



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO - X

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE DE ENERGIA COM DIAGNÓSTICOS ATRAVÉS DE ALARMES E PRE-ALARMES

Jorge Coelho*

Arlan Luiz Bettiol

Diego Brancher

Rhafael Moretti

UFSC

A VERO DOMINO

ANEEL

CELESC DISTRIBUIÇÃO S/A

RESUMO

Neste trabalho se apresenta a aplicação das ferramentas de Controle Estatístico de Qualidade em dados obtidos de analisadores de qualidade de energia para identificar situações reais críticas (alarmes) ou inadequadas (pré-alarmes preventivos) nos requisitos de qualidade do produto energia elétrica em clientes especiais. A análise dos alarmes e pré-alarmes desenvolvidos possibilita um estudo das situações que possam causar danos financeiros àquelas instalações industriais sensíveis a níveis inadequados de tensão, a VTCD's, desequilíbrios de tensão e distorção harmônica.

As informações obtidas da análise de medições reais com diferentes analisadores de qualidade de energia são apresentadas, particularizando os limites (linhas dos gráficos de controle), as situações críticas (alarmes) e as áreas limites (pré-alarmes), de acordo com as características de cada consumidor, isto é, pode ser calibrado para novas situações.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia Elétrica, Monitoração, Controle estatístico de Qualidade, VTCD's, desequilíbrio, distorção harmônica

1.0 INTRODUÇÃO

Ao definir qualidade de energia elétrica, Dugan (1) relata que a qualidade de energia, assim como a qualidade de outros produtos e serviços, é difícil de ser quantificada. Não há apenas uma definição aceita sobre o assunto. Existem padrões para tensão e outros critérios técnicos mensuráveis, porém a medida final da qualidade de energia elétrica é determinada pela performance e produtividade dos equipamentos do consumidor de eletricidade. Se a energia elétrica é inadequada para as necessidades do consumidor, há falta de qualidade de energia elétrica.

Os principais distúrbios de energia elétrica segundo a norma IEEE-1159 (2) são: Sobretensões transitórias (transiente impulsivo e transiente oscilatório); Oscilações de tensão (*sags*, *swells*, sobretensões, subtensões e interrupções); Distorções de forma de onda (harmônicos, *notching* e ruído); Flutuação de tensão; Desequilíbrios de tensão; Variações de frequência. A seguir são apresentados informações, limites e definições dos principais distúrbios relacionados com impactos econômicos.

1.1 Distúrbios de Qualidade de Energia

Definiu-se como objeto de estudo deste trabalho a monitoração do nível de tensão, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's), o desequilíbrio de tensão entre as fases e o nível de distorção harmônica. A escolha destes distúrbios deve-se ao número significativo de trabalhos e estudos, com destaque para os VTCD's, objeto

(*) Depto Engenharia Elétrica_CTC_UFSC
CP 476 – CEP 88040-970 Florianópolis – Santa Catarina

(48) 3721 9933 – coelho@labplan.ufsc.br

de estudo do “Grupo de Trabalho C4-4, *Impactos Econômicos Associados à Perda de Qualidade da Energia Elétrica*”(3).

1.1.1 VTCD's

As Variações de Tensão de Curta Duração incluem os distúrbios *sag*, *swell* e interrupções momentâneas e instantâneas. O *sag* (dip ou afundamento de tensão), é o decréscimo para valores entre 0,1 e 0,9 por unidade (p.u.) da tensão ou corrente eficaz, com tempo entre meio ciclo, da frequência fundamental, e um minuto. O *Swell*, por sua vez, é a elevação da tensão ou corrente eficaz para valores entre 1,1 e 1,8 p.u.. A interrupção é a perda total da tensão para valores abaixo de 0,1 p.u. em uma ou mais fases (2).

1.1.2 Desequilíbrio de Tensão

Para a ANEEL (4), o desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações nos padrões trifásicos do sistema de distribuição. A forma mais usual de cálculo do fator K (índice de mensuração do desequilíbrio entre as fases) é a razão entre magnitude de tensão eficaz de seqüência negativa e a magnitude de tensão eficaz de seqüência positiva. Entretanto, o índice K pode ser calculado por equação alternativa definida no PRODIST (4), cuja expressão é:

$$K\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 + 6\beta}}} \times 100 \quad (1) \quad \text{Onde} \quad \beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{ca}|^4 + |V_{bc}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{ca}|^2 + |V_{bc}|^2)^2} \quad (2)$$

sendo que V_{ab} , V_{ca} e V_{bc} são os módulos das tensões trifásicas.

