



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Ferramenta Computacional de Análise e Gestão da Qualidade da Energia Elétrica

| | |
|--|--|
| Marco Aurélio G. de Oliveira Rafael Amaral Shayani Fernando Monteiro de Figueiredo | Carlos Eduardo M. Pires |
| UnB – Universidade de Brasília | CEB Distribuição S.A. |
| mago@ene.unb.br rafael@shayani.net ferfig@pobox.com | cpires@ceb.com.br |

Palavras-chave

Desequilíbrio de tensão
Distorção harmônica
Qualidade da energia
Tensão em regime permanente

Resumo

Este trabalho apresenta a descrição de uma ferramenta computacional desenvolvida para efetuar a análise da qualidade da energia elétrica. Particularmente voltada para os sistemas de distribuição, esta ferramenta foi desenvolvida no âmbito de um projeto financiado com recursos do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da CEB Distribuição.

Trata-se de uma ferramenta simples, de fácil aplicação, que tem como uma de suas principais características ser compatível com o maior número possível dos analisadores de qualidade existentes no mercado. Os métodos de apuração e os valores limite adotados podem ser ajustados pelo usuário. Todos se baseiam em legislação nacional: Resoluções e Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), complementados pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Considerando o requisito de que ela deve ser facilmente instalada e executada na maioria dos computadores do tipo PC, adotou-se plataforma Windows® e utilizou-se o ambiente MatLab® para o desenvolvimento da ferramenta. A geração de um programa executável permite a sua utilização em qualquer computador do tipo PC com Windows®, sem custos adicionais para a instalação de licenças de outros programas. Na sua versão definitiva a ferramenta analisará os seguintes fenômenos: tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica de tensão e de corrente, flutuação de tensão e afundamentos de tensão. Neste trabalho, apresentam-se os módulos já desenvolvidos, referentes à tensão em regime permanente, ao desequilíbrio de tensão e à distorção harmônica de tensão.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o interesse maior pela qualidade da energia elétrica e a elevação dos padrões de referência para o desempenho dos sistemas elétricos fizeram com que as empresas do setor invistam na aquisição de analisadores de qualidade para seu sistema elétrico. Ao mesmo tempo, cresceu significativamente a oferta de analisadores de qualidade, com grande opção de funcionalidades e de preço. Embora se possa identificar certa tendência em uniformizar os procedimentos para cálculo e apresentação de resultados, ainda não existe uma padronização única, adotada por todos os fabricantes. Desse modo, as empresas que vêm adquirindo e instalando esses analisadores em seu sistema elétrico se encontram diante de uma grande quantidade de dados gerados diariamente, requerendo um esforço correspondente para interpretá-los e tomar as providências necessárias para garantir os requisitos de qualidade impostos. Além disso, em função da especificidade dos equipamentos adquiridos, a equipe responsável pela análise dos dados pode confrontar-se com procedimentos diferentes, arquivos de vários formatos e até resultados discordantes ao usar analisadores de marca ou modelo diferentes.

Nesse cenário, a disponibilidade de um programa computacional, feito sob medida para a equipe técnica responsável pela análise da qualidade da energia elétrica, constituiria uma ferramenta única, com capacidade para eliminar os principais inconvenientes apontados anteriormente. De fato, a ferramenta constituiria um meio coerente para realizar todas as análises sobre a qualidade da energia. Além disso, os métodos de apuração seriam claramente identificados pelo usuário, que também teria controle sobre os valores limite adotados para cada grandeza. Por meio de um processo simples, o arquivo de saída de qualquer equipamento pode ser convertido no arquivo de entrada da ferramenta.

Este trabalho apresenta a ferramenta computacional para análise de fenômenos de qualidade da energia elétrica desenvolvida segundo esses critérios. Inicialmente são descritos os aspectos teóricos da qualidade, em seguida os algoritmos adotados e finalmente as telas de saída do programa. A principal utilização do aplicativo é na análise de medições de uma determinada unidade consumidora ou ponto de conexão sob os aspectos da qualidade.

