

Ferramenta computacional para análise de grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica

Marco A. G. Oliveira, Anésio F. F. Leles, Francisco A. O. Nascimento, Edson Mintsu, Rafael Ortis, Tiago Fonseca, Geovany A. Borges, Rafael A. Shayani e Onivaldo A. Fernandes

Resumo - Este trabalho visa apresentar uma ferramenta computacional desenvolvida empregando-se o sistema operacional Linux, a partir da linguagem de programação C++, para a análise de grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica, a saber, harmônicas, desequilíbrio, afundamentos e elevações momentâneas de tensão, cintilação luminosa (flicker), e ainda, os níveis de tensão em regime permanente. Com base em medições utilizando-se diversos instrumentos do tipo ION7600, localizados em pontos do sistema elétrico da Eletronorte, são formados bancos de dados contendo informações que poderão ser analisadas e interpretadas segundo diversas normas e recomendações. Indubitavelmente, esta ferramenta tende a consolidar-se como uma metodologia de grande utilidade para concessionárias, universidades e profissionais interessados na quantificação e na qualificação dos supramencionados fenômenos.

Palavras-chave— Qualidade da energia, quantificação e qualificação de grandezas.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a evolução da eletrônica de potência, tem surgido uma nova geração de equipamentos elétricos, trazendo enormes benefícios no desempenho e na confiabilidade dos sistemas de transmissão. No entanto, estes dispositivos podem comprometer a Qualidade da Energia Elétrica – QEE

Considerando-se que atualmente o ambiente de competitividade está consolidado no setor elétrico brasileiro e os aspectos concernentes à operação com qualidade tornaram-se exigência, o assunto tem se tornado alvo de pesquisas e estudos em diversos congressos da área. Assim, são necessárias a definição e apuração de indicadores de desempenho e indi-

ces de referência capazes de refletir corretamente a degradação da QEE, cobrindo os inúmeros aspectos envolvidos no seu contexto, e que tenham um bom nível de consenso entre os agentes atuantes.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e o Operador Nacional do Sistema (ONS), em parceria com universidades, centros de pesquisa, agentes do setor elétrico, fabricantes de equipamentos e consumidores, têm executado algumas campanhas de medição e coordenado diversos fóruns de debates destinados à elaboração e à adaptação dos documentos que comporão a resolução brasileira que versa sobre a qualidade da energia elétrica no sistema de distribuição [1].

Por se tratarem de questões envolvendo comportamentos aleatórios no tempo, função inclusive de conexões e desligamentos de cargas do sistema, conforme atestam algumas publicações [2] e [3], torna-se premente uma investigação minuciosa que avalie se tais características têm sido contempladas pelas metodologias empregadas. Neste caso, medições de campo que evidenciem a realidade dos nossos sistemas nos dias atuais, caracterizam-se como ações providenciais.

Como são demandados, em geral, diversos dias de monitoração para uma análise que culmine em resultados representativos dos níveis dos distúrbios presentes no local em avaliação, o volume de informações coletadas é grande. Logo, para se obter conclusões de forma simples e prática com base nos dados armazenados, tornam-se necessárias metodologias alicerçadas na aplicação de técnicas estatísticas, capazes, inclusive, de gerar resultados considerando-se os métodos empregados pelas normas sobre o assunto.

Frente a estes fatos, a Eletronorte, em parceria com a Fundação Empreendimentos Científicos e Tecnológicos - FINATEC e Universidade de Brasília – UnB, realizou um projeto de P&D, aprovado pela ANEEL sob número 066/2004, dentro do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico ciclo 2003/2004, por meio do contrato nº: 4500054062, denominado “*Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise e avaliação das grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica*”. Este projeto de P&D contribuiu com investigações que culminaram na elaboração de uma ferramenta de análise de grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica [4], [5], [6], [7], e [8]. Tal aplicativo permite uma análise global dos afundamentos e elevações momentâneas de tensão, das harmônicas, da cintilação

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (V CITENEL), realizado em Belém/PA, no período de 22 a 24 de junho de 2009.

Marco A. G. Oliveira (e-mail: mago@ene.unb.br), Anésio F. F. Leles (e-mail: leles@unb.br) e Rafael A. Shayani (e-mail: rafael@shayani.net) são pesquisadores do Grupo de Sistemas Elétricos de Potência - GSEP - da Universidade de Brasília.

Francisco A. O. Nascimento (e-mail: assis@unb.br), Edson Mintsu (e-mail: mintsu@image.unb.br), Rafael Ortis (e-mail: rsortis@gmail.com), Tiago Fonseca (e-mail: tiago@image.unb.br) e Geovany A. Borges (e-mail: gaborges@unb.br) são pesquisadores do Grupo de Processamento Digital de Sinais - GPDS - da Universidade de Brasília.