O limite do fator K, em várias normas nacionais e internacionais (5) tende a 2%.

1.1.3 Nível de Distorção Harmônica

Neste estudo optou-se em avaliar a distorção de corrente em vez da distorção de tensão, pelo fato de o consumidor, no entendimento da norma IEEE-512 (6) ser o responsável pela injeção dos níveis de corrente harmônicas. A distorção de tensão é de responsabilidade da distribuidora, já que esta possui controle sobre as impedâncias do sistema. O índice utilizado para o estudo dos níveis harmônicos foi o TDD (*total demand distortion*) cuja equação é dada por:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (3)$$

onde I_L é a corrente de pico, ou corrente máxima, de carga medida na componente de frequência fundamental no ponto de acoplamento comum; e I_h é a corrente harmônica de ordem h .

Os limites para diferentes relações entre corrente de curto circuito e corrente de carga estão em (6), onde o valor padrão adotado para a rede de baixa tensão é de 20%.

2.0 - CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

O Controle Estatístico de Qualidade (CEQ) busca avaliar a qualidade de conformação (relação entre os bens produzidos e suas especificações). Todo processo de fabricação apresenta variação entre os bens produzidos. Estas variações implicam em variações na qualidade dos produtos. Esta variabilidade se deve a fatores aleatórios e a fatores não aleatórios. O primeiro diz respeito à variabilidade natural do processo, fruto de muitas pequenas perturbações (causas aleatórias) (7). Esta variação faz parte do processo, e é inevitável (8, 9).

As perturbações maiores, mais significativas, são variações não aleatórias. Estas variações não aleatórias, chamadas de causas especiais, ocorrem devido a eventos identificáveis e que afetam a qualidade, como por exemplo, a operação inadequada de equipamentos. Ao ocorrerem variações não aleatórias, as causas devem ser identificadas, analisadas e removidas (8), evitando-se perdas de qualidade de energia com conseqüentes perdas de produção, insumos e outros (10),(11). Para garantir a qualidade dos produtos e serviços, o processo deve apenas sofrer de distúrbios aleatórios, pois muito provavelmente, as especificações serão atendidas (7).

2.1 Gráficos de Controle

O gráfico de controle é a ferramenta que permite o acompanhamento rápido e eficiente se o processo está ou não sob controle estatístico. Para utilização de um gráfico de controle, nas abscissas, marca-se o número das amostras ou de medidas, sempre seguindo a ordem cronológica, para assim possibilitar a associação ao tempo. Nas ordenadas, marca-se o valor observado da característica sobre controle (tensão, corrente ou potência). Neste eixo, existem três importantes linhas: a linha central, o limite superior e o limite inferior.

Os três gráficos básicos normalmente usados para o controle de variáveis são o da média (\bar{X}), do desvio padrão (S) e da amplitude (R). O gráfico da média compara a média das amostras com o valor alvo (preferencialmente, um valor definido pelo órgão regulador). Os gráficos do desvio padrão e da amplitude buscam analisar a dispersão das amostras com o valor médio. Pela facilidade de cálculo e resultados satisfatórios, o gráfico da amplitude é mais utilizado (12), entretanto, para amostras maiores que 10 elementos, a amplitude perde a sua eficiência, recomendando-se utilizar o gráfico do desvio padrão (7), conforme aplicado neste trabalho.

As linhas dos gráficos de controle (linha central, limite superior e limite inferior) são definidas com base na média e no desvio padrão da distribuição da variável com o processo sujeito apenas a causas aleatórias (variações normais do processo). Logo, devem-se eliminar os dados medidos de tensão, desequilíbrio e distorção durante um evento que impossibilitou a indústria de operar com a máxima eficiência. A média deve sempre coincidir com o valor alvo da variável, por exemplo, a tensão nominal da rede. Os limites de controle do gráfico de controle são usualmente estabelecidos a três desvios padrão da média.

Para construção do gráfico de controle \bar{X} , as equações que definem as três linhas do gráfico são dadas por :

$$\begin{aligned} LSC_{\bar{X}} &= \mu_0 + 3\sigma_0 \\ LM_{\bar{X}} &= \mu_0 \\ LIC_{\bar{X}} &= \mu_0 - 3\sigma_0 \end{aligned} \quad (4)$$

onde μ_0 e σ_0 representam os valores estimados da média e do desvio padrão do processo quando este está sob controle. LSC é o limite superior, LM é a linha central e LIC é o limite inferior.

