



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 13 7748

Tópico: Sistemas de Monitoramento e Tratamento de Dados

METODOLOGIA PARA A GESTÃO DE INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Kagan, N.; Duarte, S. X.; Matsuo, N. M.; Ferrari, E. L.; Almeida, C. F. M.; Camilo, L.; Arruda, E. F. Enerq/USP

Santos, W. B.; Costa, S. M. CELPE

RESUMO

Este artigo apresenta uma especificação para apuração e uma sugestão para apresentação de indicadores de qualidade de energia, referente às medições de desequilíbrio de tensão (DU), distorção harmônica total de tensão (DHTU), flicker (Pst e Plt) e também indicadores de variações de tensão de curta duração (VTCD's), além de software que foi implantado na CELPE – Companhia Energética de Pernambuco para o tratamento e apresentação dos indicadores obtidos para os locais de monitoração instalados na regional de Pirapama II, correspondentes a sistema em tensão de subtransmissão.

PALAVRAS-CHAVE

Indicadores, Monitoração, Gestão, Limites.

1.0 INTRODUÇÃO

A metodologia apresentada nesse artigo permite avaliar a qualidade da energia em um sistema de potência frente aos fenômenos de desequilíbrio de tensão, distorção harmônica de tensão, flutuações de tensão e variação de tensão de curta duração. A metodologia é composta, basicamente, pela aquisição das informações dos pontos de medição, pela verificação da compatibilidade e coerência dessas informações e por tratamentos estatísticos das mesmas.

A aquisição das informações de medição estabelece:

- os requisitos mínimos necessários dos protocolos de monitoração de cada um dos fenômenos envolvidos, garantindo a

obtenção das informações relevantes na monitoração de perturbações de cada um dos fenômenos considerados;

- uma proposta de configuração do sistema de comunicação com os medidores, apontando os benefícios decorrentes da mesma, os procedimentos de operação, e eventuais modificações que podem ser executadas para a sua adequação a qualquer rede elétrica de potência.

A verificação da compatibilidade e coerência das informações de medição permite identificar:

- eventuais interferências nas informações de um determinado fenômeno, devido a perturbações dos outros fenômenos, como os impacto da ocorrência de VTCD's e interrupções nos dados de Desequilíbrio de Tensão, Distorção Harmônica de Tensão e Flicker;
- funcionamento inadequado de medidores de qualidade de energia, através da análise dos registros de saída.

Os tratamentos estatísticos produzem indicadores tanto de VTCD's como de fenômenos de longa duração (distorção harmônica de tensão e de corrente e desequilíbrio de tensão) e de flutuações de tensão. Para os indicadores dos fenômenos de longa duração e flicker é proposta a obtenção dos valores diários e semanais, correspondentes às probabilidades de 5 %, 50 %, 95 %, 99 % e valor máximo, dos registros de saída dos medidores. Para os fenômenos de VTCD's é proposta a obtenção dos valores correspondentes à frequência de ocorrência para um período de avaliação maior, classificando as

perturbações, também, por faixas de amplitude e/ou de duração.

Os resultados do tratamento estatístico permitem fazer diagnósticos de avaliação da qualidade de energia dos fenômenos englobados pelo sistema através de uma série de relatórios de saída padronizados, agrupando as informações dos indicadores calculados, e realizando agregações temporais e espaciais por meio de procedimentos que possibilitam obter indicadores em concordância com a filosofia adotada pelos grupos de trabalhos da CIGRÉ, da IEC e do IEEE.

Esses relatórios podem ser gerados para cada ponto de medição ou para um conjunto determinado de pontos, permitindo avaliar o comportamento de uma determinada região específica ou de todo o sistema através de gráficos e tabelas especificados. Dessa forma, eles constituem fontes de informações úteis na determinação do desempenho dos pontos de um sistema elétrico frente a cada um dos fenômenos avaliados, produzindo um diagnóstico preciso tanto para cada um dos pontos monitorados, bem como para toda a rede elétrica em análise; auxiliando na ligação de novos consumidores com processos industriais sensíveis, na mitigação de problemas oriundos dos distúrbios provocados pelos fenômenos de qualidade de energia considerados, e na averiguação da propagação das perturbações e da adequação dos padrões propostos, fornecendo subsídios para balizar alguma proposta de normalização dos valores de indicadores esperados para cada fenômeno.