Onivaldo A. Fernandes trabalha na Gerência de Estudos Elétricos da Operação da Transmissão da Eletronorte (e-mail: onivaldo@eletronorte.gov.br).

luminosa (*flicker*), do desequilíbrio e dos níveis de tensão em regime permanente, detectados e registrados a partir de instrumentos de medição instalados em pontos estratégicos do sistema Eletronorte.

Inicialmente, com base em um sistema autômato denominado “robô”, armazena-se sistematicamente as informações de interesse do usuário em um banco de dados instalado em um servidor dimensionado para este fim. Em seguida e a partir do emprego do programa computacional, têm-se disponíveis diversas modalidades de análise, a saber: o cálculo de indicadores representativos das amostras selecionadas, estatísticas de ocorrências de eventos, comparação dos resultados das medições com os padrões preestabelecidos em normas nacionais e internacionais, e ainda, a geração de relatórios em formato digital. Com isso, o sistema especialista disponibiliza avaliações integradas e simultâneas dos parâmetros selecionados, oriundos de medições em diferentes pontos de alimentação de consumidores.

Indubitavelmente, esta ferramenta tende a consolidar-se como uma metodologia de grande utilidade para concessionárias, universidades e profissionais interessados na quantificação e na qualificação dos supramencionados fenômenos.

II. PROGRAMA COMPUTACIONAL

Trata-se de uma nova ferramenta auxiliar, desenvolvida em linguagem de programação “C++”, a partir do emprego do sistema operacional “LINUX”. Tal algoritmo é dotado de vários recursos destinados a fornecer opções simples e objetivas na análise de grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica. Este sistema especialista disponibiliza uma avaliação integrada e simultânea de todos os parâmetros medidos, mesmo estando os medidores instalados em inúmeros e diferentes sítios. Esta característica permite ao usuário observar o impacto de um evento de qualidade da energia em distintos pontos do sistema. A figura 1 ilustra um fluxograma com a estrutura do sistema de monitoração desenvolvido.

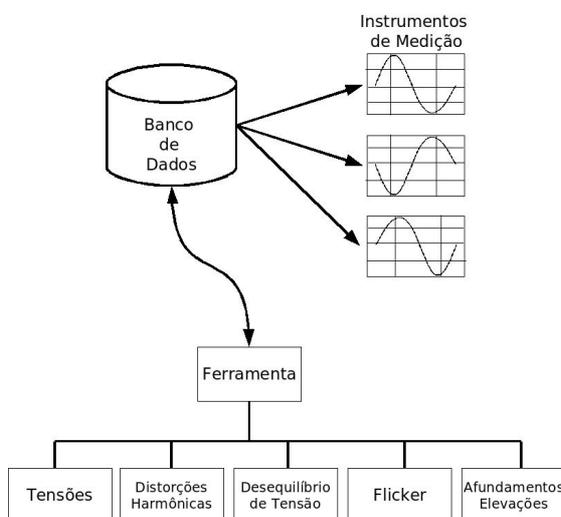


Figura 1. Apresentação da estrutura do sistema de monitoração

Da figura 1 observa-se que o banco de dados é constituído com base nas informações oriundas dos instrumentos de

medição. A escolha das grandezas e a sistemática de armazenamento são disponibilizadas com o uso de um sistema autônomo denominado “robô”. A ferramenta, a partir do acesso ao banco de dados, permite ao usuário a análise das grandezas do seu interesse, conforme mostra a figura 2.

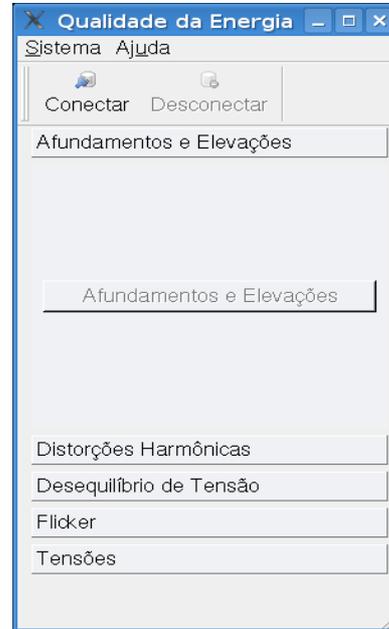


Figura 2. Apresentação dos módulos disponíveis no aplicativo

Da figura 2 verifica-se que o aplicativo encontra-se dividido em 5 módulos independentes que possibilitam a análise de afundamentos e elevações de tensão, de distorções harmônicas, do desequilíbrio, da cintilação luminosa (*flicker*), e dos níveis de tensão em regime permanente.