Uma vez instalado um equipamento de medição, por exemplo, numa unidade consumidora, ele permanece registrando os dados geralmente por um intervalo mínimo de uma semana. Esses dados, uma vez coletados, precisam ser trabalhados de forma adequada nas análises quanto aos limites recomendados. Esse trabalho, na falta de uma ferramenta adequada, é feito em planilhas com o manuseio geralmente de um volume considerável de informações e sem uma padronização nas análises. Cada profissional faz à sua maneira. A ferramenta desenvolvida permite efetuar essas análises de forma padronizada sem grandes manipulações de volumes de dados e com os parâmetros de controle já embutidos no aplicativo. Destacam-se como vantagens da ferramenta desenvolvida: 1) Vários fenômenos analisados num único aplicativo; 2) Adequação ao PRODIST e aos Procedimentos de Rede; 3) Configurável para trabalhar com leituras de qualquer aparelho de medição; 4) Executável em qualquer computador do tipo PC com Windows®; e 5) Independente de licença e instalação de outros programas computacionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico descrevem-se as características principais dos três fenômenos abordados inicialmente na ferramenta: tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão e distorções harmônicas.

2.1 Tensão em regime permanente

De acordo com a Resolução Aneel nº 505/2001, a classificação das leituras associadas à tensão em regime permanente divide-se em três categorias: adequadas, precárias e críticas, baseando-se no afastamento do valor da tensão de leitura em relação à tensão de referência. A referência pode ser definida como o próprio valor nominal da tensão, ou valores contratados, os quais devem estar situados dentro de uma faixa em torno da tensão nominal, pactuados entre os agentes ou entre estes e os responsáveis por unidades consumidoras e constarem no respectivo Contrato de Conexão ao Sistema de Distribuição – CCD.

Intervalo de medição

O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos (período de integralização) de 10 minutos cada, salvo as que eventualmente sejam expurgadas, devido à interrupções de energia. No intuito de se obter 1008 leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente.

Forma de cálculo

Após a obtenção do conjunto de leituras válidas, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o de tensão crítica (DRC), de acordo com as seguintes expressões:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \times 100[\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \times 100[\%] \quad (2)$$

onde:

nlp = número de leituras situadas nas faixas precárias;

nlc = número de leituras situadas nas faixas críticas; e

1.008 = número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos no período de observação

Valor limite

O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Precária - DRPM fica estabelecido em 3% (três por cento). O valor da Duração Relativa da Transgressão Máxima de Tensão Crítica - DRCM fica estabelecido em 0,5% (cinco décimos por cento).

2.2 Desequilíbrio de tensão

A tabela a seguir apresenta a terminologia definida pelo PRODIST.

Tabela 1 – Terminologia definida para desequilíbrio de tensão definida pelo PRODIST.

| Identificação da Grandeza | Símbolo |
|--|---|
| Fator de desequilíbrio | FD |
| Magnitude da tensão de seqüência negativa (RMS) | V- |
| Magnitude da tensão de seqüência positiva (RMS) | V+ |
| Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS) | V _{ab} , V _{bc} e V _{ca} |

Intervalo de medição

O PRODIST não define o intervalo de coleta de dados, porém orienta que os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes. Os Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2, recomenda que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos. Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos. O valor do indicador a ser comparado com o valor limite será o maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Forma de cálculo

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (3)$$

Alternativamente, pode-se utilizar a expressão a seguir, que conduz a resultados em consonância com a formulação anterior:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4) \quad \text{onde} \quad \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (5)$$

Valor limite

O valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%.

2.3 Distorção harmônica

A seguinte terminologia é definida pelo PRODIST:

Tabela 2 - Terminologia para harmônicos definida pelo PRODIST

| Identificação da Grandeza | Símbolo |
|---|---------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | DITh% |
| Distorção harmônica total de tensão | DTT % |
| Tensão harmônica de ordem h | Vh |
| Ordem harmônica | H |
| Ordem harmônica máxima | Hmáx |
| Ordem harmônica mínima | Hmin |
| Tensão fundamental medida | V1 |

Intervalo de medição

O PRODIST não define o intervalo de coleta de dados, porém orienta que os instrumentos de medição devem observar o atendimento aos protocolos de medição e às normas técnicas vigentes. Os Procedimentos de Rede, Submódulo 2.2, recomendam que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos. Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos. O valor do indicador a ser comparado com o valor-limite será o maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

A norma IEC 555-2 recomenda que a frequência de aquisição do medidor seja de 10 minutos e que o tempo total de observação seja de uma semana. O maior dentre os 1008 valores medidos no decurso do intervalo semanal será o valor de referência a ser comparado com os limites. A norma IEEE Std.

519 – 1992 não traz, em seu conteúdo, qualquer abordagem quanto à metodologia para obtenção de um valor de referência. A Norma Européia EN 50160 informa que os trabalhos de medição deverão compreender um período total de observação de uma semana. Durante este tempo de registro, deverão ser observadas as amostragens e os tratamentos estatísticos para os intervalos de 10 minutos, conforme prevê parte das diretrizes estabelecidas pela IEC. Os níveis encontrados serão considerados aceitáveis desde que os mesmos não ultrapassem os valores-limite por um tempo maior que 5% do total de medição.