Dessa forma, o processamento dessas medições e a obtenção dos indicadores em relatórios de saída padronizados constituem um conjunto de informações sobre o desempenho das redes elétricas de potência que permite a gestão dos indicadores de qualidade de energia.

O artigo apresenta em detalhes os procedimentos para a obtenção desses indicadores, bem como para o tratamento das informações de medições obtidas dos medidores de qualidade de energia elétrica instalados na rede em avaliação.

Esta metodologia foi implantada para a monitoração da qualidade de energia em uma rede de subtransmissão da CELPE - Companhia Energética de Pernambuco através da instalação de medidores em vários pontos, constituindo um sistema de monitoração permanente. Nesse caso, o sistema de gestão de indicadores de qualidade de energia elétrica desenvolvido pode fornecer os indicadores definidos continuamente a cada semana, para todas as semanas do ano. Essa concepção do sistema permite que seja feito o acompanhamento da evolução dos

indicadores, permitindo à companhia fazer o balizamento das ações de investimento baseando-se nas informações obtidas dos indicadores.

2.0 PONTOS MEDIDOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As medições das grandezas são realizadas por meio de equipamentos instalados em subestações de consumidores e em subestações de distribuição no lado primário (69 kV), para a obtenção dos indicadores de desequilíbrio de tensão (DU), distorção harmônica da tensão (DHTU) e flicker (Pst e Plt) e também dos valores instantâneos de tensões e correntes durante ocorrências de VTCD's. Foi instalado um total de doze medidores, compreendendo 12 subestações. Os equipamentos utilizados para as medições são Registradores de Qualidade de Energia Elétrica de fabricante nacional, para a medição de todos os fenômenos de qualidade de energia elétrica.

3.0 METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE DU, DHTU, PLT E PST

3.1 Tratamento dos valores registrados no banco de dados

Os instrumentos utilizados para realizar as medições estão configurados para fornecer os registros das tensões de fase (fase-neutro) e das correntes de fase, a intervalos de leitura de 10 minutos. São obtidos os valores de distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão e de corrente, a intervalos de leitura de 10 minutos. Além desses parâmetros, o equipamento também registra os valores de Pst e Plt referentes ao efeito flicker. Estes registros são trabalhados por um aplicativo que fornece, como resultado, os valores dos indicadores de distorções, desequilíbrios e flicker diários e semanais com probabilidades de 5%, 50%, 95%, 99% e 100%. Além destes valores, o programa também disponibiliza os valores máximos dos indicadores relativos ao período de uma semana, um mês e um ano. Os indicadores de desempenho dos locais medidos são obtidos para os fenômenos de desequilíbrios de tensão, distorção harmônica de tensão e efeito flicker, para um dia e para uma semana.

3.2 Grandezas avaliadas e os índices de qualidade produzidos

3.2.1 Índices para cada um dos locais medidos

O tratamento estatístico dos valores obtidos ao longo do tempo permite avaliações da distribuição de probabilidade dos níveis das grandezas medidas. A criação de histograma ou

de curva de freqüência acumulada é uma forma útil de sumarizar uma série de valores obtidos ao longo do tempo para “visualizar” o seu comportamento.

Tem sido comum utilizar valores correspondentes a uma determinada probabilidade acumulada para servir de indicadores de níveis das grandezas relativas aos fenômenos de qualidade de energia, como por exemplo, os valores correspondentes à probabilidade de 95%, 99% ou valor máximo para um dia e uma semana de monitoração.

A figura 1 ilustra a forma de obtenção do valor de 95% relativo a um parâmetro P. Significa que 95% das medições do parâmetro P ao longo do tempo, em um determinado local monitorado, são inferiores a P95. Os índices relativos a 95% ou 99% servem para comparações com níveis de planejamento ou com limites de compatibilidade.

