



**GRUPO X
ESTUDO DE SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**MODELAGEM DE FORNOS A ARCO PARA ESTIMATIVA DE
FLUTUAÇÃO DE TENSÃO**

Raul Balbi Sollero*
Antônio G. Garcia Lima

Ricardo Penido D. Ross
Eliane Valvano

Sergio Luiz Varricchio
Tatiana Mariano Lessa de Assis

CEPEL

RESUMO

O artigo apresenta um modelo probabilístico adequado para simulação de fornos a arco CA que permite a estimativa da flutuação de tensão ("flicker") causada. A estrutura computacional montada é igualmente aplicável à determinação, neste caso bastante precisa, da cintilação induzida por uma, ou mais, fontes de emissão, no caso de se dispor das formas de onda das correntes do forno. Ao final, é feita uma revisão das iniciativas nacionais e internacionais (IEC) para o estabelecimento de limites de emissão de flutuação de tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia, Flutuação de Tensão, Cintilação, Flicker, Harmônicas, Fornos Elétricos a Arco.

1.- INTRODUÇÃO

Fornos elétricos a arco voltaico têm sido utilizados em escala crescente pela indústria siderúrgica, em função de suas aplicações específicas e de progressos importantes em sua tecnologia. Unidades deste tipo podem ter grande importância social e econômica, principalmente para regiões com menor grau de desenvolvimento industrial. Entretanto, do ponto de vista elétrico, estes fornos correspondem a cargas problemáticas, pelo seu potencial de interferência na Qualidade da Energia suprida em suas imediações, notadamente, flutuação de tensão ("flicker"), que causa o fenômeno da cintilação luminosa, e geração de correntes harmônicas. Um agravante a esta situação é que estes problemas tendem a ser maiores em

sistemas elétricos com baixos níveis de curto-circuito que, geralmente, estão associados às regiões mais carentes de investimentos.

A cintilação luminosa em lâmpadas incandescentes, causada pela flutuação de tensão, não é um problema sério do ponto de vista do desempenho ou segurança dos equipamentos elétricos. Entretanto, em situações extremas, a mitigação do desconforto visual imposto aos moradores afetados pode ser complexa e dispendiosa.

Existem vários meios eficazes de se mitigar os problemas apontados acima (compensadores estáticos, compensadores síncronos, reatores série, etc.). Entretanto, a quantificação, a priori, do grau de interferência é essencial para que a indústria possa avaliar as melhores alternativas e os custos associados a esta mitigação e o Poder Concedente possa avaliar sua adequação. Esta tarefa tem sido dificultada pela natureza complexa do comportamento dos arcos voltaicos e da carga metálica durante o processo de fundição.

Este artigo apresenta uma alternativa de simulação digital de uma usina siderúrgica baseada em fornos a arco CA e do sistema elétrico da concessionária supridora, utilizando programa para cálculos de transitórios eletromagnéticos (EMTP/ATP). A título de validação, o método foi aplicado a um sistema existente do qual se conheciam medições de flutuação de tensão. Os resultados obtidos das simulações foram confrontados, com sucesso, com estas medições.

Os resultados favoráveis obtidos são um incentivo para que o método descrito possa ser proposto como uma alternativa para a estimativa dos níveis de flutuação de tensão induzidas por fornos elétricos a arco e para embasar estudos econômicos de mitigação destes problemas.

2.- A CORRENTE EM FORNOS A ARCO CA

Fornos a arco operam pelo aquecimento, até a fusão, da carga metálica a ser processada. O calor utilizado provém do arco elétrico, sendo transferido à carga por radiação e convecção.

O arco é uma descarga elétrica em um gás, onde os portadores de carga são principalmente elétrons emitidos do catodo e liberados, por impacto, com os átomos do gás. Esta mistura aquecida de gases e íons é chamada plasma. Sua capacidade de condução de corrente é função do número de portadores de carga por unidade de volume.

A ignição do arco se dá quando a tensão, dentro de cada semiciclo, cresce além de um certo valor crítico capaz de romper a rigidez dielétrica do gás. Quando a corrente passa por zero o arco se extingue, voltando à ignição no semiciclo seguinte.

