

Proposições de Protocolos, Indicadores e Metodologia de Monitoramento de VTCDs em Sistemas Elétricos de Distribuição

**N. Kagan, E.L. Ferrari, N.M. Matsuo, S.X. Duarte, Enerq/EPUSP
J. L. Cavaretti, A.Tenório, L. R. Souza, AES Eletropaulo**

E-mail: nelsonk@pea.usp.br

Palavras-chave - Afundamentos e Elevações de Tensão de Curta Duração; Ensaios em Laboratório; Indicadores de Qualidade, e Qualidade de Energia.

Resumo - Este artigo apresenta a proposta da metodologia a ser empregada para a avaliação da qualidade de energia em sistemas elétricos de distribuição e os padrões de qualidade utilizados internacionalmente para VTCDs (variações de tensão de curta duração). Apresenta, também, propostas de protocolo de medição, recomendações quanto aos parâmetros de avaliação e indicadores

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de indicadores de qualidade para as variações de tensão de curta duração em concessionárias de distribuição de energia tem sido alvo de muitas pesquisas e trabalhos internacionais. A AES Eletropaulo e a Universidade de São Paulo (USP), através de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, vêm realizando trabalhos que subsidiarão a futura regulamentação relativa ao controle da qualidade de energia de sistemas elétricos no Brasil.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Caracterização dos Eventos de VTCDs

No âmbito internacional podem ser identificadas duas importantes correntes no que se refere ao método de avaliação de VTCD [1,3], sendo elas:

- UNIPEDE (Union of International Producers and Distributors of Electrical Energy)
- EPRI/ELECTROTEK (Electrical Power Research Institute/ Electrotek Concepts, Inc.)

Os principais parâmetros que têm sido usados para caracterizar as VTCDs são a amplitude e a duração.

O parâmetro relativo à amplitude de VTCD é dado pela mínima tensão eficaz remanescente através do método

EPRI, enquanto a UNIPEDE considera a amplitude da variação da tensão eficaz.

Pelo método UNIPEDE, a profundidade de um afundamento de uma tensão trifásica é definida como a maior queda de tensão ocorrida nas três fases. A duração é o período de tempo durante o qual a tensão permanece abaixo do limiar de 90% da tensão declarada. Esse período é contado a partir do instante em que a tensão de uma das fases passa a ser inferior ao limiar de 90% da tensão declarada até o instante em que a tensão da última fase retorna para o nível acima do limiar.

Pelo método EPRI/Electrotek, a amplitude e a duração de uma VTCD são caracterizadas considerando a fase na qual se tem o maior desvio em relação à tensão nominal.

Para que os registros e medições dos eventos reflitam melhor os possíveis impactos nos consumidores, utiliza-se um procedimento chamado agregação. A partir dos registros obtidos pelos equipamentos de medição, os eventos deverão ser agregados de forma a poder associar as estatísticas e os indicadores a serem obtidos ao conceito de qualidade de energia.

Quanto ao período de tempo a ser considerado para a agregação temporal, os valores mencionados nas literaturas variam amplamente, desde 100 milissegundos, 1 minuto, 3 minutos, 5 minutos, até 15 a 30 minutos [1,4]. Se for tomado como base um ciclo de operações de religamento automático de disjuntores de alimentadores de MT ou de religadores automáticos da distribuição (considerando os tempos de atuação dos relés de proteção e os tempos de religamento), o valor de 1 minuto, usado pelo EPRI/Electrotek, é um valor compatível com o sistema de proteção normalmente utilizado em sistemas aéreos de distribuição, cobrindo também as seqüências operativas dos sistemas de proteção das redes de transmissão e de subtransmissão.

2.2. Indicadores

Os indicadores que têm sido utilizados apresentam os números de ocorrências de VTCDs registradas num

determinado período, classificados por faixas de amplitude e duração.

O método EPRI/Electrotek classifica os eventos de acordo com diferentes limiares especificados. A uma certa ocorrência com característica não retangular poderão ser atribuídas diferentes durações, pois elas consideram os instantes de ultrapassagem e de retorno da tensão em relação a diferentes níveis.

