

#### 4. Flutuações de tensão e o efeito da cintilação luminosa

A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão.

Para uma carga que varie ciclicamente, as variações da corrente podem provocar uma alteração periódica na tensão no ponto de conexão. Um exemplo típico é um compressor de ar. Tal variação de tensão pode afetar o comportamento de outras cargas, especialmente as mais sensíveis ao valor eficaz da tensão de alimentação, como ventiladores e lâmpadas incandescentes. Outros exemplos de cargas variáveis que costumam provocar o efeito são: aquecedores e fornos elétricos com controle automático de temperatura, aparelhos de solda elétrica, prensas e estamparias, elevadores, bombas, fornos a arco, laminadores siderúrgicos, etc.

As características do fenômeno, bem como limites e procedimentos de medição são estabelecidos em normas como IEC 61000-3-3 <sup>[1]</sup> IEC 61000-3-11 <sup>[2]</sup> e IEC 61000-3-5 <sup>[3]</sup>. A origem destas normas vem da importância do chamado efeito *flicker* (especialmente antes do advento das luminárias com reator eletrônico – lâmpadas fluorescentes e LED). As normas citadas apresentam diversas maneiras de estimar ou medir as flutuações de tensão resultantes do comportamento intermitente dos equipamentos.

A despeito de o fenômeno de flutuação luminosa estar historicamente ao desconforto causado pela variação de luminosidade de uma lâmpada, sua ocorrência pode afetar outros aparatos, especialmente os mais sensíveis ao valor eficaz da tensão. No entanto, todo desenvolvimento normativo ainda se encontra atrelado ao efeito luminoso, mesmo que as próprias lâmpadas incandescentes tenham sido banidas do uso comercial.

Observe-se que, como comentado em capítulo anterior, a IEC preocupa-se com a regulamentação de cargas individuais, procedimento que não é o que orienta as normas norte-americanas.

Os limites dependem da incidência de eventos e de sua severidade, como indica a figura 4.1. No eixo horizontal a grandeza é “número de alterações no valor da tensão por minuto”. Assim, um fenômeno que ocorra em 10 Hz, representa 1200 variações por minuto, pois se considera o aumento e a diminuição no valor como dois eventos distintos.

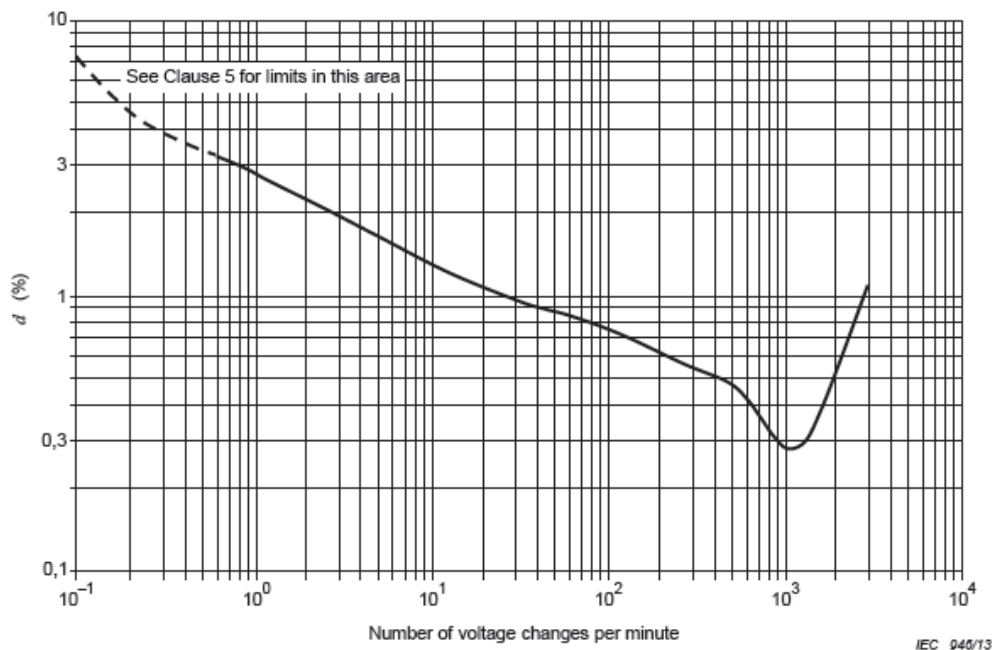


Figura 4.1 Limites de flutuação de tensão em função da quantidade de ocorrências.

A variação relativa de tensão,  $d$  (%) é calculada a partir do valor da variação da tensão eficaz (valor fase-neutro, calculado em meio ciclo da rede) em relação ao valor de regime atual da rede  $U_n$ :

$$d = \frac{\Delta U_{hp}}{U_n} \quad (4.1)$$

Para os aparelhos que se enquadram na IEC 61000-3-3 ou na IEC 61000-3-11 (corrente menor que 16 A e corrente menor que 75 A, respectivamente) o teste é feito em um alimentador que apresenta uma impedância de acordo com o mostrado na figura abaixo, verificando-se o impacto nos pontos de conexão do EUT (Equipment Under Test). A norma define procedimentos para aparelhos como fornos, aquecedores de diferentes tipos, luminárias de alta potência, máquinas de lavar, secadoras, aspiradores de pó, máquinas copiadoras, máquinas de solda, etc.

