



**XXIII SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GDS/08  
18 a 21 de Outubro de 2015  
Foz do Iguaçu - PR

**GRUPO – X**

**GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS – GDS**

**DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ENERGIA  
– PROPOSTA DO JWG CIGRE/CIREC C4.112**

**Gilson Paulilo (\*)  
ENERGISA SA**

**Paulo F. Ribeiro  
UNIFEI**

**RESUMO**

Este artigo tem por objetivo apresentar ao setor elétrico brasileiro o resultado dos trabalhos conduzidos no âmbito do *Working Group CIGRE WG C4.112 "Guidelines for Power quality monitoring – measurement locations, processing and presentation of data"*. Este GT foi criado para estabelecer um conjunto coerente de orientações para o monitoramento da qualidade de energia em redes elétricas existentes e futuras de forma a atender as necessidades dos consumidores – residenciais, comerciais, industriais, bem como das agências reguladoras. O foco principal é o atendimento das exigências normativas e reguladora para fornecer informação sobre o nível de qualidade de energia real em redes de energia elétrica. O trabalho do GT é baseado em um extenso material sobre o estado da arte de monitoramento da qualidade da energia, além da experiência profissional de renomados especialistas no assunto. Este artigo resume os principais aspectos relacionados ao tema e aponta direções para o seu futuro, a fim de subsidiar respostas às principais questões pendentes no país e no exterior.

**PALAVRAS-CHAVE**

Qualidade da Energia Elétrica, Monitoramento, Medidores, Qualímetros, Transdutores, Limites, Indicadores.

**1.0 INTRODUÇÃO**

Houve aumento significativo na quantidade de equipamentos de monitoramento da qualidade da energia utilizados em redes de energia elétrica nos últimos anos, incluindo a diversidade de fabricantes, modelos e acessórios, muitos dos quais com diferentes protocolos de medição e monitoramento aplicáveis. Isto é impulsionado pelo fato de que o monitoramento de tensões e correntes fornecem informações importantes quando ao desempenho da rede elétrica frente aos diversos fenômenos de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), seja para aqueles relacionados ao fornecimento, seja para aqueles relacionados ao produto, tanto para um sistema elétrico como um todo, quanto para locais individuais e clientes. Associado a isto, existe a pressão dos consumidores e das agências reguladoras sobre as empresas para fornecer informações sobre o real nível da qualidade da energia. Neste contexto, a evolução da tecnologia associada ao monitoramento (equipamentos de monitoramento, comunicação, armazenamento e processamento de dados) tornou possível monitorar e registrar em grande escala praticamente qualquer parâmetro de interesse relacionado aos diversos fenômenos – harmônicos, desequilíbrios, variações de tensão de curta duração, flutuação de tensão, tensão de regime, frequência, surtos e demais itens relacionados nas principais referências nacionais e internacionais.

A alteração na composição e nas características elétricas de cargas ligadas à rede, tais como a proliferação de cargas não convencionais e geradores de energia com interface baseado em eletrônica de potência, tais como os aerogeradores, bem como a previsão futura de aumento tipos não-convencionais de cargas e dispositivos de

armazenamento de energia (por exemplo, veículos elétricos e bancos de potência), coloca uma pressão adicional sobre as concessionárias para monitorar e documentar vários aspectos do desempenho da rede. Enquanto muitas instalam equipamentos de monitoramento e ao mesmo tempo mais e mais fabricantes e consumidores têm monitores disponíveis, há uma falta de conhecimento e concordância quanto a uma série de aspectos do processo de monitoramento e, em particular, sobre o processamento dos dados gravados. Os usuários finais dos dados, sejam estas concessionárias, seus clientes e órgãos reguladores, estão cada vez mais pedindo informações úteis ao invés de apenas uma grande quantidade de dados a serem fornecidos pelos monitores instalados e software de apoio. Esta situação em particular pode ser constatada no Brasil com a atual revisão do Módulo 8, do PRODIST, que trata da Qualidade da Energia Elétrica [1].

A fim de resolver alguns dos problemas destacados acima, o WG C4.112 apresenta um conjunto de orientações sobre Monitoramento de Qualidade de Energia. O objetivo é definir diretrizes para a correta escolha de locais para instalar equipamentos de monitoramento e para o número de monitores necessários para obter uma representação suficientemente precisa da qualidade da energia. Também é apresentada uma análise entre os custos de monitoramento e a quantidade de informações disponíveis, incluindo o valor prático da informação adicional obtida pela adição de mais monitores contra a complexidade da extração de dados e sua classificação. Além disso, a viabilidade e as vantagens potenciais de uma instalação de uma função de monitorização de um grande número de dispositivos de medição e / ou relés de proteção é avaliada. Por fim, são propostos métodos para a estimativa confiável dos índices de qualidade de energia relevantes em locais não monitorados.

A fim de dar adequadamente recomendações abrangentes para todas as questões relacionadas a este tema, o WG C4.112 dividiu os tópicos em quatro capítulos distintos, cujas abordagens principais são apresentados neste trabalho.

