

FLICKER PRODUZIDO POR MODULAÇÃO DE HARMÔNICAS

J.A.Pomilio S.M.Deckmann
UNICAMP/FEEC/DSCE C.P. 6101
13081-970 Campinas, SP.
Fax: 019-2391395

Resumo - O presente trabalho tem como principais objetivos: i) analisar se a modulação de harmônicos de tensão, presentes em níveis aceitáveis segundo as normas atuais, pode provocar efeitos perceptíveis de cintilação luminosa e ii) verificar se a metodologia recomendada para medir o nível de cintilação é capaz de quantificar esse fenômeno se for provocado pela modulação das harmônicas de tensão da rede. Ensaios de laboratório foram realizados visando confrontar com os resultados obtidos por simulação computacional.

Palavras Chave - Modulação Harmônica, Flicker, Limites Harmônicos.

Abstract - The main objectives of this paper are twofold: i) analyse if the system voltage harmonics modulation is capable of producing visible flicker even considering acceptable harmonic levels according to actual standards, and ii) verify if the methodology recommended for flicker analysis is able to provide the correct measurement of the phenomenon produced by harmonic modulation. Laboratory tests were performed in order to confirm the results obtained by computer simulation.

Keywords - Harmonic Modulation, Flicker, Harmonic Limits.

1. INTRODUÇÃO

O fenômeno de cintilação luminosa, ou efeito flicker, vem sendo estudado há muitos anos. Através desses estudos somos informados das principais causas e conseqüências desse tipo de distúrbio da tensão de alimentação sobre as lâmpadas elétricas. Entre as causas do fenômeno são citadas cargas com ciclo variável, cuja frequência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30Hz [6]. Nessa faixa de frequências o olho humano é extremamente sensível às variações da emissão luminosa de lâmpadas incandescentes, sendo que a máxima sensibilidade do olho é em torno de 9Hz. Por ser um fenômeno normalmente associável com o ciclo das cargas assume-se, como regra, que a causa primária do fenômeno é a variação da corrente dessas cargas, que modula a tensão da rede, afetando assim as lâmpadas.

No entanto, como a variação da potência elétrica associada ao fenômeno de cintilação é bastante baixa (da ordem de 0,3% da potência nominal da lâmpada) pode-se suspeitar que o efeito de cintilação também possa ser provocado pela simples variação do conteúdo harmônico de uma carga não-linear. Neste caso, o fenômeno ocorreria mesmo sendo a tensão fundamental constante. Esse é o tema abordado pelo presente artigo.

2. NORMAS ATUAIS

No Brasil as recomendações relativas aos limites harmônicos de tensão e corrente em sistemas elétricos, seguem basicamente a norma americana IEEE-Std. 519 [1], enquanto que os limites de emissão de correntes harmônicas por equipamento, procuram seguir a recomendação da Comissão Internacional de Eletrotécnica IEC-1000-3-2 [2].

O fenômeno de flicker, por sua vez, é tratado pela IEC-1000-3-3 [5] de 1994, que substitui a IEC-555-3 [3] de 1982. A metodologia de medição e especificação do medidor são descritas na IEC-868 de 1986 [4].

Essas normas atualmente estão sendo rediscutidas para se adequarem às condições mais exigentes requeridas pelas novas tecnologias de chaveamento eletrônico. É oportuno, portanto, que se discuta o problema, chamando a atenção para os efeitos da modulação harmônica em baixa frequência e seu eventual impacto em cargas sensíveis ao fenômeno de flicker.

Neste artigo pretende-se mostrar que mesmo atendendo às normas específicas atuais para níveis médios de conteúdo harmônico, existe a possibilidade de violação do limite de flicker causado pela variação da amplitude das harmônicas

produzidas pelo ciclo de trabalho da carga que gera essas harmônicas.

Por exemplo, se o nível médio de uma harmônica de tensão for da ordem de 4% da fundamental e a modulação do conteúdo harmônico ocorrer na faixa de maior sensibilidade visual do fenômeno (em torno de 9Hz) pode-se mostrar que é atingido o nível de percepção de flicker. Uma vez que essa situação não é nada incomum em sistemas que alimentam cargas industriais com ciclo de trabalho variável deve-se estar atento a esse problema.