Conhecido o comportamento da corrente do EUT, é possível calcular a variação esperada de tensão, determinando o valor de  $d$  e, dada a periodicidade de variações, verificar analiticamente a conformidade com os limites da figura 4.1.

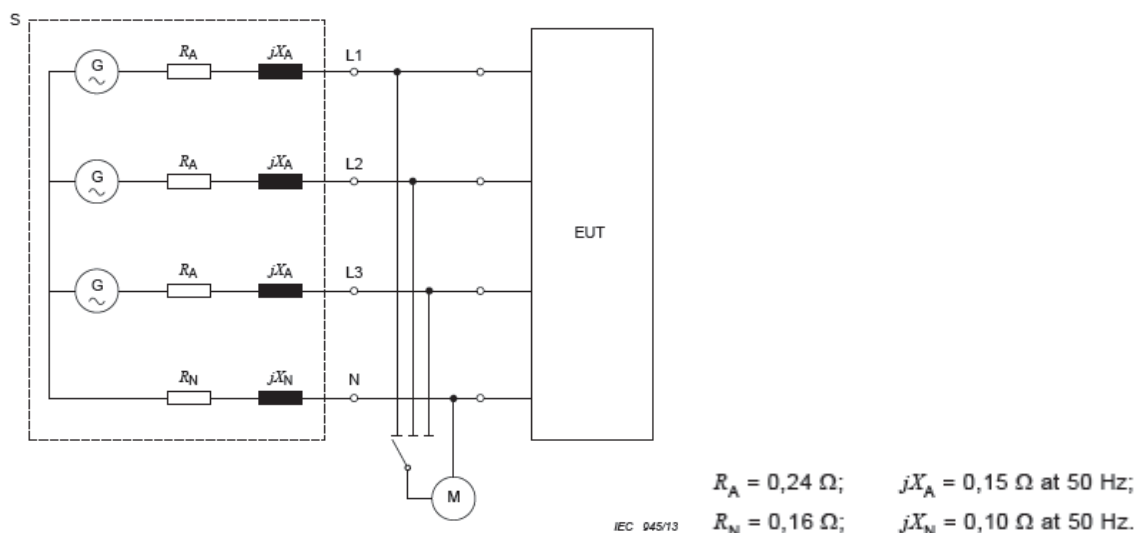


Figura 4.2 Rede de referência para testes de flutuação de tensão.

#### 4.1. Cintilação luminosa ou efeito “flicker”

O fenômeno designado por cintilação luminosa, em inglês “flicker” ou “lamp flicker” se refere à percepção, pelo olho humano, das variações luminosas provocadas pela flutuação da tensão de alimentação. Testes com observadores, realizados nos Estados Unidos, na Inglaterra e na França, demonstraram que a sensibilidade do olho humano às variações luminosas se restringe à faixa de frequências entre 0 e 30 Hz. Mesmo nessa faixa, a sensibilidade não é uniforme, sendo máxima em torno de 8,8 Hz, caso a fonte luminosa seja uma lâmpada incandescente de filamento. O fenômeno, no entanto, também pode ser observado, embora de modo atenuado, com outros tipos de dispositivos de iluminação. A unidade para a sensação de cintilação instantânea é definida de tal forma que um valor unitário corresponde ao limite de percepção para 50% da população.

A maioria das pessoas já experimentou a sensação de variação da intensidade de iluminação das lâmpadas incandescentes quando outras cargas ligadas ao mesmo circuito de alimentação variam repentinamente a corrente consumida. Em ambientes domésticos, aquecedores, condicionadores de ar, fornos de micro-ondas são exemplos de equipamentos que podem gerar flicker observável. Uma descrição mais precisa de flicker é encontrada na (IEC) EN 61000-3-3 que define como “a gravidade subjetiva da cintilação imposta à luz produzida por lâmpadas incandescentes de 230 V, 60 W pelas flutuações da tensão de alimentação.” Flicker é definido em termos de comportamento de lâmpada incandescente por causa do uso comum de tal tipo de dispositivo até recentemente (em torno de 2015).

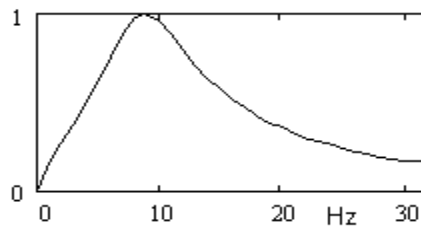


Figura 4.3 Sensibilidade relativa do olho humano às variações luminosas

**Efeitos provocados pela cintilação luminosa**

Apesar de se tratar aparentemente de um mero problema de desconforto visual, já ficou demonstrado que esse efeito pode atingir o sistema nervoso central e provocar disfunções neurológicas em observadores submetidos ao processo.