Forma de cálculo

As expressões para o cálculo das grandezas DIT_h% e DTT% são:

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

Valor limite

Os valores-limite são apresentados tanto para a distorção harmônica total quanto para cada uma das componentes individuais.

Tabela 3 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em % da fundamental)

| Tensão nominal do Barramento | Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%] |
|------------------------------|---|
| VN ≤ 1kV | 10 |
| 1kV < VN ≤ 13,8kV | 8 |
| 13,8kV < VN ≤ 69kV | 6 |
| 69kV < VN ≤ 138kV | 3 |

Tabela 4 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em % da fundamental)

| Ordem Harmônica | | Distorção Harmônica Individual de Tensão [%] | | | |
|----------------------------|------|--|-------------------|--------------------|-------------------|
| | | VN ≤ 1kV | 1kV < VN ≤ 13,8kV | 13,8kV < VN ≤ 69kV | 69kV < VN ≤ 230kV |
| Ímpares não múltiplas de 3 | 5 | 7,5 | 6 | 4,5 | 2,5 |
| | 7 | 6,5 | 5 | 4 | 2 |
| | 11 | 4,5 | 3,5 | 3 | 1,5 |
| | 13 | 4 | 2 | 2,5 | 1,5 |
| | 17 | 2,5 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| | 19 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| | 23 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| | 25 | 2 | 1 | 1,5 | 1 |
| > 25 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | |
| Ímpares múltiplas de 3 | 3 | 6,5 | 5 | 4 | 2 |
| | 9 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1 |
| | 15 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 21 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | >21 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Pares | 2 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 |
| | 4 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 |
| | 6 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 8 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 10 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 12 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | > 12 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

3 TELAS DA FERRAMENTA

Este capítulo contém as principais telas da ferramenta, que ilustram a maneira simples com que o usuário pode navegar entre as diferentes funções de análise e saída de dados.

3.1 Principais telas do módulo tensão em regime permanente

A figura 1 apresenta a tela de entrada, após a seleção do arquivo que contém os dados, possibilitando selecionar a data da análise e o módulo a ser visualizado. A figura 2 mostra o menu de opções para tensão em regime permanente. A marcação em verde na figura 1 será explicada mais a diante.



Figura 1 – Tela de entrada onde seleciona-se a data da análise e o módulo desejado.



Figura 2 – Menu de opções do módulo de tensão em regime permanente.

O gráfico de comparação das 3 fases, ilustrado na figura 3, permite verificar se alguma das fases encontra-se discrepante das demais. Os limites precários e críticos, que permitem visualizar a tensão que adentra nestas faixas, é automaticamente ajustado para a tensão de fase ou de linha, conforme seleção do usuário. A figura 4 apresenta a comparação entre vários dias

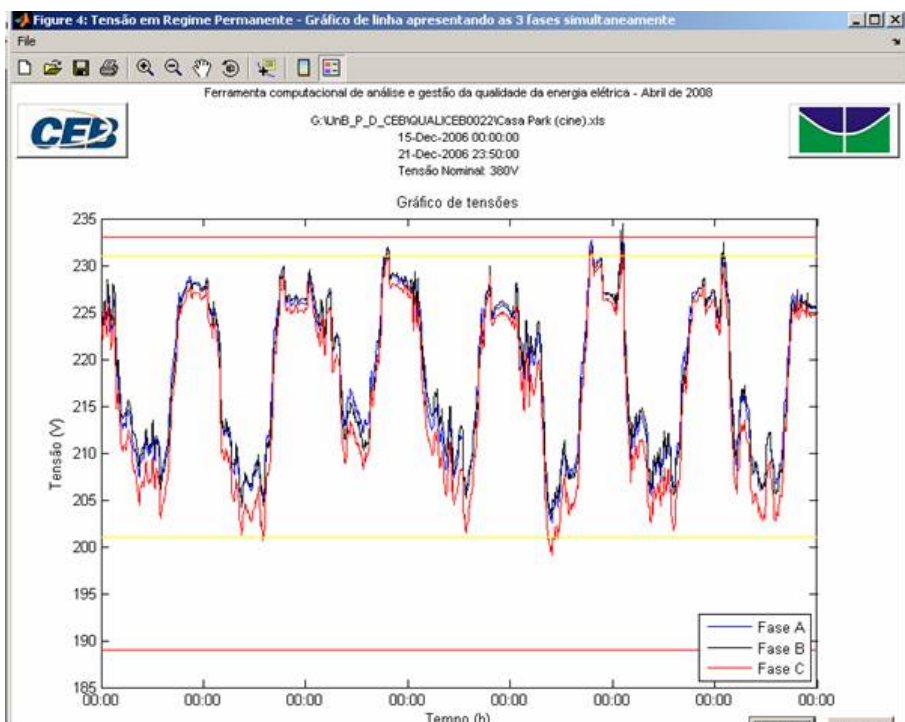


Figura 3 - Gráfico de tensão em regime permanente apresentando as 3 fases simultaneamente.

