

Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica e sua Correlação com Falhas no Sistema de Distribuição

E. A. Mertens Jr., L. F. S. Dias, B. D. Bonatto, J. P. G. Abreu e H. Arango

Resumo--Um sistema de telemedição para faturamento integrando o monitoramento de diversos parâmetros de qualidade da energia elétrica vem sendo utilizado pela Elektro há alguns anos. Uma grande quantidade de equipamentos em operação (239 pontos de monitoramento) registra e envia dados de forma contínua alimentando um banco de dados estruturado de forma a permitir a extração de informações que proporcionam um eficiente suporte na operação, análise e gerenciamento do sistema elétrico de distribuição. Neste trabalho é apresentada uma avaliação estatística dos níveis de desequilíbrio de tensão em 143 barras de 13,8kV de subestações de distribuição, baseada no índice “Fator de Desequilíbrio de Tensão”, que consiste na relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva das tensões trifásicas. Também é apresentado um estudo de caso demonstrando uma correlação entre alterações no comportamento dos níveis de determinados indicadores de qualidade de energia elétrica monitorados e o diagnóstico de falhas no sistema elétrico de distribuição. É ilustrada esta correlação, verificada neste caso com resultados práticos medidos no sistema, entre desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas.

Palavras-Chave-- Desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas, monitoramento da qualidade da energia elétrica, indicadores, correlação, falhas, sistema de distribuição.

I. INTRODUÇÃO

QUALIDADE da energia elétrica tem sido tema de interesse de concessionárias, clientes, fabricantes, órgãos reguladores, universidades e centros de pesquisa e tem tido ampla divulgação nos últimos anos, em especial quanto a definições, terminologia, classificação e busca de limites para indicadores dos diversos fenômenos envolvidos [1], [2], [3]. Desenvolver capacidade de medição dos fenômenos foi o passo inicial de muitos agentes para promover um melhor entendimento de causas, conseqüências, níveis de emissividade, de sensibilidade e busca de formas de mitigação de problemas na qualidade da energia [4]. Num passo seguinte, a análise estruturada de dados (medição, monitoramento, faturamento, geoclimáticos, econômico-sociais) para a produção de informações úteis ao planejamento, operação, manutenção integrados [5], [6] estão contribuindo para a promoção da qualidade da energia elétrica

em conformidade aos critérios regulatórios e compatível com os requisitos técnico-econômicos e financeiros dos agentes envolvidos, uma vez que tarifas sensíveis à qualidade ainda não foram estabelecidas no país.

A interação e interdependência dos vários fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica têm sido por vezes observadas [7], inclusive com avaliação de impactos econômicos e financeiros, tais como de redução de vida útil de equipamentos em função de desequilíbrios e harmônicos combinados [8], [9].

Neste trabalho é apresentada uma avaliação estatística dos níveis de desequilíbrio de tensão em 143 barras de 13,8kV de subestações de distribuição, baseada no índice “Fator de Desequilíbrio de Tensão”, que consiste na relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva das tensões trifásicas. Também é apresentado um estudo de caso demonstrando uma correlação entre alterações no comportamento dos níveis de determinados indicadores de qualidade de energia elétrica monitorados e o diagnóstico de falhas no sistema elétrico de distribuição. É ilustrada esta correlação, verificada neste caso com resultados práticos medidos no sistema, entre desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas.

II. DIAGNÓSTICO DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

A ELEKTRO distribui energia elétrica a 1,9 milhões de clientes, localizados em uma área de concessão formada por 223 municípios do Estado de São Paulo e 5 do Mato Grosso do Sul. Sua área de concessão abrange um território de mais de 120 mil quilômetros quadrados, o que representa 37% da área do Estado de São Paulo.

No passado a empresa decidiu pela aquisição de instrumentos de medição para faturamento integrando funções de qualidade de energia, permitindo assim o registro de diversas grandezas e possibilitando a criação de uma rede de monitoramento da qualidade da energia elétrica. A operação contínua destes instrumentos está permitindo o armazenamento de uma grande quantidade de informações do sistema elétrico. A Elektro possui atualmente uma grande quantidade de pontos de monitoramento em operação, enviando e registrando os dados de forma contínua, alimentando um banco de dados estruturado de forma a permitir a extração de informações úteis e consistentes do sistema elétrico. Tais informações proporcionam um eficiente suporte na análise, identificação e gerenciamento do sistema elétrico.