Há várias fases distintas na operação de um forno elétrico a arco, desde o carregamento inicial até o final da corrida, com o aço já líquido. No início, após o carregamento da sucata, os três eletrodos são baixados até que se estabeleça um curto-circuito entre pelo menos dois deles. Neste momento (fase de ignição) estabelece-se a corrente e o regulador do forno começa a levantar um ou mais eletrodos para estabelecer o arco elétrico. No início da fusão a sucata apresenta superfície muito irregular o que acarreta grandes flutuações de corrente, já que o regulador dos eletrodos não tem velocidade suficiente para responder a estas mudanças. Além disto é comum a queda de porções de sucata das paredes do forno nos eletrodos, com conseqüente curto-circuito. Esta é a fase de operação do forno que acarreta as maiores flutuações de tensão no sistema elétrico.

Já durante os períodos de fusão da carga metálica e posterior refino o arco se mantém mais estável. Esta estabilidade, entretanto, é função do fator de potência de operação do forno. De fato, como o arco se extingue a cada passagem por zero da corrente, sua reignição depende da tensão entre eletrodos neste instante. Com fator

de potência elevado (acima de 0,9), a tensão no instante da extinção do arco é insuficiente para a reignição imediata, resultando em arco instável. Por outro lado, para fatores de potência da ordem de 0,7 a 0,8, a tensão durante a extinção do arco é suficiente para sua reignição imediata, levando a um arco mais estável. Isto gera uma demanda de reativos que deve ser compensada (idealmente através de um SVC) para que o fator de potência da usina como um todo seja próximo da unidade.

Os comentários acima deixam clara a natureza aleatória da resistência de arco, com variações desde praticamente zero (curto-circuito franco) até infinito (corrente interrompida). Entretanto, estaremos admitindo aqui que, em cada semiciclo, a resistência de arco é constante, o que é uma hipótese razoável, ainda que não estritamente correta. O valor médio destas resistências de arco pode ser estabelecido pela potência nominal do forno.

A Referência (1) sugere que a resistência de arco de um forno elétrico pode ser modelada por uma distribuição gaussiana, com variação a cada semiciclo. A implementação deste modelo no EMTP/ATP exige o uso de distribuições uniformes, que são as únicas disponíveis neste programa ($\text{ran}(x)$), onde x é uma semente escolhida livremente. O resultado é:

$$R_{\text{arco}} = m + m \cdot s \sqrt{-2 \ln(\text{ran}(x1))} \cdot \sin[2\pi \cdot \text{ran}(x2)]$$

onde:

R_{arco} : resistência de arco calculada a cada semiciclo

μ : valor médio da distribuição gaussiana

σ : desvio padrão da distribuição gaussiana

$x1$: semente da distribuição uniforme 1

$x2$: semente da distribuição uniforme 2

A implementação do modelo descrito acima no ATP leva a resultados para o comportamento das resistências de arco como mostrado na Figura 1.

A partir da implantação do modelo acima nos arquivos de simulação da rede em estudo, através do EMTP/ATP, é possível obter-se as formas de onda de tensão em qualquer barra de interesse. Resta agora processar estas formas de onda de tensão para o cálculo da flutuação de tensão.

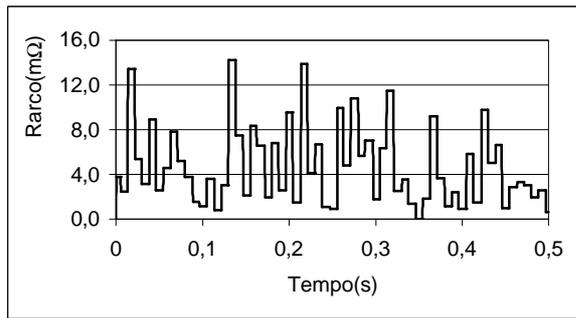


Figura 1

Resistência de arco dada pelo modelo probabilístico

Os resultados destas variações de tensão são posteriormente analisados por modelagem matemática do flickermeter proposto pela UIE (União Internacional de Eletrotécnica) via módulo TACS do ATP e pelo programa de análise matemática Matlab[®].

3.- O FLICKERMETER DA UIE

O fenômeno da cintilação luminosa nas lâmpadas incandescentes é bem conhecido e pode causar desconforto visual às pessoas em ambientes com este tipo de iluminação. O método de avaliação de cintilação luminosa mais aceito atualmente é o que faz uso do Flickermeter cuja estrutura é definida na IEC 868 de 1986, Referência (3), e repetida na Figura 2.