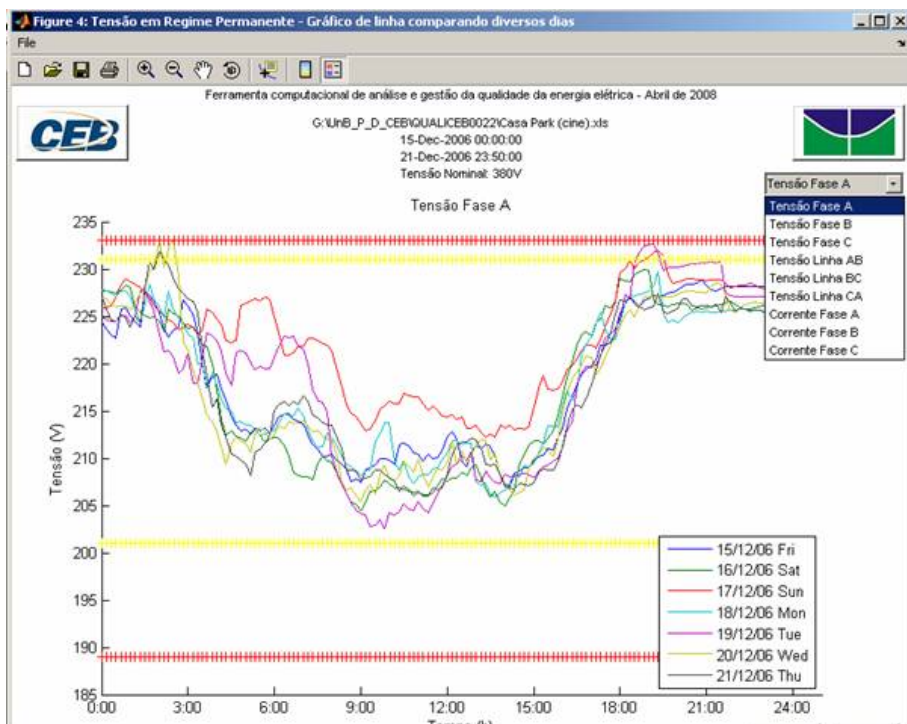





Figura 4 – Gráfico de tensão em regime permanente apresentando comparação entre diversos dias.

Destacam-se algumas funcionalidades na tela da figura 4:

- a possibilidade de selecionar a grandeza a ser plotada, entre tensões de fase, de linha ou correntes;
- a alteração automática dos limites de tensão precária e crítica, vinculada à seleção de tensão de fase ou de linha;
- botão grid, que permite traçar linhas pontilhadas de apoio nos eixos X e Y; e
- barra de ferramentas, que permite acionar o zoom, ler determinado valor através do cursor e salvar o gráfico, em formato de figura ou de relatório PDF.

Visando permitir um rápido diagnóstico das tensões em regime permanente, os índices DRP e DRC previstos pela Resolução ANEEL 505/2001 são calculados e comparados com o limite, utilizando recurso visual de cores para alertar o usuário.

O seguinte conjunto de cores foi utilizado, visando identificar o quão próximo do limite encontra-se o valor calculado:

-  Verde → indicador <90% do limite;
-  Amarelo → indicador entre 90% e 100% do limite; e
-  Vermelho → indicador acima de 100% do limite.

A figuras 5 ilustra esta situação. Essa informação contida já na primeira tela permite que o usuário identifique se a situação está adequada ou se requer providências de melhorias. Ao identificar que ocorreram situações em que as tensões apresentaram valores precários ou críticos, é possível exportar uma tabela com a data, hora e valor da tensão inadequada, visando uma análise pormenorizada.