Para o observador comum, as variações luminosas podem causar dificuldades para leitura, incômodo visual, dor de cabeça, cansaço visual, estresse mental, perda de concentração, etc. Isso significa que as pessoas podem ser mais ou menos afetadas por esses efeitos, mas de qualquer modo a sua capacidade produtiva física ou intelectual fica prejudicada.

**Causas do efeito flicker**

O problema fica mais evidente quando se constata que o olho é capaz de perceber a variação luminosa da lâmpada submetida a uma alteração brusca de apenas 0,2 % da tensão nominal. Para que esta percepção se transforme em incômodo é preciso aumentar a intensidade da variação ou repetir essa variação na faixa de frequências de maior sensibilidade.

**4.2. Medição do efeito flicker**

A atual norma da Comissão Internacional de Eletrotécnica IEC - 61000-3, com origem na antiga IEC-555-3 [4] trata da avaliação das flutuações e, em particular do efeito de cintilação, estabelecendo curvas limite para o nível de flicker, como mostra a figura 4.4.

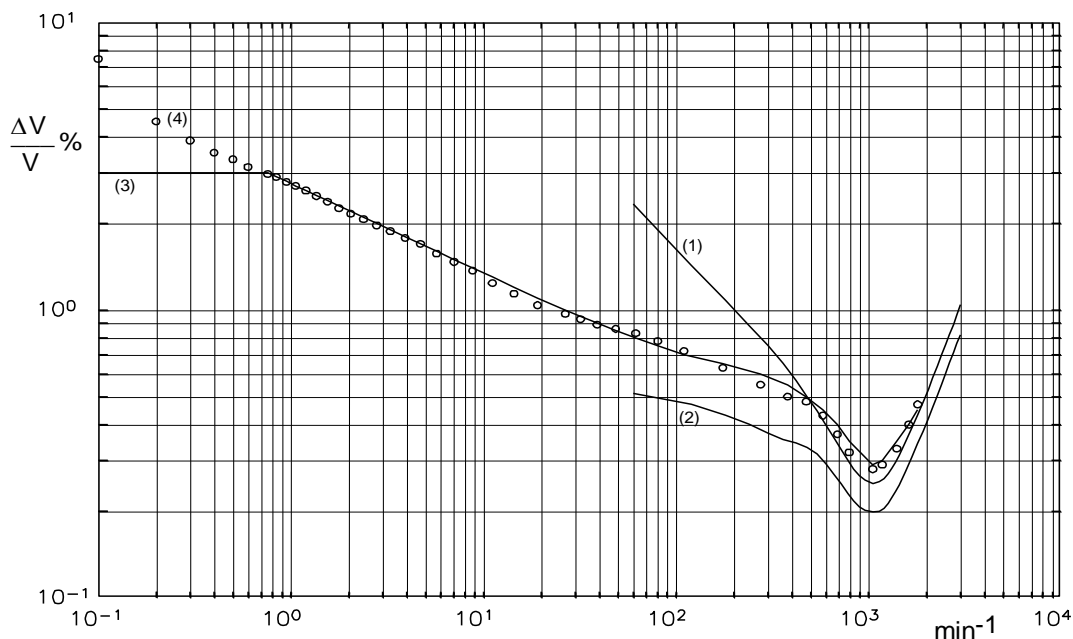


Figura 4.4. Curva 1 - Limiar de percepção visual para modulação senoidal;  
 Curva 2 - Limiar de percepção visual para modulação quadrada;  
 Curva 3 - Limite aceitável segundo a IEC;  
 Curva 4 - Valores resultantes pelo método proposto pela IEC.

Para avaliar os níveis de *flicker* existe uma metodologia específica de processamento da tensão, que originalmente foi proposta pela UIE (União Internacional de Eletrotermia) em 1982 <sup>[5]</sup> e aprovada em 1986 pela IEC como Std. 868 <sup>[6]</sup>, e atualmente IEC - 61000-4-15 <sup>[7]</sup>. A Figura 4.5 mostra o processamento do sinal de tensão necessário para extrair o nível de *flicker* provocado pelas variações da amplitude sobre o sistema de iluminação.

Existem equipamentos de medição pioneiros no Brasil, desenvolvidos na Unicamp, baseados nessa metodologia <sup>[8,9]</sup>.

#### 4.2.1 Descrição detalhada do Medidor de *Flicker*

A Figura 4.5 mostra um diagrama de blocos para o medido de *flicker*, conforme definido na IEC 868 e na IEC 61000-4-15. Nas seções que seguem, cada bloco será descrito em detalhes no que diz respeito tanto às funções de processamento do sinal fornecido pelo bloco, bem como de sua relação com os fenômenos fisiológicos correspondentes. Como a resposta espectral de alguns blocos proporciona uma maior compreensão de sua função, os comportamentos desses blocos no domínio da frequência são incluídos.