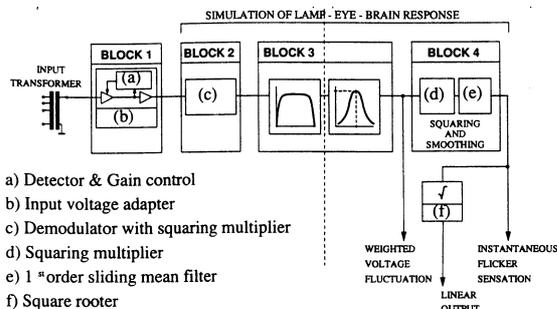


Figura 2 - Diagrama de blocos do flickermeter IEC

Este flickermeter foi desenvolvido a partir de uma pesquisa em que se submeteu um número expressivo de pessoas a vários níveis de cintilação e se avaliou a sensibilidade do conjunto lâmpada-olho-cérebro às variações luminosas. Estes testes foram realizadas usando-se uma lâmpada incandescente de 230 V, variando-se a frequência da onda modulante e o tipo de modulação. A curva mostrada na Figura 3 apresenta o resultado da pesquisa em que se pode constatar a diferença de sensibilidade em função da frequência da oscilação. Note-se que

esta curva reflete um comportamento médio das pessoas submetidas aos testes.

O eixo das ordenadas da curva da Figura 3 mostra o valor de "flicker" instantâneo que causa o início da sensibilização do efeito cintilante. Estabeleceu-se, então, que a curva da Figura 3 define $P_{st}=1$, ou seja o valor de flicker instantâneo, em função da frequência, que causa o início da sensibilização humana ao flicker, para lâmpadas incandescentes de 230 V.

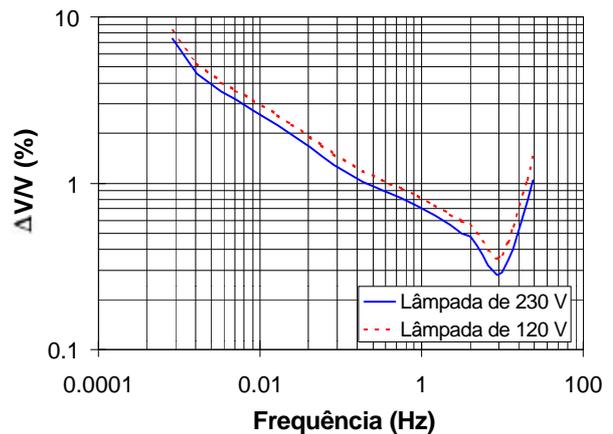


Figura 3 – Limiar de sensibilidade à cintilação luminosa ($P_{st}=1$)

4.- SIMULAÇÃO DO FLICKERMETER

Neste estudo, a função de transferência de cada um dos blocos apontados na Figura 2 foi implementada pelas rotinas TACS do ATP. As funções de cada um deles são, basicamente, as seguintes:

1. Cálculo do valor RMS da tensão da barra sob estudo e normalização em relação à tensão RMS média do minuto anterior. O objetivo é o de evitar que variações de tensão normais, que não geram cintilação, afetem o resultado
2. Demodulação quadrática, para extrair a componente modulante da tensão;
3. Filtro passa-banda com frequências de corte em 0,05 e 35 Hz, para selecionar a faixa de frequências de modulação capazes de gerar desconforto visual;
4. Filtro de ponderação, centrado em 8,8 Hz, que atribui pesos adequados às frequências de modulação, relativos ao grau de perceptibilidade fisiológica e levantados nos estudos estatísticos;
5. Circuito quadrador, e filtro de média completam o modelo.

À saída dos blocos descritos acima obtém-se uma forma de onda temporal correspondente à "Sensação Instantânea de Flicker" - s_f . Entretanto, de acordo com o mecanismo de visão e crescimento cumulativo do grau de perturbação, o flicker deve ser avaliado através de uma função probabilística de distribuição cumulativa, processando dados de um período suficientemente longo. Esta função é dada por:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{50} + 0.0525P_{10} + 0.0657P_3 + 0.28P_1 + 0.08P_{0.1}}$$

onde P_{st} ("short-term probability") é um indicador adimensional de "unidades de perceptibilidade" e onde os valores P_i indicam os níveis de s_f que foram violados por mais de $i\%$ do tempo. O período de observação recomendado pela IEC para o estabelecimento do P_{st} é de 10 minutos. Um outro indicador utilizado é o Plt ("long term probability"), relativo a 2 horas de observação, obtido de 12 medições de P_{st} . $P_{st}=1$ indica o limite estatístico em que mais da metade de um grupo significativo de pessoas passa a perceber a cintilação luminosa.

