



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7725
Tópico: Modelagem e Simulações

UMA ESTRATÉGIA PARA MODELAGEM DE FORNOS A ARCO PARA ESTUDOS DE DESEQUILÍBRIOS E FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

CARLOS E.
TAVARES

RODRIGO A.
PENICHE

JOSÉ C. DE
OLIVEIRA

JOSÉ W. RESENDE

UFU

CARLOS A. G. MEDEIROS
SOES/IUESO
Faculdades Objetivo/Goiânia-GO

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia analítica e respectiva implementação computacional no domínio do tempo para representar o comportamento dinâmico da operação de fornos a arco trifásicos, no que tange a aleatoriedade dos consumos de potência ativa e reativa. Fundamentado em um banco de dados extraído de medições de campo e objetivando ilustrar a aplicabilidade do modelo, são realizados estudos computacionais de desempenho e análise crítica dos impactos causados pela operação do equipamento focado em um sistema típico de empresa distribuidora. Estas avaliações compreendem análises de desequilíbrios e flutuações de tensão. A partir dos resultados numéricos obtidos, são estabelecidos termos comparativos em relação aos indicadores recomendados para os fenômenos supra mencionados. Isto ilustra e evidencia a potencialidade da modelagem para fins preditivos dos impactos de novas instalações nas quais os fornos aqui considerados sejam expressivos.

PALAVRAS-CHAVE

Fornos a arco, qualidade da energia, modelagem computacional, análise de desempenho.

1.0 INTRODUÇÃO

A modelagem de cargas não lineares para a análise do comportamento de sistemas à luz da qualidade da energia constitui-se assunto atual e de grande importância. A previsão dos impactos causados na rede elétrica, oriundos de cargas perturbadoras, através de modelos matemáticos e respectivas implementações computacionais, apresenta-se como uma ferramenta poderosa na busca por soluções mitigadoras para os problemas advindos da conexão destas cargas nos sistemas elétricos.

Dentre as diversas cargas passíveis de afetar os padrões de desempenho dos complexos elétricos ressaltam-se, sobremaneira, os fornos a arco. Estes, devido às características intrínsecas à sua operação, constituem-se numa das mais expressivas cargas capazes de provocar efeitos como: distorções harmônicas, desequilíbrios, flutuações de tensão, dentre outros. Não obstante suas conseqüências sobre os sistemas elétricos de suprimento, vale lembrar que, tais dispositivos oferecem mecanismos altamente atrativos para os processos de produção de aço e outros materiais ferrosos. Estes atrativos resultam que os fornos a arco podem ser considerados como

* Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Grupo de QEE e Racionalização da Energia Elétrica.
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N, 38400-902, Uberlândia – MG, (34) 32394166
E-mail: cetavares@eel.ufu.br

um dos principais equipamentos da siderurgia mundial.

Inserido, pois no cenário da correlação operativa destes equipamentos e suas implicações na qualidade da energia, surge este artigo, o qual se encontra contextualizado na forma de uma contribuição para o estabelecimento de uma estratégia analítica e respectiva implementação computacional em um programa que emprega técnicas de modelagem no domínio do tempo para os estudos aqui enfocados. Tal imposição quanto à forma de modelagem se faz necessária pela forte dinâmica operacional determinada pela carga aqui contemplada. A proposta estabelece como ponto central os estudos dos desequilíbrios e flutuações de tensão e respectivas propagações ao longo de uma rede elétrica de suprimento. De posse dos resultados obtidos computacionalmente, são determinados os indicadores numéricos dos itens de qualidade aqui considerados, sendo posteriormente comparados aos seus respectivos resultados de campo.

2.0 METODOLOGIA PARA OS ESTUDOS

Tendo em vista a natureza do fenômeno enfocado, tornou-se necessário que os desenvolvimentos fossem realizados numa plataforma que utiliza técnicas de modelagem e cálculos no domínio do tempo. Neste contexto, foram desenvolvidas e implementadas computacionalmente, expressões analíticas para representar a dinâmica operativa dos fornos a arco, no intuito de analisar os seus impactos em um sistema elétrico real. As etapas deste processo são detalhadas na seqüência.

