

MEDIÇÃO DE FLICKER: PROCESSAMENTO DIRETO E ANÁLISE RMS

S.M.Deckmann **J.A.Pomilio**
UNICAMP/FEEC/DSCE C.P. 6101
13081-970 Campinas, SP.
Fax: 19-2391395

Resumo - O artigo faz a comparação entre dois métodos de processamento digital da tensão com vistas à análise de cintilação luminosa (flicker) conforme a metodologia proposta pela CIE - Comissão Internacional de Eletrotécnica. A comparação é feita entre o processamento direto das amostras da tensão e o processamento dos valores eficazes da tensão que contém os sinais modulantes causadores do efeito flicker. Resultados de simulação computacional e de medição mostram que há diferenças significativas entre as duas abordagens. O trabalho mostra também o desempenho no caso de frequência de 50 ou 60Hz e a influência da fase relativa entre a onda portadora e a modulante.

Palavras Chave - Efeito Flicker, Cintilação Luminosa, Qualidade da Tensão.

Abstract - This paper provides a comparison between two different approaches to implement flicker analysis according to the methodology recommended by the IEC - International Electrotechnical Commission. The comparison is made between direct processing of voltage samples and RMS values processing of the voltage producing flicker effect. Computer simulation and measured values show the difference between both methods, the performance considering carrier frequency of 50 or 60Hz and the influence of the relative phase-angle between modulating and carrier signals.

Keywords - Flicker Effect, Voltage Quality.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente preocupação com a qualidade da energia elétrica disponível para o consumidor, aumenta o interesse pela monitoração de distúrbios na rede que possam afetar cargas sensíveis. A medição do nível de flicker provocado pelas variações da tensão auxilia no diagnóstico e identificação de pontos problemáticos na rede de alimentação.

O presente artigo pretende mostrar que a aplicação da metodologia recomendada não é trivial e requer certos cuidados para não mascarar efeitos devidos a não-linearidades do processo. Como será mostrado, existem aspectos importantes a considerar como o efeito da média de meio-ciclo, implícito na análise utilizando valores eficazes, bem como a interpretação dos limites que são definidos em termos de afundamento da tensão para serem utilizados como sinais modulantes.

2. METODOLOGIA CIE/UIE

A especificação funcional e de projeto do sistema para medição de flicker está descrita no relatório CIE-868, publicado em 1986 [1]. Esse método mostra como o sinal de tensão deve ser demodulado e filtrado visando reproduzir a

sensibilidade visual do olho humano às variações luminosas provocadas pelas flutuações na tensão sobre uma lâmpada padrão (230V, 60W, 50Hz). As principais etapas desse processo de simulação lâmpada-olho-cérebro são:

- i - adaptação da tensão da rede ao nível de referência do medidor;
- ii - demodulação por quadramento do sinal de tensão;
- iii - filtragem e ponderação na faixa de percepção do fenômeno (0-30Hz);
- iv - quadramento e média para obtenção da sensação instantânea média (S_i);

Após essas quatro etapas de condicionamento do sinal de tensão, segue-se a análise de flicker propriamente dita, com as seguintes etapas:

- v - classificação por níveis e obtenção da curva de duração por níveis de violação;
- vi - normalização e cálculo do valor de PST ("short-term probability") para cada 10 minutos e do PLT ("long-term probability") referente às duas últimas horas de medição.

Neste trabalho iremos analisar mais detidamente as 4 primeiras etapas porque elas definem o valor que será tomado como base de

normalização do nível de flicker em termos de pu de sensibilidade. Em particular, estamos interessados em comparar duas possíveis abordagens para implementação dessas etapas, a saber:

- i - amostragem e processamento direto de amostras da tensão;
- ii - processamento dos valores eficazes de meio ciclo da tensão.

A principal motivação para essa comparação decorre do fato de que a metodologia não deixa claro se o processamento deve ser aplicado diretamente às amostras da tensão ou ao nível RMS dessa tensão. A dúvida é procedente porque o cálculo do valor eficaz envolve uma operação não-linear de quadramento e média de meio-ciclo antes de se processar o nível de flicker. As questões que precisamos responder são basicamente as seguintes:

- essas duas abordagens produzem os mesmos resultados?
- como esses métodos são afetados pela frequência da portadora?
- há influência da fase relativa entre portadora e modulante?