Nos 5 módulos ilustrados nas figuras 1 e 2, buscou-se uma padronização das análises disponíveis, com vistas a facilitar o entendimento e manuseio da mesma. O aplicativo comporta a abertura simultânea de inúmeros módulos de uma determinada grandeza, conforme o interesse do analista. Isso viabiliza, por exemplo, a comparação entre os valores adquiridos por fase, além de fornecer possibilidades de análises em períodos diferentes, e entre pontos de medição distintos. A seguir, são caracterizados de forma sucinta, cada um dos módulos que compõem a estrutura geral da ferramenta. Adicionalmente, serão ilustradas as principais características do sistema especialista, o “robô”.

A. Afundamentos e elevações momentâneas de tensão

No módulo de análise de “Afundamentos e Elevações”, têm-se 4 opções de análise, a saber: caracterização, classificação, estatísticas e curvas CBEMA e ITIC [3].

Em todos os módulos, tão logo o usuário selecione o fenômeno a ser analisado, surge na tela o mapa ilustrado na figura 3, cujo objetivo é permitir uma indicação rápida da região preterida para investigação.

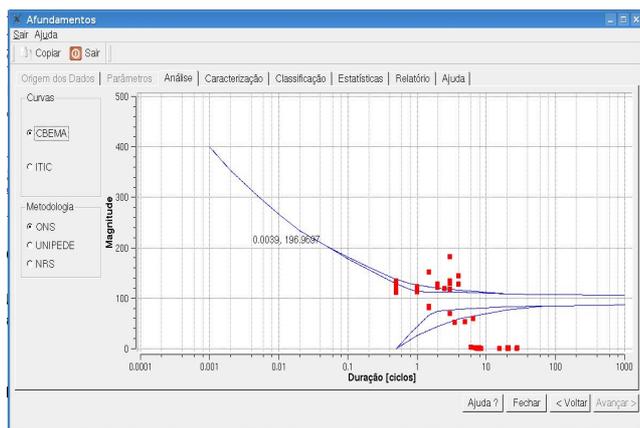


Figura 8. Tela de apresentação dos eventos sobre a curva “CBEMA”

De posse dos resultados ilustrados nas figuras 7 e 8, pode-se ter uma idéia das conseqüências oriundas da presença dos eventos detectados pelo medidor sobre os equipamentos do sistema elétrico.

Encontra-se neste módulo, o ícone para a visualização de algumas estatísticas dos eventos medidos. A figura 9 ilustra uma tela com uma das possibilidades de análise do menu “estatísticas”, a saber, o histograma com o número de ocorrências por duração dos eventos.

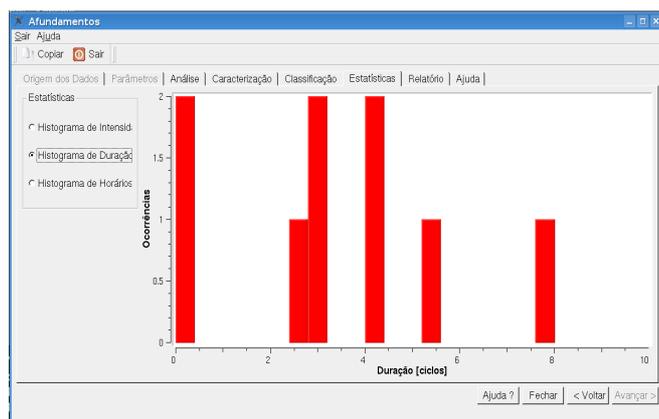


Figura 9. Tela de apresentação de um dos histogramas disponíveis no tópico “estatísticas”

Da figura 9 pode-se verificar que este item possibilita a visualização de estatísticas de eventos por duração, intensidade e horários, facilitando a identificação de comportamentos semelhantes ou cíclicos.

B. Desequilíbrio de tensão

No módulo de análise de desequilíbrio de tensão têm-se 4 opções de análise, a saber: quantificação, análise de similaridade entre dias, análise das componentes de seqüência, e qualificação.

Na quantificação do desequilíbrio é possível calcular o fator de desequilíbrio pelos métodos das componentes simétricas, do Cigré, do Nema e do IEEE.

As figuras 10 e 11 ilustram as telas com os resultados da quantificação do desequilíbrio do local em estudo, para 7 dias consecutivos, a partir do método das componentes simétricas.