## 2.0 OBJETIVOS PRINCIPAIS PARA O MONITORAMENTO DA QEE

Os aspectos de monitoramento da QEE incluem diferentes questões relacionadas com o monitor em si: a tecnologia de monitoramento, o número de monitores implantados e suas localizações, a configuração do monitor (parâmetros) e seus ajustes. Alguns objetivos podem ser satisfeitos com simples medições de tensão RMS em alguns locais, enquanto outro(s) objetivo(s) pode(m) exigir da captura da forma de onda em alta resolução. Dessa forma, o passo mais importante na implantação de um sistema de monitoramento de qualidade de energia é clara identificação do objetivo (s) desse sistema. Em geral, os objetivos podem ser agrupados em seis conjuntos distintos:

- Verificação de conformidade: compara um conjunto definido de parâmetros de qualidade de energia com limites indicados por normas, regras ou especificações regulamentares. Na maioria dos casos, envolve um mínimo de 2 partes interessadas e, pelo menos, alguns resultados são relatados externamente. Tarefas típicas incluem o atendimento de níveis de qualidade de tensão em um local específico em comparação com determinados padrões (por exemplo, EN 50160, IEC 61000-2-2, etc.), o nível de emissão de um equipamento conectado / instalação (consumo ou geração) com determinadas exigências (por exemplo, IEEE P519, IEC 61000-3-6, etc.), o acompanhamento dos contratos bilaterais e medições com base em requisitos regulamentares, dentre outras potenciais aplicações.
- Análise de desempenho: geralmente originado a partir da necessidade de uma concessionária, cujos resultados são utilizados principalmente para fins internos (por exemplo, planejamento estratégico, gestão de ativos, etc.) ou para uma avaliação de QEE em uma determinada região.
- Caracterização de um local: usado para descrever a qualidade da energia em um local específico e de forma detalhada. O objetivo é responder a perguntas sobre a qualidade da energia antes da conexão de um cliente específico, especificar restrições sobre a conexão de novos clientes e verificar o desempenho por parte dos clientes existentes.
- Solução de problemas: este tipo de demanda é ocasionada a partir da constatação da existência de um problema associado a QEE, tais como danos a equipamentos, não atendimento a limites indicadores, etc..
- Aplicações e estudos avançados: estão crescendo em popularidade devido à maior resolução e complexidade dos dados e sua comunicação mais oportuna. Estes envolvem a cobertura de métodos novos e altamente sofisticados para melhorar a eficiência do funcionamento da rede, e incluem as medições e análises mais específicas que muitas vezes não fazem parte da atividade diária. Objetivos típicos são para determinar a localização de falhas, realizar a análise de assinaturas de fenômenos, analisar coeficiente de transferência (harmônicos, desequilíbrio, flicker) entre os diferentes níveis de tensão e estudos dos ângulos de fase de harmônicos em redes de baixa tensão.

- Gestão ativa da QEE: inclui todas as aplicações onde qualquer tipo de operação de controle de rede é derivadas dos resultados da medição. Este controle pode ser ou não em tempo real. A finalidade típica é controlar os níveis de harmônicas em redes de baixa tensão (por exemplo, usando conversores ativos in-feed como filtros ativos), gerenciar a energia reativa de microgeradores, realizar a regulação de cargas perturbadoras ou geradores e considerar componente adicional tarifário com base na medição de energia de distorção.

### 3.0 VISÃO GERAL DO MONITORAMENTO DA QEE

Muitas forças de mercado e de negócios, incluindo aquelas relacionadas com o segmento de Redes Elétricas Inteligentes (Smart Grid), têm aumentado a necessidade de empresas de energia elétrica em todo o mundo a compreender o verdadeiro desempenho de suas redes de transmissão e distribuição. A atual prática atual utilizada no monitoramento da QEE têm se concentrado em uma série de resultados-chave, incluindo:

- Otimização do investimento em prevenção e mitigação dos problemas relacionados a QEE;
- Benchmarking de desempenho de rede para usos internos às empresas;
- Benchmarking de desempenho de rede em comparação a outras redes;
- Definição de níveis de desempenho normais/adequados a QEE;
- Entendimento da tendência do desempenho associado a QEE;
- Antecipação de crescente demandas regulatórias; e,
- Atendimento das necessidades de um número crescente de clientes sensíveis a pequenas variações na rede elétrica.

Todos os resultados mencionados podem ser claramente atribuídas aos objetivos gerais apresentados na seção 2.0. Dependendo do resultado(s) desejado(s) que uma concessionária procura atingir, diferentes abordagens são utilizadas para a localização, seleção e configuração de hardware de monitoramento. Além disso, a abordagem para adquirir e armazenar os dados são afetadas, conforme mostra a Tabela 1.

Os métodos de análise de medições de QEE também são impulsionados pelo resultado desejado. No caso de simples análises, é muitas vezes adequado avaliar apenas a tensão RMS ou, em alguns casos, os níveis de corrente RMS. Em outros casos, análises sofisticadas devem ser realizadas em com base nas características dos fenômenos, o impacto da perturbação nos equipamentos, a capacidade de armazenamento de dados e as ferramentas de análise e avaliação.

Tabela 1 – Práticas do monitoramento da QEE influenciados pelo resultado desejado

Objetivo	Critério do local de monitoramento	Tipo do Monitor	Tratamento dos Dados	Principal direcionador não QEE
Monitoramento básico para avaliação do desempenho geral do sistema	10 a 20% dos barramentos de SE	Permanente, multiparâmetros	Coletado centralmente	Custo do monitoramento / sistema
Monitoramento regulatório para avaliação do desempenho geral do sistema	20 a 50% dos barramentos de SE	Permanente, multiparâmetros	Coletado centralmente	Custo do monitoramento / sistema
Monitoramento avançado para avaliação do desempenho geral do sistema	50 a 100% dos barramentos de SE	Permanente, multiparâmetros	Coletado centralmente	Aplicações avançadas, por exemplo, localização de falta
Compatibilidade com o sistema elétrico	Alimentador ou PAC	Permanente ou temporário	Coletado centralmente	Versatilidade e portabilidade

### 4.0 SELEÇÃO DOS LOCAIS DE MONITORAMENTO

O local de monitoramento da QEE está fortemente relacionado com a arquitetura e a estrutura do sistema elétrico e a finalidade de monitoramento. Em sistemas de energia elétrica clássicos, os pontos de monitoramento da QEE

estão geralmente localizados na fronteira entre os quatro segmentos fundamentais: a geração, transmissão, distribuição e clientes. No caso de REI (Smart Grids), adiciona-se um novo segmento relacionado a energias renováveis / GD (Geração Distribuída), conforme mostra a Figura 1.