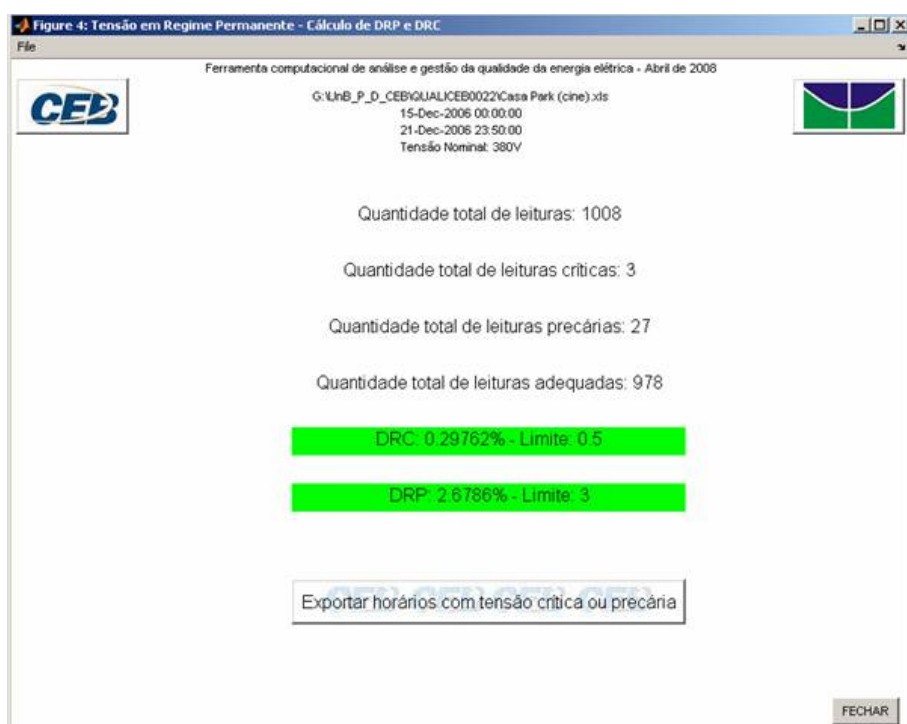


Figura 5 - Indicação visual de que o DRP extrapolou o limite mas o DRC encontra-se adequado.

As figura 6 e 7 apresentam, respectivamente, as telas com o histograma de ocorrências e a função de probabilidade acumulada. As ocorrências podem ser verificadas em pu ou em volts. Além disso, os resultados são apresentados considerando as tensões de fase e de linha.

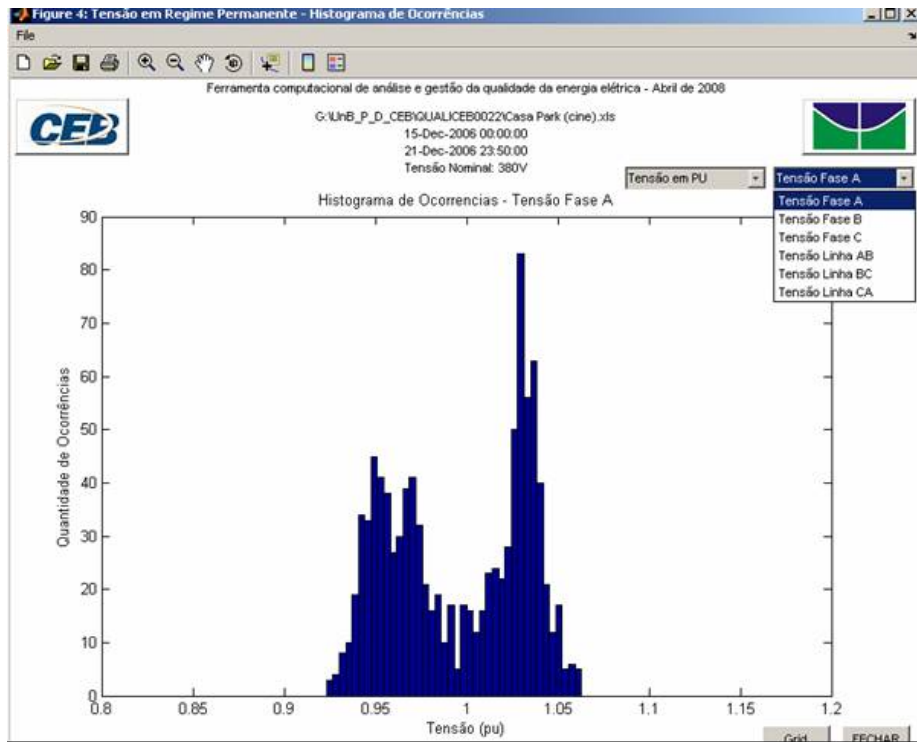


Figura 6 – Histograma de ocorrências.