2.1 Proposta de modelo no domínio do tempo para os fornos elétricos

Em consonância com a estrutura do programa empregado e dos objetivos aqui delineados, torna-se imperativo que as representações dos fornos sejam compatíveis com a forma aleatória com que ocorrem as variações de suas potências ativas e reativas instantâneas, respectivamente $P(t)$ e $Q(t)$. Deste modo, a proposta aqui apresentada baseia-se na derivação de expressões que correlacionam tais grandezas em composições trigonométricas, que reconheçam suas amplitudes e frequências das modulações em torno de um valor médio, conforme requerido para as avaliações dos fenômenos enfocados no presente trabalho. Estas expressões foram baseadas na referência [1], ressalvadas algumas

modificações para adequação ao modelo do forno a arco. Esta proposta obedece à estrutura matemática descrita pelas expressões a seguir:

$$P(t) = P_0 + \sum_{f_i=1}^n P_{f_i} \cos(2\pi f_i t + \phi) \quad (1)$$

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{f_i=1}^n Q_{f_i} \cos(2\pi f_i t + \phi) \quad (2)$$

Onde:

- $P(t)$ - Potência ativa absorvida pelo forno num instante t ;
- $Q(t)$ - Potência reativa absorvida pelo forno num instante t ;
- P_0 - Potência ativa média absorvida pelo forno durante o período de amostragem;
- Q_0 - Potência reativa média absorvida pelo forno durante o período de amostragem;
- P_{f_i} - Parcela da potência ativa absorvida pelo forno em uma determinada frequência de modulação f_i ;
- Q_{f_i} - Parcela da potência reativa absorvida pelo forno em uma frequência de modulação f_i ;
- f_i - Frequência de modulação contida na variação das potências monitoradas e obtida pela decomposição espectral destas;
- n - n -ésima frequência de modulação;
- ϕ - Deslocamento de fase;
- t - Tempo;

As informações sobre as potências ativas e reativas consumidas pelo forno a arco, para os propósitos deste trabalho, foram obtidas através de medições de campo, realizadas numa unidade de 48MVA de uma usina siderúrgica. Tais grandezas foram decompostas num espectro de frequências para posterior composição de síntese, que foi traduzida em dados de entrada para as expressões (1) e (2). Assim procedendo, fez-se necessário limitar a faixa de frequências de interesse, de 1 e 25 Hertz, resultando em pequenas divergências entre as formas e valores das potências registradas e aquelas utilizadas para os cálculos computacionais sem que isto, no entanto, trouxesse grandes compromissos para as avaliações enfocadas no presente trabalho. Deve-se ressaltar que a faixa de frequências pré-selecionada acima tem uma correspondência direta com aquelas relevantes aos cálculos dos indicadores da severidade da cintilação luminosa, conforme estabelece os procedimentos próprios à matéria [2].

De posse dos dados experimentais, as expressões analíticas foram incluídas em um simulador computacional, permitindo, então, a

realização dos estudos considerando a aleatoriedade com que tais consumos se manifestam. As figuras de 1 a 6 apresentam, comparativamente, os resultados das potências ativas e reativas obtidos através das expressões matemáticas e aquelas originalmente obtidas das medições, para as fases A, B e C.

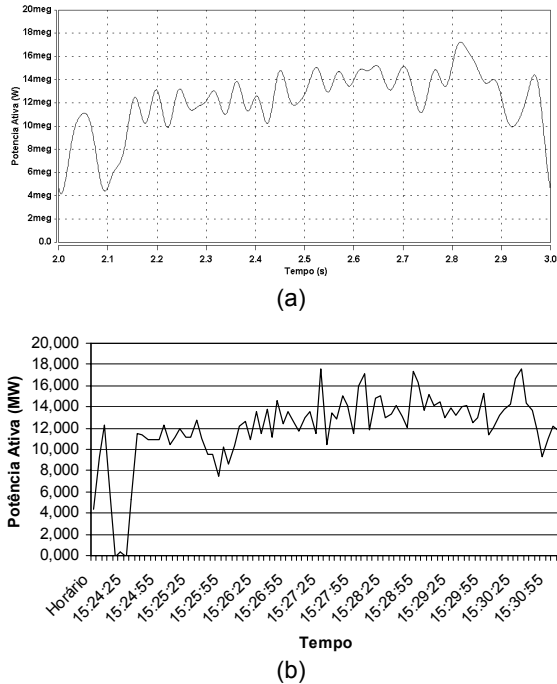


Figura 1: Perfis para as potências ativas do forno a arco na fase A, (a) computacional, (b) medição