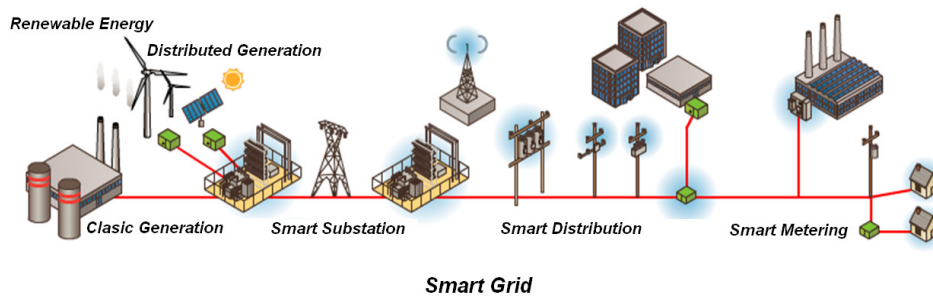


FIGURA 1 – Arquitetura de Rede Elétrica – REI (Smart Grid)

Atividades incluídas em Transmissão ou Distribuição Inteligentes, tais como medição fasorial, Controle Volt x VAR, localização de falta, Self Healing e Infraestrutura Avançada de Medição (AMI) do lado do consumidor, representam soluções bem sucedidas para o aumento da eficiência operacional no âmbito das REIs. Estas dependem da informação aquirida da própria rede por meio do uso de sensores ou dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) para permitir o monitoramento em tempo real das condições de rede para as concessionárias de transmissão e distribuição de energia. Por esta razão, o número de locais de monitoramento nas redes elétricas do futuro irá aumentar significativamente e grandes quantidades de dados serão aquiridas em diferentes níveis de tensão nos seguintes locais:

- Subestação de transmissão – EAT/AT;
- Subestação de distribuição – AT/MT;
- Alimentadores de distribuição – aéreo e subterrâneo – MT;
- Ponto de entrega (GD) – MT/BT;
- Ponto de acoplamento comum (PAC) – MT/BT.

O custo da atividade de monitoramento varia de acordo com o nível de tensão sendo significativamente afetado pelo preços dos sensores e IEDs e podem ser categorizados em:

- Alto – EAT e AT;
- Moderado – MT;
- Baixo / acessível - BT.

Restrições relacionadas ao custo impõem a utilização do potencial de monitoramento de QEE da maioria dos relés ou controladores instalados em equipamentos de distribuição, que coletam dados brutos da rede, são tratados localmente e transferidos para centros de operação ou outros locais. Em REIs, os analisadores de QEE serão substituídos por IEDs com as seguintes funcionalidades [2]:

- Relés, controladores, RTUs compartilhados com diferentes aplicações de distribuição inteligentes;
- Unidades de medição fasorial (PMU) compartilhados com diferentes aplicações de distribuição inteligentes;
- Medidores compartilhado com infraestrutura avançada de medição (AMI).

Outro fator importante que influencia a seleção local de monitoramento é a prática utilizada pela concessionária, relacionada ao monitoramento da QEE. Eles dependem de cada propósito definido pela concessionária, que na maioria das vezes inclui, conforme mencionado anteriormente, na **verificação de conformidade, análise de desempenho, caracterização do local e solução de problemas**. Para realizar essas várias tarefas, exigindo diferentes graus de precisão na medição, as concessionárias podem utilizar transdutores de tensão e de corrente já presentes na rede ou integrar novos sensores e transformadores de instrumentos que oferecem várias opções de precisão:

- Transformadores de distribuição ( $\pm 0.6\%$ ),
- Transformadores de corrente e de tensão ( $\pm 1\%$  a  $2.5\%$ ) - (erro ângulo de fase  $\pm 1.5^\circ$ ),
- Transformadores de instrumento ( $\pm 0.15\%$  a  $0.3\%$ ),
- Sensores ( $\pm 0.2\%$  to  $1\%$ ).

Especialmente para medições de harmônicos de tensão em redes de MT, AT e EAT, transformadores de instrumento convencionais podem ter uma influência significativa na precisão das medições. A frequência de ressonância da primeira ressonância pode variar significativamente de acordo com o nível de tensão, conforme mostra a Figura 2 [3].

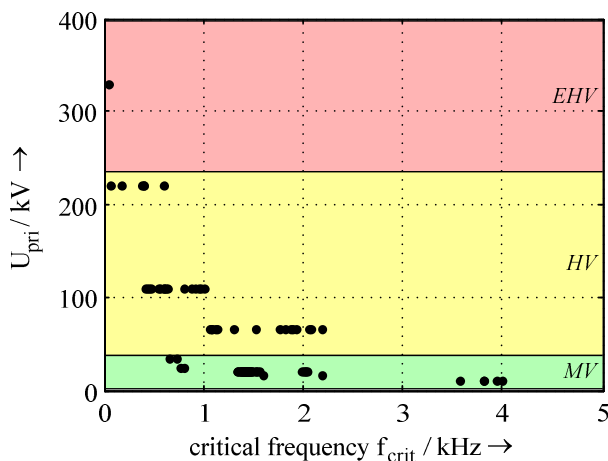


FIGURA 2 – Frequências críticas  $f_{crit}$  de diferentes transdutores de tensão para uma precisão na medição melhor que 1% seja alcançada

Independentemente do caminho seguido por cada concessionária, a redução do custo total é um importante aspecto a ser considerado e depende dos recursos dos equipamentos, tais como a interoperabilidade ou a capacidade de intercâmbio. Ambos os requisitos têm de ser baseadas em normas amplamente aceitas, como por exemplo, a IEC 61850. No entanto, a implementação atual da QEE no âmbito da IEC 61850-7-4 não é satisfatório, porque não atende a IEC 61000-4-30.