Definições de Variação e de Flutuação de Tensão

Antes de abordar o problema proposto vejamos algumas definições fundamentais para a nossa análise. De acordo com a publicação CIE 555-3 de 1982 [2] e sua substitutiva CIE 1000-3-3 de 1994 [3] define-se:

- Variação de tensão como "uma variação do valor RMS (ou pico) da tensão entre dois níveis adjacentes, sustentados por um tempo finito porém não especificado".
- Magnitude da variação da tensão como "a diferença entre os valores RMS (ou pico) da tensão antes e depois da variação da tensão".
- Flutuação de tensão como "uma série de variações ou variação cíclica da envoltória da tensão".
- Magnitude de uma flutuação de tensão como "a diferença entre os valores máximo e mínimo da tensão".

No Apêndice da Ref. [2] está definida a *variação relativa da tensão* como sendo:

$$\frac{DV}{V_1} (\%) = 100 \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (1)$$

onde:

V_1 = tensão eficaz antes da variação;

V_2 = tensão eficaz depois da variação.

De acordo com a definição (1) podemos interpretar a variação relativa como o *afundamento percentual* da tensão provocado, por exemplo, pela entrada de uma carga.

Deve-se destacar que essa definição não coincide com a definição usual de modulação. Como a metodologia da CIE prevê a demodulação do sinal de tensão, é necessário fazer a correspondência entre os dois conceitos.

Definição de Modulação em Amplitude

Define-se como modulação em amplitude de um sinal, uma função do tipo:

$$v(t) = v_p(t) \cdot [1 + m \cdot v_m(t)] \quad (2)$$

onde:

$v_p(t)$ = sinal da portadora;
 $v_m(t)$ = sinal da modulante;
 m = índice de modulação (≤ 1).

No caso de termos ambos os sinais senoidais, resultará:

$$v(t) = V_p \cdot \text{sen}(w_p t) [1 + m \cdot \text{sen}(w_m t)] \quad (3)$$

Aplicando o conceito de variação de tensão segundo a CIE teremos, como mostra a Figura 1:

$$\begin{aligned} DV &= V_{max} - V_{min} \\ &= (V_p + mV_p) - (V_p - mV_p) = 2mV_p \end{aligned} \quad (4)$$

e, portanto, resulta :

$$m = \frac{1}{2} \cdot \frac{DV}{V_p} \quad (5)$$

Isto significa que as variações de tensão tabeladas pela CIE como limiar de percepção (DV/V), devem ser divididas por 2 para fornecer o nível de modulação m correspondente. Por exemplo, para obtermos variação $\Delta V/V=0,25\%$ devemos assumir um índice de modulação $m=0,125\%$.

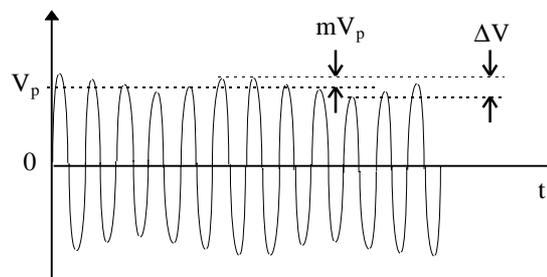


Figura 1. - Modulação e afundamento da tensão.

Neste ponto deve-se chamar a atenção para o fato de que o limiar de percepção dado pela CIE/UIE em termos da variação DV/V foi obtida para uma lâmpada de 230V/60W e alimentação em 50Hz. No Brasil, as tensões secundárias mais comuns são 220/127V e 60Hz. Recentemente foi divulgado um estudo [6] para adequar a metodologia de flicker da CIE/UIE para lâmpadas de 120V, 60Hz. Devido à maior inércia térmica das lâmpadas de menor tensão (e, portanto, de maior corrente), o efeito flicker torna-se menos perceptível nessas condições. Em consequência, o limite aceitável das variações de tensão em 120V devem ser superiores aos recomendados para 230V.

3. PROCESSAMENTO DIRETO DA TENSÃO

O processamento direto consiste na análise da tensão amostrada com uma taxa bem superior à frequência da portadora, de modo a preservar tanto a forma de onda da portadora como do sinal modulante. Através de técnicas de filtragem digital as etapas mencionadas na Seção 2 são processadas sequencialmente para calcular o nível de flicker. Essa abordagem permite obter resultados por simulação ou por geração de sinais analógicos, usando fontes. Um sistema de medição digital de flicker foi usado para realizar o processamento direto tanto na rede como de sinais gerados por fonte programável [5].