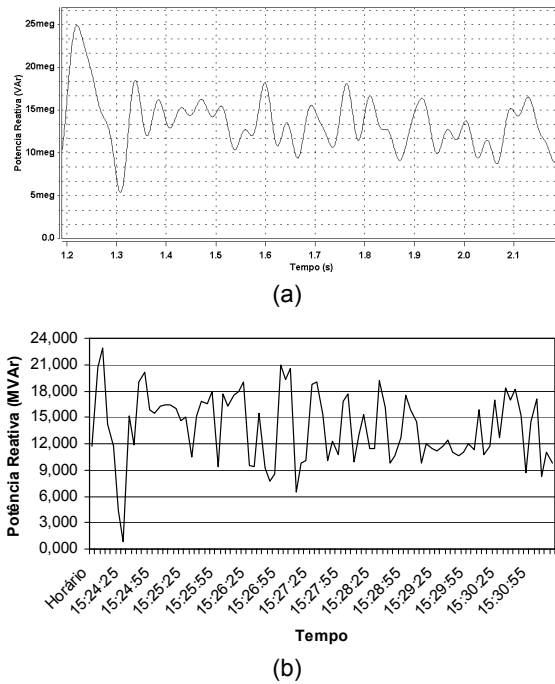


Figura 2: Perfis para as potências reativas do forno a arco na fase A, (a) computacional, (b) medição

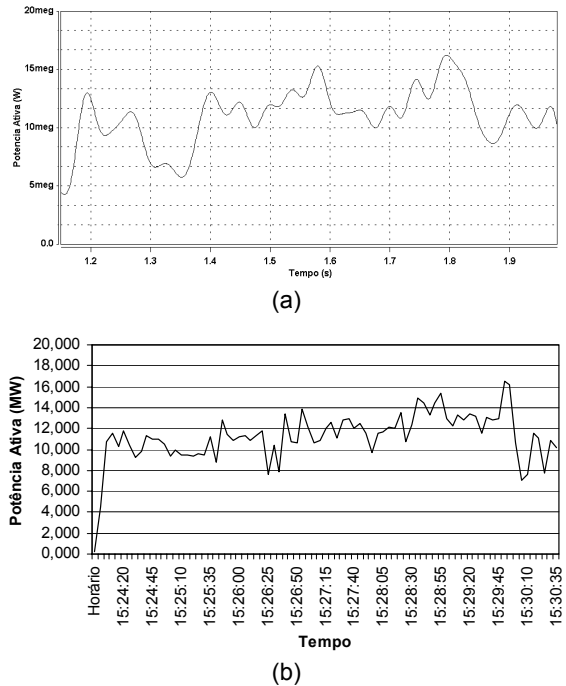


Figura 3: Perfis para as potências ativas do forno a arco na fase B, (a) computacional, (b) medição

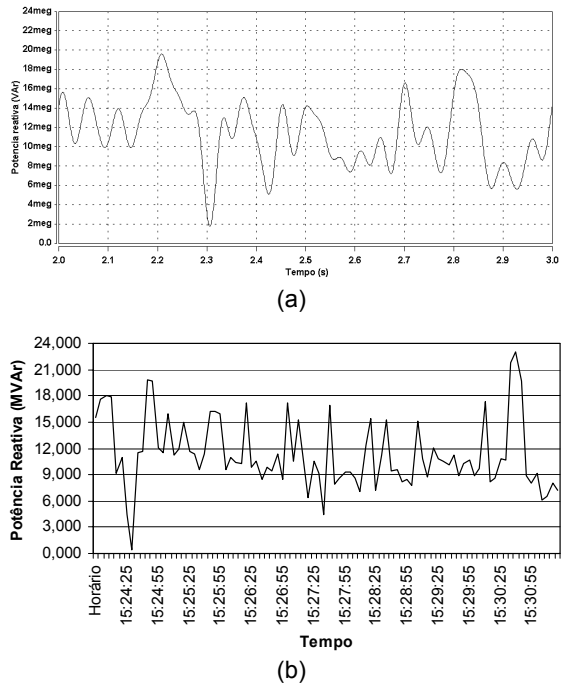


Figura 4: Perfis para as potências reativas do forno a arco na fase B, (a) computacional, (b) medição