##### **Bloco 1 - Adaptador de tensão de entrada.**

A principal função do adaptador de tensão de entrada é fornecer uma tensão RMS normalizada para a entrada do bloco 2. Um controle automático de ganho (AGC), com uma característica de resposta ao degrau de 10 a 90 % em um minuto, fornece a funcionalidade necessária. De uma perspectiva de resposta de frequência, a constante de tempo especificada corresponde a um filtro passa-alta de primeira ordem, com frequência de corte de 5,83 mHz. Flutuações de tensão em frequência mais elevada passam pelo AGC sem atenuação, mas componentes de muito baixa frequência são removidos.

Do ponto de vista fisiológico, o circuito de AGC imita uma característica bem conhecida da percepção humana, em que estímulos constantes aos sentidos (no caso a visão), de nível moderado, gradualmente se tornam imperceptíveis.

O Bloco 1 também inclui uma entrada para um sinal de calibração. Esta função é adequada para garantir a precisão da calibração dos instrumentos mais antigos, de tipo analógico, descritos na norma IEC 61000-4-15. É menos necessária nos instrumentos digitais, pois é fácil de assegurar suficiente estabilidade de calibração.

Estritamente falando, o transformador de entrada mostrado antes do Bloco 1 não faz parte do mesmo. Sua função é adaptar o circuito de entrada do instrumento ao nível nominal do sinal medido. Instrumentos modernos podem diferir ligeiramente deste esquema em virtude de utilizarem, por exemplo, amplificadores diferenciais de ganho variável, ao invés de transformadores.

A saída do Bloco 1 é aplicada à entrada do bloco 2. Também pode ser aplicado a um circuito opcional de medição/indicação da tensão eficaz, que pode servir para analisar mudança de tensão ao longo do tempo. Tal facilidade pode servir para alguns testes previstos na EN 61000-3-3. A medição RMS é normalmente incluída no medidor de *flicker* de acordo com a UIE, mas não é utilizada para avaliar o valor de *flicker*.