4. PROCESSAMENTO DOS VALORES RMS

O processamento dos valores RMS consiste no cálculo dos valores eficazes de meio ciclo da tensão da portadora. Para obter uma função contínua de valores RMS, foi utilizada uma janela de meio ciclo móvel ao longo das amostras que realiza o cálculo do valor RMS passo a passo. A função de valores RMS é então processada digitalmente da mesma forma que na amostragem direta. Como o cálculo do valor RMS considera a média quadrática das amostras da janela móvel, o objetivo é verificar a influência dessa média no nível de flicker resultante.

5. ESTUDOS REALIZADOS

O estudo comparativo entre as duas abordagens para a análise do fenômeno da cintilação foi realizado da seguinte forma:

Parte A - Simulação

1. Utilizando rotinas computacionais gerou-se o sinal modulado e procedeu-se à análise **direta** das amostras obtidas à taxa de 8192 amostras por

segundo para a avaliação do nível de flicker, conforme a metodologia CIE.

2. A partir do mesmo sinal modulado e amostrado, procedeu-se primeiramente ao cálculo do valor **RMS** para uma janela de meio ciclo, móvel ao longo das amostras. A saída correspondente ao valor RMS do sinal, obtido à mesma taxa de 8192 amostras por segundo, foi então processado segundo a metodologia CIE.

Parte B - Medição

1. Utilizando um gerador de sinais programável, com precisão de 12 bits, foram gerados os sinais correspondentes ao item anterior;
2. Através do analisador digital de flicker, baseado na análise direta das amostras de tensão, foi obtida a medida do nível de S_f .

Grandeza analisada

A grandeza básica analisada S_f , chamada sensação instantânea média de flicker, é definida como sendo:

$$S_f = \frac{1}{T} \int^T \left(a_f \cdot \frac{DV}{V} \right)^2 \cdot dt \quad (6)$$

onde:

DV/V = variação relativa da tensão;

a_f = ponderação em frequência segundo a curva de sensibilidade visual [1];

T = constante de tempo para média quadrática (300ms).

O sinal S_f foi escolhido para essa análise porque a publicação CIE-868 estabelece os níveis que definem o limiar de percepção visual para modulação senoidal e retangular para diferentes frequências (Tabelas I e II da Ref. [1]). Isto significa que os níveis de S_f produzidos pelos valores de afundamento de tensão dados nessas tabelas devem resultar aproximadamente iguais, e definem a base de 1pu de perceptibilidade.

6. RESULTADOS NUMÉRICOS

Simulação

Em cada caso estudaram-se sinais com modulação **senoidal** e **retangular**. A Figura 2 mostra como variam os valores de S_f nos dois métodos. Na Figura 2.a) a modulação é senoidal e na figura 2.b) é retangular. Em ambos os casos a portadora é de 50Hz.

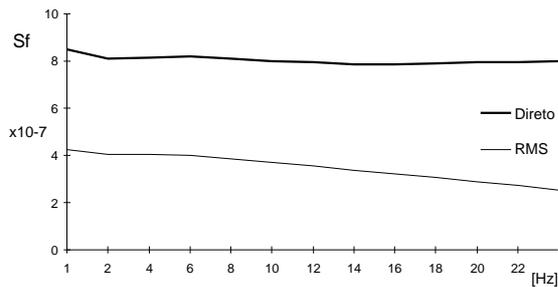


Figura 2.a) Sf para limiar de percepção com modulante senoidal

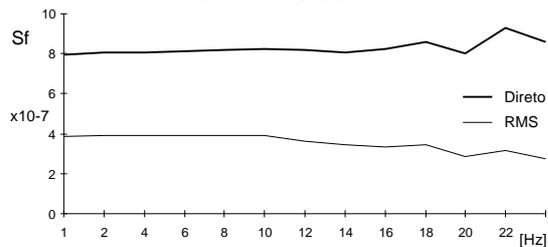


Figura 2.b) Sf para limiar de percepção com modulante retangular

Como o método direto calcula as variações em termos da diferença entre valores máximo e mínimo da tensão e o método RMS obtém as variações em termos dos valores eficazes, a relação entre os valores quadráticos médios (S_f) dos dois métodos deveria ser constante e igual a 2. No entanto, as curvas da Figura 2 mostram dois tipos de discrepâncias:

- i - a relação, que deveria ser 2, aumenta com a frequência da modulante;
- ii - para modulação retangular o nível de Sf oscila acima de 15Hz;