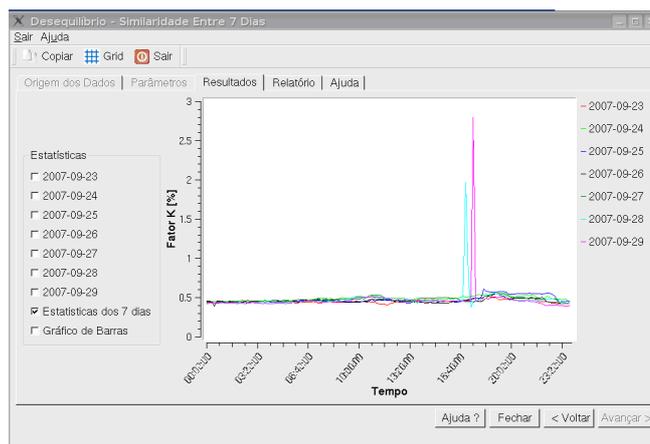


Figura 10. Tela de apresentação dos resultados da quantificação do desequilíbrio de 7 dias consecutivos

Da figura 10 observa-se os perfis do fator K calculados para os 7 dias em avaliação.

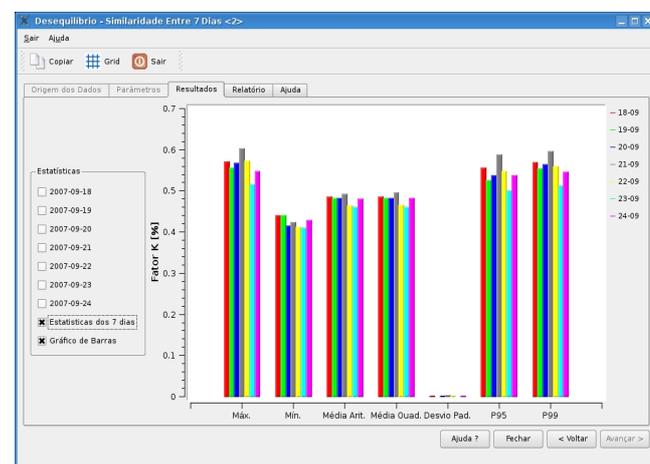


Figura 11. Tela de apresentação dos resultados da quantificação do desequilíbrio de 7 dias consecutivos

Da figura 11 é possível observar as barras com as estatísticas para cada dia em análise. Os valores exatos das mencionadas estatísticas podem ser adquiridos a partir da seleção do ícone “estatísticas dos 7 dias” (figura 12).

	2007-09-18	2007-09-19	2007-09-20	2007-09-21	2007-09-22	2007-09-23	2007-09-24
Máximo	0,570885	0,556202	0,566976	0,602742	0,571962	0,516524	0,547145
Mínimo	0,440721	0,439754	0,415901	0,423634	0,411353	0,410795	0,428096
Média Aritmética	0,485165	0,481731	0,481981	0,492339	0,464674	0,460511	0,480348
Média Quadrática	0,486307	0,482506	0,483041	0,494915	0,465837	0,461134	0,48148
Desvio Padrão	0,0333046	0,0273409	0,031971	0,0504354	0,0328996	0,0239623	0,0329981
P95	0,555686	0,525573	0,537264	0,587985	0,547943	0,500338	0,537668
P99	0,569204	0,554503	0,564718	0,596024	0,559606	0,512654	0,546626

Figura 12. Tela de apresentação das estatísticas do fator K , calculados para 7 dias de medição

A figura 13 apresenta os resultados da análise das componentes de seqüência.

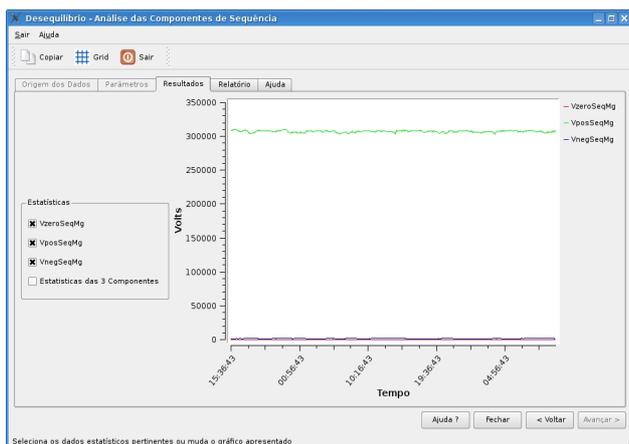


Figura 13. Tela de apresentação dos resultados do cálculo das componentes de seqüência

Verifica-se da figura 13, a possibilidade de se adquirir tanto o perfil das componentes de seqüência positiva, negativa e zero do local em estudo, bem como as suas estatísticas.