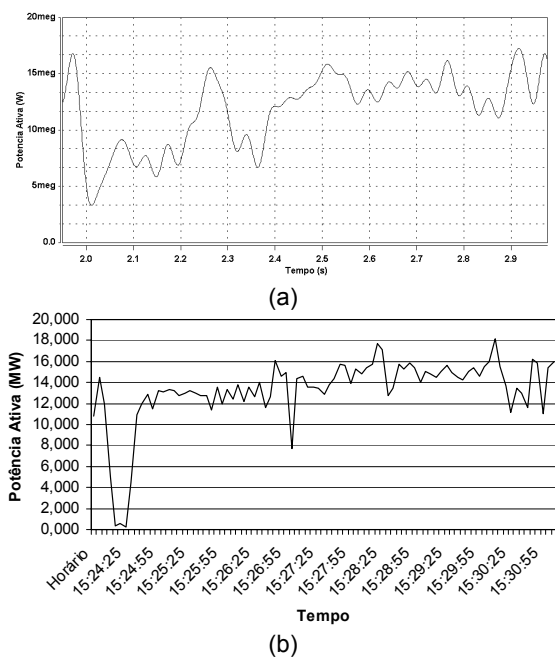


Figura 5: Perfis para as potências ativas do forno a arco na fase C, (a) computacional, (b) medição

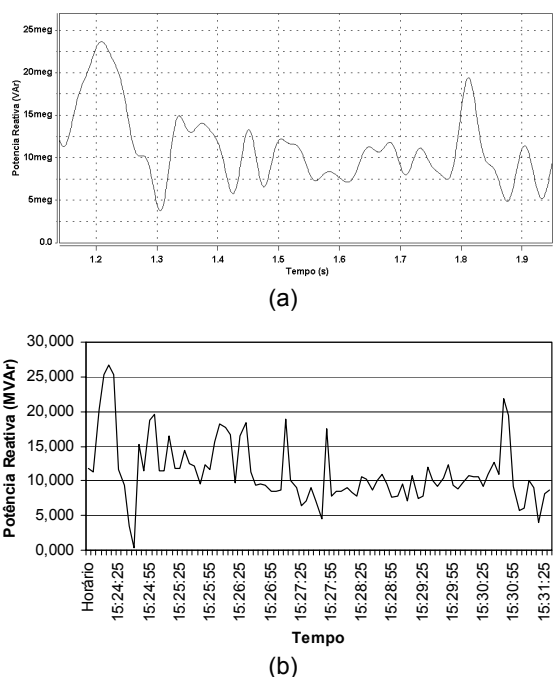


Figura 6: Perfis para as potências reativas do forno a arco na fase C, (a) computacional, (b) medição

Quando ao mecanismo computacional para a inserção dos consumos das potências anteriores, de modo a caracterizar a operação do forno, o procedimento empregado consiste, para cada instante, em obter uma impedância representativa da carga sob enfoque. Dentre desta premissa, as impedâncias assim derivadas

passam a compor, momentaneamente, as matrizes de impedâncias do sistema como um todo. Na seqüência, os cálculos internos ao programa permitem obter o desempenho das tensões trifásicas, de modo independente por fase, ao longo do tempo. Estes perfis das tensões consistem na base para os cálculos dos desequilíbrios e das flutuações de tensão.

2.2 Cálculo do Desequilíbrio instantâneo

Dentre as diversas possibilidades para a determinação dos níveis de desequilíbrios presentes num determinado barramento de um complexo elétrico, foi adotada a formulação CIGRÉ. Este procedimento, como é sabido, é bastante atrativo pela sua simplicidade e precisão [3]. Esta expressão, empregando apenas as amplitudes das tensões trifásicas, é:

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

$$\text{Sendo: } \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (4)$$

Onde:

K% - Fator de Desequilíbrio;
 $\left. \begin{array}{l} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{array} \right\}$ Tensões de linha.