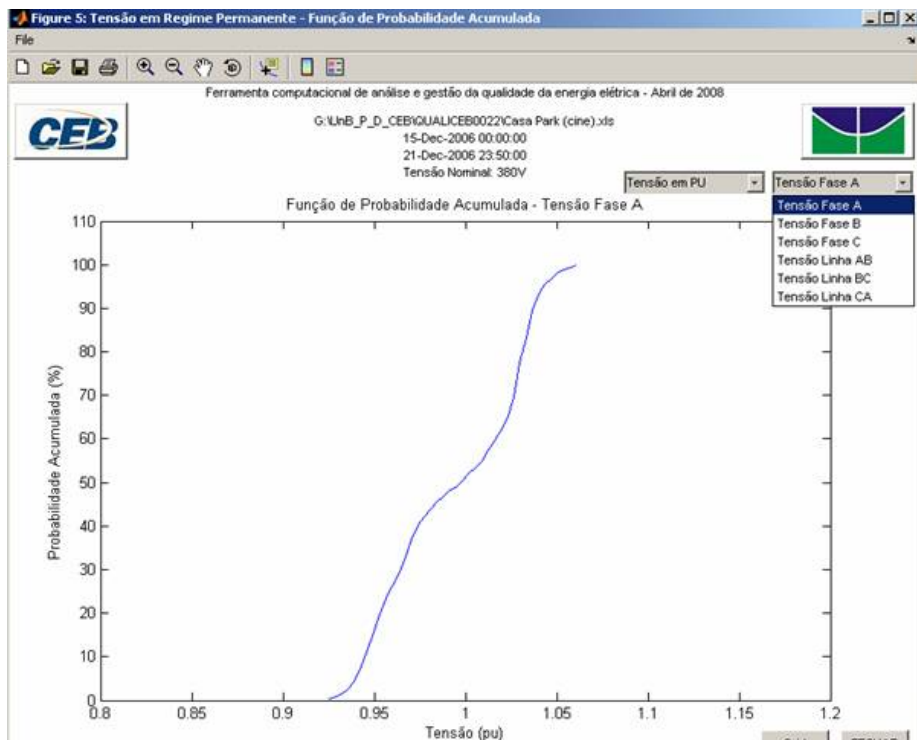


Figura 7 – Função de probabilidade acumulada.

3.2 Principais telas do módulo desequilíbrio de tensão

Quanto ao desequilíbrio de tensão o aplicativo apresenta as opções: Gráfico no tempo, Gráfico comparando diversos dias, Histograma de ocorrências e Função de probabilidade acumulada. A figura 8 mostra a tela inicial desse módulo.



Figura 8 - Tela inicial do módulo desequilíbrio de tensão.

Estão previstos no PRODIST dois métodos de cálculo de desequilíbrio: Componentes Simétricas e CRIGRÉ. As figuras 9 e 10 apresentam os gráficos, com a identificação do método de cálculo utilizado.

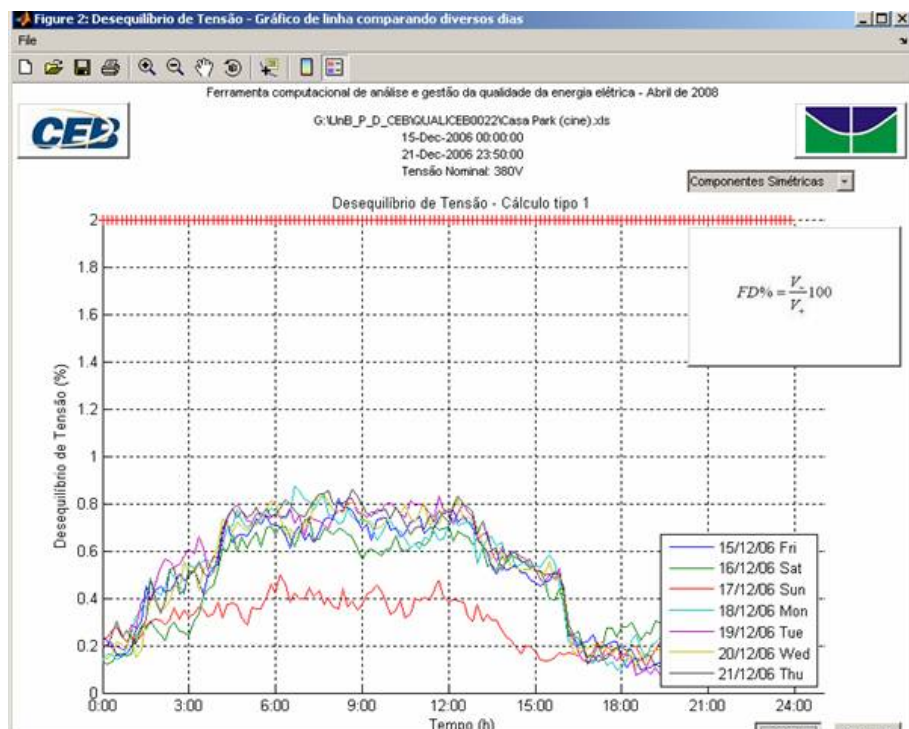


Figura 9 - Gráfico de desequilíbrio de tensão, comparando diversos dias, utilizando o método de cálculo de Componentes Simétricas.