3. ESTUDOS REALIZADOS

O estudo visou analisar dois aspectos associados ao problema da modulação harmônica:

- i - verificar se a metodologia recomendada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica para medição de flicker através da norma IEC-868, é capaz de representar corretamente esse efeito causado pela modulação harmônica.
- ii - se os limites atuais para os harmônicos de tensão na rede, previstos pela recomendação IEEE Std. 519, estão adequados do ponto de vista do efeito flicker produzido pela modulação harmônica.

Casos estudados

Para realizar esse estudo utilizou-se inicialmente a simulação computacional de sinais característicos, calculando os valores de flicker produzidos pela modulação das componentes harmônicas. O algoritmo para o cálculo do nível de flicker produzido baseia-se na metodologia recomendada em [4], e foi implementada através de simulação numérica [8]. Partindo de um sinal de tensão CA com conteúdo harmônico conhecido, verificou-se qual o efeito de cintilação que é produzido nas seguintes situações:

- Caso 1** - sinal com 3% de quinta harmônica, modulada em 100%, na frequência de 9Hz;
- Caso 2** - sinal com 3% de quinta e sétima harmônicas, moduladas em 100%, na frequência de 9Hz;
- Caso 3** - sinal com 2,9% de quinta, sétima e décima primeira harmônicas, todas moduladas com 100% em 9Hz.

Notar que 100% de modulação harmônica com 9Hz significa que as harmônicas aparecem e somem completamente nove vezes por segundo. Nos três casos considerados atende-se aos limites da recomendação IEEE 519, pois a distorção média total está dentro do limite de 5% e o nível médio individual limitado em 3%.

Para exemplificar, a equação (1) apresenta o sinal correspondente ao Caso 2.

$$v_2(t) = I \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + [0.03 \cdot \sin(\omega_5 \cdot t) + 0.03 \cdot \sin(\omega_7 \cdot t)] \cdot [1 + I \cdot \sin(\omega_m \cdot t)] \quad (1)$$

onde:

- ω_1 = frequência da fundamental (60Hz);
- ω_5, ω_7 = quinta e sétima harmônicas (300 e 420Hz);
- ω_m = frequência da modulante das harmônicas (9Hz).

A Figura 1 mostra a forma de onda do sinal para o Caso 2 juntamente com o espectro do sinal (1) e do sinal quadrático, tornando visível a ocorrência de flicker na faixa (0-30Hz).

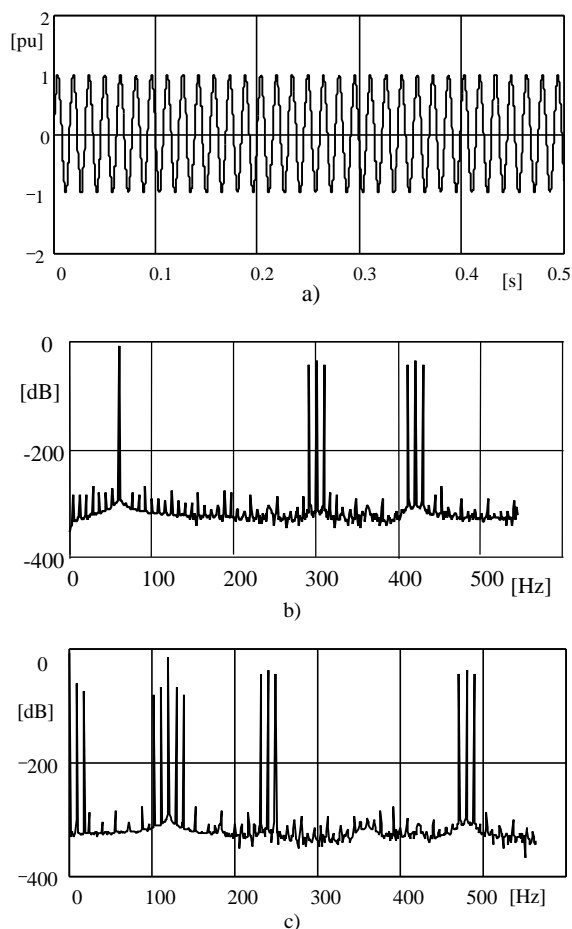


Figura. 1. a) sinal com harmônicas moduladas, b) o espectro do sinal de tensão, c) o espectro do sinal quadrático.