O gráfico do desvio padrão S é definido de maneira idêntica, porém, como a variação não pode ser negativa, quando o valor do limite inferior for negativo, adota-se para este limite o valor zero. Para variáveis com especificação unilateral (distorção harmônica e desequilíbrio de tensão) analisam-se apenas o valor médio e o limite superior.

2.2 Análise Estatística dos Gráficos de Controle

As causas especiais (não aleatórias, que não são comuns no processo) são identificadas num gráfico de controle por uma diferença significativa entre o valor observado e a média do processo, ou seja, valores amostrais fora da faixa de controle (região entre o LIC e o LSC) do gráfico de controle (8). A presença de causas especiais é detectada pelo aumento da dispersão e/ou alteração da média do valor alvo (9).

Entretanto, não apenas quando um ponto ultrapassa os limites de controle significa que o processo está fora de controle. Mesmo uma série de pontos estando dentro dos limites de controle, de acordo com o comportamento desta série de pontos, pode-se constatar que o processo está saindo de controle. Uma análise estatística do comportamento destes pontos pode prevenir que a qualidade da energia esteja fora de especificação (7).

3.0- METODOLOGIA

O objetivo das análises a seguir é de viabilizar a aplicação dos conceitos de Controle Estatístico de Qualidade para monitoração dos requisitos de tensão e distorção, assegurando a qualidade da energia elétrica fornecida.

Inicialmente devem-se calcular as linhas dos gráficos de controle. Após, a cada intervalo de integração, de 10 minutos segundo recomendação da Res. No. 505/2001 (13), os dados de medição obtidos de analisadores de qualidade de energia elétrica são analisados. Caso haja o disparo de alarmes ou pré-alarmes, os dados correspondentes são armazenados para análise posterior.

Para cada intervalo de 10 minutos é calculado a média e desvio padrão das variáveis, criando uma amostra. Para estas amostras também se aplicam os procedimentos de CEQ. Após, ao fim do dia, semana ou mês podem-se analisar as variações através dos gráficos da média e do desvio padrão.

3.1 Configuração dos Alarmes e Pré-alarmes

As situações críticas, que diminuem ou interrompem a capacidade produtiva das indústrias serão caracterizadas por alarmes e pré-alarmes. Os alarmes, para a qualidade de energia elétrica, é a ocorrência de distúrbios (VTCD's) ou quando um índice excede seu limite (desequilíbrio e distorção harmônica). Os pré-alarmes estão

divididos em dois níveis, conforme FIGURA 1. O Nível I refere-se a pontos fora da faixa de controle dos gráficos de controle. Por sua vez, os pré-almos do Nível II, são os seguintes testes estatísticos (regras) para o gráfico da média:

- Pré-alarque Nível II – 1 (PAII-1): no mínimo 5 amostras seguidas entre $\mu + 2\sigma$ e LSC;
- Pré-alarque Nível II – 2 (PAII-2): no mínimo 5 amostras seguidas entre $\mu - 2\sigma$ e LIC;
- Pré-alarque Nível II – 3 (PAII-3): 10 amostras entre 11 amostras seguidas acima de $\mu + \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 4 (PAII-4): 10 amostras entre 11 amostras seguidas abaixo de $\mu - \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 5 (PII-5): 12 amostras entre 14 amostras seguidas acima de $\mu + \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 6 (PII-6): 12 amostras entre 14 amostras seguidas abaixo de $\mu - \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 7 (PII-7): 16 amostras entre 20 amostras seguidas acima de $\mu + \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 8 (PII-8): 16 amostras entre 20 amostras seguidas abaixo de $\mu - \sigma$;
- Pré-alarque Nível II – 9 (PII-9): no mínimo 5 amostras seguidas com tendência de descida;
- Pré-alarque Nível II – 10 (PII-10): no mínimo 5 amostras seguidas com tendência de subida.

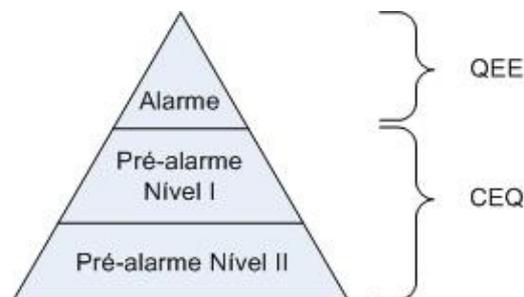


FIGURA 1 - Hierarquia entre alarmes e pré-almos

Esta configuração de alarmes e pré-almos possui hierarquia, ou seja, caso um alarque dispare, não se aplica a análise dos pré-almos. Por sua vez, só pode haver disparo de um pré-alarque do Nível II caso não tenha ocorrido, para aquele elemento ou amostra, o disparo de alarmes ou pré-almos do Nível I.