A figura 14 ilustra um dos gráficos disponíveis no tópico de qualificação do desequilíbrio de tensão.

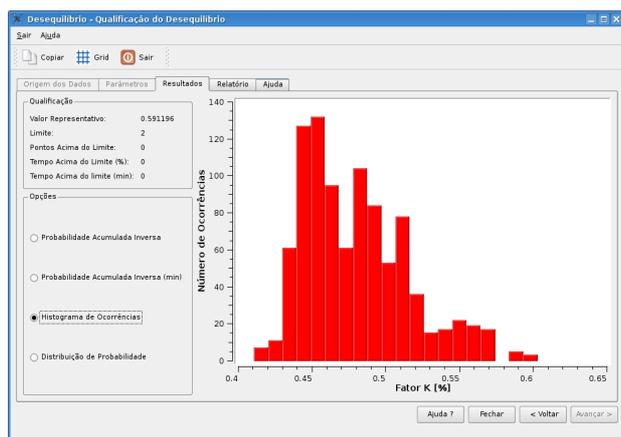


Figura 14. Histograma com o número de ocorrências dos níveis de desequilíbrio de tensão

Com base na figura 14 observa-se que encontram-se também disponíveis os gráficos com a probabilidade acumulada inversa, a probabilidade acumulada inversa em minutos, e a distribuição de probabilidade.

C. Distorções Harmônicas

No módulo de análise das distorções harmônicas de tensão têm-se 3 opções de análise, a saber: análise de similaridade entre dias, análise de similaridade entre fases, e qualificação.

A figura 15 apresenta a tela com os resultados da análise de similaridade entre fases.

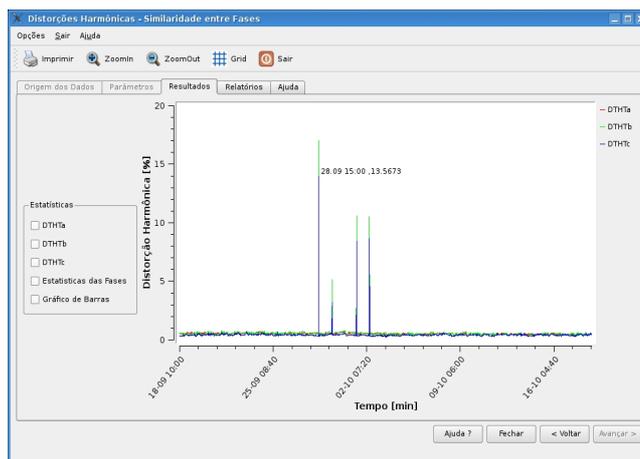


Figura 15. Análise de similaridade entre fases das distorções harmônicas

Na figura 15 nota-se, como ocorre na análise de outras grandezas, a possibilidade de se adquirir a tabela com as estatísticas por fase das distorções harmônicas.

A figura 16 ilustra os perfis das distorções harmônicas totais de tensão dos 7 dias em análise.

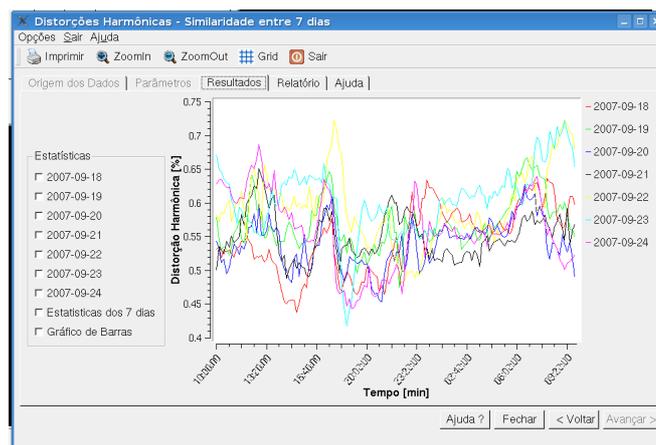


Figura 16. Análise de similaridade entre dias das distorções harmônicas

Da figura 16 observa-se como se dão os comportamentos das distorções harmônicas de tensão de cada dia em análise. Por este gráfico é também possível se identificar qual o dia que possui valores mais elevados, e se há semelhança entre os perfis das distorções harmônicas em análise.

A figura 17 exhibe a tela de apresentação do módulo de qualificação das distorções harmônicas, permitindo selecionar para análise, qualquer uma das ordens harmônicas.

