGA
-	+	CARGA

Observa-se que, quando mudanças de polaridade ocorrem com o mesmo sentido nas tensões e correntes, a provável origem dos distúrbios é o sistema (fonte). Para polaridades opostas a origem é relacionada com a carga. É preciso destacar que a determinação da direção de impulsos em sistemas trifásicos nem sempre é possível. Por exemplo, um impulso ocorrido na fase A pode propagar-se através do ponto de medição e acoplar-se às fases B e C através da carga, retornando em direção oposta. A análise dos resultados neste caso pode ser ambígua. As Figuras 8 e 9 apresentam um evento no qual a carga foi relacionada com a origem dos transitórios, que, por sua vez, são repetitivos em função da comutação de tiristores e alta impedância da linha (4), (6). Para este evento, as mudanças de polaridade das tensões e correntes são opostas.

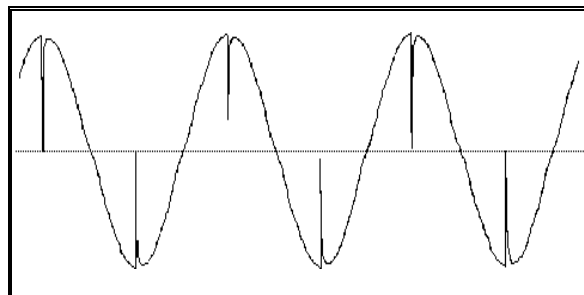


FIGURA 8 - Tensões transitórias

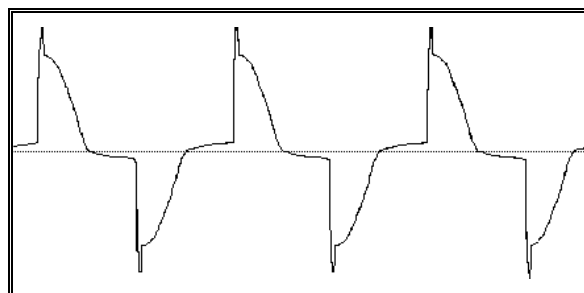


FIGURA 9 - Correntes transitórias

#### 4.2.2 - Transitórios oscilatórios

Os transitórios oscilatórios possuem variações com ambas as polaridades, positiva e negativa. A natureza indutiva ou capacitiva do sistema elétrico interage com a fonte de impulsos, resultando em transitórios oscilatórios. Um exemplo desse tipo de distúrbio é o chaveamento de bancos de capacitores para correção do fator de potência. Normalmente, a frequência fundamental fica na faixa de 300 a 900 Hz. A magnitude de pico pode ser próxima a 2,0 pu, mas tipicamente varia entre 1,3 a 1,5 pu, com uma duração entre 0,5 a 3 ciclos, dependendo do amortecimento do sistema (1). Transitórios oscilatórios com frequência fundamental maior que 500 kHz são considerados eventos de alta frequência. Transitórios oscilatórios com frequências abaixo de 300 Hz também podem ser encontrados em sistemas de distribuição, normalmente associados com ferorrressonância na energização de transformadores. A figura 10 apresenta as tensões e correntes transitórias induzidas na baixa tensão devido a descargas atmosféricas.

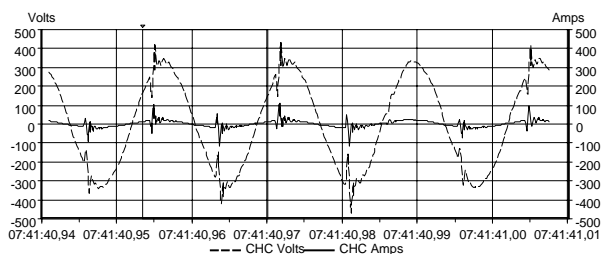


FIGURA 10 - Tensões e correntes transitórias

#### 4.3 - Falhas de Conexões e Isolamento

Um caso estudado com problemas em transformadores de distribuição indica a evolução dos distúrbios decorrentes de falhas com conexões. A Figura 11 mostra o comportamento típico durante o início do processo e subsequente progressão. Especificamente neste caso, os eventos evoluíram até uma falha completa e catastrófica do transformador devido a falhas das conexões internas. Uma característica importante na ocorrência de distúrbios deste tipo é que a forma de onda da tensão é afetada normalmente próximo ao instante da passagem por zero da corrente (2).