2.3 Cálculo das flutuações de tensão

Dentre os vários efeitos associados às flutuações de tensão em um sistema elétrico, destaca-se a cintilação luminosa ou efeito *Flicker*. A cintilação é a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas, causada pelas flutuações da tensão de alimentação. Os níveis de severidade da cintilação, associados à flutuação de tensão [4], são quantificados pelos indicadores Pst e Plt. O indicador Pst, "Probability short term" representa a severidade dos níveis de cintilação verificada num período contínuo de 10 minutos e é calculado a partir dos níveis instantâneos de sensação de cintilação, medidos conforme a seguinte expressão:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}}$$

Na equação anterior P_i corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo, resultante do histograma de classificação por níveis, calculado conforme estabelecido em [5]. Para tanto, os valores instantâneos de tensão dos barramentos analisados foram inseridos em um modelo computacional do medidor de flicker, desenvolvido no programa *MatLab/Simulink* [6], que emprega rigorosamente as características do medidor padrão IEC [5]. A obtenção do indicador Plt, “Probability long term”, não se fez necessária para o escopo das análises pretendidas nesta investigação.

2.4 Modelagem do sistema elétrico estudado

As análises foram realizadas utilizando-se um sistema de uma empresa de distribuição, com 76 barramentos, ao nível de 138kV. Os carregamentos dos distintos barramentos outros que não aquele de conexão do forno a arco, foram adotados na forma de cargas tipo potência constante ($P + jQ$).

3.0 CASOS ESTUDADOS

Considerando a complexidade do sistema elétrico estudado e, conseqüentemente, as restrições de espaço para a apresentação de todos os pontos elétricos envolvidos, para fins de apresentação e discussão dos resultados no âmbito deste artigo, foram selecionados apenas 03 dos 76 barramentos. A figura 7 ilustra esta simplificação, lembrando, todavia, que as simulações foram feitas com todos os barramentos operantes. A escolha das barras 1, 2 e 3 utilizou como premissa o grau de acoplamento destes em relação à barra onde se situa a carga perturbadora. Tal procedimento permite ilustrar os efeitos da carga dinâmica sobre as flutuações de tensão (*Flicker*) e dos desequilíbrios, e suas propagações ao longo da rede elétrica, sem o comprometimento qualitativo e quantitativo do estudo ora apresentado.

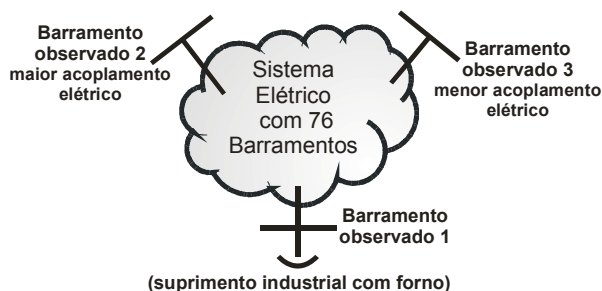


Figura 7: Diagrama representativo do sistema estudado

Tendo em vista a diversidade de casos que englobariam, dentre outros fatores: as cargas supridas, as topologias para o complexo elétrico, os níveis de curto-circuito etc. os trabalhos computacionais foram realizados com tais preocupações em foco. Além disso, foram ainda simuladas condições operativas distintas e representativas das diversas hipóteses para os carregamentos do sistema, isto é carregamento leve, médio e pesado.

4.0 RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados computacionais obtidos para os níveis de desequilíbrios e *Flicker* e, para fins de validação e comparação do desempenho dos procedimentos propostos, são também anexados valores extraídos de medições de campo.

4.1 Níveis de desequilíbrio

A tabela 1 apresenta os valores recomendados pelo sub-módulo 2.2 do ONS [7] e os resultados obtidos para os níveis de desequilíbrios nos barramentos estudados, onde “Med” significa valor medido e “Sim” está associado com aqueles advindos da simulação computacional.