E. A. Mertens Jr. e L. F. S. Dias são profissionais da Elektro – Eletricidade e Serviços S. A., Rua Ary Antenor de Souza 321, Jardim Nova América, CEP 13053-024, Campinas-SP, Brasil (e-mails: Ernesto.Mertens@elektro.com.br, Luis.Dias@elektro.com.br),

B. D. Bonatto, J. P. G. Abreu e H. Arango são docentes da Universidade Federal de Itajubá, Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica, Av. BPS 1303, Bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá-MG, Brasil (e-mails: bonatto@unifei.edu.br, polica@unifei.edu.br, arango@unifei.edu.br).

Esta seção deste trabalho apresenta uma avaliação dos níveis de desequilíbrio de tensão, baseada no índice “Fator de Desequilíbrio de Tensão”, que consiste da relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva das tensões trifásicas. O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição, na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo, ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos, ou ainda, as duas condições simultaneamente.

Portanto, o desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição. Trata-se de fenômeno amplamente conhecido no contexto da engenharia elétrica. As origens do desequilíbrio estão nos meios de transmissão, distribuição, transformação e, principalmente na operação de cargas desequilibradas.

A. Aquisição dos Dados

A empresa possui atualmente 239 pontos de monitoramento (telemedição), envolvendo vários níveis de tensão. Porém, esse trabalho focará apenas as barras de 13,8 kV, que totalizam 143 pontos.

Todos os dados são baseados nos registros efetuados pelos medidores Power Measurement, modelos ION 8500 e ION 8400, através de medições de tensão fase-terra. A taxa de amostragem dos medidores é de 256 amostras por ciclo.

Os registros das grandezas de regime permanente (tensões e desequilíbrios de tensão) são adquiridos ciclo a ciclo, com amostras a cada 2 segundos, e integralizados em intervalos de 10 minutos.

Os transdutores utilizados para registros de tensão são transformadores de potencial indutivos de 15kV, tensão secundária de 115V, com ligação fase-terra, e classe de exatidão de 0,3 (medição).

A fim de permitir uma visão geográfica dos 143 pontos de monitoramento em média tensão, apresenta-se na Fig. 1 a seguir, um mapa ilustrativo do estado de São Paulo, demonstrando os pontos monitorados.

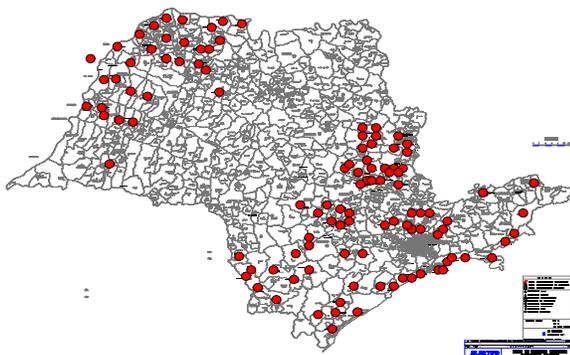


Fig. 1. Mapa do estado de São Paulo, com a demonstração geográfica dos pontos monitorados.

B. Premissas de Apuração do Indicador

A sistemática de apuração do indicador adotada neste trabalho para avaliar o desequilíbrio de tensão é o “Fator de Desequilíbrio de Tensão” (K), e trata-se da mesma sistemática utilizada pelas normas IEC, CENELEC e NRS – 048, que consiste no cálculo da relação entre as componentes de seqüência negativa e positiva das tensões trifásicas, conforme (1):

$$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Dentre as alternativas de cálculo do indicador de desequilíbrio, pode-se dizer que este é o mais exato, pois tal procedimento leva em consideração tanto o módulo quanto o ângulo de fase da referida grandeza para obter o seu nível de desequilíbrio.

Para obter-se o indicador de desequilíbrio de tensão adotado para avaliar o desempenho de um determinado ponto do sistema elétrico em regime permanente, adota-se o KS95%. A sistemática de apuração desse indicador é a estabelecida no documento “Procedimentos de Rede”, elaborado pelo ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico [2]. Uma vez obtido o “Fator de Desequilíbrio de Tensão” (K), considerando os valores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos, determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de cada um dos 7 dias. O valor do indicador corresponde ao maior valor entre os 7 valores obtidos em base diária.