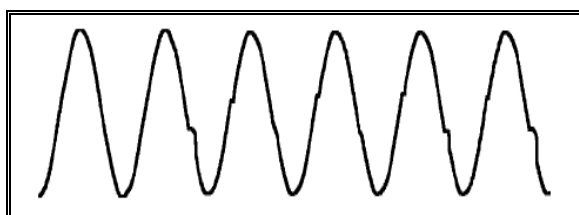


FIGURA 11 - (a) : início dos distúrbios

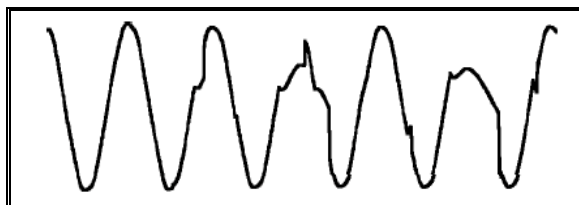


FIGURA 11 - (b) :progressão dos distúrbios

FIGURA 11 - Falhas de conexões internas ao transformador

Um outro aspecto a destacar refere-se a evolução dos sistemas de isolamento de equipamentos elétricos. Por exemplo, faltas à terra podem iniciar-se com uma pequena corrente de dispersão e evoluírem até a deterioração total da isolação. Este processo pode permanecer por vários dias até a danificação total dos componentes elétricos. Neste caso, considera-se que o maior *stress* ocorra durante o valor de pico da onda de tensão (2). Portanto, pode-se definir mais uma regra básica quanto às perturbações na qualidade da tensão:

*Regra 4 - Quando o distúrbio na forma de onda da tensão ocorre próximo ao valor de pico, a causa provável são as falhas de isolação.*

#### 5.0 - CONCLUSÕES

Na medida em que os equipamentos de alta tecnologia ficam cada vez mais sensíveis, os problemas relatados aumentam de modo significativo, causando interrupções e paradas de processos produtivos que geram imensos prejuízos econômicos. Entretanto, atualmente os instrumentos de medição tem evoluído de forma similar e os analisadores de distúrbios são extremamente rápidos e eficientes, podendo registrar transitórios de curtíssima duração, além de informações sobre as principais grandezas elétricas. O

informe técnico mostra alguns conceitos básicos e a importância de medições com analisadores específicos, objetivando detectar, investigar e corrigir problemas com a qualidade da energia. Em razão da dificuldade na análise de vários tipos de distúrbios, torna-se importante o estudo de casos práticos com características típicas que auxiliam na solução de outras ocorrências. Os resultados obtidos durante o monitoramento, quando possível registrando-se simultaneamente as formas de onda das tensões e correntes, podem fornecer indicações sobre a origem das perturbações. Os valores eficazes devem ser comparados aos recomendados pelos fabricantes e, muitas vezes, apresentam uma incompatibilidade permanente. Neste caso, deve-se estabelecer critérios no momento de aquisição dos equipamentos, comparando os limites de operação com aqueles regulamentados. Quando da ocorrência de problemas constantes com os equipamentos já em operação, deve-se buscar identificar a incompatibilidade e encontrar a melhor forma de condicionamento. A área de monitoramento na qualidade de energia apresenta constantes desafios e se reveste de grande importância, tanto para estabelecer as reais condições de operação dos sistemas elétricos, quanto na investigação detalhada de problemas com a qualidade do fornecimento. Um levantamento das conseqüências na carga também pode ser fundamental na solução de cada caso. Vale salientar que características similares podem apresentar causas diferentes e, sendo assim, somente as experiências adquiridas durante os monitoramentos podem nortear corretamente a investigação realizada.

#### 6. 0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dugan, R.C., Mcgranaghan, M.F., Beaty, H.W. *Electrical power systems quality*; McGraw-Hill.
- (2) Mueller, D., Lamore, J. *Detecting, identifying, and correcting power quality problems*; Electrotek Concepts.
- (3) Melhorn, C.J., McGranaghan, M.F. *Interpretation and analysis of power quality measurements*; Electrotek Concepts.
- (4) Dranetz Technologies, INC. *The Dranetz Field Handbook for Power Quality Analysis*;1991.
- (5) Jesus, N.C., Neto, J.A.M., Oliveira, H.R.P.M., Koch, N., Eidt, M. *Medição e Análise de Sags de Tensão em um Consumidor Industrial*; Revista Eletricidade Moderna; nº 298; Jan. 1999.
- (6) Price, K. *Practices for Solving End-User Power Quality Problems*; IEEE Transactions on Industry Applications. Nov/Dez. 1993.
- (7) PQToday - *The Journal of Power Quality Issues Solutions*; Vol 1, nº1 e nº2, Vol 2, nº1, <http://www.powerquality.com/pqtoday>.