Tabela 1 - Tabulação dos Índices de Ocorrências Anuais de VTCDs de Acordo com limiares especificados - EPRI

Limiar (%)	Duração (t)						
	todos	20 ms ≤ t < 100 ms	100 ms ≤ t < 500 ms	0,5 s ≤ t < 1 s	1 s ≤ t < 3 s	3 s ≤ t < 60 s	60 s ≤ t < 180s
≤ 90							
≤ 80							
≤ 70							
≤ 40							
≤ 10							
≥ 110							

Observa-se que o UNIPEDÉ considera apenas o limiar de 90%, classificando os eventos de acordo com a profundidade alcançada pelo afundamento.

Tabela 2 -Tabulação dos Índices de Ocorrências Anuais de VTCDs de Acordo com UNIPEDÉ

"DIP" (%)	Duração (t)					
	10-100 ms	100-500 ms	0,5-1seg	1-3seg	3-20seg	20-60seg
10 - 15						
15 - 30						
30 - 60						
60 - 99						
99 - 100						

O indicador do UNIPEDÉ, representa uma avaliação estatística simples a partir dos dados das medições, considerando apenas os pontos medidos.

O indicador do EPRI/Electrotek, SARFI [1], que representa uma relação entre o número de consumidores afetados pela VTCD e o número total de consumidores supridos pelo sistema considerado, é teoricamente mais representativo. Mas a sua aplicação é, na prática, mais difícil, pois necessita de uma avaliação por modelagem/estimção ou medição de VTCDs por consumidor.

O uso da definição das durações de VTCDs de acordo com limiar especificado adotada por EPRI/Electrotek também possibilita melhor avaliação, mas se considerarmos que apenas 10% das medições de VTCDs apresentam forma de variação não retangular, conforme [1], poderia ser adotado o mesmo procedimento da UNIPEDÉ no que se refere a utilização de um único limiar de 90%.

Há outras normas/recomendações, como a do NER (National Electricity Regulator) da África do Sul [6] e da CEA (Canadian Electrical Association) [7], que adotam procedimentos similares aos da UNIPEDÉ, mas com variações apenas quanto às faixas para a classificação das durações e amplitudes dos eventos.

Há limitações óbvias nesses métodos de avaliação, pois a severidade de VTCD depende de outros parâmetros, como mudança no ângulo de fase da tensão, característica do ponto de ocorrência de VTCD ou do restabelecimento da tensão na onda (*point-on-wave characteristics*) número de fases envolvidas, etc.. Existem propostas para suprir essas deficiências, que possivelmente serão incorporadas em futuras aplicações.

3. AVALIAÇÃO DE PROTOCOLOS DE MEDIÇÃO

Tendo em vista a existência de diferentes protocolos de medição de VTCDs usados pelos instrumentos existentes no mercado, foram avaliadas as possíveis diferenças nos resultados obtidos, através de simulações computacionais de aplicação de diferentes protocolos de medição e testes funcionais de equipamentos, pois não há, ainda, uma padronização na forma de captura e medição de VTCDs.

As VTCDs são medidas em valor eficaz de tensão, que está sujeita a efeitos inerentes ao cálculo dessa grandeza. Cita-se entre eles o atraso na resposta à variação de tensão de um regime para outro.

A figura 1 mostra um exemplo de cálculo do valor eficaz de tensão durante uma perturbação de curta duração, em que a amplitude varia de 1,0 pu a 0,5 pu, ilustrando como os resultados de três protocolos que utilizam tamanhos de janela diferentes podem diferir entre si. A forma de atualização dos valores eficazes é contínua, isto é, realizada a cada amostra obtida do sinal de tensão.

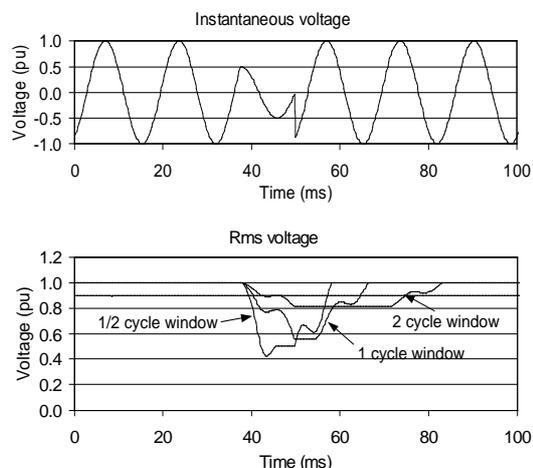


Figura 1 – Exemplo mostrando as diferenças entre valores rms para diferentes janelas

3.1. Simulações Computacionais Para Avaliação de Protocolos

Foram avaliados oito protocolos de cálculo do valor eficaz, visando avaliar as diferenças nos resultados e propor o estabelecimento de um protocolo mínimo a ser usado para a obtenção de índices de desempenho de sistemas elétricos [8].