4.0 - RESULTADOS

Para dados de medição de diferentes analisadores de qualidade de energia é aplicado o procedimento desenvolvido. Primeiramente, criou-se um banco de dados que simulasse a memória de massa de um analisador (8). A faixa de valores das variações de tensão, o tipo de distúrbio e a duração do evento são definidos de modo que a probabilidade de ocorrência e a duração deste evento, durante o intervalo de tempo total do banco de dados, sejam próximas ao número e duração de eventos citados em (14). Após, utilizando-se de dois diferentes analisadores, com tempos de integração diferentes, analisou-se a aplicabilidade do procedimento em casos reais.

4.1 Caso 1: Tempo de monitoração de 1 dia

O objetivo desta análise do banco de dados é verificar quais as diferenças de resultados para o procedimento desenvolvido, para as mesmas medidas caso a janela de integração dos analisadores for diferente.

4.1.1 Janela de integração igual a 1 ciclo em uma análise diária

A cada intervalo de 10 minutos são verificados os distúrbios de QEE, os pré-almos e por fim o cálculo da média e do desvio padrão dos elementos desta amostra. Os VTCD's encontrados para todo o período sob análise encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - VTCD's

Distúrbio	Dado de início	Duração em ciclos	Magnitude	Fases	Amostra
Interrupção	595.876	53	0 p.u.	3	17
<i>Swell</i>	1.177.894	2	1,13 p.u.	3	33
<i>Sag</i>	1.814.250	41	0,72 p.u.	3	51
Interrupção	4.148.124	3	0 p.u.	3	116

Os gráficos de controle da média e do desvio padrão para as amostras (intervalos de 10 minutos) da fase C estão apresentados nas FIGURAS 2 e 3, respectivamente.

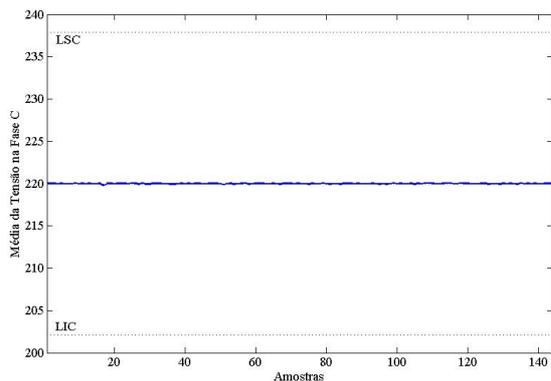


FIGURA 2 - Gráfico de controle da média da fase C

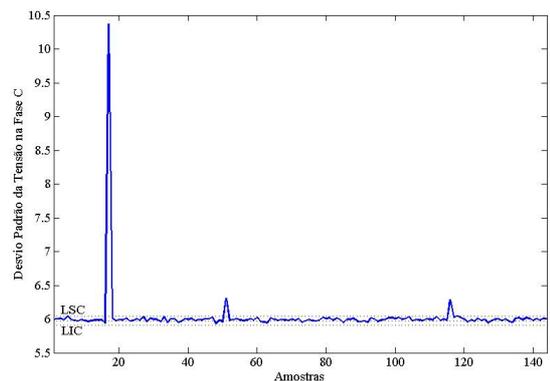


FIGURA 3 - Gráfico de controle do desvio padrão da fase C

Observa-se que os valores referentes à média apresentaram pequena variabilidade, mesmo em intervalo de análise onde ocorreram distúrbios de tensão, porque os VTCD's apresentam duração pequena em relação ao total da janela de análise, não possuindo significância estatística para alterar a média das tensões no intervalo de 10 minutos analisados (36.000 medições). Por outro lado, no gráfico do desvio padrão, há o disparo de pré-almos devido à ultrapassagem dos limites de controle dos gráficos do desvio padrão. Na Tabela 2 temos detalhes dos pontos onde o processo, desvio de tensão nas três fases, não estavam sob CEQ.