Um passo importante para a implementação do modelo probabilístico para o forno é o estabelecimento do desvio padrão σ . Idealmente, σ deveria ser obtido a partir de medições de campo em instalações similares às que se pretende simular. Entretanto, mesmo na ausência destas medições foi possível obter-se uma estimativa razoável de σ a partir de um estudo realizado em 187 instalações de fornos a arco da Europa e do Japão, descrita na Referência (2). Este estudo mostra que existe forte correlação entre a cintilação induzida por um forno e a relação entre a potência de curto-circuito no ponto de acoplamento comum (S_{PCC}) e a potência de curto-circuito do forno (S_F). Foi observado que, se S_{PCC}/S_F for da ordem de 50, o P_{st} induzido neste ponto é da ordem de 1. Assim, basta um procedimento preliminar em que se ajusta a impedância da fonte da rede em estudo até que S_{PCC}/S_F seja de 50. A seguir, encontra-se o valor de σ que leva a $P_{st}=1$ nesta situação. Finalmente, retorna-se com a impedância da fonte para o seu valor real.

Outra observação importante é que os fornos modernos podem operar com tempos totais de corrida menores que 40 min, com mais de 25 corridas/dia. As simulações propostas neste artigo referem-se aos minutos iniciais de cada corrida, quando os níveis de distúrbio induzidos são máximos.

5.- VALIDAÇÃO DO MODELO

Os modelos descritos para o forno a arco CA e para o flickermeter foram testados através da avaliação do nível de flicker (P_{st}) produzido por um forno CA de 33 MVA, numa instalação da África do Sul, para o qual se dispõe de medições da cintilação luminosa e de dados do sistema elétrico (1). O diagrama trifilar desta instalação é mostrado na Figura 4, enquanto os parâmetros principais da instalação são dados na Referência (1).

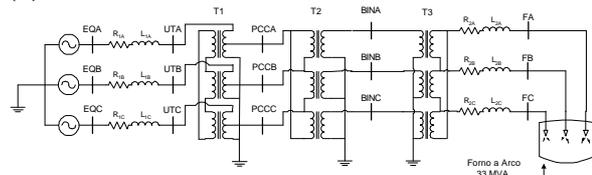


Figura 4 - Diagrama de instalação real de forno a arco

O sistema da Figura 4 foi simulado através do ATP, com a operação do forno durante a fase inicial de fusão da carga metálica, conforme a metodologia descrita no item 2. A corrente de arco simulada (fase A) é mostrada na Figura 5.

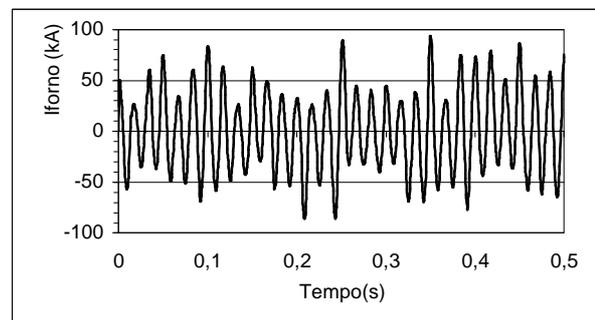


Figura 5 - Corrente de arco simulada

A seguir, foi aplicada a metodologia descrita no item 4, variando-se o valor de σ até que P_{st} calculado no ponto de acoplamento comum fosse igual ao valor medido na instalação real: $P_{st} = 1,3$. Este processo corresponde à "calibração" do modelo. A partir deste ponto foi considerado lícito supor que o modelo está apto a representar fornos que usem a mesma tecnologia, mesmo se de potência diferente e aplicados a sistemas diversos, desde que estas diferenças sejam adequadamente consideradas.