A Figura 1.b) mostra que o sinal de tensão apresenta a fundamental (60Hz) e as harmônicas quinta (300Hz) e sétima (420Hz). As duas varetas laterais às componentes de 300 e 420Hz representam a modulação dessas harmônicas com frequência de 9Hz.

A Figura 1.c) mostra o que acontece com o espectro quando se faz o quadrado do sinal para

obter a demodulação. De fato, pode-se observar o aparecimento de varetas em 9Hz e 18Hz. Essas componentes de baixa frequência é que são responsáveis pelo efeito flicker. No entanto, a amplitude da componente na dupla frequência modulante (18Hz) é pequena e sua contribuição se torna desprezível frente à componente modulante principal (9Hz).

Grandeza quantificada

Após a demodulação, o sinal passa por um filtro passa-baixas para eliminação de todas as componentes acima da frequência da rede. O sinal restante é então ponderado em frequência pela curva de sensibilidade visual cujo valor quadrático médio produz a "sensação instantânea de flicker S_f ", definida pela norma IEC-868 [4] como sendo:

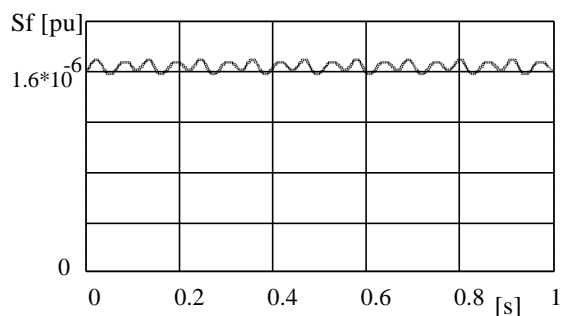
$$S_f = \frac{1}{T} \int^T (a_f \cdot \Delta V_f)^2 \cdot dt \quad (2)$$

onde:

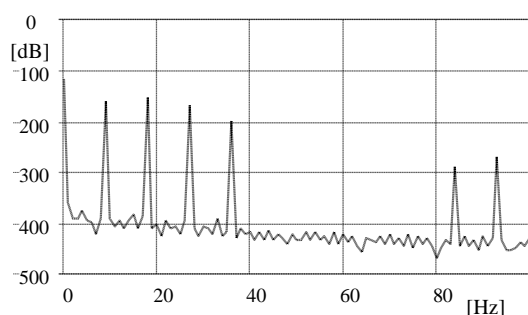
ΔV_f = variação relativa da tensão modulante;

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

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



a)



b)

Figura 2. a) Sinal S_f resultante para o caso 2.
b) Espectro de S_f .

Pelo espectro de S_f na Figura 2.b), nota-se a existência de nível CC e de uma pequena componente em 18Hz predominando, conforme mostrado na Figura 2.a). O sinal S_f foi usado como base para este estudo porque se conhecem os níveis que definem o limiar de percepção visual para cada

frequência na faixa 0-24Hz (Tabelas I e II da Ref. [4]). Para obter S_f é preciso processar o sinal de tensão de acordo com a metodologia descrita pela IEC [3,4] usada em geral para avaliar o efeito flicker decorrente das variações da tensão fundamental da rede. No presente caso, porém, a fundamental não está modulada, mas sim as harmônicas é que estão variando em amplitude. Ao aplicarmos a metodologia da IEC às harmônicas moduladas estaremos verificando se ela é capaz de detectar o efeito em baixa frequência e, além disso, em quais condições o flicker harmônico é capaz de violar o limite de percepção visual.