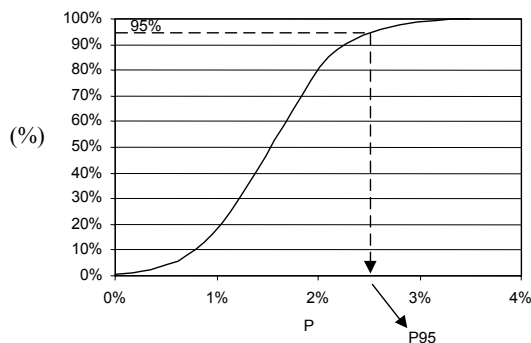


Figura 1 - Valor correspondente à probabilidade acumulada de 95%

A especificação se prendeu à obtenção dos parâmetros:

- Distorção Harmônica Total de Tensão - (DHTU);
- Desequilíbrio de Tensão (DU);
- Pst;
- Plt.

É sugerido que as grandezas sejam obtidas independentemente para cada fase, no caso de distorções harmônicas e flicker.

Na análise das medições, seguindo a linha comumente adotada no tratamento dos dados advindos de monitoração, os seguintes valores relativos aos parâmetros são obtidos, para cada local medido:

- $DHTU_d$: valores com probabilidade de 5%, 50%, 95%, 99% e 100%, por dia;
- $DHTU_{Sem}$: maior dos valores com probabilidade de 95% obtidos para cada dia, bem como maior dos valores com probabilidade de 100% obtidos para cada dia, numa semana de avaliação;

- DU_d : valores com probabilidade de 5%, 50%, 95%, 99% e 100%, por dia;
- DU_{Sem} : maior dos valores com probabilidade de 95% obtidos para cada dia, bem como maior dos valores com probabilidade de 100% obtidos para cada dia, numa semana de avaliação;
- Pst_d : valores com probabilidade de 5%, 50%, 95%, 99% e 100%, por dia;
- Pst_{Sem} : maior dos valores com probabilidade de 95% obtidos para cada dia, bem como maior dos valores com probabilidade de 100% obtidos para cada dia, numa semana de avaliação;
- Plt_d : valor máximo do dia;
- Plt_{Sem} : valor máximo semanal.

Assim, para um certo ano, possibilita-se a definição dos indicadores: diários e semanais para cada local de medição.

Porém, a fim de subsidiar estudos relativos às características de periodicidade dos indicadores que são obtidos, características que a priori não são conhecidas, também foram disponibilizados indicadores mensais e anuais, análogos aos listados anteriormente, quando o período de avaliação for compatível.

As tabelas 1 a 3 são exemplos de saídas que podem ser obtidas das informações estatísticas do processamento de medições de locais monitorados. Nas referidas tabelas, P representa qualquer um dos seguintes parâmetros: Desequilíbrio (DU), Distorção Harmônica Total (DHTU), Pst ou Plt.

A tabela 1 ilustra os indicadores obtidos para

Valores de P Correspondentes as Probabilidades Acumuladas Indicadores Diários								
Indicador	Prob. (%)	SE - PORTO DE GALINHAS						
		1ª Dia	2ª Dia	3ª Dia	4ª Dia	5ª Dia	6ª Dia	7ª Dia
$P5_d$	5.0	0.03	0.18	0.05	0.03	0.00	0.03	0.09
$P50_d$	50.0	0.09	0.25	0.15	0.12	0.07	0.11	0.19
$P95_d$	95.0	0.19	0.30	0.23	0.20	0.17	0.20	0.25
$P99_d$	99.0	0.23	0.43	0.25	0.24	0.19	0.23	0.27
$P100_d$	100.0	0.25	0.48	0.35	0.32	0.29	0.32	0.35

cada dia de medição. Caso o período de avaliação seja de um ano, haveria indicadores para cada um dos dias do ano.