As discrepâncias observadas podem ser explicadas da seguinte forma:

- i - A relação entre as curvas não se mantém constante porque o efeito da média de meio ciclo imposto pelo cálculo do valor RMS tende a atenuar o efeito de variação da modulante à medida que cresce a frequência de modulação.
- ii - Para explicar as oscilações de Sf observadas para modulação retangular, é preciso lembrar que o espectro da onda quadrada contém componentes harmônicas ímpares. O processo de demodulação por quadrado do sinal introduz frequências do tipo:

$$k \cdot f_m \text{ e } (2f_p \pm k \cdot f_m)$$

onde: $k=1,2,3\dots$ ordem das harmônicas;

f_p = frequência da portadora;

f_m = frequência da modulante.

Se f_m for submúltiplo inteiro de f_p , então as componentes do tipo $(2f_p \pm k \cdot f_m)$ coincidem com as componentes $k \cdot f_m$.

Se f_m não for submúltiplo inteiro de f_p , então serão introduzidas novas componentes não múltiplas inteiras de f_m .

Para ilustrar essas duas condições, foram simuladas ondas com $f_p=50\text{Hz}$ e modulantes retangulares $f_m=20\text{Hz}$ e $f_m=22\text{Hz}$. Os espectros dos sinais quadráticos são mostrados nas Figuras 3.a) e b), respectivamente. Notar que são introduzidas diversas componentes na faixa de sensibilidade do flicker (0-30Hz). Devido às diferentes ponderações dessas frequências no cálculo de Sf, resultam valores distintos, dependendo da combinação das frequências introduzidas, o que explica as oscilações observadas sob modulação retangular.

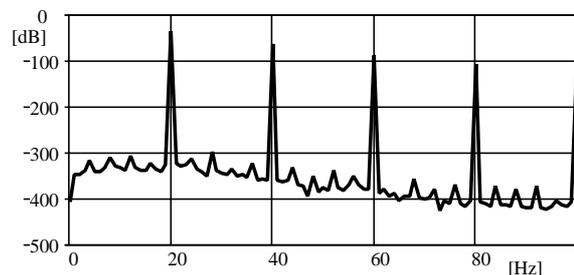


Figura 3.a) Espectro do sinal quadrático para modulante retangular de 20Hz.

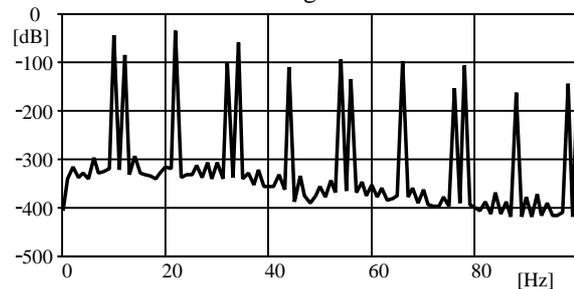


Figura 3.b) Espectro do sinal quadrático para modulante retangular de 22Hz.

Valores medidos

Utilizando medidor de flicker e fonte de sinais programável, foram obtidos os valores de Sf correspondentes ao limiar de percepção, utilizando o método direto de análise. Os valores medidos para $f_p=60\text{Hz}$ estão mostrados na Figura 4.

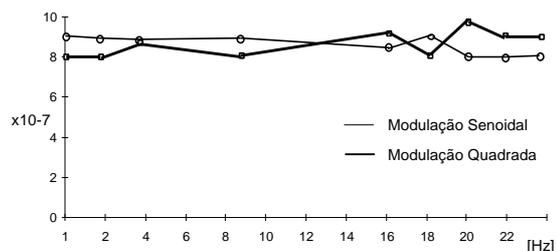


Figura 4. Valores de Sf medidos pelo método direto.

Efeito da frequência da onda portadora

Para verificar o efeito da frequência da portadora sobre o valor de Sf, foram realizados testes com diferentes frequências modulantes com amplitudes que correspondem ao limiar de percepção, porém considerando portadora de 50Hz e 60Hz. A Tabela I mostra os valores medidos em pu, tomando como base o valor de $S_f=8 \times 10^{-7}$, que resulta para modulante senoidal de 9Hz, com amplitude de variação $\Delta V=0.25\%$. Observa-se que em 50Hz os valores de Sf são em média 8% maiores que em 60 Hz. Isto sugere que a metodologia da IEC