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para a análise dos resultados deve-se lembrar que o valor $S_f=1$ pu indica que foi atingido o limiar de percepção do fenômeno de flicker. O limite de aceitação previsto pela norma é maior e corresponde a um nível de S_f da ordem de 2pu [5]. A metodologia IEC aplicada aos Casos 1, 2 e 3 forneceu os seguintes resultados numéricos:

Tabela I - Resultados da simulação

Modulação	Senoidal	Quadrada
Caso 1	$S_f = 0,52$ pu	$S_f = 0,84$ pu
Caso 2	$S_f = 2,10$ pu	$S_f = 3,36$ pu
Caso 3	$S_f = 4,11$ pu	$S_f = 6,58$ pu

Conforme era esperado, o nível de flicker produzido pela modulação quadrada é maior (62%) que o da modulação senoidal de mesma amplitude. A surpresa é que basta ocorrer a modulação de duas harmônicas para que o limiar de percepção ($S_f=1$ pu) seja ultrapassado.

Observa-se também que o nível de flicker cresce de forma não-linear com o número de harmônicos modulados. Isto se deve à combinação quadrática dos efeitos modulantes de cada harmônica:

$$S_{fT} = \sum_{h=1}^n S_h = \frac{1}{T} \int^T \left(a_f \cdot \sum_{h=1}^n \Delta V_h \right)^2 \cdot dt \quad (3)$$

No caso de modulações iguais, o nível de flicker cresce com o quadrado do número do número de harmônicos modulados, uma vez que:

$$\sum_{h=1}^n \Delta V_h = n \cdot \Delta V \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3) obtemos a relação esperada:

$$S_{fT} = \frac{1}{T} \int^T (a_f \cdot n \cdot \Delta V)^2 \cdot dt = n^2 \cdot S_h \quad (5)$$

5. TESTE DE LABORATÓRIO

Para confirmar as conclusões obtidas por simulação, foi realizado um teste no laboratório gerando-se os sinais harmônicos, definidos anteriormente nos casos 1, 2 e 3 através de um gerador programável de sinais. O nível de flicker foi medido através de analisador digital [7], ligado aos terminais do gerador e observado através de um osciloscópio. As Figuras 3.a) e b) mostram os sinais e os respectivos espectros obtidos através do osciloscópio, correspondentes aos casos em que apenas os harmônicos 7^o e 11^o são modulados respectivamente por onda senoidal e quadrada de 9Hz.

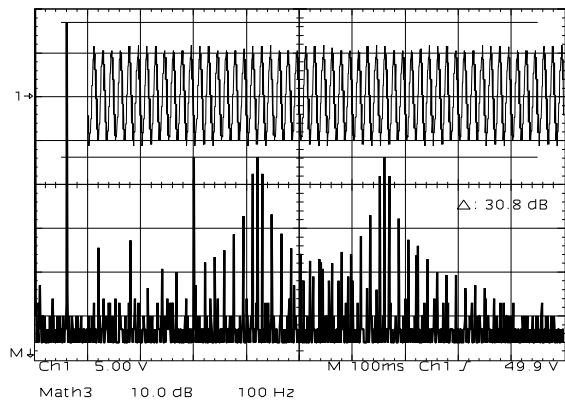
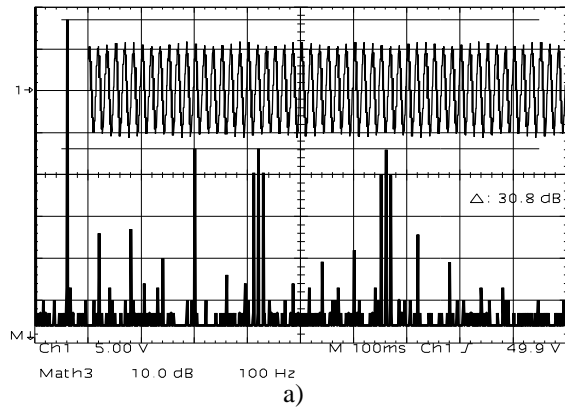


Figura 3. a) Modulação harmônica senoidal;
b) Modulação harmônica quadrada.