Tabela 2: Alarmes do gráfico de controle do desvio da tensão

Pré-alarne Nível I	Amostras				
	Desvio de tensão fase A acima do limite superior	17	51	81	116
Desvio de tensão fase B acima do limite superior	17	51		98	116
Desvio de tensão fase C acima do limite superior	5	17	51		116 118

Os pré-almos das amostras 17, 51 e 116 ocorreram devido à ocorrência de VTCD's, conforme a Tabela 1. Observa-se também, que quanto maior a duração dos distúrbios, e quanto maior for a intensidade (diferença para o valor médio), maior será o módulo do desvio padrão. Assim, para o *swell* do intervalo 33 não há um disparo de alarme de ultrapassagem mas apenas um ponto relativamente mais elevado do que a vizinhança.

As amostras 5, 81, 98 e 118 foram disparados apenas para uma fase. Este fato se explica pela ocorrência de valores, na fase em questão de medidas próximas a ambos os limites de ocorrência de distúrbios na tensão eficaz (*sag, swell*).

Finalmente, observa-se que os eventos de qualidade de energia que alteram o valor eficaz da tensão, são identificados nos gráficos de controle do desvio padrão. Quanto maior a duração e magnitude dos distúrbios, maior será também a variância do intervalo de ocorrência dos distúrbios.

4.1.2 Janela de integração igual a 12 ciclos conforme regulação da ANEEL

A agência reguladora brasileira, ANEEL, ao definir os requisitos dos equipamentos de medição para os níveis de tensão em regime permanente, exige que os valores de tensão eficaz sejam calculados com janelas fixas e consecutivas de 12 a 15 ciclos. Ou seja, a cada 0,2 (ou 0,25) segundos o medidor disponibilizará um valor de tensão eficaz.

Para avaliar o comportamento dos procedimentos de controle estatístico de qualidade desenvolvidos, caso um medidor com estas características fosse utilizado, integrou-se, para janelas fixas de 12 amostras. Desta forma, pretende-se avaliar as diferenças entre os dois casos para as tensões trifásicas.

Na Tabela 3 apresentam-se os eventos de curta duração encontrados da análise do caso em estudo. A duração dos distúrbios, terceira coluna da tabela, refere-se ao número de intervalos do tempo de integração onde ocorreu evento. Numa comparação com a Tabela 1, constata-se que os eventos com duração menor que 12 ciclos não foram detectados. Entretanto, para os mesmos eventos detectados, as informações de magnitude e número de fases afetadas, que caracterizam os distúrbios, foram idênticas. A exceção foi à duração, onde houve uma diminuição da precisão devido ao processo de integração.

Tabela 3 - VTCD's

Distúrbio	Dado de início	Duração	Magnitude	Fases	Intervalo
Interrupção	49658	4	0 p.u.	3	17
<i>Sag</i>	151188	4	0,73 p.u.	3	51

Pode-se concluir através destas análises que medições de grandezas e índices de qualidade de energia com diferentes janelas de integração não implicam em mudanças nas técnicas de controle estatístico de qualidade, nem mesmo perde-se em sensibilidade de controle do processo. Nos dois estudos, o primeiro com janela de integração igual a um ciclo, e o segundo, com janela igual a 12 ciclos, os principais eventos (alarmes e pré-alarmes dos dois níveis) foram detectados. Logo, o tempo entre uma medição e outra, fator que muda de acordo com o tipo, marca e configuração dos analisadores de qualidade de energia, não implica em alterações no controle do processo através das técnicas de controle estatístico.

Tabela 4 - Pré-alarmes do gráfico de controle do desvio da tensão da fase C

Pré-alarme Nível I	Amostras	
Desvio de tensão fase A acima do limite superior	17	51
Desvio de tensão fase B acima do limite superior	17	51
Desvio de tensão fase C acima do limite superior	17	51

4.2 Caso 2: Medições e monitoração de 7 horas com janela de integração de 1 ciclo

O Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, LabPlan, possui o Projeto Sistema de Medição Fasorial Sincronizada com Aplicações em Sistemas de Energia Elétrica, MedFasee (15), que realiza medições dos valores do módulo e ângulo das tensões trifásicas. O equipamento, instalado em um dos prédios do Centro Tecnológico da UFSC, realiza medições das tensões de baixa tensão do circuito que alimenta os aparelhos de ar condicionado do edifício. Este medidor informa um valor de módulo e ângulo a cada ciclo. Utilizou-se um período de sete horas de medições dos módulos das tensões trifásicas, das onze horas até as vinte horas, do dia 22 de novembro de 2007.

4.2.1 Monitoração da tensão

Para o período em análise nenhum distúrbio de qualidade do valor eficaz foi detectado, permanecendo na faixa de 201 a 229 Volts, valores adequados segundo (4). Conclui-se que não há preocupação com níveis de tensão fora dos limites. Logo, para esta instalação não se justifica a aplicação de regras suplementares de decisão para pontos consecutivos.