Foram examinados os protocolos descritos na tabela 3.

Tabela 3 - Protocolos de medição de VTCD avaliados

Protocolo	Tamanho da janela	Intervalo de tempo de cálculo do valor eficaz	Instante inicial das janelas
A	1 ciclo	a cada amostra	Deslocado a cada amostra
B	1 ciclo	1 ciclo	aleatório
C	1 ciclo	1 ciclo	no zero da tensão de uma das fases
D	1 ciclo	½ ciclo	aleatório
E	½ ciclo	a cada amostra	Deslocado a cada amostra
F	½ ciclo	½ ciclo	aleatório
G	2 ciclos	a cada amostra	Deslocado a cada amostra
H	2 ciclos	2 ciclos	aleatório

Foram realizadas três diferentes baterias de testes (10000 casos para cada situação, mudando os parâmetros), sendo elas:

- Simulações de faltas fase-terra e fase-fase ao longo de um alimentador de distribuição primário modelo;
- Simulações a partir da aplicação de afundamentos com diferentes defasagens angulares e amplitudes, considerando distribuições de probabilidade desses parâmetros obtidas a partir dos resultados das simulações mencionadas no item a.
- Testes de detecção de VTCDs, em que foram avaliadas as taxas de falhas de cada protocolo na detecção de eventos

Nessas simulações foram considerados os eventos com durações de 1 a 6 ciclos.

Verificou-se que os principais fatores que afetam os resultados são o tamanho da janela e o intervalo de

cálculo do valor eficaz, mas eles são dependentes também das características das VTCDs.

A janela de tempo de 2 ciclos apresenta desempenho bastante baixo devido à sua resposta lenta causando desvios de amplitude significativos e problemas de detecção de VTCDs de durações curtas. Em sistemas de distribuição, em que há possibilidades de eventos com durações inferiores a 4 ciclos, como nos casos de atuações de fusíveis, é recomendável o uso de janelas com tempo de cálculo do valor eficaz inferior a 2 ciclos.

As janelas de ½ e 1 ciclo são mais adequadas para as medições de VTCDs.

3.2. Taxa de Amostragem de Aquisição do Sinal de Tensão

A partir de aplicações computacionais utilizando ondas senoidais foi constatado que taxas de 16 amostras por ciclos podem fornecer resultados satisfatórios para o monitoramento de VTCDs. Contudo, deve ser observado que para o cálculo de valores eficazes de sinais com conteúdo harmônico significativo deve ser considerada uma taxa de amostragem maior, de pelo menos 64 amostras por ciclo.

4. TESTES FUNCIONAIS DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

Utilizando-se um gerador de VTCDs desenvolvido na USP foram avaliados os desempenhos de 12 medidores para monitoramento de VTCDs, os quais, além de apresentarem diferentes características de hardware e de software, apresentaram as seguintes performances:

Quanto à capacidade de captura de VTCDs, muitos dos equipamentos testados falharam nos ensaios com tensão remanescente superior a 0,7 pu e duração inferior a 1 ciclo.

Os testes com aplicações de eventos sucessivos, similares aos que ocorrem devido aos ciclos de religamentos de disjuntores de circuitos primários de distribuição, mostraram que alguns equipamentos falharam na captura total da sequência de eventos. Foi constatado que este tipo de problema está relacionado com a necessidade de transmissão de informações para um concentrador de dados ou microcomputador, quando a memória do medidor reservada para armazenagem de oscilografias é limitada.

5. PROPOSTA DE PROTOCOLOS DE MEDIÇÃO E INDICADORES DE VTCDs [8, 9]

A definição dos protocolos de medição e indicadores de VTCDs deve ser baseada nos seguintes itens:

5.1. Forma de Cálculo dos Valores Eficazes

A taxa de amostragem pode ser menor do que as consideradas para fenômenos como harmônicos ou transitórios. Uma taxa mínima de 16 amostras por ciclo de 60 Hz é aceitável para as medições de VTCDs.

Propõe-se que os cálculos dos valores eficazes sejam realizados considerando janelas de um ciclo e intervalos de atualização de um ciclo.

5.2. Parâmetros a serem Utilizados

Embora existam outros parâmetros que influem na severidade de VTCDs, propõe-se que neste primeiro momento sejam adotados os parâmetros mais simples e tradicionais, os quais são:

amplitude: maior desvio da tensão eficaz em relação à tensão nominal.

duração: período desde a ultrapassagem do valor eficaz pelo limiar de VTCD ($0.9 \times V_n$ para afundamentos e $1.1 \times V_n$ para elevações) até o retorno ao nível aquém do limiar.

5.3. Forma de Agregação das Medições

5.3.1. Agregação de Eventos de Várias Fases

Para o propósito de índice de qualidade, os parâmetros amplitude e duração deverão ser considerados agregando-se os eventos de várias fases, isto é, quando uma ocorrência envolve simultaneamente mais de uma fase, ela deve ser caracterizada por um único valor de amplitude e um único valor de duração. Será utilizada a amplitude e a duração da fase com a maior variação da tensão eficaz.

5.3.2. Agregação de Eventos Sucessivos

Propõe-se adotar o intervalo de 1 minuto para o período de agregação temporal; isto é, se houver diversas VTCDs registradas nesse período, deverá ser contabilizada apenas 1 ocorrência de VTCD.

5.4. Indicador a ser Adotado

Propõe-se utilizar como indicador de desempenho de um ponto monitorado (circuito/consumidor) a quantidade total de ocorrências de VTCDs classificadas de acordo com faixas de classificação por durações e amplitudes, conforme tabela abaixo, mensalmente e anualmente.

Para a avaliação global de um sistema ou sub-sistema elétrico (circuito, ou conjuntos, a exemplo dos definidos pela ANEEL para os indicadores de continuidade), pode-se utilizar como indicadores o valores que não são excedidos em 95% dos pontos monitorados, por faixa de classificação dos eventos.

Tabela 4 - Proposta de faixas de amplitudes e durações para indicadores de VTCD

	Amplitude	Duração			
		8.33 a 100 ms	100 a 500 ms	0.5 a 3 s	3 a 60 s
Afundamento	90% a 85%				
	85% a 70%				
	70% a 50%				
	50% a 10%				
	10% a 0 (interrupção)				
Elevação	110% a 120%				
	120% a 140%				
	> 140%				

6. PADRÕES DE QUALIDADE E LIMITES PARA OS INDICADORES

O estabelecimento de padrões de qualidade e limites para os indicadores de qualidade de energia não é uma questão simples e requer um conhecimento tanto do desempenho dos sistemas elétricos em relação ao fenômeno, como das conseqüências econômicas provocadas pelo fenômeno, além de uma avaliação das soluções mais adequadas para o aumento da imunidade dos equipamentos.

A adoção de valores baseados em práticas de outros países sem o conhecimento das condições aqui existentes pode significar uma imposição de restrições desnecessárias, ou, contrariamente, trazer pouco efeito no controle de qualidade de energia. Deve-se ter em mente que as práticas de projeto de sistemas elétricos e de uso de equipamentos de proteção de outros países podem diferir profundamente das práticas aqui usadas, fato esse que pode afetar bastante as estatísticas das características dos eventos de VTCDs. Além disso, os problemas decorrentes desses fenômenos são peculiares de acordo com país ou mesmo região.

Recomenda-se que o estabelecimento de limites máximos admissíveis seja baseado em diagnósticos do desempenho

das redes elétricas, com uma estatística representativa das características de VTCDs obtidas de medições no campo (levantamentos de pelo menos 2 anos, considerando-se a eventual ocorrência de ano atípico) e outras avaliações, incluindo a questão da susceptibilidade dos equipamentos.

O monitoramento do sistema elétrico em relação aos fenômenos de qualidade de energia vem sendo realizado na rede de distribuição da AES Eletropaulo com a finalidade de "benchmarking", o qual será apresentado em trabalhos e seminários futuros. Os dados obtidos deverão servir de subsídio para a regulamentação do controle da qualidade de energia no país.

7. MONITORAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA AES ELETROPAULO

Apesar de não ser o escopo desse artigo a publicação de resultados das campanhas de medição de qualidade de energia visando o benchmarking quanto aos diversos indicadores, neste item apresenta-se tão somente uma visão sobre o monitoramento em vigor na AES Eletropaulo, com ênfase para o tempo de monitoramento e número de pontos com medição dos fenômenos de qualidade, seguindo-se as propostas de protocolos e indicadores estabelecidas nos itens anteriores deste artigo.

A quantidade de pontos com monitoramento, desde setembro de 1999, foi definida a partir de critérios estatísticos em que, para obter-se uma representatividade do universo de aproximadamente 1400 alimentadores primários de distribuição, com margem de erro de aproximadamente 5%, chegou-se a uma amostra de aproximadamente 300 alimentadores com monitoramento.

Para se atender a questão da diversidade do universo a ser amostrado, foram escolhidas as subestações supridas por diferentes fontes (ETT - Estações Transformadoras de Transmissão) e que alimentam cargas com diferentes características, como residenciais, industriais e comerciais.

8. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta os estudos realizados para definir uma metodologia para avaliação dos níveis de VTCDs de sistema de distribuição.

O levantamento do estado da arte indicou os pontos principais para a avaliação da qualidade de energia com respeito às VTCDs como os parâmetros e indicadores representativos para avaliação e questões relativas ao protocolo de medição.

Estudos de avaliação das influências do tamanho da janela e da frequência de atualização dos valores eficazes de tensão indicaram ser recomendável a utilização de protocolo de medição de tensão eficaz com uma janela máxima de um ciclo e atualização, pelo menos, a cada ciclo.

Testes funcionais com equipamentos de medição existentes no mercado mostraram diferentes desempenhos quanto à capacidade de captura de eventos sucessivos, indicando a necessidade de se estabelecer procedimentos padronizados para avaliação consistente da qualidade de energia.

O artigo propõe o uso dos seguintes índices para a avaliação de VTCDs. Estes índices são quantificados como número de ocorrências num período de tempo:

	Amplitude	Duração			
		8.33 a 100 ms	100 a 500 ms	0.5 a 3 s	3 a 60 s
Afundamento	90% a 85%				
	85% a 70%				
	70% a 50%				
	50% a 10%				
	10% a 0 (interrupção)				
Elevação	110% a 120%				
	120% a 140%				
	> 140%				

Para a avaliação global de um sistema ou sub-sistema elétrico sugere-se utilizar como indicadores os valores que não são excedidos em 95% dos pontos monitorados, por faixa de classificação dos eventos.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Brooks, C. L.; Dugan, R. C.; Waclawiak, M; Sundaram, A. - "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance" - www.pqnet.electrotek.com
- [2] Sabin, D. D.; Grebe, T. E.; McGranaghan, M. F.; Sundaram, A. - "Statistical Analysis of Voltage Dips and Interruptions - Final Results from the EPRI Distribution System Power Quality Monitoring Survey" - CIRED 99 - Nice, França
- [3] Brooks, D. L.; Gunther, E. W.; Sundaram, A.; Cigré 36.05/CIRED 2 CC02 Voltage Quality Working Group - "Recommendations for Tabulation RMS Variation Disturbances with Specific Reference to Utility Power Contracts" - Draft - www.pqnet.electrotek.com

[4] Martinon, J; Poisson, O.; DeChateaouvieux - "A Project about Voltage Dips and Short Interruptions to Meet Customers' Requirements" - CIRED 99, Nice, França

[5] Bollen, M.; Zhang, L. - A Method for Characterisation of Three-Phase Unbalanced Dips from Recorded Voltage Waveshapes - Feb./99 - www.pqnet.electrotek.com

[6] NRS 048-2: 1996 - Electricity Supply - Quality of Supply - Part 1 Minimum Standards - For application by the National Electricity Regulator

[7] CEA 220 D 711 - Power Quality Measurement Protocol - CEA Guide to Performing Power Quality Surveys - May 1996

[8] Castellani U.F; Cavaretti J.L.; Duarte S.X.; Ferrari E.L.; Kagan, N.; Matsuo N. M.; Tenório A. - "Proposta de Indicadores para Fiscalização Estatística dos Fenômenos de VMT" - Projeto de Mapeamento de Fenômenos relativos à Qualidade do Produto no Sistema Elétrico - Parte II - USP/Eletropaulo - Produto G - Março /2000

[9] Cavaretti J.L.; Duarte S.X.; Ferrari E.L.; Kagan, N.; Matsuo N. M.; Tenório A.. - "Metodologia de Avaliação da Qualidade de Energia e Padrões de Qualidade" - Projeto de Mapeamento de Fenômenos Relativos à Qualidade do Produto no Sistema Elétrico - Parte II - USP/Eletropaulo - Relatório R8 - Setembro/2001