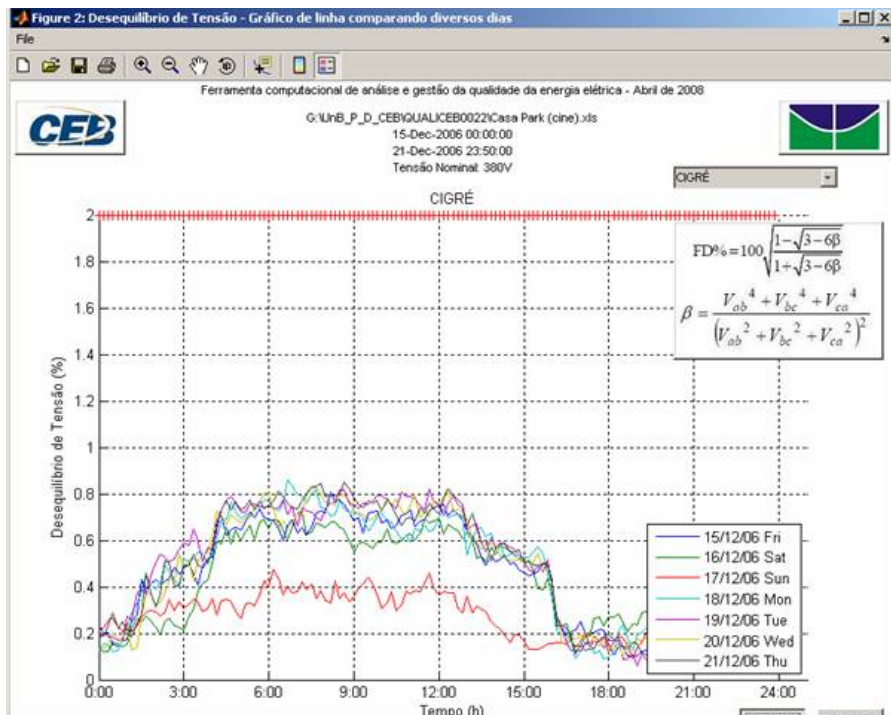


Figura 10 - Gráfico de desequilíbrio de tensão, comparando diversos dias, utilizando o método de cálculo CIGRÉ.

As demais telas contêm funções semelhantes às do módulo anterior (histograma de ocorrências e função de probabilidade acumulada).

3.3 Principais telas do módulo distorção harmônica

A figura 11 apresenta a tela inicial desse módulo. Existem funções similares aos dos outros módulos.