Assim sendo, pode-se recomendar que ao tratar-se da monitoração da tensão em casos onde a amplitude é pequena, como neste caso, a única regra suplementar, ou seja pré-alarme Nível II, devem ser as regras de tendência (PAII-9 e PAII-10).

4.2.2 Monitoração do desequilíbrio de tensão

Aplicando a equação (1) para todos os dados de tensão, em 60 elementos o desequilíbrio excedeu os 2%. Estes 60 pontos, distribuem-se em uma seqüência de 12 eventos, onde 9 seqüências de alarmes de desequilíbrio foram precedidas do disparo de pré-alarmes Nível I e os outros 3 antecedidos de pré-alarmes do Nível II, com antecedência mínima de 5 elementos. Se considerarmos o desequilíbrio para 95% dos casos, o fator K é igual a 1,19%, como se observa na FIGURA 10.

4.3 Caso 3: Tempo de monitoração 1 Mês com janela de integração de 1 minuto

Um segundo caso real estudado foi o das medições de um registrador de qualidade em energia realizadas no Bloco 2 da UNIVALI, campus Florianópolis, do período de 2 de março a 2 de abril de 2007. Este equipamento armazena o valor médio, mínimo e máximo da variável elétrica sob análise para um período de integração de 1 minuto.

Como analisado no Caso_1, pode-se aplicar o Controle Estatístico de Qualidade para valores médios de um intervalo sem que se perca a sensibilidade de controle do processo. Desde modo, se aplicará o procedimento de controle estatístico para os valores médios (16).

4.3.1 Monitoração da tensão

Para o período em análise ocorreu uma interrupção, ver Tabela 5. Esta interrupção foi ante-cedida pelo disparo de um pré-alarme Nível I, com início no dado 3.862 e com fim na medição 3.864. Os pré-alarmes do Nível I dispararam apenas devido ao evento que culminou na interrupção. Por sua vez, os pré-alarmes de Nível II ocorreram mais vezes, principalmente os de tendência (PAII-9 e PAII-10). Os gráficos de controle estatístico são apresentados nas FIGURAs 8 e 9. Observa-se claramente que o VTCD ocorreu na amostra 387.

Tabela 5 - VTCD's

Distúrbio	Dado de início	Duração	Magnitude	Fases	Intervalo
Interrupção	3.864	3	0 p.u.	3	387

4.3.2 Monitoração do desequilíbrio de tensão

Nesta análise, para um percentil de 95%, o fator de desequilíbrio de tensão é de 1,65%. Na FIGURA 11 apresenta-se o histograma e a frequência acumulada do fator K.

De todos os 4.569 pontos de medição, apenas em 29 pontos, o desequilíbrio excedeu o limite de 2%. Estes pontos dividem-se em 10 seqüências. Destas, apenas uma, que se inicia no primeiro ponto em análise, não foi antecipada por um pré-alarme, com no mínimo 10 elementos de antecipação. Em apenas quatro vezes há o disparo de pré-alarme do Nível I. Os pré-almes de Nível II dispararam mais vezes, com maior número para os de tendência (PAII-9 e PAII-10).