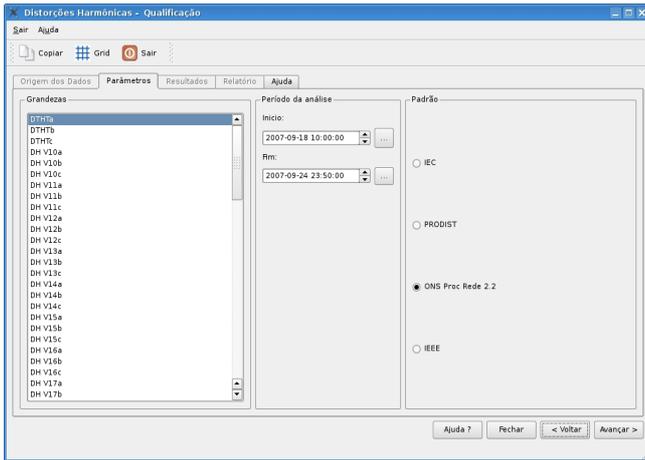


Figura 17. Tela de apresentação do módulo de qualificação das distúrbios harmônicas

Da figura 17 observa-se a possibilidade de qualificação das distúrbios harmônicas pelos métodos das normas do IEC, do PRODIST (lembrando que os Procedimentos de Distribuição não foram até a presente data, outorgados pela Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil - Aneel), do IEEE, e dos Procedimentos de Rede do ONS. O módulo de similaridade entre dias oferece os mesmos recursos apresentados no tópico de desequilíbrio de tensão.

D. Cintilação Luminosa - Flicker

No módulo de análise das cintilações luminosas (*flicker*) têm-se 3 as opções de análise de similaridade entre dias, entre fases, e qualificação.

A figura 18 mostra o tópico de qualificação do flicker.

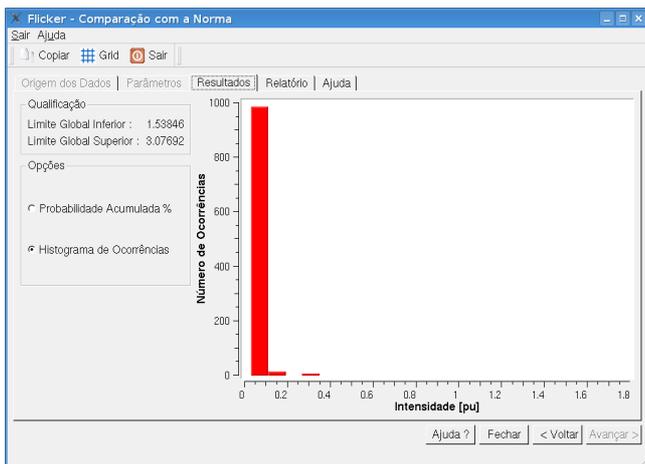


Figura 18. Histograma com o número de ocorrências dos níveis de P_{ST}

Da figura 18 observa-se que encontram-se também disponíveis os gráficos com a probabilidade acumulada e o histograma de ocorrências, tanto para o P_{ST} (*short-term probability*), um índice de quantificação estatística da sensação instantânea de *flicker* como para o P_{LT} (*long-term probability*, média cúbica de 12 valores consecutivos de P_{ST}).

Os módulos de similaridade entre dias e fases possuem os mesmos recursos já apresentados nos tópicos de distúrbios harmônicas e desequilíbrio.

E. Tensões

No módulo de análise das tensões têm-se as opções de estudos de tensão e carga, de similaridade entre dias, e qualificação.

A figura 19 exibe uma das telas de resultados da análise de tensão e carga.

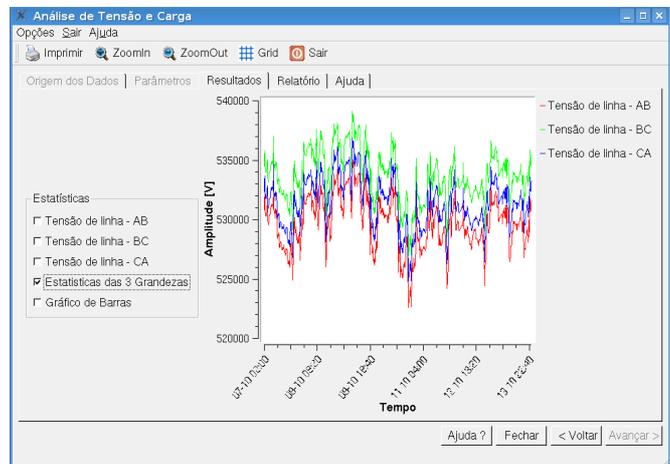


Figura 19. Tela de apresentação das formas de onda das tensões de linha do local em estudo

Na figura 19 visualizam-se os perfis das tensões de linha do local em estudo. Neste mesmo tópico de análise é possível obter não só as formas de onda, bem como o gráfico de barras e as estatísticas nas 3 fases das correntes, das tensões de fase, das potências ativa, reativa e aparente, do fator de potência e das frequências.