A evolução contínua de novas tecnologias (sensores, IEDs, software, telecomunicações) e padronização de produtos facilita a aquisição de dados exigidos por aplicações inteligentes para melhorar a eficiência do sistema de alimentação através de necessidades de negócios das concessionárias.

A nova forma de pensar e operar a rede elétrica por meio das REIs (Smart Grids) criou as premissas para o estabelecimento de um sistema de monitoramento integrado da QEE na transmissão e na distribuição, cuja estrutura em potencial é ilustrada na Figura 3 [4].

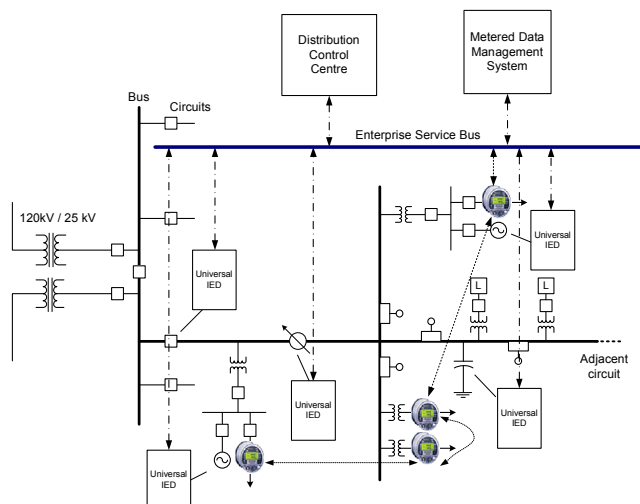


FIGURA 3 – Sistema de Monitoramento de QEE integrado no âmbito das REIs (Smart Grids)

## 5.0 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

A seleção dos parâmetros de monitoramento e uma média dos intervalos depende fortemente do objetivo do monitoramento da QEE, conforme a Tabela II.

Tabela 2 – Caracterização dos parâmetros de QEE

Variações	Eventos
Variável medida (por exemplo, tensão)	
Parâmetro medido (ex. Harmônicos)	(ex. Sags)
Método de medição (ex. 10 ciclos)	(ex. ciclo RMS)
Intervalo de medição (ex. 10 min)	NA
Valor medido (ex. médio)	NA
Período de monitoramento (ex. 1 semana)	(ex. 1 ciclo)
Índice de avaliação (ex. 95%)	(ex. Classificação DISDIP)

Para fins de verificação da conformidade, os intervalos e as parâmetros são definidos por norma, como por exemplo a EN 50160 ou a IEC 61000-3-6. Na maioria dos casos, o monitoramento dos parâmetros de tensão são suficientes. Além disso, os requisitos de resolução e taxa de amostragem não são muito elevados. Se a conformidade de uma instalação frente a uma carga perturbadora com limites pré-definidos de emissões deve ser verificada, a medição adicional de parâmetros de corrente podem ser úteis (por exemplo, regras DA-CH-CZ).

No caso de análise de desempenho e estudos avançados, todos os parâmetros definidos em normas associadas a QEE podem não ser necessários. Normalmente, a concessionária utilizará aqueles nos quais, baseados em experiências anteriores, serão úteis e confiáveis. Muitas vezes, as variáveis com limites indicativos são escolhidos, como, por exemplo, em afundamentos e elevações de tensão, bem como períodos de integração mais curtos, se necessário.

Para uma avaliação do desempenho de uma concessionária, o número de locais monitorados pode ser elevado. Para tanto, uma abordagem escalável e em multi-nível (camadas) pode ser necessária para a correta manipulação de dados, conforme mostra a Figura 4. Neste caso, a parte cinza destacada é a abordagem clássica, adotada atualmente em muitos sistemas de monitoramento. Os dados de medição são armazenados e pós-processados quase exclusivamente em um local de armazenamento central. O número de níveis hierárquicos varia. Dependendo do número de dispositivos e do desempenho dos links de comunicação, muitas vezes dados destes dispositivos são diretamente transferidos para uma base de dados central (apenas o primeiro e o último nível existem) [5].

Em futuros sistemas de monitoramento, uma abordagem mais avançada em termos de armazenamento distribuído e processamento em todos os níveis hierárquicos (marcados em verde na Figura 4) pode ser benéfico. A maioria dos dados pode ser armazenada e pós-processada a nível do dispositivo e apenas a informação agregada (conforme um critério de agregação) deve ser continuamente transferida para uma central. Dados crus devem ser transferidos somente se necessários e de alguns dispositivos de QEE, tais como consumidores sensíveis e com contrato de fornecimento específicos ou no caso da ocorrência de algum evento.

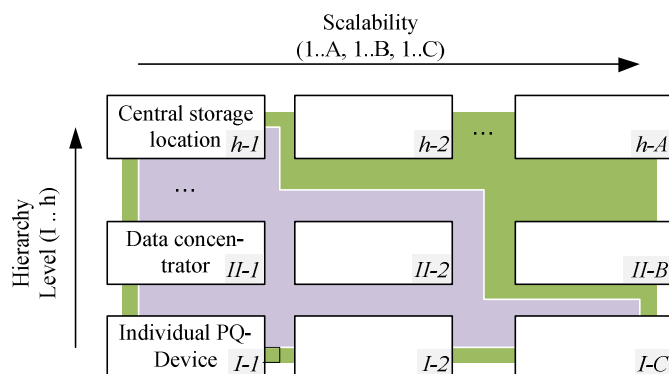


FIGURA 4 – Arquitetura de uma abordagem escalável para um sistema de monitoramento de QEE

## 6.0 APRESENTAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS MEDIDOS

Diferentes formas de processamento e apresentação dos resultados do monitoramento são necessários para diferentes tipos de aplicação e tomada de decisão. A apresentação e tratamento de dados medidos dependerá dos seguintes fatores:

- Objetivo do monitoramento;
- Existência de normas, regras de conexão, regulamentação em vigor ou futura e pos-síveis contratos bilaterais existentes;
- Duração e características do sistema de monitoramento (locais de monitoramento e seu número);
- Sistema elétrico sob monitorização (o que, como e onde monitorar);
- Tecnologias à disposição para gerenciar grande volume de dados;
- Tecnologias de comunicação à disposição.

Dentre estes fatores, o objetivo do monitoramento exerce o maior papel. De fato, uma vez que o escopo é claro, torna-se fácil estabelecer o peso dos demais itens. Se o objetivo é verificar a conformidade a uma norma, dados provenientes de um número significativo de sites e coletados durante uma campanha de monitoramento de longo prazo devem ser apresentados da maneira mais efetiva para demonstrar que o número de violações estão dentro do intervalo permitido, ou seja, por meio de percentis, índices ou gráficos de barra que evidenciem que os limites estão normais (vide Figura 5), ou ainda, por meio de tabelas (vide Figura 6).

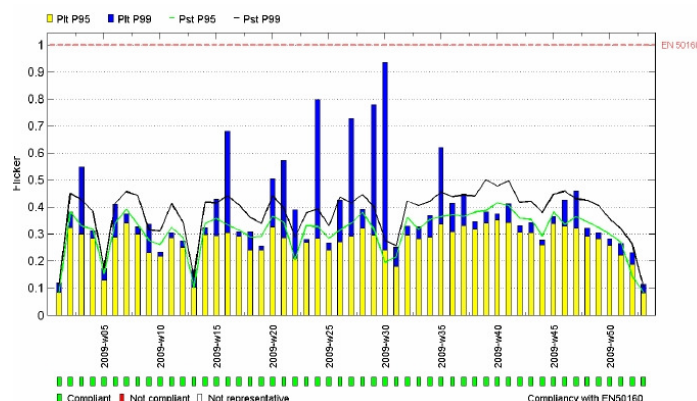


FIGURA 5 – Exemplo de medição pontual de flutuação de tensão – 95%

Avg. number of MV dips for equivalent point of measure within the selected interval (EN50160)						
		Dips duration				
		20-200 ms	200-500 ms	500-1000 ms	1-5 s	5-60 s
Residual V. [%]	80...90	34.9	7.5	2.0	0.6	0.0
	70...80	17.1	5.3	0.6	0.2	0.0
	40...70	28.2	5.3	0.6	0.1	0.0
	5...40	9.9	1.7	0.2	0.0	0.0
	1...5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0

FIGURA 6 – Classificação de VTCS em uma rede de MT conforme a EN 50160 (52 semanas – algumas centenas de sites)

A avaliação do desempenho de uma rede elétrica é obtido a partir de uma campanha de monitorização a longo prazo, envolvendo um número representativo de sites por meio de tabelas, índices de QEE e seu comportamento no tempo (análise de tendências), gráficos de dispersão e gráficos cumulativos, conforme mostra a Figura 7.

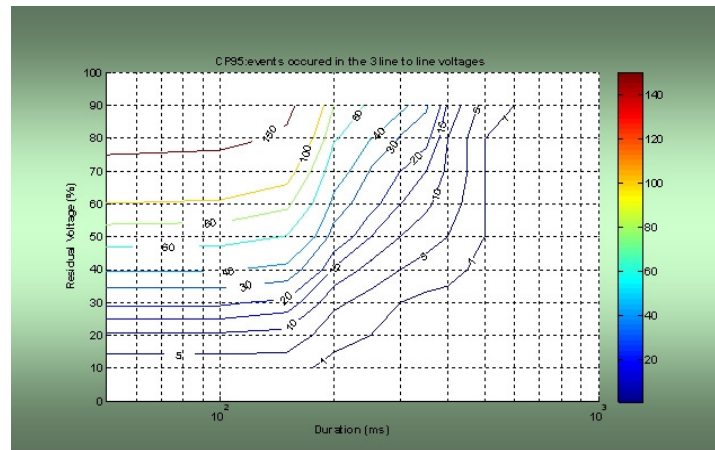


FIGURA 7 – Gráfico de contorno para VTCD para 95% dos melhores locais – tensão fase-fase

## 7.0 EXEMPLOS DE ESTUDOS AVANÇADOS DE ANÁLISE DOS DADOS MEDIDOS

### 7.1 Análise automática de registros de distúrbios

A disponibilização de um grande volume de dados de medições torna impossível que a análise e manipulação dos mesmos ocorra de forma manual. Logo, métodos que possam automatizar e extrair informações úteis e necessárias para a análise de distúrbios e ocorrências associadas à QEE são necessárias para a gestão e a definição de soluções.

Um primeiro nível de extração da informação já está disponibilizado e implantado na maioria dos monitores de QEE disponíveis no mercado. Estes tratam da classificação do evento (transitório, afundamento de tensão, interrupção, etc.) e do cálculo das características padrão intrínsecas a cada evento associado (magnitude, duração, etc.) e suas variações (THD, rms, etc.).

Além disso, devem-se aprofundar estudos de forma a proporcionar a extração automática de informação associada a um grande volume de dados. Como exemplo, a definição e a extração automática de características pode proporcionar informações adicionais sobre a origem dos eventos. O método de segmentação introduzido em [6] mostrou ser uma base adequada para a análise automática de interrupções e afundamentos de tensão. Embora o método possa ser aprimorado, um grande desafio futuro é o desenvolvimento de métodos similares para análise de dados de transitório de tensão e corrente. Esta situação é mostrada na Figura 8.