Tabela 1 - Indicadores diários de probabilidade do parâmetro P de tensão obtidos a partir dos registros armazenados no banco de dados para uma SE monitorada

A tabela 2 ilustra os indicadores obtidos para cada semana de medição. Caso o período de avaliação seja de um ano, haveria indicadores para cada uma das semanas do ano.

Tabela 2 - Indicadores semanais de máximo dos índices diários do parâmetro P de tensão

Valores de P Correspondentes aos Valores Máximos dos Índices Diários de Probabilidade Acumulada no Período de 1 Semana (Indicadores Semanais) [%]									
Indicador	Base (%)	SE – PORTO DE GALINHAS							
		1ª Sem	2ª Sem	3ª Sem	4ª Sem	5ª Sem	6ª Sem	7ª Sem	48ª Sem
Max(P95 _d) _{Sem}	P95 _d	0.30	0.43	0.25	0.24	0.19	0.22	0.29	0.50
Max(P100 _d) _{Sem}	P100 _d	0.48	0.48	0.35	0.32	0.29	0.32	0.35	0.57

Tabela 3 - Indicador semanal do valor de probabilidade de 95% do parâmetro P de tensão de todos os valores registrados em uma semana, para uma SE monitorada

Valores de P Correspondentes a P95, obtidos a partir de todos os registros de uma Semana (Indicador Semanal) [%]									
Ind.	Base (%)	SE – PORTO DE GALINHAS							
		1ª Sem	2ª Sem	3ª Sem	4ª Sem	5ª Sem	6ª Sem	7ª Sem	48ª Sem
P95 _{Sem}	Todos os valores de P registrados na semana	0.24	0.41	0.20	0.21	0.17	0.20	0.25	0.40

3.2.2 Índices para um conjunto de locais medidos

Quando muitos locais são monitorados, a estatística dos índices obtidos para os diversos locais permite uma avaliação do conjunto. Trata-se de uma estatística aplicada aos índices obtidos também estatisticamente. O valor comumente usado é aquele correspondente à probabilidade acumulada de 95%. Esse valor pode ser tomado como um índice global para os locais medidos.

A obtenção desse índice é semelhante à obtenção do valor de uma determinada probabilidade para um determinado local. A diferença está no fato de que os valores dos índices I, de um parâmetro, são obtidos a partir dos valores das medições dos diversos locais. O valor I95, portanto, é o valor de I correspondente à probabilidade de 95%. Esse indica que 95% das medições de 10 minutos, de todos os locais do conjunto estão abaixo de I95.

Entretanto, quando a quantidade de locais monitorados é reduzida, como no caso do sistema de subtransmissão da CELPE (região piloto), não se pode estabelecer com exatidão os valores estatísticos dos índices obtidos para os locais medidos. Neste caso, sugere-se que seja feita uma avaliação do conjunto pelo valor médio obtido para o conjunto de locais monitorados, e pelo valor máximo. Esses valores podem ser tomados como índices globais. O valor médio é o valor correspondente à média aritmética dos

índices obtidos para os locais monitorados, para cada semana estabelecida.

As tabelas de 4 a 6 ilustram a forma de obtenção de índices relativos ao parâmetro P, que podem ser atribuídos ao conjunto de pontos monitorados, para os períodos de avaliação de um dia e de uma semana. Observa-se que os valores constantes destas tabelas são fictícios.

Para o exemplo ilustrado na tabela 4, um dos índices atribuídos ao conjunto de pontos é o valor correspondente à média aritmética dos índices individuais obtidos para cada um dos locais, isto é $Med(Max(P95_d)_{Sem}) = 2.2657 \%$; ou seja, em média os locais monitorados possuem o índice Max(P95_d)_{Sem} igual a 2.2657 %. O outro índice encontrado é o valor máximo dentre os índices Max(P95_d)_{Sem} nos locais.