A Tabela II apresenta os níveis de flicker obtidos com o medidor de flicker. O instrumento, calibrado segundo a norma IEC, calcula o valor de PST (short-term probability) em cada um dos casos. O valor de PST é dado pela expressão:

$$PST = \sqrt{0.0314P_{50} + 0.0525P_{10} + 0.0657P_3 + 0.28P_1 + 0.08P_{0.1}} \quad (6)$$

onde os valores de Pi indicam os níveis de Sf que foram violados durante i % do tempo. No caso de

flicker constante todos os valores de Pi coincidem com o próprio valor de Sf. Nessas condições do ensaio podemos escrever que:

$$PST \cong \sqrt{(0.0314 + 0.0525 + 0.0657 + 0.28 + 0.08) \cdot S_f} \quad (7)$$

ou seja,

$$PST \cong 0.714 \sqrt{S_f} \quad (8)$$

A equação (8) nos permite relacionar diretamente os valores de PST medidos com os níveis correspondentes de Sf do sinal. A Tabela II apresenta os valores esperados de PST de acordo com a equação (8) aplicada aos valores da Tabela I. Os valores da Tabela III foram medidos no laboratório considerando sinais sintetizados conforme os Casos 1, 2 e 3 do Item 3.

Tabela II - Valores de PST esperados.

Modulação	Senoidal	Quadrada
	PST	PST
Caso 1	0.52 pu	0.65 pu
Caso 2	1.03 pu	1.31 pu
Caso 3	1.45 pu	1.83 pu

Tabela III - Valores de PST medidos.

Modulação	Senoidal	Quadrada
	PST	PST
Caso 1	0.56 pu	0.73 pu
Caso 2	1.07 pu	1.40 pu
Caso 3	1.47 pu	1.86 pu

Como se pode observar, os valores medidos são próximos dos esperados, com discrepância máxima de 12% e média de 5.6%. A explicação para esses erros está no ruído superposto ao sinal gerado e que pode ser notado no espectro mostrado na Figura 3. Cabe lembrar que estamos trabalhando com componentes harmônicas de apenas 3% da amplitude da fundamental.

6. CONCLUSÕES

As conclusões do trabalho podem ser resumidas da seguinte forma:

- Através de simulação digital constatou-se que a modulação de componentes harmônicas pode provocar o fenômeno de cintilação ou flicker, mesmo estando o conteúdo harmônico médio dentro da norma específica para harmônicas.

- Observou-se ainda que ocorre um aumento de S_f proporcional ao quadrado do número de harmônicas igualmente moduladas. Essa combinação multiplicativa da cintilação pode acontecer na prática com cargas não-lineares variáveis, tais como fornos a arco ou conversores eletrônicos que produzem diversas harmônicas com amplitude variável.
- A ocorrência do efeito de cintilação foi confirmado através de medições diretas, usando um flickermetro nos ensaios de laboratório.
- A metodologia atual para medição de flicker se mostrou capaz de quantificar o efeito de flicker produzido pela modulação harmônica. No caso de processamento digital direto do sinal de tensão, no entanto, deve-se ter o cuidado de utilizar uma frequência de amostragem suficientemente alta para que o filtro anti-aliasing não atenuasse as harmônicas moduladas.

Em função dos resultados obtidos por simulação computacional, confirmados experimentalmente, conclui-se que as normas atuais deveriam incluir restrições quanto à modulação harmônica, especialmente quando a faixa das frequências modulantes corresponde à região de maior percepção do fenômeno de flicker, ou seja, na faixa entre 3 e 15Hz.

Agradecimento

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

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE - Std 519 - "Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters". Ed. 1981.
- [2] IEC 1000-3-2 "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3 Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16A$)". International Electrotechnical Commission, 1995.
- [3] IEC 555-3: "Disturbances in Supply Systems caused by Household Appliances and Similar Electrical Equipment". Part 3 - Voltage Fluctuations. International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77, Ed. 1982.
- [4] IEC 868: "Flickermeter - Functional and Design Specifications". International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77, Ed. 1986.
- [5] 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 $\leq 16A$." Ed. 1994.
- [6] Tang, L. et al. "Analysis of DC Arc Furnace Operation and Flicker caused by 187 Hz Voltage Distortion". IEEE-93 SM - Vancouver, Can., Jul. 1993.
- [7] Deckmann, S., de Sousa, J.P., Junqueira, F. "Analisador Trifásico de Flutuações de Tensão". Manual do medidor de flicker. Jun. 1996.
- [8] Deckmann, S., Pomilio, J.A. "Medição de Flicker: Processamento Direto e Análise RMS". SBQEE'97. Itajubá, Nov. 1997.