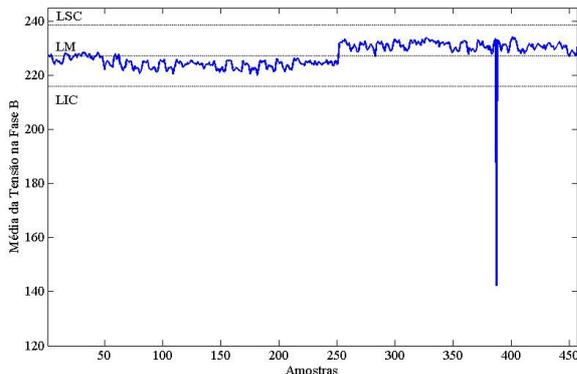


FIGURA 8 - Gráfico de controle da média da Fase B

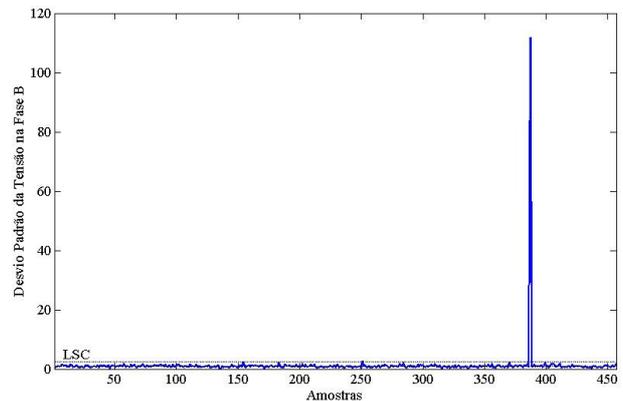


FIGURA 9 - Gráfico de controle do desvio padrão da fase B

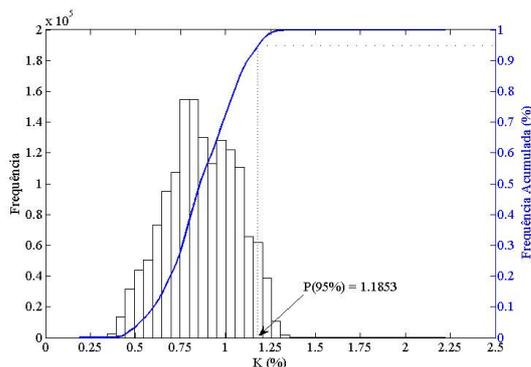


FIGURA 10 - Histograma do desequilíbrio de tensão do Caso 2

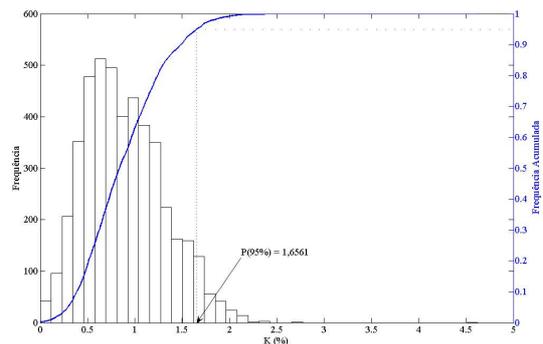


FIGURA 11 - Histograma do desequilíbrio de tensão do Caso 3

4.3.3 Monitoração da distorção harmônica de corrente

A rede de baixa tensão objeto de medição é um prédio com grande número de computadores, por este motivo, a distorção harmônica de corrente é elevada, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Percentis de 95% para o índice TDD

Fase	A	B	C
TDD (95%)	32,00	55,36	41,14

Apenas nas medições onde ocorreu a interrupção, conforme a Tabela 5, a distorção harmônica de corrente estava em níveis aceitáveis. Mesmo assim, aplicou-se o procedimento desenvolvido. Nas FIGURAS 13 e 14 apresentam-se os gráficos de controle da distorção harmônica medida através do TDD. Observa-se claramente que a interrupção também traz conseqüências para a os gráficos de controle da distorção harmônica de corrente, onde tanto a média quanto o desvio padrão aumentaram significativamente. Outro fato marcante observado é a mudança de comportamento das amostras a partir do intervalo 251 (2510 minutos) com o aumento dos módulos da média e do desvio padrão.

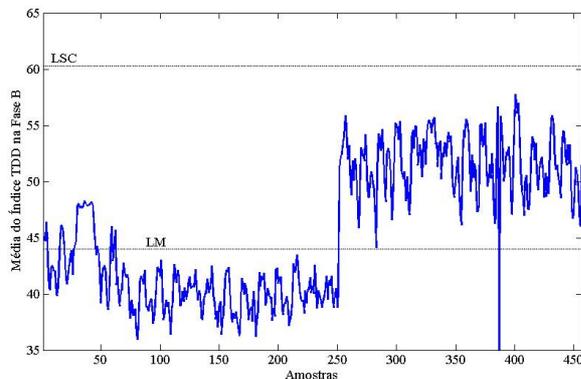


FIGURA 14 - Gráfico de controle da média da distorção harmônica da fase B

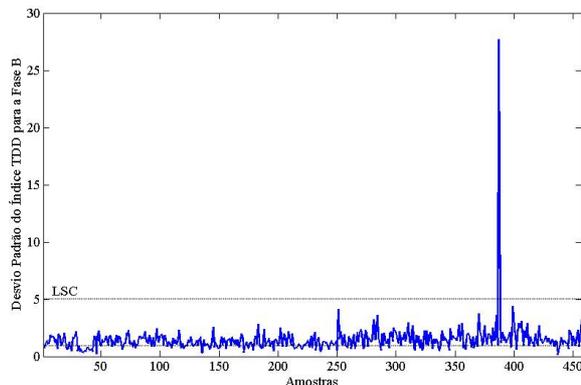


FIGURA 15 - Gráfico de controle do desvio padrão da distorção harmônica da fase B

Se considerarmos que, os valores do TDD dentro dos limites dos gráficos de controle permitem o perfeito funcionamento da instalação sem nenhum prejuízo, mesmo estando acima do recomendado, esta técnica pode ser utilizado como ferramenta de monitoração das características particulares do consumidor, no caso de elevado índice de distorção. Desde modo, mesmo a distorção sendo maior que o recomendado, só se buscaria soluções para os intervalos de tempo onde o TDD ultrapassasse os limites de CEQ, ou seja, quando algum prejuízo fosse causado ao consumidor ou houvesse a mitigação destas correntes harmônicas para instalações próximas.