Tabela 4 – Índices $Med(Max(P95_d)_{Sem})$ e $Max(Max(P95_d)_{Sem})$ de um conjunto de locais medidos, obtidos a partir do indicador do valor máximo de P95_d no período de uma semana

Local	Indicador Semanal obtido por local Max(P95 _d) _{Sem} (%)	Indicadores do conjunto de locais (Semanais)	
		Média $Med(Max(P95_d)_{Sem})$ (%)	Máximo $Max(Max(P95_d)_{Sem})$ (%)
1	2.1780	2.2657	3.780
2	2.780		
3	2.80		
4	2.1780		
5	3.1780		
6	3.780		
7	2.1780		
8	1.1780		
9	0.780		
10	0.80		
11	2.3780		
12	2.980		

Para o exemplo ilustrado na tabela 5, o índice atribuído ao conjunto de pontos é o valor correspondente a média aritmética dos índices obtidos para cada um dos locais, isto é, $Med(Max(P100_d)_{Sem}) = 2.5708 \%$, ou seja; em média os locais monitorados possuem o índice Max(P100_d) igual a 2.5708%. O outro índice encontrado é o valor máximo dentre os índices Max(P95_d)_{Sem} nos locais.

Tabela 5 – Índice $Med(Max(P100_d)_{Sem})$ e $Max(Max(P100_d)_{Sem})$ de um conjunto de locais medidos, obtidos a partir do indicador de valor máximo de P100_d no período de uma semana

Local	Indicador Semanal obtido por local Max(P100 _d) _{Sem} (%)	Indicador do conjunto de locais (Semanais)	
		Média $Med(Max(P100_d)_{Sem})$ (%)	Máximo $Max(Max(P100_d)_{Sem})$ (%)
1	2.780	2.5708	3.80
2	2.80		
3	2.90		
4	2.780		
5	3.780		
6	3.80		
7	2.780		
8	1.780		
9	0.90		
10	0.78		

11	2.780		
12	2.990		

Para o exemplo ilustrado na tabela 6, o índice atribuído ao conjunto de pontos é o valor correspondente à média aritmética dos índices obtidos para cada um dos locais, isto é, $Med(Med(P95_{Sem}))=2.2657\%$, ou seja; em média os locais monitorados possuem o índice $Med(P95_{Sem})$ igual a 2.2657%. O outro índice encontrado é o valor máximo dentre os índices $P95_{Sem}$ nos locais.

Tabela 6 – Índice de $Med(P95_{Sem})$ e $Max(P95_{Sem})$ de um conjunto de locais medidos, obtidos a partir do indicador $P95_{Sem}$ no período de uma semana

Local	Indicador Semanal obtido por local $P95_{Sem}(\%)$	Indicadores do conjunto de locais (Semanais)	
		Média $Med(P95_{Sem})(\%)$	Máximo $Max(P95_{Sem})(\%)$
1	2.1780	2.2657	3.780
2	2.780		
3	2.80		
4	2.1780		
5	3.1780		
6	3.780		
7	2.1780		
8	1.1780		
9	0.780		
10	0.80		
11	2.3780		
12	2.980		

As tabelas 7 e 8 resumem os indicadores individuais e coletivos, respectivamente, que são obtidos para os locais monitorados ao longo de um ano de medição, por meio do sistema de monitoramento instalado na CELPE.

Tabela 7 – Indicadores para cada local monitorado, para um ano de medição

Intervalo Apuração	Desequilíbrio	Distorção Harmônica	Pst	Plt
Diário	$DU5_d, DU50_d, DU95_d, DU99_d, DU100_d$	$DHTU5_d, DHTU50_d, DHTU95_d, DHTU99_d, DHTU100_d$	$Pst5_d, Pst50_d, Pst95_d, Pst99_d, Pst100_d$	$Max(Plt100)_d$
Semanal	$Max(DU95_d)_{Sem}$	$Max(DHTU95_d)_{Sem}$	$Max(Pst95_d)_{Sem}$	-
Semanal	$Max(DU100_d)_{Sem}$	$Max(DHTU100_d)_{Sem}$	$Max(Pst100_d)_{Sem}$	$Max(Plt100_d)_{Sem}$
Semanal	$DU95_{Sem}$	$DHTU95_{Sem}$	$Pst95_{Sem}$	-

Tabela 8 – Indicadores para um conjunto de locais monitorados, para um ano de medição