A seguir demonstra-se um exemplo do processo de geração do indicador, para o caso de uma subestação típica. O gráfico da Fig. 2 mostra o perfil de K “Fator de Desequilíbrio de Tensão”, obtido através dos valores médios resultantes da integralização feita pelo medidor em intervalos de 10 minutos, durante uma semana.

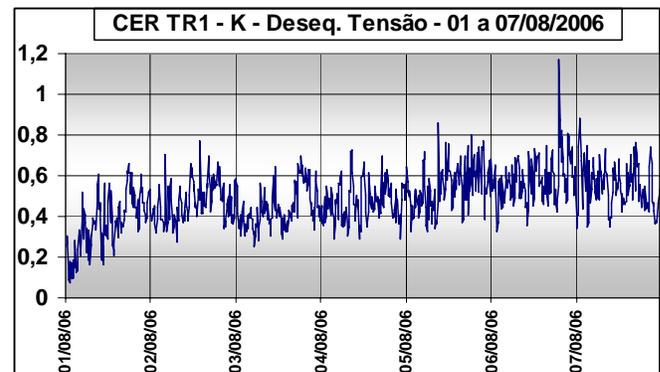


Fig. 2. Perfil de desequilíbrio de tensão da instalação (SE) ao longo de 7 dias.

Em seguida determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia, ao longo de 7 dias consecutivos e o valor do indicador KS95%, que corresponde ao maior entre os 7 valores obtidos, em base diária (BD), demonstrado no gráfico da Fig. 3, através da linha com valor de 0,79. Este é o indicador estabelecido pelo ONS para avaliação do desempenho. A linha de valor 0,70 indica o valor do KS95% em base semanal (BS), ou seja, verifica-se o

valor que foi superado em 5% dos registros obtidos no período de uma semana. Esse valor será utilizado para outras avaliações, pois apresenta um indicador mais estável, com melhor representatividade para outros objetivos. A linha de valor 0,50 demonstra o valor médio de KS95%, e serve também como referência em outras avaliações desse indicador.

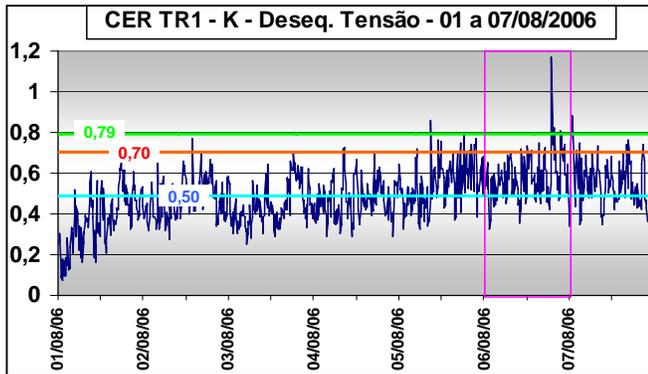


Fig. 3. Perfil de desequilíbrio de tensão da instalação (SE) ao longo de 7 dias e valores de indicadores limite.

Percebe-se que o indicador adotado (KS95%) é bastante rígido, e será utilizado para o gerenciamento de Desequilíbrio de Tensão na rede básica, frente aos seus limites de referência.

C. Resultados Obtidos

Como citado, o universo abrangido por este trabalho é de 143 pontos de monitoramento com medições simultâneas, ou seja, eventuais interferências entre barras estarão consideradas nos registros. Todos os monitoramentos foram realizados nas barras de 13,8kV das subestações de distribuição. Trata-se de um universo representativo para avaliação do desempenho do sistema elétrico de média tensão, referente a esse indicador.

A Fig. 4 a seguir sintetiza o resultado verificado nas 143 barras de 13,8 kV:

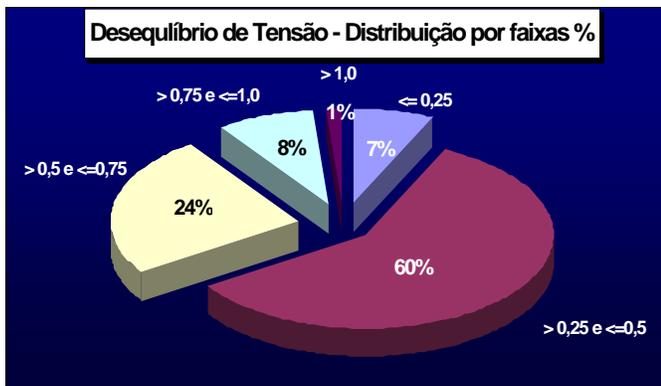


Fig. 4. Indicadores de desequilíbrio de tensão nas 143 barras de 13,8kV das SEs monitoradas.