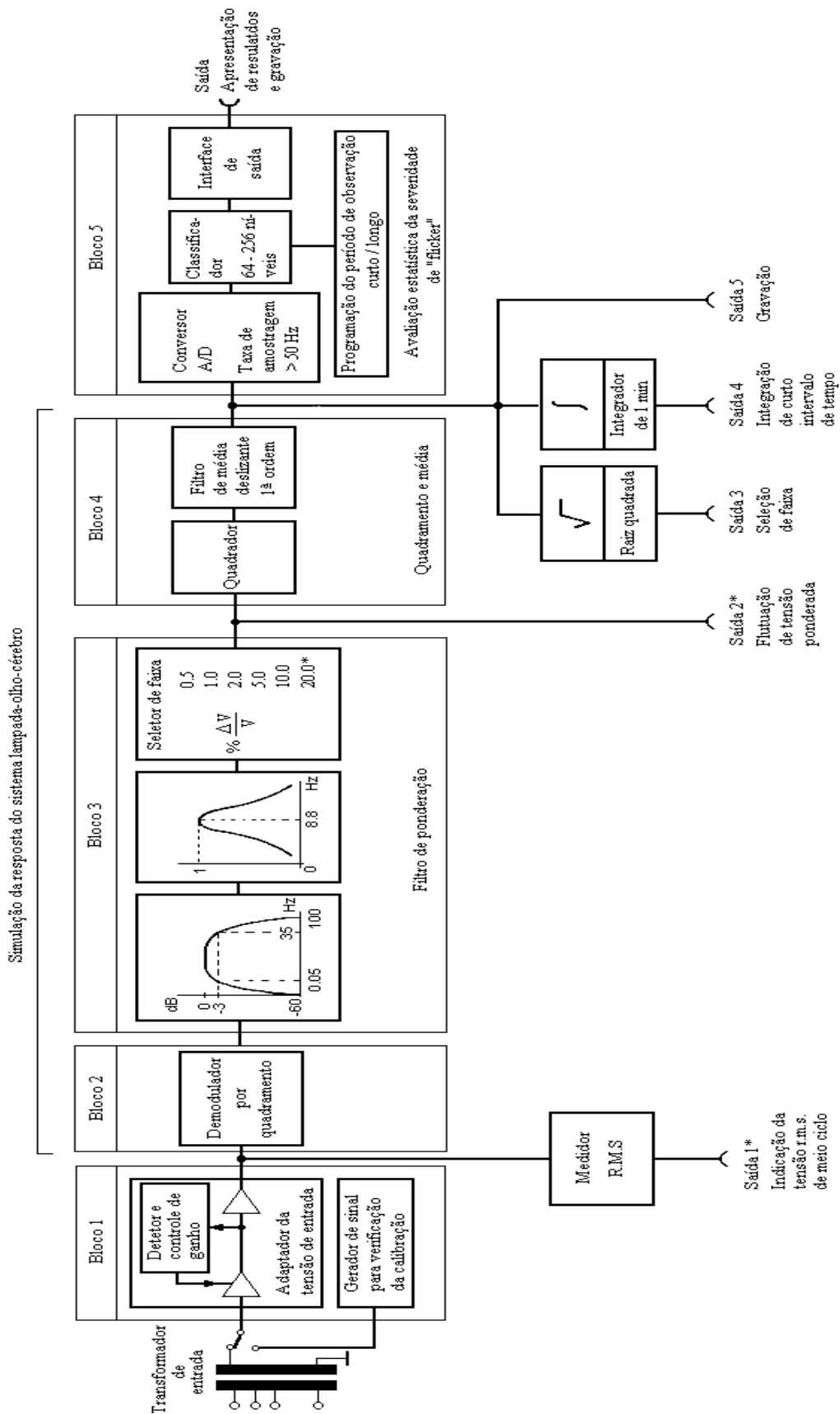


Figura 4.5. Metodologia UIE/IEC para medição de flicker.

## Bloco 2 - Demodulador.

Bloco 2 faz uso de um circuito quadrador (multiplica o sinal por ele mesmo) como demodulador. O objetivo deste bloco é a recuperação do sinal modulante, ou seja, aquele que faz com que a tensão CA altere seu valor eficaz. A ação do quadrador também suprime o sinal da frequência portadora (rede). Operação do Bloco 2 é mais facilmente compreendida no domínio da frequência. A Figura 4.6 mostra o espectro (à direita) de um sinal de tensão de 50 Hz com 1% @ 9 Hz de modulação senoidal de amplitude. O nível equivalente  $\Delta U/U$  é de 2 %. Para fins de ilustração, o sinal de portadora de 50 Hz é mostrado normalizado para 0 dB.

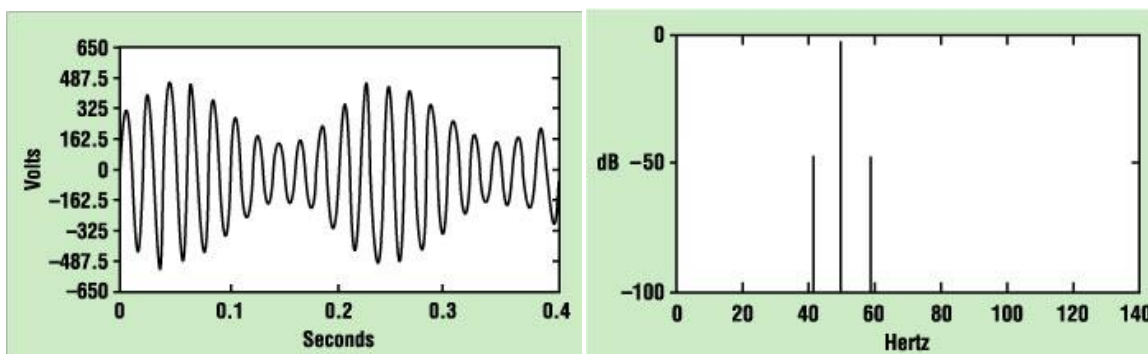


Figura 4.6. Sinal ilustrativo de 50 Hz com 50% de modulação AM (no tempo) e espectro para 1% de modulação AM em 9 Hz.

Deixando de lado a normalização da amplitude da portadora, o sinal mostrado na Figura 4.6 seria a entrada do Bloco 2, assumindo-se uma modulação equivalente de uma tensão invariável da rede. O sinal modulante é visto como um par de bandas laterais deslocadas 9 Hz acima e abaixo da portadora. Tais componentes estão -6 dB em relação ao nível de -40 dB (1%) do sinal modulante.

Aplicando o sinal da Figura 4.6 como entrada, resulta na saída do demodulador mostrada na Figura 4.7. Como é de esperar de uma função não linear, aparecem outras frequências na saída do Bloco 2. A portadora de 50 Hz é duplicada em frequência e aparece em 100 Hz. A frequência modulante é recuperada e aparece em 9 Hz, com -40 dB (ou seja, 1%). Uma significativamente atenuada segunda harmônica do sinal modulante também aparece na saída (em 18 Hz), além de uma componente CC, oculta no eixo esquerdo da figura. Finalmente, outros componentes muito atenuados aparecem em cerca de 100 Hz.

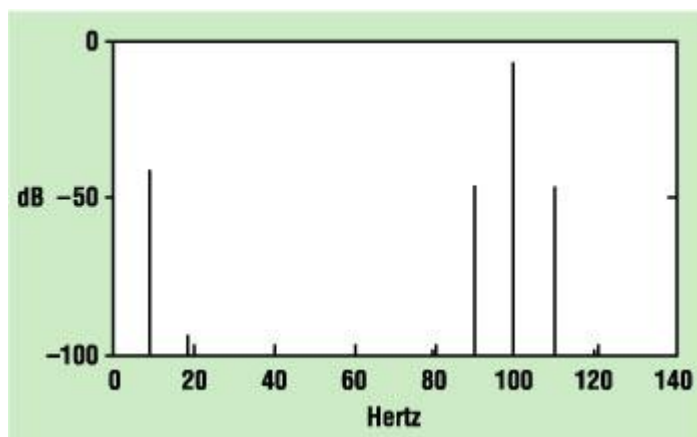


Figura 4.7 Sinal da figura 4.6, demodulado por quadramento.