Tabela 1: Índices de desequilíbrios

Carga	ONS	Barra 1		Barra 2		Barra 3	
		Med	Sim	Med	Sim	Med	Sim
Leve	2 %	1,2	1,27	0,5	0,48	0,35	0,30
Média	2 %		1,31		0,55		0,39
Pesada	2 %		1,27		0,51		0,35

4.2 Níveis de *Flicker*

A tabela 2 apresenta o limite global superior recomendado pelo sub-módulo 2.2 do ONS [7] (considerando um fator de transferência $FT = 0,8$, para o nível de 138 kV) e os resultados obtidos para os níveis de *Flicker* dos barramentos sob análise.

Tabela 2: Índices de flicker (Pst)

Carga	ONS	Barra 1		Barra 2		Barra 3	
		Med	Sim	Med	Sim	Med	Sim
Leve	2,5pu	7,0	6,64	2,5	2,62	1,4	1,61
Média	2,5pu		7,02		3,00		1,59
Pesada	2,5pu		6,84		2,81		1,84

5.0 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma estratégia analítica e respectiva implementação computacional para representar o comportamento dinâmico dos

fornos a arco, objetivando atender aos propósitos de estudos de desequilíbrios e flutuações de tensão. Ao serem confrontados com as medições de campo, os indicativos oriundos dos estudos computacionais apresentaram boa concordância, validando, portanto, a metodologia proposta.

Quanto aos estudos dos impactos do forno a arco sobre o sistema elétrico focado foram extraídas as seguintes constatações:

- Os estudos foram realizados através da representação do sistema elétrico proposto em consonância com as informações topológicas, parâmetros e carregamentos fornecidos para cada situação operacional;
- O forno a arco foi inserido na forma de consumos dinâmicos de potências, cujas informações foram derivadas de medições diretas. Além disso, esta foi a única carga simulada com tais características. Por este motivo, os resultados obtidos refletem tão apenas as contribuições desta para os desequilíbrios e efeito *Flicker*.
- As distintas condições de carregamento para o sistema, quais sejam: carga leve, carga média e carga pesada, foram devidamente consideradas. Pode-se perceber que os carregamentos impostos foram de pequena relevância sobre os resultados obtidos. Isto está em consonância com os conceitos da propagação dos desequilíbrios e flutuações de tensão.
- Conforme estabelecido pelos indicadores do submódulo 2.2 do ONS, o nível de desequilíbrio encontra-se limitado ao valor de 2%. Comparando-se aos resultados obtidos na tabela 1, verifica-se que todos os barramentos analisados apresentam-se com um fator de desequilíbrio dentro dos valores recomendados;
- Quanto aos níveis de Pst, verificou-se que para o barramento 1, ao qual o forno está instalado e para o barramento 2, de maior acoplamento elétrico, ocorre a violação do

- limite recomendado pelo submódulo 2.2 do ONS. Esta violação aponta a necessidade da utilização de técnicas mitigadoras para melhoria da qualidade da energia, no que tange às flutuações de tensão. Já para o barramento 3, embora tenha menor acoplamento elétrico, os indicadores apontaram um estado de observação que também possa aspirar ações mitigadoras, caso haja reclamações por parte dos consumidores conectados àquele barramento.

5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pontes, Maria das Graças Santos Rufino, “Contribuições às Análises da Propagação das Flutuações de Tensão sob o Enfoque do Fenômeno Flicker”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, dezembro de 2000.
- [2] Dugan, Roger C. at all, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw Hill, 1996
- [3] ONS/ANEEL/UFU, Relatório Parcial 2 - Harmônicos e Desequilíbrios – Contribuições para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica, agosto de 2000.
- [4] Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais- Revisão 1” ; Nov/97; GGOI/SCEL e GCPS/CTST.
- [5] IEC Eletromagnetic Compatibility – Part 4: Testing and Measurement Techniques, séc. 15, “Flickermeter: Funcional and design specifications”, IEC standard 61000-4-15, 1997.
- [6] Medeiros, C. A. G., Oliveira, J. C., “Implementação Computacional do Modelo do Medidor de Cintilação Luminosa UIE/IEC para Calibração de Medidores Práticos”, XIV Congresso Brasileiro de Automática (CBA), 02 a 05 de Setembro de 2002, em Natal-RN.
- [7] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Padrões de Desempenho da Rede Básica – submódulo 2.2”, Procedimentos de Rede, 2002.