D. Correlação entre Níveis de Desequilíbrio de Tensão e Distorções Harmônicas

Tal avaliação visa verificar se os níveis registrados de desequilíbrio possuem uma correlação esperada que quanto maior o desequilíbrio de tensão, maior a possibilidade de elevados níveis de distorção harmônica. Através da linha de tendência da Fig. 5 verifica-se que existe esta correlação.

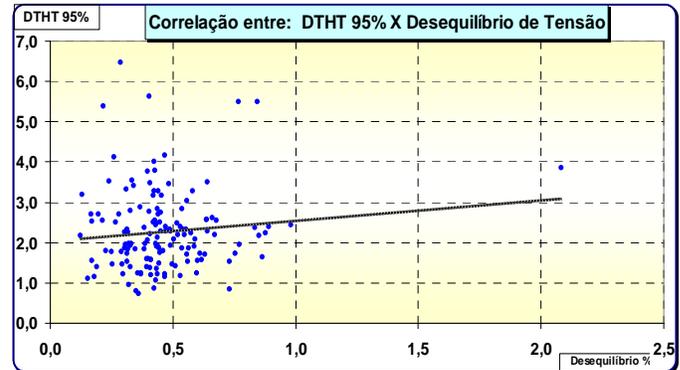


Fig. 5. Correlação entre níveis de desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas nas SEs monitoradas.

III. ESTUDO DE CASO: DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO E DISTORÇÃO HARMÔNICA

Esta seção deste trabalho tem por objetivo demonstrar as funcionalidades adicionais obtidas através do monitoramento dos parâmetros de qualidade da energia elétrica. Para esse caso demonstra-se que é possível diagnosticar com boa precisão, falhas no sistema elétrico de distribuição, através da avaliação de alterações no comportamento dos níveis de determinados parâmetros de qualidade de energia.

Dessa forma, a implementação possível de um sistema que trate os dados históricos de cada um dos indicadores de qualidade de energia, de maneira a obter-se o comportamento característico de cada uma das grandezas de regime permanente para uma determinada barra do sistema elétrico, permite diagnosticar rapidamente alguns tipos de falhas, que na ausência desse tipo de ferramenta, necessitará do auxílio de que algum cliente efetue a comunicação para a concessionária, para que a mesma possa iniciar uma busca do defeito, o que em alguns casos pode levar dias.

A. Avaliação Prática

Este caso exemplo demonstra que a análise da inter-relação entre as diversas grandezas monitoradas na barra da SE cria a possibilidade de identificar-se prontamente desvios no comportamento ou alguns tipos de falhas ocorridos no sistema elétrico de distribuição.

O caso a seguir apresenta o monitoramento dos níveis de distorção harmônica de tensão, e sua correlação com a ocorrência de uma falha em um equipamento de regulação de tensão (RT – Regulador de Tensão), instalado no alimentador, entre a SE e um cliente industrial, situado a cerca de 9 km da SE, conforme diagrama da Fig. 6:

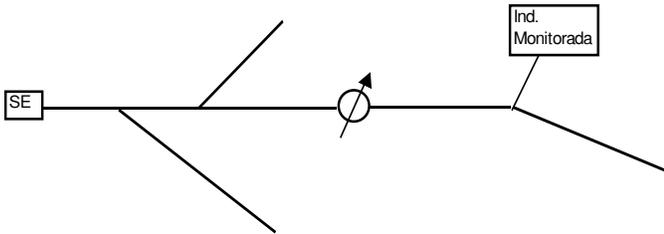


Fig. 6. Diagrama do circuito alimentador, desde a subestação de distribuição até a carga industrial monitorada.

Como havia monitoramento simultâneo na saída do alimentador e também no cliente industrial citado, localizado após o Regulador de Tensão (RT) avariado, ou seja, a instalação do cliente estava sujeita às condições inadequadas de fornecimento, aproveitou-se essa ocorrência para analisar a influência dos níveis de desequilíbrio de tensão e elevação da tensão sobre as distorções harmônicas presentes no sistema.