5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou a aplicação das ferramentas de controle estatístico de qualidade em dados obtidos de analisadores de qualidade de energia para identificação de situações reais críticas (alarmes) ou inadequadas (pré-alarmes) de qualidade do produto energia elétrica.

A grande maioria dos eventos de qualidade de energia estudados neste trabalho foi antecipada por no mínimo um dos pré-alarmes desenvolvidos, possibilitando se fazer diagnósticos e encaminhar soluções e ações preventivas para evitá-los. Um número maior de distúrbios, com diferentes características e causas podem ser estudados para confirmar a eficiência da metodologia apresentada.

Uma das aplicações deste procedimento é como ferramenta de controle para contratos diferenciados de qualidade de energia, e para identificação preventiva (através dos pré-alarmes) de futuros problemas de qualidade de energia junto aos grandes Consumidores Industriais. A vantagem deste método é que ele particulariza os limites (linhas dos gráficos de controle), situações críticas e áreas limites (pré-alarmes), de acordo com as características de cada consumidor.

6.0- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dugan, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. Electrical power system quality. 2ª Ed. (S.I.): McGraw-Hill, 2002.
- (2) IEEE 1159. IEEE Standard 1159 – IEEE recommended practice for monitoring electric power quality. 1995.
- (3) CIGRÉ – BRASIL, Grupo de Trabalho C4-4, Impactos Econômicos Associados à Perda de Qualidade da Energia Elétrica, Acessado em 17/12/2007, disponível em <http://cigre.dee.ufcg.edu.br/pmwiki/pmwiki.php>.
- (4) ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema elétrico Nacional – PRODIST, Brasília, 2007.
- (5) Filho, A.L.F, Oliveira, M.A, Pinto, M.G.S; Ferramenta computacional para quantificação e qualificação do desequilíbrio de tensão. Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica –SBQEE, Belém, 2005.
- (6) IEEE 519. IEEE Standard 519 – IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. 1992.
- (7) Bravo, P. C.; Elementos de controle estatístico de qualidade, 1ª Ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1984.
- (8) Brancher, D. L.; Monitoração da Qualidade de Energia Elétrica em Consumidores Industriais e Comerciais. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) –UFSC.
- (9) Costa, A. F. B.; Epprecht, E. K.; Carpinetti, L. C. R.; Controle estatístico de qualidade, Ed. Atlas, 2005
- (10) Cruz, M.P.; Coelho, J.; Cislighi, R.; Graf, O.J. Metodologia para avaliação dos custos associados a problemas de qualidade de energia em consumidores de grande porte. SBSE. Campina Grande, 2006.
- (11) Brancher, D.L.; Coelho, J.; Cruz, M.P.; Cislighi, R.; Graf, O.J.; Cabdeó, E.L. Custos de interrupção de fornecimento de energia elétrica em consumidores tipo A. Sem. Nac. Contr. e Automação – Salvador, 2007.
- (12) Diniz, M. G.; Desmistificando o controle estatístico de processo, 1ª Ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- (13) ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução 505, Brasília, 2006.
- (14) Mertens, E.A. Jr, Bonatto, B.D., Dias, L.F.S.; Avaliação do sistema elétrico quanto às “variações de tensão de curta duração”, -SENDI (21-24 Nov 2004: Brasília, Brasil). Anais. Brasília, 2004.
- (15) Decker, I. C.; Agostini, M. N.; Dotta, D.; Zimath, S. L.; Sistema de Medição Fasorial Sincronizada: Desenvolvimento e Aplicação na Monitoração de Frequência do Sistema Brasileiro. XVIII SNPTEE, 2005.
- (16) Faccenda, G. G.; Lange, T.; Beckert, J.I.; Teive, R.C.G.; Sistema Baseado no Conhecimento de suporte à decisão para a análise da qualidade de energia de uma instalação elétrica. XXII CRICTE 2007.