Inter. Apur.	Desequilíbrio	Distorção Harmônica	Pst	Plt
Sem.	$Med(Max(DU95_d))_{Sem}$	$Med(Max(DHTU95_d))_{Sem}$	$Med(Max(Pst95_d))_{Sem}$	-
Sem.	$Med(Max(DU100_d))_{Sem}$	$Med(Max(DHTU100_d))_{Sem}$	$Med(Max(Pst100_d))_{Sem}$	$Med(Max(Plt100_d))_{Sem}$
Sem.	$Med(DU95_{Sem})$	$Med(DHTU95_{Sem})$	$Med(Pst95_{Sem})$	-
Sem.	$Max(Max(DU95_d))_{Sem}$	$Max(Max(DHTU95_d))_{Sem}$	$Max(Max(Pst95_d))_{Sem}$	-
Sem.	$Max(Max(DU100_d))_{Sem}$	$Max(Max(DHTU100_d))_{Sem}$	$Max(Max(Pst100_d))_{Sem}$	$Max(Max(Plt100_d))_{Sem}$
Sem.	$Max(DU95_{Sem})$	$Max(DHTU95_{Sem})$	$Max(Pst95_{Sem})$	-

4.0 METODOLOGIA DE ANÁLISE DAS MEDIÇÕES DE VTCD

Para os fenômenos de VTCD's, conforme já foi apresentado no início, não é realizado nenhum tratamento estatístico das medições. Simplesmente é proposta, a partir da análise do registro oscilográfico das variações de tensão de curta duração (maior detalhamento sobre a mesma pode ser encontrado em [3]), a classificação desses eventos de acordo com a amplitude e duração dos mesmos, a fim de

permitir a determinação das frequências de ocorrência para cada tipo, viabilizando-se a avaliação de compatibilidade entre a sensibilidade dos diversos tipos de equipamentos e desempenho dos suprimentos.

Dessa maneira, os eventos identificados pela análise oscilográfica são contabilizados em:

- número de ocorrências;
- número de ocorrências por faixa de amplitude;
- número de ocorrências por faixa de duração;
- número de ocorrências por faixa de amplitude e duração.

Eles também são diferenciados pelo número de fases envolvidas, sendo classificados em:

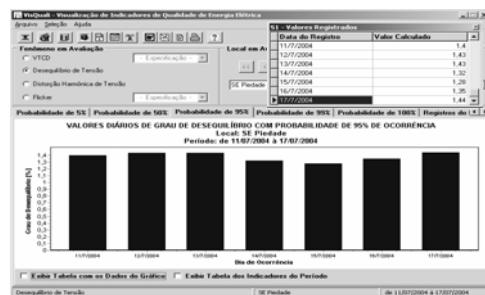
- eventos monofásicos;
- eventos bifásicos;
- eventos trifásicos.

5.0 RESULTADOS

Os resultados da aplicação da proposição de indicadores feita nos itens anteriores são apresentados a seguir.

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE DU, DHTU, PLT E PST

As figuras 2, 3 e 4 ilustram os resultados da aplicação das proposições para o caso real. Devido ao curto período de monitoração efetiva dos locais selecionados, não tendo sido contemplados os períodos requisitados para o cálculo dos indicadores, não foi possível ilustrar os resultados obtidos para todos os indicadores



sugeridos.

Figura 2 – Tela com os indicadores $DU95d$ para uma SE monitorada, para uma semana de medição

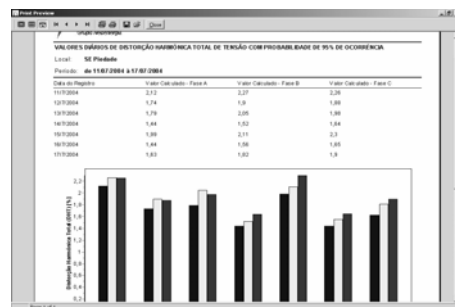


Figura 3 - Relatório de saída indicadores DHTU95_d para uma SE monitorada, para uma semana de medição