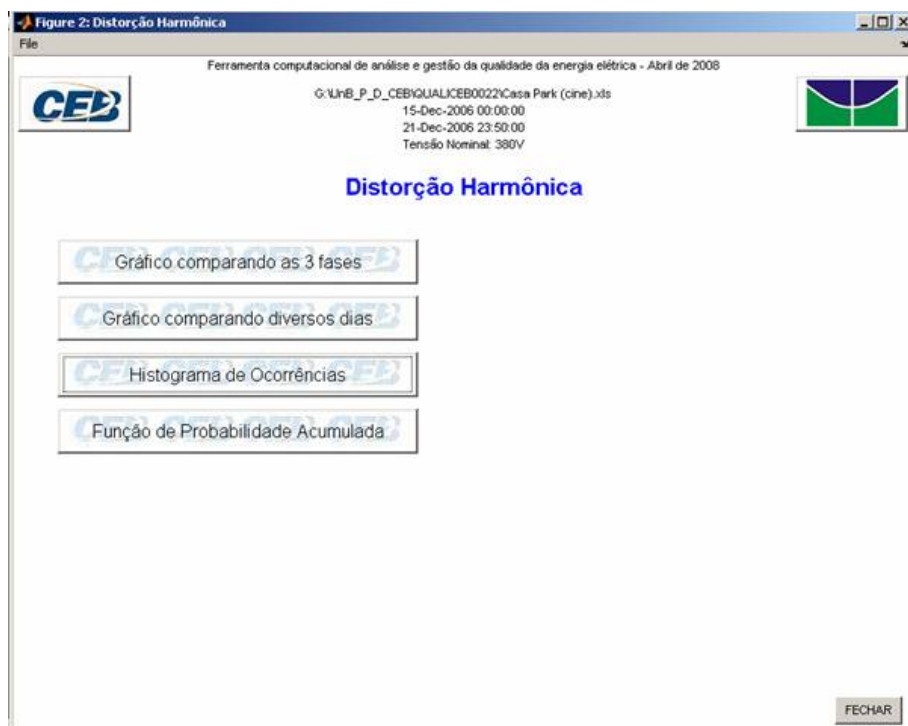


Figura 11 – Tela inicial do módulo de distorção harmônica.

A figura 12 mostra a tela com o histograma de ocorrências para este módulo. O usuário tem as opções de verificar, por fase, o total ou cada uma das harmônicas (da 1ª à 15ª).

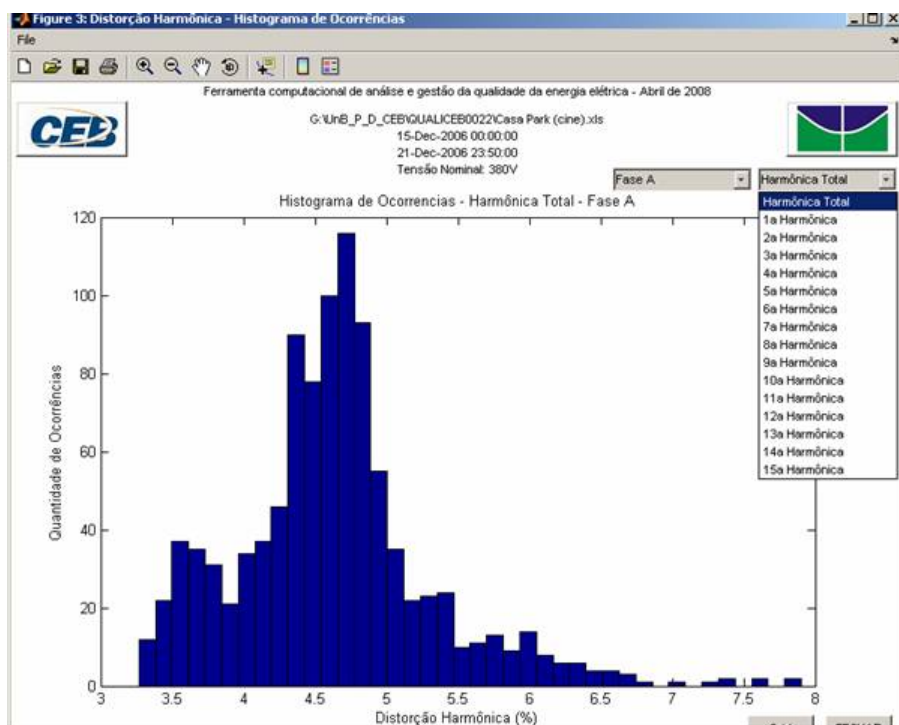


Figura 12 – Histograma de ocorrências – distorção harmônica.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a descrição de uma ferramenta computacional desenvolvida para efetuar a análise da qualidade da energia elétrica, voltada para sistemas de distribuição. Destacam-se como características principais ser uma ferramenta simples, de fácil aplicação, compatível com o maior número possível dos analisadores de qualidade existentes no mercado, facilmente instalada e executada na maioria dos computadores do tipo PC, por meio de um programa executável, e configurável pelo usuário quanto aos métodos de apuração e os valores limites adotados.

Na sua versão definitiva a ferramenta analisará os seguintes fenômenos: tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica de tensão e de corrente, flutuação de tensão e afundamentos de tensão. Neste trabalho, apresentam-se os módulos já desenvolvidos, referentes à tensão em regime permanente, ao desequilíbrio de tensão e à distorção harmônica de tensão. A fundamentação teórica dos fenômenos abordados estão baseados em Resoluções e no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), complementados pelos Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema (ONS).

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL, PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Versão submetida à Audiência Pública nº 014/2008 da Aneel, 23008.

ONS, Submódulo 2.2 - Padrões de Desempenho da Rede Básica, dos Procedimentos de Rede, 2002.

ANEEL, Resolução ANEEL nº 505, de 26 de novembro de 2001, Estabelece de forma atualizada e consolidada, as disposições relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente.