



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 01 7720
Tópico: Análise, Diagnóstico e Soluções

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

ANÉSIO DE LELES F. FILHO

MARCO A. DE OLIVEIRA

MARCOS G. DA S. PINTO

UNB

UNB

UNB

RESUMO

Este trabalho visa apresentar uma ferramenta computacional criada a partir da linguagem de programação do MatLab, para a análise do desequilíbrio de tensão. A partir de medições utilizando-se os mais variados tipos de instrumentos, são formados bancos de dados que poderão ser caracterizados, analisados e interpretados 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 desequilíbrios de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia Elétrica, Desequilíbrio de Tensão, Fator K, Quantificação, Qualificação.

1.0 INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento de lâmpadas fluorescentes e outros utensílios altamente recomendados durante o racionamento de energia elétrica realizado no Brasil no ano de 2001, têm gerado uma preocupação cada vez maior com os problemas associados ao seu suprimento, dentre os quais enquadra-se a questão do desequilíbrio de tensão.

As normas internacionais do IEEE, do IEC e a Européia, bem como a Recomendação Brasileira, estabelecem limites para diversos parâmetros que caracterizam a qualidade da energia elétrica.

Em outra frente, inúmeros instrumentos de medição capazes de armazenar os dados segundo as exigências das normas, estão à disposição no mercado. Contudo, no que diz respeito ao tratamento e análise das amostras, segue incipiente o número de ferramentas voltadas a este fim.

Neste ínterim, ergue-se a idéia do desenvolvimento deste estudo, que em linhas gerais visa apresentar uma ferramenta computacional criada a partir da linguagem de programação do MatLab, para a análise do desequilíbrio de tensão. A partir de medições utilizando-se os mais variados tipos de instrumentos, são formados bancos de dados que poderão ser caracterizados, analisados e interpretados segundo diversas normas e recomendações.

A partir do programa computacional é possível calcular o fator K pelo método das componentes simétricas, do IEEE, do Cigré e do Nema. Diversos gráficos estão disponíveis para se efetuar comparações entre os resultados obtidos oriundos dos supracitados processos.

Há possibilidade de visualização dos dados referentes aos desequilíbrios de tensão por meio de gráficos do fator K versus tempo, e de distribuição de probabilidade e de probabilidade cumulativa de ocorrências de desequilíbrios de tensão versus as suas amplitudes. Estes resultados se prestarão para a avaliação dos locais em estudo, quando da comparação com patamares estabelecidos pelas normas internacionais.

A partir da utilização de um ferramental estatístico, a saber: valores máximos, mínimos, médias aritméticas e quadráticas, desvio padrão,

valores com probabilidades de 95% e 99% de não serem excedidos (P95% e P99%), dentre outros, o programa permitirá a avaliação de questões como a similaridade do perfil do comportamento do K entre os diversos dias de medição, e a determinação do período mínimo necessário para medição.

Tem-se a disposição todos os gráficos voltados à verificação da existência ou não de estacionalidade do fenômeno (média temporal e de probabilidade).

É ilustrada uma metodologia auxiliar de análise que possibilita, inclusive aos fabricantes, entender se o seu equipamento suporta ou não os níveis de desequilíbrios apresentados, em função do tempo de exposição. Será possível, a partir dos resultados gerados, concluir quanto à distribuição dos valores de fator K durante todo o período de medição.

2.0 FATOR K DE DESEQUILÍBRIO: CONCEITUAÇÃO E MÉTODOS PARA O CÁLCULO

2.1 Conceituação

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

Sabe-se que a presença de cargas trifásicas desequilibradas conectadas a um sistema trifásico causa um desequilíbrio de tensão, uma vez que as correntes absorvidas nas três fases não são simétricas, isto é, não são iguais em módulo nem tão pouco defasadas de 120°.

Normalmente, em sistemas de alta tensão não existem grandes desequilíbrios, exceto quando alimentam instalações com cargas monofásicas de grande porte, tais como trens com tração elétrica ou fornos elétricos monofásicos.

Outro fator que causa o aparecimento do desequilíbrio de tensão é a existência de linhas de transmissão mal transpostas, pois as características elétricas destas linhas não serão uniformes no seu percurso.

Os efeitos provocados por um sistema elétrico com a presença de desequilíbrios de tensão estão associados a sobreaquecimentos, mau funcionamento e/ou falhas dos dispositivos de proteção, solicitação do isolamento e redução da vida útil.

O cálculo do nível do desequilíbrio de tensão - fator K - pode ser feito através de quatro diferentes métodos que serão apresentados neste trabalho. O primeiro método utiliza os módulos e os ângulos das tensões trifásicas para a obtenção do fator K. Os demais utilizam somente os módulos.

Método 1: Componentes Simétricas: Para este método, o desequilíbrio de tensão é definido pela relação entre os módulos da tensão de seqüência negativa e da tensão de seqüência positiva, conforme (2.1).

Onde:

V_- → Módulo da tensão de seqüência negativa;

V_+ → Módulo da tensão de seqüência positiva;

$$K\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (2.1)$$

Método 2: NEMA: A norma NEMA-MG-14.34, a fim de se quantificar o desequilíbrio, define o fator K como a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão média, tendo como referência às tensões de linha.

$$K\% = \frac{\Delta V}{V_m} \times 100 \quad (2.2)$$

Onde:

ΔV → Máximo desvio das tensões de linha em relação ao valor médio;

V_m → Média aritmética dos módulos das tensões trifásicas;

Método 3: CIGRÉ: Um outro procedimento recomendado para a definição do desequilíbrio de tensão pode ser extraído do CIGRÉ, (Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension), que emprega uma expressão para o fator de desequilíbrio a partir de uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha.

$$K\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (2.4)$$

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} \rightarrow$ Módulo das tensões trifásicas;

Método 4: IEEE: Por fim, o IEEE recomenda que o desequilíbrio de tensão pode ser obtido por uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões de linhas medidas e o somatório das mesmas.

$$K\% = \frac{3(V_{\max} - V_{\min})}{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

$V_{\max} \rightarrow$ Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

$V_{\min} \rightarrow$ Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} \rightarrow$ Módulo das tensões trifásicas;

Apresentam-se, na Tabela (2.1), os índices de conformidade retirados das normas e recomendações utilizadas ao redor do mundo para o controle da Qualidade da Energia Elétrica com relação aos desequilíbrios de tensão (fator K).

Tabela 2.1 – Índices de conformidade

Recomendação / Norma	Limite
IEC	2%
GCOI/GCPS	2%
CENELEC	2%
NRS-048	2%
NTSCE	---
ANSI	3%

A CENELEC e a NRS-048 permitem, em algumas áreas, onde partes dos consumidores são monofásicos ou bifásicos, que o índice de conformidade seja de 3%.

Verifica-se que a maioria das normas limita em 2% o desequilíbrio de tensão. Isto mostra que os índices de conformidade convergem para este valor.

3.0 PROGRAMA COMPUTACIONAL

Trata-se de uma nova ferramenta auxiliar, desenvolvido em linguagem "MATLAB 6.5", e dotado de vários recursos no sentido de fornecer opções simples e objetivas na análise do

desequilíbrio de tensões. A sua aplicação se justifica sobretudo por se tratar de um programa bastante útil aos consumidores, à concessionária e aos fabricantes de equipamentos, quando da avaliação do fator K em qualquer ambiente do sistema elétrico de potência.

O aplicativo foi dividido em um módulo de entrada e ainda 6 módulos independentes e ao mesmo tempo complementares. Em quase todos, as ferramentas estatísticas de análise disponíveis ao usuário são: valores máximos e mínimos, média quadrática e aritmética, desvio padrão, P95% e P99%.

A seguir, são caracterizados de forma sucinta, cada um dos módulos que compõem a estrutura geral da ferramenta:

Módulo de entrada: Corresponde ao módulo de inicialização do aplicativo, responsável pela leitura do banco de dados e apresentação de suas principais características. A figura 1 apresenta os tópicos contidos neste item.

FIGURA 1 - Módulo de Entrada

Da figura 1 observa-se que após a abertura do banco de dados, o programa disponibiliza diversas informações vinculadas à sua estrutura.

Módulo I - Quantificação do desequilíbrio: Neste módulo é realizado o cálculo do fator K. Inicialmente, o usuário opta por um dos 4 métodos de cálculo. As estatísticas são então calculadas. Em seguida, os gráficos K% versus tempo e das estatísticas são disponibilizados. As figuras 2 e 3 mostram a tela inicial do módulo I e o gráfico de K% versus tempo, respectivamente.

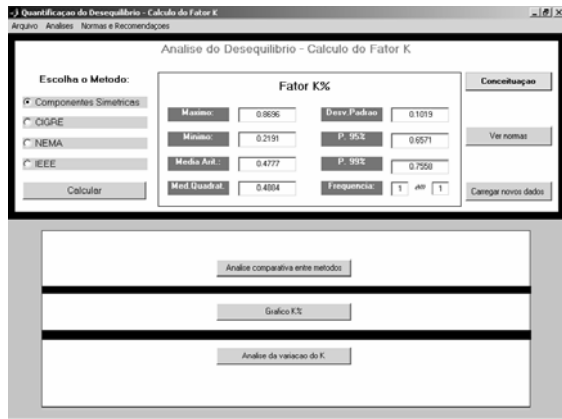


FIGURA 2 - Quantificação do desequilíbrio

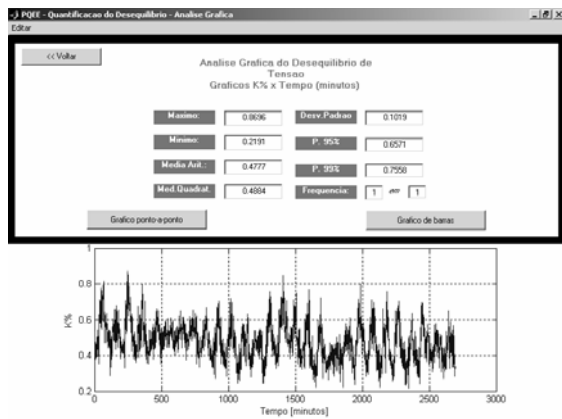


FIGURA 3 - Gráfico K% x Tempo

Módulo II - Frequência de aquisição dos dados: Permite a apreciação, com vistas a análises da frequência de aquisição, dos valores médios aritméticos, da média quadrática, do desvio padrão, do P95%, e do P99%, todos calculados quando da execução de medições intercaladas de 1, 5, 10, 15, 30, e 60 minutos, bem como o erro cometido nestas operações, determinados a partir dos dados de um espaçamento preestabelecido. De fato, para o propósito desta etapa do trabalho, faz-se uso de ferramentas gráficas e oriundas de cálculos estatísticos, conforme evidencia a figura 5. Esta estrutura é padronizada para as análises de similaridade entre dias e entre períodos.

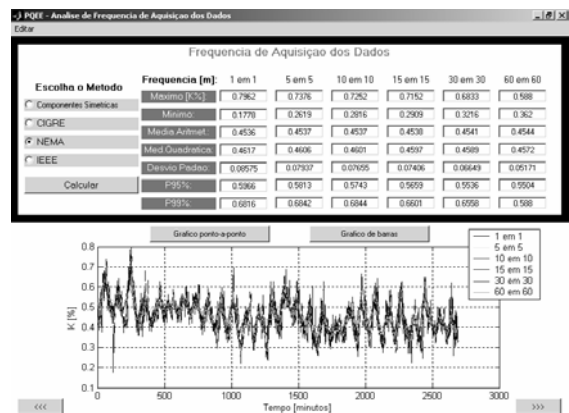


FIGURA 5 - Análise da frequência de aquisição dos dados

Como mencionado anteriormente, o cálculo do K pode ser executado a partir da utilização de 4 métodos distintos. Um deles considera os fasores de tensão e os demais apenas os módulos. Sendo assim, no módulo I é disponibilizada ferramenta para a comparação entre os métodos. Pode-se verificar a discrepância entre os valores do K calculados por todos os métodos simultaneamente ou ainda escolher um método como referência e calcular o erro absoluto do K frente aos demais métodos. Esta última opção está ilustrada na figura 4 abaixo.

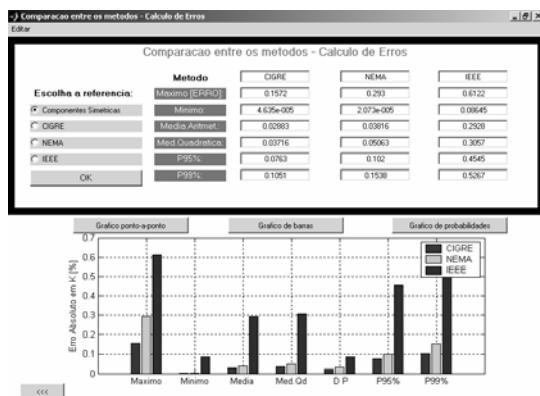


FIGURA 4 - Comparação entre os métodos – Cálculo de erros

Da figura 6 pode-se observar que o programa disponibiliza os valores de médias, desvios padrão, valores máximos e mínimos, P95%, P99%, todos calculados a partir de bancos de dados que consideram dados colhidos de 1em 1 minuto, de 5 em 5, de 10 em 10, de 15 em 15, de 30 em 30 e de 1 em 1 hora. Estão ainda aptas à utilização, as janelas de plotagem do gráfico de barras contendo os resultados supracitados.

Módulo III - Similaridade entre dias: A partir da aplicação dos métodos de análise, busca-se comprovar a existência ou não de similaridade entre dias, com o intuito de reduzir o volume de dados a serem processados. A figura 6 ilustra os tópicos contidos neste módulo.

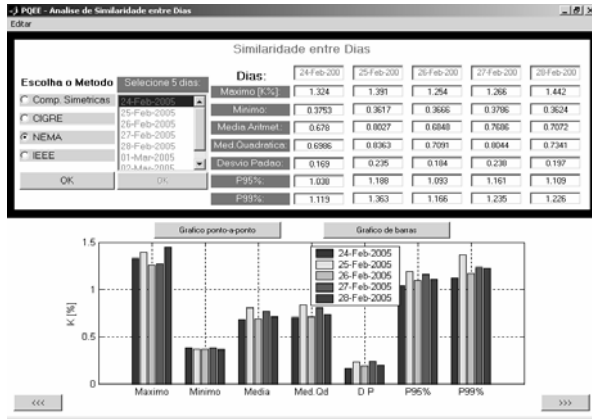


FIGURA 6 - Módulo da similaridade entre dias

Há de se considerar que, comprovando-se a similaridade, pode-se utilizar um dia como representativo aos demais.

Módulo IV - Similaridade entre períodos: A partir da aplicação dos métodos de análise, gera-se a possibilidade de execução de uma comparação entre diferentes períodos dentro de um mesmo dia. Busca-se um intervalo de medição no qual se possa obter períodos com valores representativos aos mais elevados patamares de desequilíbrio de um dia. O programa está configurado para o cálculo do desequilíbrio nos períodos de 0 às 8h, 8 às 16h, 16 às 24h, e ainda permite que o usuário escolha um período contínuo qualquer de 8 horas. A figura 7 ilustra os tópicos contidos neste módulo.

A partir deste módulo pode-se comparar estatísticas obtidas dos mais variados períodos de análise. Com isto, chega-se ao período de maior representatividade aos mais elevados valores de desequilíbrios.

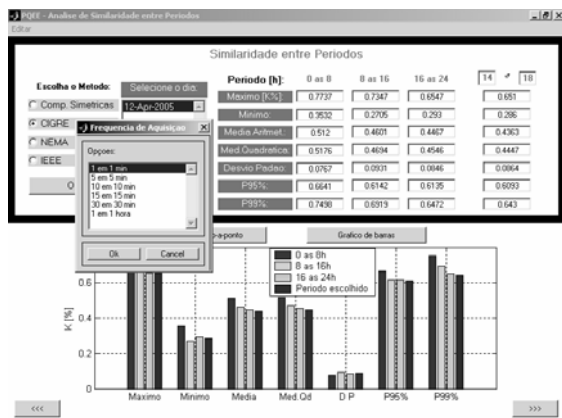


FIGURA 7 - Módulo da similaridade entre períodos

Módulo V - Qualificação do desequilíbrio: Possibilita a apreciação dos dados com respeito aos limites impostos pelas principais normas e recomendações, bem como permite aos usuários

entender se os seus equipamentos suportam ou não os níveis de desequilíbrios em função do seu tempo de exposição.

Aqui são disponibilizados gráficos de probabilidade de ocorrência de valores do fator K, média de probabilidade, média temporal, o número total de minutos que o sistema permaneceu com um valor de desequilíbrio acima da uma referência preestabelecida, o máximo tempo que o sistema permaneceu com um valor de desequilíbrio acima e abaixo do da referência ininterruptamente. É esperado que o resultado das análises possa auxiliar na conclusão a respeito da estacionalidade do processo.

Módulo VI - Tensão, corrente e potência trifásicas: Esta etapa presta-se, principalmente, quando da busca das causas dos desequilíbrios apresentados nas análises anteriores. São disponibilizados os gráficos de tensão de linha e de fase, corrente de linha e de fase, potência ativa, reativa e aparente. É possível observar, por exemplo, o comportamento das correntes e concluir a respeito da uniformidade ou não na distribuição da carga. A figura 8 ilustra uma tela deste módulo.

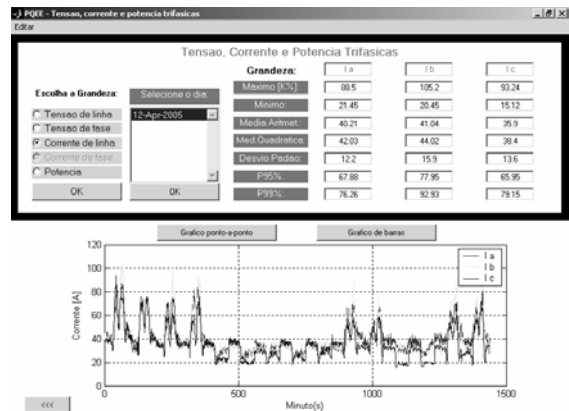


FIGURA 8 - Módulo da tensão, corrente e potência trifásicas

Da figura 8 observa-se que com a utilização do supracitado módulo, pode-se visualizar os perfis das tensões, correntes e potência, bem como as estatísticas calculadas a partir dos dados medidos.

4.0 CONCLUSÃO

A síntese das principais normas pertinentes indicou que, nada se tem registrado quanto aos fundamentos e definições estatísticas relacionadas aos métodos utilizados para o estabelecimento dos limites. As informações são vagas, porém apontam a importância de tratamentos baseados em conceitos estatísticos.

Estes fatos nortearam e justificaram o desenvolvimento do programa computacional apresentado neste trabalho.

O aplicativo foi dividido em um módulo de entrada e outros 6 independentes e ao mesmo tempo complementares. Na maioria das vezes, estes módulos foram sustentados por ferramentas estatísticas como os valores máximos e mínimos, média quadrática e aritmética, desvio padrão, P95% e P99%.

O programa, quando da sua aplicação à uma situação real, mostrou-se simples, e sobretudo capaz de propiciar análises baseadas em conceitos estatísticos. Destaca-se que os índices e resultados gerados pela ferramenta conduzem a um retrato fiel dos níveis de desequilíbrios presentes em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais.

O tratamento estatístico dos dados, efetuado a partir da utilização dos módulos de análise, permite estabelecer um período típico que melhor caracteriza os níveis de desequilíbrio de uma dada instalação, e ainda avalia questões como a escolha de um dia como representativo aos demais.

Com vistas a apreciação da frequência de aquisição, são calculados os valores médios e várias outras estatísticas, determinadas a partir das simulações de medições intercaladas de 1, 5, 10, 15, 30, e 60 minutos, bem como o erro cometido nestas operações, determinados a partir dos dados de um espaçamento preestabelecido.

A metodologia utilizada na análise de "Qualificação do desequilíbrio", permite ao fabricante, de posse dos níveis máximos de suportabilidade ao fator K, em função do tempo de exposição às mesmas, atestar se o seu produto pode ou não ser utilizado, sem riscos de

danos, causados por um sistema como o em estudo. Pode-se ainda atestar se o local em estudo atende aos limites impostos pela Norma IEEE, Norma Européia e a Recomendação Brasileira.

Da utilização dos módulos que constituem a ferramenta computacional, é possível contribuir para o estabelecimento de diretrizes para nortear as campanhas de medição de desequilíbrios de tensão.

Embora os resultados obtidos não possam ser imediatamente generalizados para outras cargas, a metodologia apresentada pode ser de grande utilidade para empresas e profissionais interessados na quantificação e na qualificação dos desequilíbrios de tensão.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Bronzeado, H. S.; Ramos, A. J. P.; Lira, D. P. C. P. de; *Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Práticos, Curso Especial - Qualidade da Energia Elétrica - Conceitos Problemas e Soluções*, Recife, 2000.
- [2] Dugan, R. C.; Mcgranaghan, M. F.; Beauty, H. W.; *Electrical Power System Quality*, Editora McGraw-Hill, EUA, 1996.
- [3] Oliveira, David; *Análise, Quantificação e Qualificação do Desequilíbrio de Tensão*, UnB, 2001.
- [4] Ferreira Filho, Anésio de Leles; OLiveira, de Hwang, Gisele. Voltage Unbalance Monitoring in CEB Systems. In: 10 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS, 2002 Rio de Janeiro. 10 th International Conference on Harmonics em CD. EFEI, 2002.
- [5] Almeida, W.G.; Freitas, F.D. *Circuitos Polifásicos*. Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos. Brasília, 1995.