A falha ocorrida foi em um equipamento do tipo banca de reguladores de tensão, composta por 2 equipamentos monofásicos, com ligação elétrica do tipo delta-aberto. Trata-se de configuração amplamente utilizada pelas empresas de distribuição. Neste caso um dos reguladores teve o travamento de seu sistema de comutação, devido a uma falha no painel de controle deste equipamento. Esse tipo de falha é de difícil diagnóstico, uma vez que a maioria dos equipamentos atualmente em uso não possui sistema de monitoramento / comunicação remota. Dessa forma, a identificação de falha nesse tipo de dispositivo depende basicamente da comunicação dos clientes localizados à frente do mesmo, que em muitos casos efetuam a reclamação à concessionária já após terem sofrido algum tipo de prejuízo.

As Figs. 7, 8, 9 e 10 apresentam gráficos com os resultados das medições efetuadas no período de 06/01 a 06/02/2007, no ponto de entrega da indústria monitorada. Na Fig. 7 é apresentado o gráfico do perfil de tensão, em cada fase, no ponto de entrega da indústria monitorada à frente do RT.

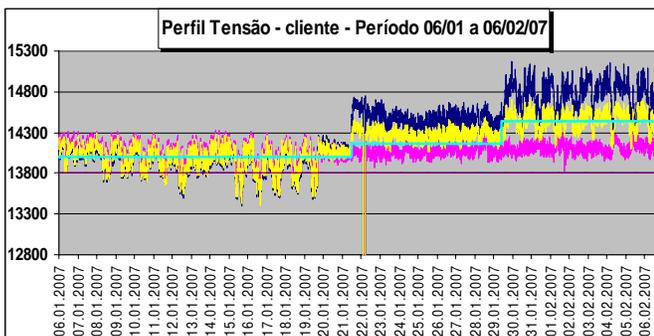


Fig. 7. Gráfico do perfil de tensão, em cada fase, no ponto de entrega da indústria monitorada à frente do RT, no período de 06/01 a 06/02/2007.

Percebe-se claramente, que num primeiro período (de 06 a 21/01/2007) as tensões apresentam valores praticamente iguais entre as fases; já num segundo período (de 21 a 29/01/2007) há uma discrepância entre os valores das fases, que é agravada no terceiro período (de 29/01 a 06/02/2007).

As Figs. 8, 9 e 10 apresentam, respectivamente, o gráfico do perfil do desequilíbrio de tensão, de distorção harmônica

de tensão e de distorção harmônica de corrente na indústria monitorada, no período de 06/01 a 06/02/2007.

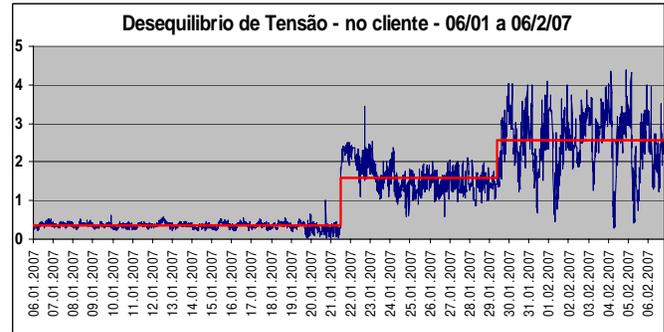


Fig. 8. Gráfico do perfil do desequilíbrio de tensão na indústria monitorada, no período de 06/01 a 06/02/2007.

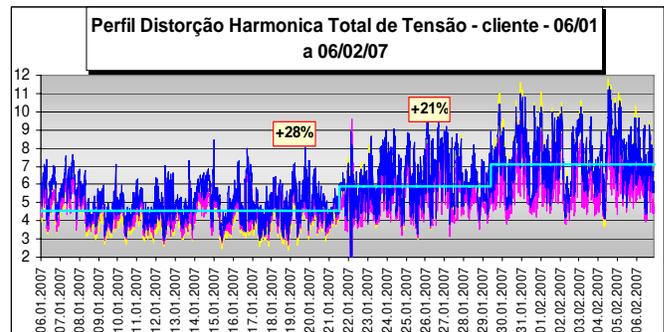


Fig. 9. Gráfico do perfil de DTHH na indústria monitorada, no período de 06/01 a 06/02/2007.

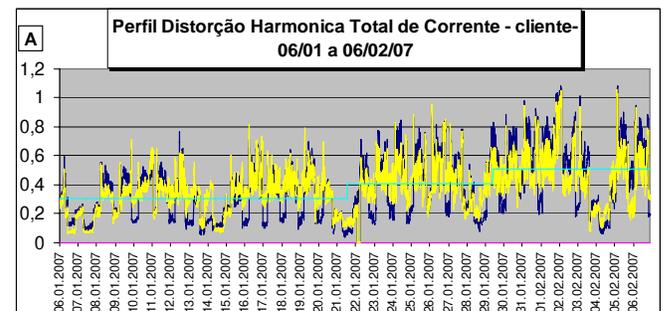


Fig. 10. Gráfico do perfil de injeção harmônica total de corrente na indústria monitorada, no período de 06/01 a 06/02/2007.

Continuando, a Fig. 11 apresenta o gráfico com os resultados das medições efetuadas no período de 06/01 a 06/02/2007, na saída da subestação que supre esse alimentador. A linha inferior no gráfico refere-se ao indicador "K" de desequilíbrio de tensão, apresentando em todo o período valores inferiores a 0,5 %. As linhas superiores representam o perfil de distorção harmônica total de tensão, de cada uma das fases. A linha central refere-se à média aritmética dos níveis de distorção de tensão, onde os degraus são devido à mudança da situação de desequilíbrio no sistema provocado por falha de operação no Regulador de Tensão instalado na rede de distribuição da concessionária.

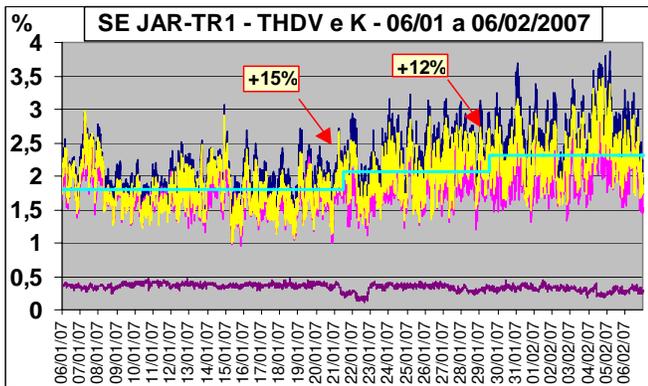


Fig. 11. Medição de desequilíbrio e distorção harmônica de tensão na SE, ponto de saída do alimentador.

Nota-se que o perfil de desequilíbrio de tensão ao qual os clientes à frente do RT foram submetidos não afetou o indicador na saída da SE; o mesmo vale para o nível de tensão. Já o nível de distorção harmônica sofreu significativa amplificação, permitindo que seja sinalizada uma provável anomalia na operação desse sistema elétrico.

IV. CONCLUSÕES

A aplicação de ferramentas de análise integrada desse tipo nas barras das SEs monitoradas, permite agilidade na correção de alguns tipos de problemas que ocorrem no sistema elétrico e que são de difícil identificação pela sistemática atual de operação da maioria das concessionárias de distribuição.

Destaca-se a implementação desse tipo de “inteligência” aplicado ao monitoramento, permite que haja uma verificação contínua das tendências de cada uma das grandezas elétricas, de forma a permitir antecipadamente ações corretivas no sistema, minimizando seus efeitos e dessa forma proporcionando uma melhor qualidade da energia elétrica fornecida aos clientes.

A análise de possíveis correlações entre indicadores de qualidade da energia elétrica com eventuais falhas no sistema de distribuição deve ser objeto de pesquisa integrada para o desenvolvimento de processos integrados de gestão de planejamento, operação, manutenção e de aplicativos computacionais inteligentes aplicados ao sistema de distribuição das concessionárias.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Francisco Alfredo Fernandes e Paulo de Tarso Gasparino de Souza pela possibilidade de interação entre a ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A. e o Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica da UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá para a redação conjunta deste artigo.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. McGranaghan, H. W. Beatty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2nd Ed., 2003.
- [2] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”, endereço na internet: <http://www.ons.org.br>.