A saída do Bloco 2 é aplicada à entrada do Bloco 3. A única componente de interesse no Bloco 2 é a correspondente à modulante. A remoção das frequências indesejáveis é executada por meio de filtros no Bloco 3.

### Bloco 3 - Filtros de ponderação.

Bloco 3 inclui três filtros ligados em série e um circuito de escalonamento. Um filtro passa-alta de primeira ordem tem frequência de corte de 0,05 Hz. Há também um filtro de Butterworth, passa-baixa, de sexta ordem, com uma frequência de corte de 35 Hz. Tais filtros atuam, respectivamente, para remover a componente CC e as frequências em torno de 100 Hz.

O terceiro filtro fornece uma resposta passa-banda centrada em 8,8 Hz. O filtro passa-banda apresenta uma função de ponderação muito específica dentro da faixa de frequência de interesse, entre 0,05 Hz e 35 Hz. Seu objetivo é simular uma parte da resposta do sistema filamento-olho-cérebro, para um observador humano típico. O pico da resposta é em 8,8 Hz. O filtro é muito bem especificado por meio de uma equação que determina a função de transferência que deve ser implementada.

A Figura 4.8 mostra a resposta de frequência dos três filtros em série, enquanto a Figura 4.9 mostra a saída do Bloco 3, dada a entrada mostrada na Figura 4.6.

A função de escalonamento mostrada na saída do bloco 3 é necessária em certos instrumentos que usam classificadores estatísticos no Bloco 5, mas geralmente é eliminada se classificadores não-lineares são utilizados. Em ambos os casos, o instrumento deve prever medidas de sensação de cintilação instantânea ( $S_f$ ) dentro de uma faixa de 0,01 a 6400 em unidades do limiar de percepção. Fundos de escala em intervalos correspondentes aos níveis de  $\Delta U/U$  de 0,5, 1, 2, 5, 10 e 20% são definidos, com a exigência de uma resolução mínima de 1 parte em 64, dentro de cada faixa.

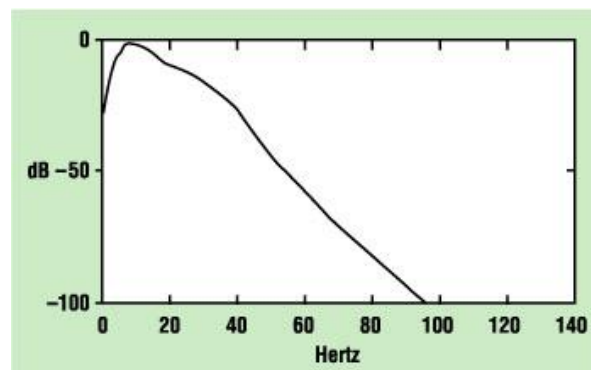


Figura 4.8. Resposta em frequência composta dos filtros

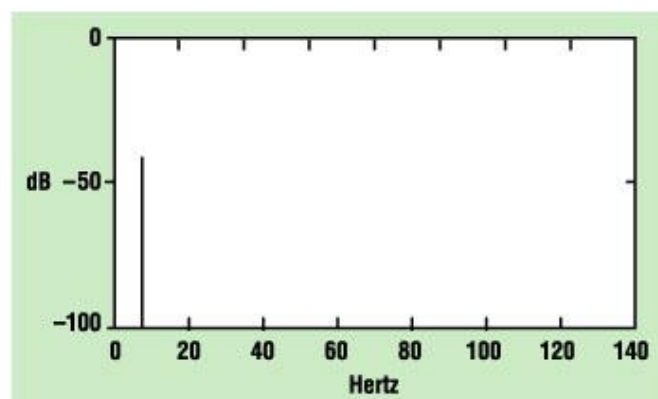


Figura 4.9. Sinal de saída do filtro

Dado que a relação entre percepção de *flicker* ( $S_f$ ) e  $\Delta U/U$  varia com a frequência, não há relação direta entre os dois conjuntos de valores. No entanto, as faixas de  $\Delta U/U$  são especificadas para garantir que a variação da sensação de cintilação seja acomodada para qualquer frequência de modulação.

#### **Bloco 4 - Multiplicador por quadratura e filtro de média móvel de primeira ordem.**

Bloco 4 fornece condições para realizar o restante do modelo filamento-olho-cérebro associado à percepção de *flicker*. O operador de quadratura simula características de resposta não linear do cérebro-olho, enquanto o filtro de primeira ordem simula os efeitos de persistência da imagem no cérebro. O filtro de primeira ordem é um pouco imprecisamente especificado como um filtro de média móvel tendo uma constante de tempo de 0,3 segundos, mas deve ser implementado como um filtro passa-baixa de primeira ordem, com uma frequência de corte de 0,53 Hz.