A figura 20 apresenta o histograma de ocorrências de tensões do local em avaliação.

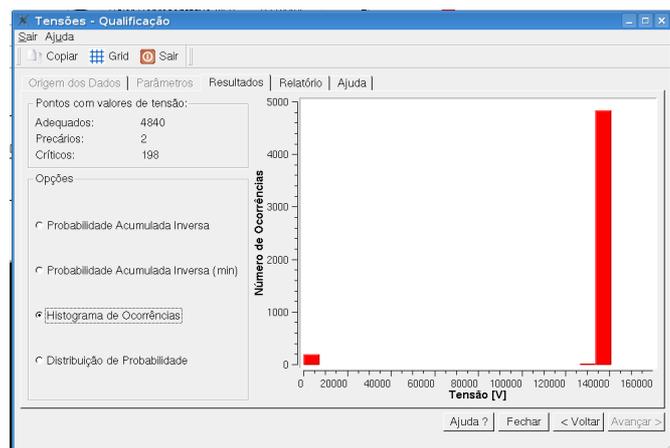


Figura 20. Histograma com o número de ocorrências dos níveis de P_{ST}

Da figura 20 nota-se que encontram-se também disponíveis os gráficos com a probabilidade acumulada inversa, probabilidade acumulada inversa no tempo e distribuição de probabilidades dos níveis de tensão.

O módulo de similaridade entre dias assemelha-se aos já exibidos quando da análise das distúrbios harmônicas e desequilíbrio.

F. Sistema Especialista - Robô

A figura 21 ilustra a estrutura do sistema de monitoração instalado na Eletronorte.

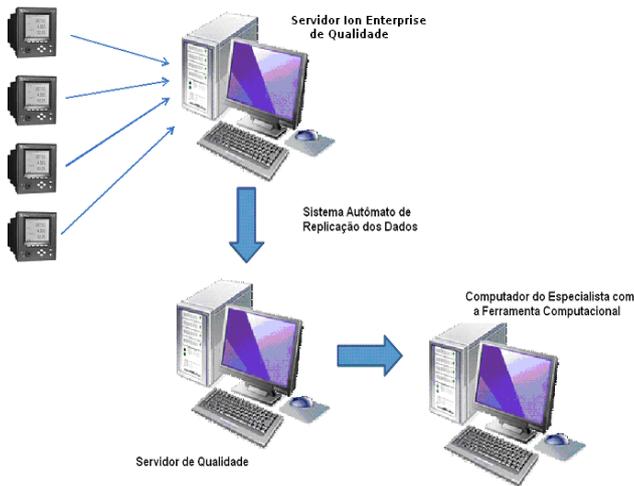


Figura 21. Estrutura do sistema de monitoração

Na figura 21 é possível notar todas as partes envolvidas na medição e armazenamento das informações colhidas pelos instrumentos de medição instalados em diversos pontos do sistema Eletronorte. A partir do ION Enterprise, software de configuração do instrumento de medição, faz-se a escolha das grandezas que serão monitoradas.

O sistema autônomo, no caso o robô, é responsável pela seleção das grandezas que irão compor o banco de dados de qualidade. Com o mesmo, torna-se factível o armazenamento de um conjunto de grandezas oriundas de um instrumento de medição, com características diferentes ao captado por outro medidor.

III. CONCLUSÕES

A ferramenta computacional desenvolvida teve como principal objetivo, possibilitar de forma eficiente e simples, o armazenamento e a interpretação de uma grande quantidade de informações vinculadas com a qualidade da energia elétrica, de um ou vários locais em monitoração. O aplicativo foi dividido em 5 módulos independentes entre si. Contudo, manteve-se um padrão estrutural que possibilita a análise de dados, a emissão de relatórios, e a exportação de resultados, tudo isso intuitivamente. É possível a execução simultânea de análises de diferentes fenômenos em locais distintos, quase sempre com o auxílio de um instrumental estatístico. Isso viabiliza comparações, e em conseqüência, conclusões que podem ser empregadas para solucionar eventuais problemas do sistema elétrico.

Os dados são coletados a partir de instrumentos de medição e armazenados, sistematicamente, em um servidor a partir da ação de um sistema autônomo.