- [3] PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, disponível no site da ANEEL: <http://www.aneel.gov.br/>.
- [4] B. D. Bonatto, E. A. Mertens Jr., E. S. da Silva, and L. F. S. Dias, “Power Quality Assessment at Sensitive Loads”, in Proceedings, IEEE/PES Transmission and Distribution Latin America Conference (IEEE/PES T&D 2002 Latin America), São Paulo –SP, Brazil, March 18-22, 2002.
- [5] E. A. Mertens Jr., E. S. da Silva, B. D. Bonatto e L. F. S. Dias, “Impacto de Variações de Frequência versus Variações de Tensão de Curta Duração”, XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Uberlândia-MG, Brasil, 19-24 de outubro de 2003.
- [6] E. A. Mertens Jr., B. D. Bonatto e L. F. S. Dias, “Avaliação do Sistema Elétrico quanto às “Variações de Tensão de Curta-Duração””, XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (XVI SENDI), Brasília-DF, Brasil, 21 – 24 de novembro de 2004
- [7] E. A. Mertens Jr., B. D. Bonatto e L. F. S. Dias, “Avaliação e Tendência dos Níveis de Distorção Harmônica de Tensão no Sistema Elétrico de Distribuição”, XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (XVII SENDI), Belo Horizonte - MG, Brasil, 21 - 25 de agosto de 2006.
- [8] J. P. G. Abreu and A. E. Emanuel, “Induction Motors Loss of Life due to Voltage Imbalance and Harmonics: A Preliminary Study”, 9th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Proceedings Vol. I, October 1-4, 2000, Orlando, Florida, USA, pp. 75-80.
- [9] J. P. G. Abreu and A. E. Emanuel, “Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and its Estimated Cost”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No 1, Jan/Feb 2002, pp. 12-20.

VII. BIOGRAFIAS



profissional registrado no CREA.

Ernesto Alberto Mertens Jr. graduou-se em engenharia elétrica na Escola de Engenharia de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil, em 1983. De 1983 a 1986 trabalhou para a Prefeitura de São Paulo. Em 1986 ingressou na Companhia Energética de São Paulo S.A. (CESP), e após sua privatização está atuando na ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A., Campinas-SP, Brasil, na área de engenharia sendo responsável por diversos assuntos relacionados à qualidade da energia elétrica. É



Luís Fernando Souza Dias graduou-se em técnico em eletrotécnica pela Escola Técnica Industrial João Batista de Lima Figueiredo, Mococa-SP, Brasil, em 1977. Em 1978 ingressou na Companhia Energética de São Paulo S.A. (CESP), e após sua privatização tem atuado em diversas áreas da engenharia da ELEKTRO – Eletricidade e Serviços S.A., Campinas-SP, Brasil, ênfase para tópicos relacionados a monitoramento da qualidade da energia elétrica. É profissional registrado no CREA.



Benedito Donizeti Bonatto graduou-se como engenheiro electricista em 1991 pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), obteve em 1995 o Mestrado (MAsc.) pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e em 2001 o título de Doutor (Ph.D.) pela Universidade da Columbia Britânica (UBC), Canadá, onde estudou sob a supervisão do Dr-Ing. Hermann W. Dommel (o autor do EMTP – Electromagnetic Transients Program). Ingressou na CESP em 1994 e atuou na ELEKTRO até janeiro de 2007. Trabalhou em engenharia, projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, gerência de Educação Corporativa. Atualmente é professor na UNIFEI, atuando no Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE–<http://www.gqee.locaweb.com.br/gqee/>). É filiado ao CREA e IEEE.



José Policarpo Gonçalves de Abreu graduou-se em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI em 1975. Recebeu o título de Mestre em Ciências também pela EFEI em 1980 e o título de Doutor em Ciências pela Universidade de Campinas - Unicamp em 1991. Desenvolveu o Pós-Doutorado no WPI (Worcester Polytechnic Institute, EUA) em 2000. Prof. Policarpo é Coordenador do GQEE, desde a sua fundação e tem sido consultor da Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - Fupai, bem

como tem prestado serviços para ONS, CSPE, ANEEL, Enerq, CED, dentre outros.



Héctor Arango graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidad Nacional Del Sul. Recebeu o grau de Mestre em Ciências pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá, EFEI, no ano de 1990, no qual trabalhou com transformações especiais. Recebeu o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo - USP em 1996. Desde 1976 é professor da Universidade Federal de Itajubá. Seu campo de pesquisa e interesse inclui a Qualidade da Energia Elétrica, Legislação do

mercado de energia, máquinas elétricas rotativas e transformadores, definições sobre condições não senoidais e análise de risco em mercados de eletricidade.