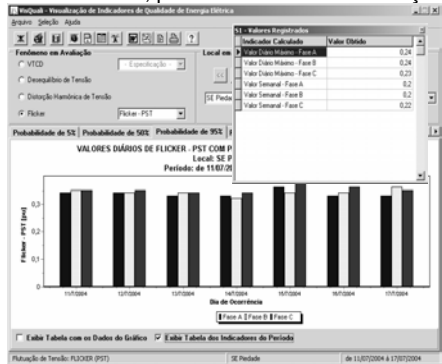


Figura 4 – Tela com indicadores PST95_d para uma SE monitorada, para uma semana de medição

5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE VTCD

As figuras 5, 6 e 7 ilustram os resultados da aplicação das proposições para o caso real.

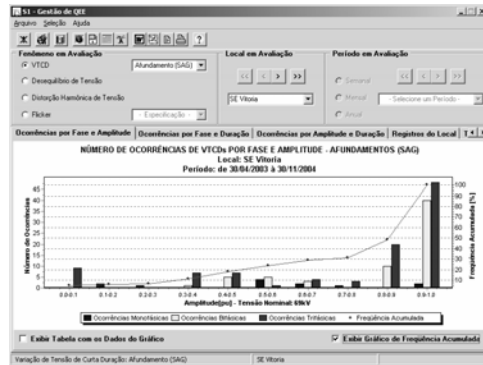


Figura 7 – Tela com números de ocorrências por faixa de amplitude e duração

6.0 CONCLUSÕES

Através das proposições realizadas nesse artigo, viabilizou-se um procedimento comum para a determinação de indicadores de desempenho para a Qualidade de Energia.

A diversidade de indicadores propostos possibilita averiguar a influência existente entre os mesmos, de maneira a viabilizar a determinação daqueles que melhor caracterizam um sistema elétrico.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hydro-Québec, CEA (Canadian Electricity Association) 220 D 711 - Power Quality Measurement Protocol CEA Guide to Performing Power Quality Surveys, Québec, 1996.
- [2] Duarte, Silvio Xavier - Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados para a Monitoração da Tensão em Regime Permanente - Dissertação, USP, São Paulo, 2000.
- [3] Kagan, N.; Matsuo, N. M.; Ferrari E. L.; Duarte, S. X.; Rocco, A.; Rosa, P.; Arango, T. P. L.; Santos, W. B.; Marinho S.; Cavaretti, J. L.; Tenório, A.; Souza, L. R. - Estimadores de Variações de Tensão de Curta Duração para Redes de Distribuição e Subtransmissão - SENDI 2002
- [4] Hydro-Québec - Caractéristiques électriques des tensions d'alimentacion du réseau d'Hydro-Québec - Jun/96.
- [5] IEEE Std 1159: IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality - 1995.
- [6] Quality of supply technologies - Normas NRS - 048, desenvolvidas para a África do Sul.

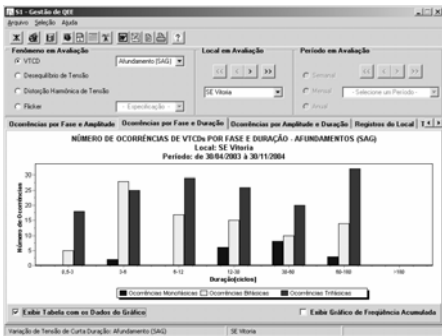


Figura 5 – Tela com números de ocorrências por fase e faixa de duração

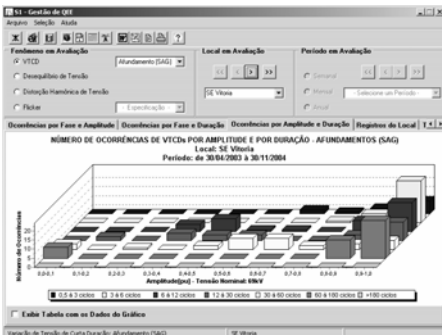


Figura 6 – Tela com números de ocorrências por fase e faixa de amplitude