Tabela I - Níveis de Sf para portadora de 50 e 60Hz

Portadora Modulante	50Hz	60Hz	Dif. %
4Hz	1,13	1,07	5,3
9Hz	1,13	1,02	9,7
14Hz	1,07	1,02	4,7
18Hz	1,04	0,92	11,5

para avaliação da cintilação é sensível à frequência da portadora. Este resultado novamente reflete o efeito dos diferentes componentes que são introduzidos quando fm não é submúltipla inteira de 2fp. Como estamos usando diferentes valores para fp (50 e 60 Hz), as componentes introduzidos nos dois casos são distintos, o que explica a variação dos níveis de Sf obtidos. O fato dos valores para 50Hz serem em média 8% maiores que os de 60Hz se deve à diferença de atenuação que o filtro de ponderação introduz às frequências acima de 30 Hz.

Efeito da fase relativa entre portadora e modulante.

Para verificar o efeito da fase relativa entre portadora e modulante sobre o valor de Sf, as condições de teste anteriores foram repetidas considerando a fase inicial de 0 e 90° na portadora. Neste caso também foi usada modulação retangular, para ressaltar a descontinuidade de amplitude imposta pela modulante. A Tabela II mostra os valores resultantes para Sf em pu.

Tabela II - Níveis de Sf para fases distintas entre portadora e modulante.

Modulante	Fase 0°	Fase 90°	Dif. %
4Hz	1,07	0,93	9,3
9Hz	1,02	0,93	9,0
14Hz	1,02	0,96	6,0
18Hz	0,92	0,96	4,3

O que se observa da Tabela II é que a diferença decresce com o aumento da frequência modulante. A razão disso é que o valor quadrático da onda modulada apresenta diferentes amplitudes

ao longo de um ciclo da modulante, diferenças essas que tendem a desaparecer devido ao filtro de média de 300ms que simula a resposta do olho. Na prática, como a medida de PST é realizada para intervalos de 10 minutos, o efeito da fase relativa é estatisticamente eliminado, mesmo para frequências modulantes muito baixas.

7. CONCLUSÕES

1. Os métodos de processamento direto e de valores RMS não produzem os mesmos resultados, uma vez que Sf varia diferentemente nos dois métodos.
2. Os dois métodos sofrem de oscilações de valores de Sf para frequências modulantes superiores a 15Hz, devido ao processo de demodulação quadrática utilizado. Esse é um problema inerente à metodologia recomendada pela CIE.
3. Considerando que o valor de Sf correspondente ao limiar de percepção deve resultar constante sobre toda a faixa de frequências para os dois tipos de modulação (senoidal e retangular), o método direto se mostra mais confiável.
4. Os valores de Sf medidos apresentam erros aceitáveis em relação aos valores calculados e, portanto, satisfazem às especificações da CIE.
5. A frequência da portadora (50 ou 60Hz) acarreta uma pequena diferença no valor de Sf, sendo que o método da CIE indica da ordem de 8% mais flicker em 50Hz do que em 60Hz.
6. A fase relativa entre a onda modulante e a portadora praticamente não afeta a medida final de flicker.

Agradecimento

O presente trabalho contou com o apoio financeiro da FAPESP, pelo qual os autores desejam expressar o seu reconhecimento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 868: "Flickermeter - Functional and Design Specifications". International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77, 1986.
- [2] IEC 533-3: "Disturbances in Supply Systems caused by Household Appliances and Similar Electrical Equipment". Part 3 - Voltage Fluctuations. International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77, 1982.
- [3] IEC 1000-3-3: "Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 3 Limits Section 3 Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage supply systems for equipment with rated current $\leq 16A$." 1994.
- [4] Neri, G., Cain, G.D., Salmon, T., Yardim, A. "A Microprocessor-Based Digital Flickermeter".

- IEEE Trans. on Instrum. and Measurement, Vol. 46, No. 6, Dec. 1991.
- [5] Deckmann, S., Rocha, J.P.S. "Manual do Analisador Trifásico de Flutuações de Tensão". Relatório final de Conv. Eletropaulo-Unicamp. Jun. 1996.
 - [6] Sakulin, M., Renner H., Bergeron, R. "UIE/IEC flickermeter for 120V incandescent lamps". 4th Intern. Conf. On Power Quality, PQA95, New York, 1995.
 - [7] Deckmann, S., de Sousa, J.P., Junqueira, F. "Analisador Trifásico de Flutuações de Tensão". Manual do medidor de flicker. Jun. 1996.