Quando o ganho total do instrumento é configurado corretamente, os níveis de modulação correspondentes ao limiar humano médio para sensação de *flicker* produzirá valores de 1 (pu) a saída do Bloco 4. Para tal, o valor de  $S_f$  resultante do processamento até este ponto deve ser dividido por  $8 \cdot 10^{-7}$ , que corresponde a um índice de modulação senoidal de 0,125% em 8,8 Hz (quando o filtro de ponderação tem ganho unitário).

Várias etapas de processamento adicional podem ser realizadas na saída do Bloco 4 para auxiliar na escolha da escala do instrumento ou para fins de pesquisa. Para os testes previstos na EN 61000-3-3, no entanto, estas saídas são opcionais (assumindo que o uso de um classificador não-linear no Bloco 5), uma vez que as saídas do bloco 5 são usadas exclusivamente para determinar a conformidade das emissões de cintilação.

#### **Bloco 5 - Classificador.**

O classificador estatístico no Bloco 5 modela a irritabilidade humana na presença de *flicker*. *Flicker* é mais tolerável se ocorre com pouca frequência. A tolerância diminui com crescimento da intensidade da perturbação, aumento da frequência de eventos, ou a duração do evento.

A entrada para o bloco 5 mostra um conversor A/D, seguido por um classificador estatístico. Em instrumentos modernos, a conversão do analógico para digital tipicamente ocorre já em blocos anteriores. O classificador é dedicado a fornecer a informação estatística necessária para calcular a severidade do *flicker* de curta duração ( $P_{ST}$ ), bem como a severidade do *flicker* de longa duração ( $P_{LT}$  - *Long Term Probability*).

Severidade da cintilação de Curto Prazo é calculada utilizando valores percentuais obtidos a partir do classificador estatístico. O classificador estatístico implementa um processo de cálculo dos valores percentuais para sensação instantânea de *flicker* ( $S_f$ ) em função do intervalo de tempo em que este sinal permanece acima de um certo nível. Isso é feito por períodos de integração de 1, 5, 10 ou 15 minutos, sendo o intervalo de 10 minutos especificado como o período de integração para as medições de conformidade. Assumindo por hipótese que as amostras são acumuladas a uma taxa de 100 Hz e que é usado o período de integração de 10 minutos, 60.000 amostras individuais de  $S_f$  serão adquiridos para cada cálculo do  $P_{ST}$ .

Cada amostra é acumulada no classificador estatístico, incrementando um contador, o qual está associado a certo nível de  $S_f$ . O contador a ser incrementado é selecionado determinando entre quais níveis pré-estabelecidos de  $S_f$  a amostra se insere. No final do período de integração, a contagem total acumulada de todos os contadores é igual ao número total de amostras colhidas durante o período de integração (60 mil nesse exemplo). Um conjunto de percentis pode então ser calculado através de metodologia estatística.

Dependendo do projeto do classificador, as classes podem ser em número reduzido como 64, pode ser em maior número, ou podem ser linearmente ou logaritmicamente ponderadas. O uso de um projeto com o requisito mínimo de 64 níveis linearmente ponderados exige a implementação de circuitos de escalonamento como especificado para o Bloco 3. Implementações modernas normalmente usam níveis em escala logarítmica, geralmente com 1024 níveis ou mais. Esta abordagem, assumindo uma faixa dinâmica adequada em outras partes do processamento do sinal, elimina a necessidade de escalonamento do Bloco 3. Classificação logarítmica também evita problemas de precisão que surgem quando se aplica uma interpolação linear para calcular os limites percentuais entre os níveis.



A notação percentual utilizada nas normas é um pouco confusa, pois o percentual de índices corresponde à percentagem de amostras que ultrapassam os níveis, em vez de números cumulativos de amostras em níveis mais baixos. Por exemplo,  $P_{0,1}$  corresponde ao nível excedido por 0,1 % das amostras. Este nível é mais convencionalmente referido como o percentil 99,9.

A severidade da cintilação de longo prazo é calculada a partir de sucessivos valores de  $P_{ST}$ . Para as medições de referência,  $P_{LT}$  é calculado a partir de um conjunto de 12 medidas consecutivas de  $P_{ST}$  adquiridas durante um teste de 2 horas, com 10 minutos de períodos de integração (i.e.,  $N = 12$ ).

Note-se que as unidades de  $P_{ST}$  e  $P_{LT}$  são alteradas de "perceptibilidade" a "irritabilidade".  $P_{st} = 1$  é o limiar médio de irritabilidade para a cintilação de curto prazo e 0,65 é definido como o limiar de *flicker* de longo prazo. Limites para aprovação / reprovação para  $P_{ST}$   $P_{LT}$  são fixados na EN 61000-3-3 de acordo com estes limiares. Os testes são realizados com uma impedância de referência IEC 725 colocada entre a fonte de alimentação e o equipamento sob teste.

$$P_{ST} = \sqrt{a_1 \cdot P_{50} + a_2 \cdot P_{10} + a_3 \cdot P_3 + a_4 \cdot P_1 + a_5 \cdot P_{0,1}} \quad (4.2)$$

$P_i$  são os níveis de variação de tensão ultrapassados durante  $i$  % do tempo. Esses valores são obtidos do histograma de classificação por níveis de  $S_f$ . Por exemplo,  $P_{50}$  representa o nível de  $S_f$  que é violado 50% do tempo;  $P_{10}$  é o nível ultrapassado durante 10% do tempo, e assim por diante.