Para confirmar esta suposição foi variada a potência de curto-circuito do ponto de acoplamento comum PCC desde 772 MVA até 3703 MVA (valor real: 2616 MVA). A Referência

(2) indica, a partir de uma série de medições de campo, que existe uma relação aproximada entre o Pst neste ponto e a razão entre a potência de curto-circuito do forno e o nível de curto no ponto de acoplamento comum, dada pela seguinte expressão:

$$K_{st} = \frac{P_{st}}{\left(\frac{S_F}{S_{PCC}} \right)}$$

onde S_F é a potência de curto-circuito do forno, S_{PCC} é o nível de curto do sistema no PCC e K_{st} é o chamado coeficiente característico de emissão, com valores usuais na faixa de 48 a 85. Na Figura 6 as linhas pontilhadas representam os valores inferior e superior de K_{st} e os losangos indicam valores calculados de Pst de acordo com a metodologia proposta neste estudo. É possível notar que o modelo é robusto frente a variações dos níveis de curto-circuito do sistema.

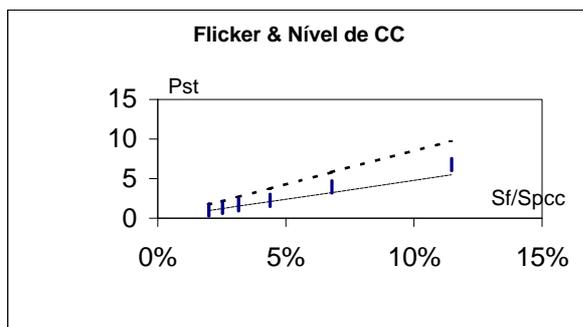


Figura 6 - Pst em função do nível de curto do sistema, para validação do modelo

Note-se que, utilizando o modelo proposto como “fonte de corrente” no programa ATP, é possível calcular seu efeito na tensão em qualquer ponto do sistema, e não apenas no PCC. Esta tensão pode ser processada (TACS/Matlab[®]) para o estabelecimento do flicker produzido por esta instalação em particular nesta barra de interesse.

6.- LIMITES DE EMISSÃO

A IEC produziu, recentemente, um Relatório Técnico (4), de caráter informativo, contendo recomendações quanto aos limites de flicker na rede elétrica. Este relatório traz as seguintes definições:

- **Níveis de Compatibilidade** – São níveis de referência para coordenação da emissão. Foram escolhidos os valores de $P_{st}=1$ e $P_{lt}=0,8$ pois estes níveis correspondem ao limiar de percepção e, portanto, incapazes de causar problemas.

- **Níveis de Planejamento** – São níveis que podem ser usados para o planejamento de novas instalações, de vez que não se espera que flutuações desta ordem venham a causar problemas. Foram escolhidos os valores de $P_{st}=0,9$ (média tensão), $P_{st}=0,8$ (alta tensão), $P_{lt}=0,7$ (média tensão) e $P_{lt}=0,6$ (alta tensão).
- **Níveis de Emissão** – São níveis de flicker que podem ser produzidos por um consumidor específico, desconsiderando-se a emissão dos demais consumidores. Para se definir este nível a Referência sugere três estágios de investigação, dependendo do tamanho do consumidor em relação ao sistema e da perturbação que ele possa causar.

A referência (4) recomenda o processo de medição de forma a aferir níveis de flicker existentes na rede elétrica. Sugere o tempo de uma semana de medição e a obtenção dos níveis $P_{st95\%}$, $P_{st99\%}$, $P_{lt95\%}$ e $P_{lt99\%}$.

Apesar destas, e outras, iniciativas para o estabelecimento de limites de emissão, investigação recente realizada por pesquisadores do Laborelec (Bélgica), referência (2), em um total de 27 instalações de fornos a arco na Europa, mostraram que em 50% delas os valores de $P_{st99\%}$ excederam o nível 2,3. Estes resultados mostram que muitas das instalações existentes na Europa apresentam níveis de emissão superiores aos contidos no relatório IEC. Esta referência não informa se a não observância dos níveis contidos no citado relatório implicaram em multas ou restrições de ligação.

No Brasil um grupo de trabalho, sob a coordenação da ELETROBRÁS, contando com representantes de várias empresas concessionárias, produziu uma proposta de limites de emissão de flicker e sugestões quanto ao processo de medição nas instalações existentes (5) e (6). Atualmente o ONS, a ANEEL e as agências reguladoras estaduais estão analisando este documento, o qual estabelece limites semelhantes aos do relatório da IEC.