Alguns recursos de grande utilidade foram empregados em diversos os módulos. São eles: análise da similaridade

entre dias e fases; histogramas de ocorrências; distribuição de probabilidade e de eventos por intensidade e duração, e a qualificação dos distúrbios com base nas metodologias empregadas pelas principais normas que versam sobre o assunto.

No módulo de análise de afundamentos e elevações de tensão, dentre as várias possibilidades, pode-se visualizar a forma de onda e o valor RMS para os eventos medidos. A utilização das curvas “CBEMA” e “ITIC” permitem a atribuição de prováveis efeitos dos eventos sobre equipamentos do sistema elétrico.

Em se tratando dos desequilíbrios de tensão, o aplicativo permite ao usuário calcular o fator K a partir dos métodos das componentes simétricas, do Cigré, do Nema, e do IEEE.

Quanto às harmônicas, é factível uma investigação pormenorizada nas distorções totais e individuais de cada uma das fases. Isso permite a identificação dos prováveis causadores de perturbações, e em decorrência, pode-se desenvolver soluções pontuais para a eliminação das mesmas.

Para a análise das cintilações luminosas, são empregados tanto o P_{ST} como o P_{LT} .

No módulo das tensões e carga, têm-se disponíveis para as 3 fases, gráficos de linha e estatísticas das tensões de fase e de linha, das correntes, das potências ativa, reativa, e aparente, do fator de potência, e da frequência.

Indubitavelmente, a metodologia apresentada pode ser de grande utilidade para empresas e profissionais interessados na quantificação e na qualificação das grandezas relacionadas à qualidade da energia elétrica, possibilitando análises profundas e completas em curto espaço de tempo.

Adicionalmente, vale ressaltar que a aplicação da ferramenta computacional em dados das mais variadas regiões do país, torna possível o estabelecimento de diretrizes que além de nortear campanhas de medição, proporcionam meios para a geração de metodologias que correlacionam causa e efeito dos distúrbios vinculados à qualidade da energia elétrica.

A presente ferramenta computacional permite à Eletronorte analisar a qualidade da energia elétrica de sua região, realizando estudos e comparações com normas, visando identificar eventuais distúrbios de qualidade. De posse dessas informações, que incluem data e hora das ocorrências, pode-se promover a busca pela causa raiz, vindo então a melhorar a qualidade do produto oferecido às unidades consumidoras, o que conseqüentemente reduz transtornos para o usuário final e custos para a concessionária.

Por fim, a Eletronorte, de posse dos resultados das análises geradas pela ferramenta computacional, poderá identificar as medidas corretivas, e até preventivas, que resultarão em um sistema elétrico mais seguro para as unidades consumidoras.

IV. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de D. G. Caetano, M. G. Pinto, T. S. Rolin Jr., e M. V. Chaffim C., F. Soares, S. Salomoni, W. P. dos Santos, recebidas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica - Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 6 - Resultados das Medições e Tratamentos. Universidade Federal de Uberlândia.
- [2] Souto, O. C. N., (2001). "Modelagem e Análise do Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação." Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, pp. 399.
- [3] Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Beaty, H. W. "Electrical Power Systems - Power Quality", 1995, Editora McGraw-Hill, E.U.A.
- [4] Amboni, G. P. M.; Leles, A. F. F.; Oliveira, M. A. G.; Freitas, P. O.; Oliveira, S. C. (2004). "Uma ferramenta Computacional Para Quantificação e Qualificação das Distorções Harmônicas". In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), São Paulo, Brasil.
- [5] Leles, A. F. F.; Oliveira, M. A. G.; Pinto, M. G. S. (2005). "Ferramenta Computacional Para a Quantificação e Qualificação do Desequilíbrio de Tensão", In: VI Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE), Belém, Brasil.
- [6] Leles, A. F. F.; Oliveira, M. A. G.; Soares, S. S. T.; Assumpção, A.; Matos, C. A. F. (2007). "Ferramenta Computacional para Análise de Variações Momentâneas de Tensão", In: VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos/SP, Brasil.
- [7] Prado, T. F.; Monteiro, R. A.; Fernandes, O. A.; Leles, A. F. F. (2007). "Ferramenta Computacional para Análise, Quantificação e Qualificação da Cintilação Luminosa". In: VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE), Santos/SP, Brasil.
- [8] Romão, A. A.; Leles, A. F. F.; Oliveira, M. A. G. (2004). "Uma Metodologia Para a Quantificação e Qualificação dos Níveis de Tensão em uma Instalação Universitária". In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), São Paulo, Brasil.