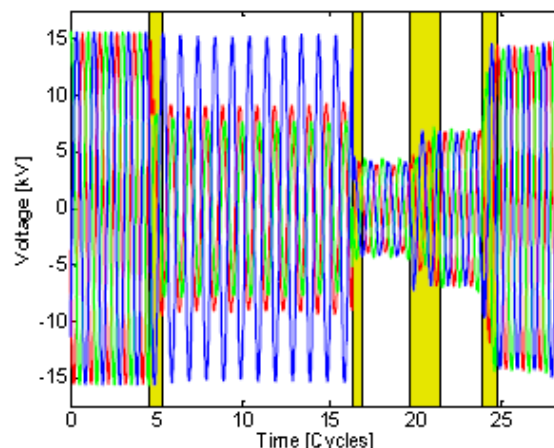


FIGURA 8 – Exemplo de segmentação de evento aplicado a uma forma de onda de tensão

Neste exemplo, a segmentação resultou em um intervalo de tempo de 4.8 a 25 ciclos, consistindo de quatro “segmentos de transição” (marcados em amarelo) e três “segmentos de eventos” entre cada um dos segmentos de transição. Nestes casos, o segmento anterior ao primeiro segmento de transição (segmento “pré-evento”) e o segmento posterior ao último segmento de transição (segmento “pós-evento”) são relacionados aos estados normais.

Este método resulta em diversas características associadas a QEE é apenas um primeiro passo para uma análise automática de um grande volume de dados associados a afundamentos de tensão e interrupções. Os próximos



passos incluem a associação de métodos automáticos de classificação, os quais podem ser um sistema especialista, uma rede neural, ou um método de processamento avançado de sinais, juntamente com a aplicação de métodos estatísticos. Uma visão detalhada deste e de outros desafios associados à aplicação de processamento de sinais em QEE é mostrado em [7].

## 7.2 Distúrbios de alta frequência

A introdução de equipamentos com *front end* ativos resulta na injeção de novos componentes de frequência no sistema elétrico. Um exemplo é mostrado na Figura 9, onde a parte superior mostra a corrente medida nos terminais de uma lâmpada fluorescente compacta. A forma de onda é senoidal e a distorção harmônica é claramente inferior em comparação com os tipos mais comuns desta lâmpada. Apesar da ausência de harmônicos de baixa ordem (3, 5 e 7), esta carga apresenta distorções em frequências de alta ordem, conforme mostra a parte inferior da Figura 4. Neste, se observam oscilações em alta frequência e com diversas amplitudes. Este tipo de comportamento para cargas com esta característica é mostrado em [8].

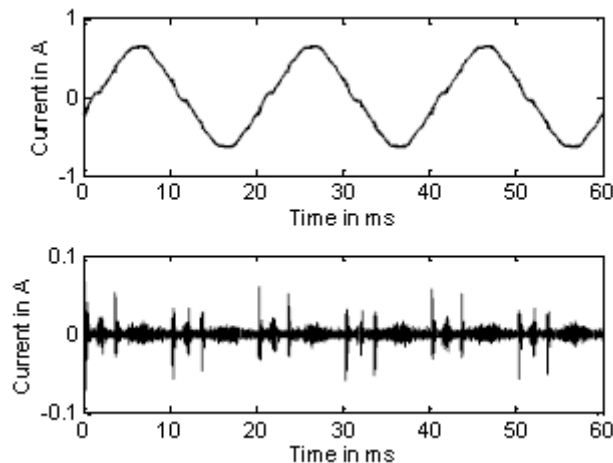


FIGURA 9 – Medições de corrente em uma lâmpada fluorescente compacta

A fim de descrever os níveis de emissão destes equipamentos e estudar o impacto de sua disseminação no sistema elétrico é fundamental a adoção de novas ferramentas de análise. O espectrograma desenvolvido para analisar estes sinais, têm se mostrado uma ferramenta útil, conforme [9 e 10]. Um exemplo de espectrograma é mostrado na Figura 10, resultante da aplicação de um filtro passa alta sobre uma janela de 20 ms. Este espectrograma foi resultante da utilização da transformada discreta de Fourier, mas outros métodos de processamento de sinais avançados podem ser aplicados para extrair mais informação [9].

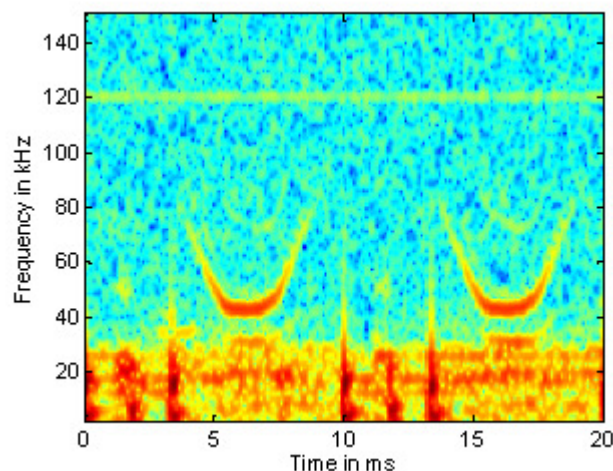


FIGURA 10 – Espectrograma da corrente de uma lâmpada fluorescente compacta

Vale destacar que outros equipamentos provocam emissões nestas faixas de frequência, tais como turbinas eólicas, painéis solares, microturbinas, conversores de fonte de tensão para HVDC e outros dispositivos FACTS. O crescimento da penetração deste tipo de equipamento no sistema elétrico demandará novos estudos para avaliar estas emissões em frequências superiores a 2 kHz.

## 7.3 Harmônicos variantes no tempo

O conceito associado a Harmônicos associa os mesmos a condições periódicas e de regime permanente. A técnica mais comum para análise harmônica aplica a Transformada Rápida de Fourier (FFT), em geral implementada computacionalmente de forma eficaz por meio da Transformada Discreta de Fourier (DFT). Este algoritmo apresenta resultados satisfatórios nas seguintes condições: sinal estacionário; frequência de amostragem duas vezes maior que a frequência do sinal; número de períodos de amostragem inteiros; e, a forma de onda não contém frequências que não sejam múltiplas inteiras da frequência fundamental.

Caso as condições mencionadas sejam atendidas, a FFT fornece resultados com boa exatidão, sendo, neste caso, necessárias apenas uma amostragem do sinal. Por outro lado, caso estejam presentes interharmônicos, múltiplos períodos devem ser amostrados a fim de se obter magnitudes harmônicas precisas.

No entanto, em condições reais, os níveis de distorção de tensão e corrente, bem como suas componentes fundamentais estão constantemente variando no tempo. As variações no tempo dos harmônicos individuais são, nesse caso, analisadas por meio das transformações de Fourier de curto período (em janelas de tempo) e cada espectro harmônico corresponde a cada janela de tempo aplicada em um sinal contínuo. Mas, devidos aos existentes em cada menor janela de tempo possível, diferentes tamanhos de janela resultam em diferentes espectros harmônicos e a seleção da menor janela de tempo mais adequada é uma questão complexa que ainda carece de discussões e consenso.

Muitas abordagens vêm sendo propostas nos últimos anos para equacionar esta questão e melhorar a exatidão das magnitudes dos harmônicos em condições variáveis no tempo. Isso incluem os analisadores baseados em filtros de Kalman, filtros adaptativos e PLL [11], uma combinação usando redes neurais adaptativas [16] e uma abordagem por decomposição de bancos de filtragem [10]. Cada um dos métodos possuem vantagens e desvantagens e a busca pelo melhor método continua com uma das mais ativas e promissoras áreas no âmbito do processamento de sinais. Como ilustração, considere uma corrente de energização típica de um transformador, mostrada na Figura 11. A Figura 12 apresenta a decomposição harmônica variando no tempo de alguns harmônicos utilizando um método de composição por bancos de filtros. Este método de análise pode levar ao desenvolvimento de uma nova filosofia para proteção e controle de redes elétricas.

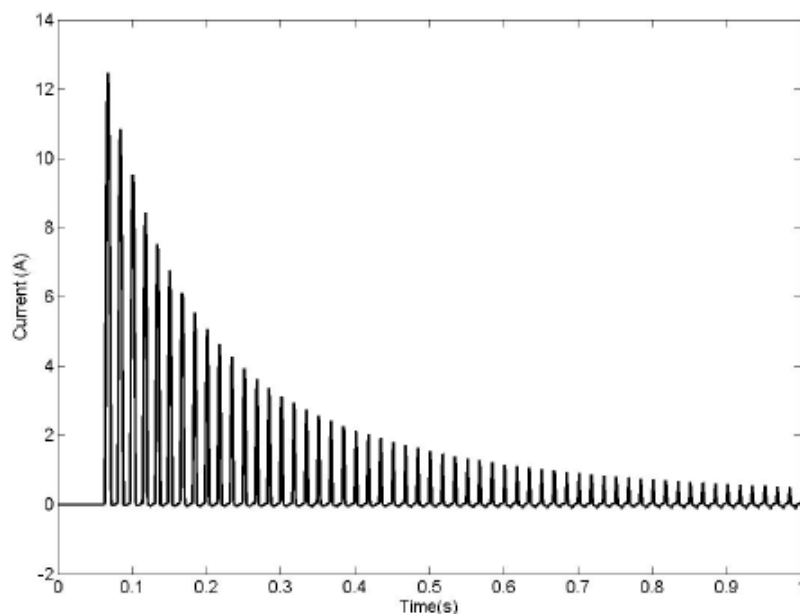


FIGURA 11 – Corrente de inrush – Fase A

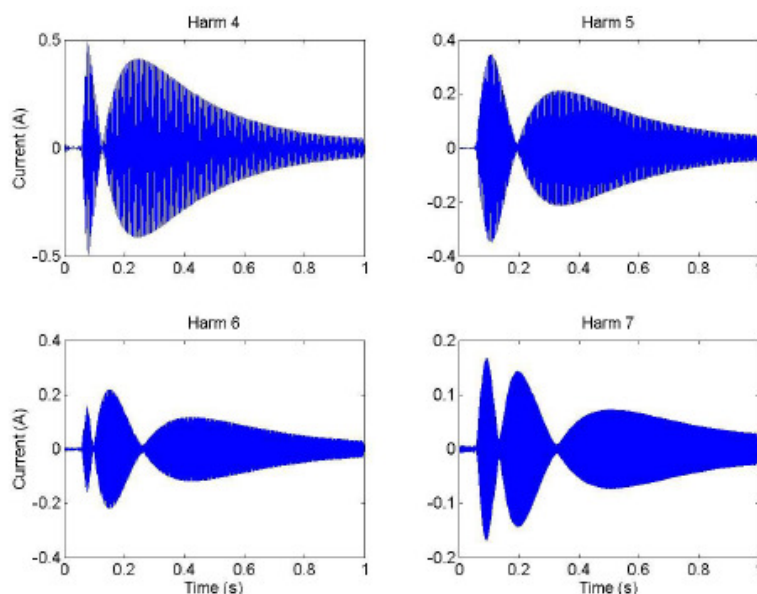


FIGURA 12 – Decomposição da corrente de inrush

## 8.0 CONCLUSÃO

O artigo apresentou o atual entendimento e uma visão geral acerca da prática internacional sobre monitoramento de QEE. Este é resultado de um esforço coordenado de vários especialistas de todo o mundo que participaram do CIGRE WG C4.112 e que teve a duração de três anos. Neste período, foram coletadas e analisadas as principais práticas relacionadas ao monitoramento de QEE no mundo.

É importante destacar a grande variedade de abordagens e metodologias associadas ao monitoramento de QEE e a coordenação e unificação das atividades são necessárias para a consolidação de uma única metodologia. Nesse sentido, este trabalho contribui para orientar todos os profissionais que, pelas mais variadas razões, necessitam proceder ao monitoramento da QEE. Em particular, apresenta orientações para questões importantes que necessitam de uma orientação clara e que incluem os seguintes aspectos:

- A escolha de locais e número de monitores a serem instalados deve considerar o trade-off entre os custos de monitoramento e a quantidade de informações a serem fornecidas;
- A possibilidade e as potenciais vantagens da instalação de uma função de monitoramento em um grande número de dispositivos de medição e / ou relés de proteção;
- As metodologias para estimativa confiável dos índices relevantes de QEE em locais não monitorados;
- A seleção de parâmetros que devem ser contabilizados e sob que taxa de amostragem e resolução;
- Como e onde devem ser armazenados, processados e relatados os resultados da monitorização;
- Até que ponto deve-se contar com avançadas técnicas estatísticas e de processamento e apresentação de dados.

## 9.0 MEMBROS DO WORKING GROUP CIGRE C4.112

O grupo foi composto por 24 membros regulares, provenientes de 18 diferentes países, destacando-se os seguintes membros: J. Milanović (UK, Coordenador Geral), B. Howe (USA, Chapter Chair), F. Zavoda (CAN, Chapter Chair), J. Romero (ESP, Chapter Chair), L. Tenti (ITA, Chapter Chair), J. Kilter (EST, Secretary), J. Mayer (GER), B. Allaf (KSA), S. Bahramirad (USA), R. Ball (UK), V. Barrera (ESP), D. Correia (BRA), N. Cukalevski (SRB), A. Dabin (BEL), N. Trinchant (FRA), P. Doyle (IRL), J. Höglund (SWE), M. Bollen (SWE), R. Neumann (ITA), A. Pavas (COL), P. F. Ribeiro (NED), B. Parent (CAN), M. Slimanou (ALG), G. Paulillo (BRA).

## 10.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ANEEL, Procedimento de Distribuição (PRODIST) – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2012;
- (2) F. Zavoda, "Sensors and IEDs required by smart distribution applications," The First International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies (ENERGY 2011), Venice/Mestre, Italy, May 2011.
- (3) R. Stiegler, J. Meyer, M. Elst, E. Sperling: "Accuracy of harmonic Voltage Measurements in the Frequency Range up to 5 kHz using Conventional Instrument Transformers," 21st International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Frankfurt/Germany, 2011.
- (4) F. Zavoda, C. Abbey and Y. Brissette, "The Ideal IED for Smart Distribution Applications," IEEE-PES ISGT Europe 2011, Manchester, UK, December 2011.
- (5) J.-M. Romero Gordon, J. Meyer, P. Schegner, "Design Aspects for large PQ Monitoring Systems in future Smart Grids," presented at IEEE PES General Meeting 2011, Detroit, USA.
- (6) Styvaktakis, E., Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H.. "Expert system for classification and analysis of power system events". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.2, April 2002, pp.423-428.
- (7) Bollen, M.H.J., Gu, I.Y.H., Santoso, S., McGranaghan, M.F., Crossley, P.A., Ribeiro, P.F.. "Bridging the gap between signal and power – state of the art and remaining challenges for signal-processing applications to power system quality". IEEE Signal Processing Magazine, in print.
- (8) Djokić, S.Ž., Bollen, M.H.J.. "Dip Segmentation Method". IEEE Int Conf on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Wollongong, Australia, September 2008.
- (9) Gu, I.Y.H. Gu, Bollen, M.H.J.. "Estimating interharmonics by using sliding-window esprit". IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.23, No.1 (January 2008).
- (10) Varandan, S., Makram, E.B.. "Harmonic load identification and determination of load composition using a least square method". Electric Power Systems Research, vol. 37, pp. 203-208, 1996.
- (11) Rönnberg, S., Wahlberg, M., Bollen, M.H.J., Larsson, A., Lundmark, M.. "Measurements of interaction between equipment in the frequency range 9 to 95 kHz". IEEE Int. Conf. on Electricity Distribution, Prague, June 2009.
- (12) CIGRE' WG C4.07, "Power Quality Indices and Objectives", Report 261, October 2004.
- (13) R. Chiumeo, L. Garbero, L. Tenti, C. Gandolfi, M. de Nigris, 2011, "The Voltage Dip Performance Assessment Of The Italian Mv Network Through Global Indices," 21th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, Frankfurt, paper 0668.
- (14) S. Rönnberg, A. Larsson, M. Bollen, J.-L. Schanen, "A simple model for interaction between equipment at a frequency of some tens of kHz," Int. Conf. Electricity Distribution (CIRED), Frankfurt, June, 2011.
- (15) M.H.J. Bollen, and Gu, I.Y.H., Signal processing of power quality disturbances, Wiley-IEEE Press, 2006.

## 11.0 DADOS BIOGRÁFICOS



**Gilson Paulillo** é Engenheiro Eletricista, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela UNIFEI, Itajubá-MG, em 1990, 1996 e 2001, respectivamente, na área de Sistemas Elétricos de Potência, com ênfase no tema Qualidade da Energia Elétrica. Tem grande experiência e atuação em temas relacionados a Qualidade da Energia Elétrica, Eficiência Energética, Geração Distribuída, Redes Inteligentes e Automação de Sistemas Elétricos. Membro de diversos Grupos Técnicos Nacionais e Internacionais, bem como autor inúmeros trabalhos técnico-científicos de alcance nacional e internacional. Atualmente é Gerente Corporativo de Inovação do Grupo ENERGISA, no Rio de Janeiro - RJ.



**Paulo Ribeiro**, nascido em 14 de novembro de 1952, é Professor Titular na Universidade Federal de Itajubá, graduado pela Universidade Federal de Pernambuco, e PhD pela Universidade de Manchester, Inglaterra. É Fellow do IEEE e IET.