Entretanto, estas agências estão estudando a hipótese de se normalizar e regulamentar tais limites de forma que não sejam admitidos novos consumidores cuja emissão exceda “os níveis de planejamento” e, no futuro, prevê a aplicação de multas aos consumidores existentes para que sejam forçados a reduzir os seus níveis de emissão.

A fim de melhor conduzir tal proposta julga-se que os seguintes pontos devam merecer consideração:

- A curva de $P_{st} = 1$ é definida com base no *limiar de percepção* de 50% das pessoas envolvidas no teste. Para os objetivos estabelecidos, provavelmente seria mais apropriado definir e verificar um *limiar de desconforto* para 50% das pessoas;
- A curva de $P_{st}=1$ foi obtida com o uso de lâmpadas incandescentes de 230V – 60W, comuns na Europa. Sabe-se que a lâmpada de 120V é menos sensível à flutuação de tensão, como mostrado na Figura 3. Assim, seria necessário adaptar os limites admissíveis de P_{st} medidos com o “flickermeter” tradicional ou efetuar medições com um equipamento que já possua a opção da lâmpada de 120 V;
- O relatório da IEC propõe um limite de emissão na alta tensão inferior ao da média tensão. No entanto, em casos práticos, observa-se que os níveis de flutuação medidos na barra de alta tensão da concessionária são inferiores aos medidos na média tensão do forno que, por sua vez são diferentes dos níveis da baixa tensão. É importante que não se perca de vista que o flicker é um fenômeno importante apenas na baixa tensão, onde são ligadas as lâmpadas.

7.- CONCLUSÕES

A flutuação de tensão é um problema que pode ser de controle dispendioso. Foi visto no item anterior que, embora ainda não haja definição final, já existem recomendações IEC quanto a limites de emissão e outras padronizações.

Neste sentido, este artigo apresentou uma metodologia que é uma contribuição para implementação destas recomendações em duas fases:

- no nível *planejamento*, ao permitir estimar o “flicker” individual induzido por uma siderúrgica a arco CA em qualquer barra do sistema elétrico, antes mesmo que a usina esteja efetivamente implantada.
- no nível de *emissão*: nas situações em que a usina já está implantada pode não ser trivial estabelecer-se a contribuição individual de cada fonte emissora de cintilação através de medição direta de flicker. Nestes casos, a partir das formas de onda das correntes do(s)

forno(s), obtidas por medição, seria possível estabelecer-se a contribuição da usina em questão, com grande precisão, em qualquer barra do sistema bastando substituir-se o modelo probabilístico do forno pela forma de onda de corrente efetivamente medida. Este método seria particularmente útil nas situações em que haja mais de um forno operando nas imediações da barra de interesse.

O modelo probabilístico apresentado neste artigo refere-se, exclusivamente, a fornos CA, não se aplicando a fornos do tipo CC. Entretanto, em se dispor das formas de onda das correntes no ponto de acoplamento com a concessionária, é igualmente possível estimar-se a cintilação e distorções harmônicas nas barras de interesse.

Finalmente, é opinião dos autores deste artigo que, no Brasil, é necessário ganhar experiência adicional na análise, medição e entendimento do fenômeno de flutuação de tensão, antes do estabelecimento de limites rígidos que possam trazer conseqüências econômicas e até sociais desastrosas.

8.- BIBLIOGRAFIA

- (1) Petersen, H.M., Koch, R.G., Swart, P.H., Heerden, R. - "Modelling Arc Furnace Flicker and Investigating Compensation Techniques", 1995 IEEE Winter Meeting.
- (2) Robert, A., Couvreur, M. - "Arc Furnace Flicker Assessment and Prediction", CIREC 1993.
- (3) IEC Publicação 868- "Flickermeter Functional and Design Specifications", 1989
- (4) IEC 1000-3-7 - "Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems - Basic EMC publication" , 1996.
- (5) "Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais" - GCOI/SCCEL/GCPS/CTST/GTCP - Revisão 1 - Novembro 1997.
- (6) "Procedimentos de Medição para Aferição da Qualidade da Onda de Tensão quanto ao Aspecto de Conformidade (Distorção harmônica, Flutuação e Desequilíbrio de Tensão) - GCOI/SCCEL/GCPS/CTST/GTCP - Novembro 1997.