$a_1$   $a_2$   $a_3$   $a_4$  e  $a_5$  os valores numéricos foram atribuídos de forma que a combinação dos níveis de probabilidade de violação  $P_i$  produzam valores de  $P_{ST}$  unitários para flutuações dadas pela curva IEC-61000.3, mostrada na Figura 4.1.

$$a_1=0,08; a_2=0,28; a_3=0,0657; a_4=0,0525; a_5=0,0314$$

A figura 4.10 ilustra como se faz a classificação dos níveis do sinal  $S_f$  para cálculo do valor de  $P_{ST}$ .

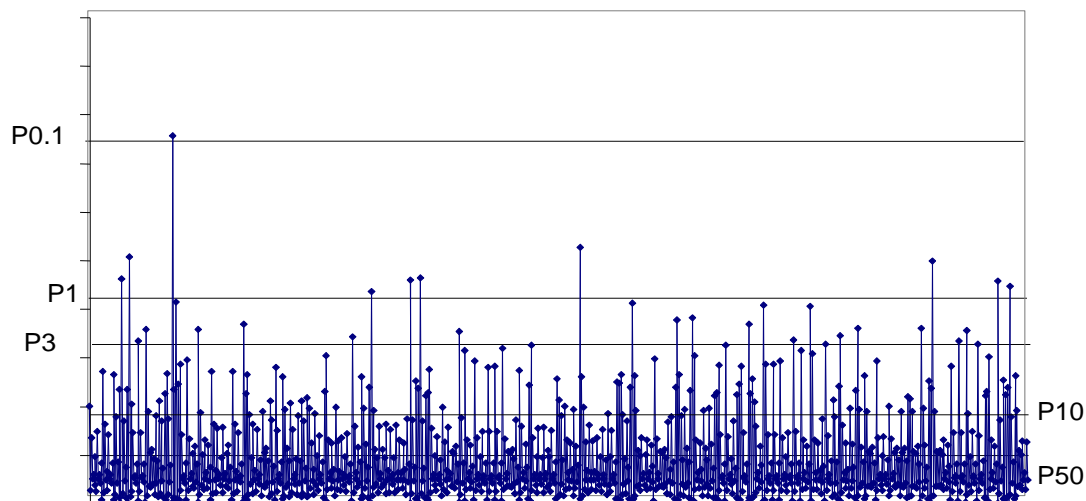


Figura 4.10 Exemplo de sinal amostrado de Sensação Instantânea de *flicker* ( $S_f$ ) com 1000 amostras.

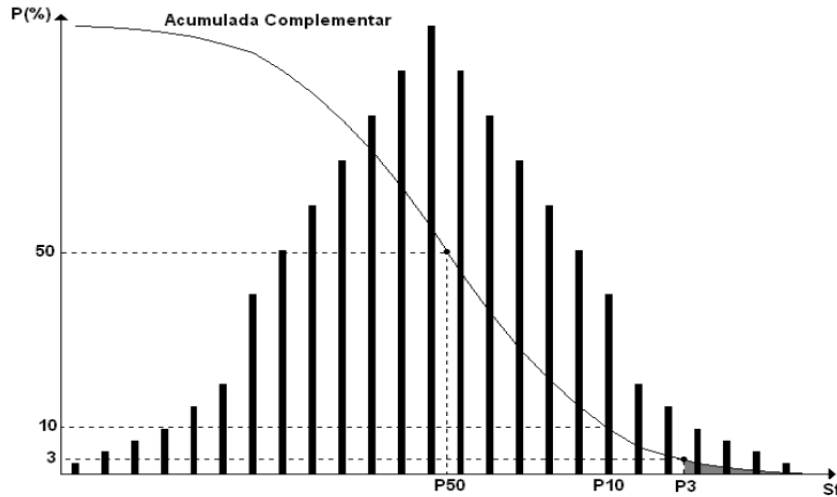


Figura 4.11 Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de flicker ( $S_f$ ).

Para modulação senoidal de 0,125 % em 8,8 Hz constante, tem-se  $S_f=1$  pu e o  $P_{ST}$  é 0,714. Para ser atingido o limiar de irritabilidade é preciso ter  $S_f = 2$  pu, resultando  $P_{ST}= 1$  pu pois para uma perturbação homogênea:  $P_{ST} = 0,714\sqrt{S_f}$  [pu].

A figura 4.12 mostra os espectros dos sinais após passagem pelos diferentes blocos de processamento (figuras a, b, c). O sinal de  $S_f$ , no tempo é mostrado em d).

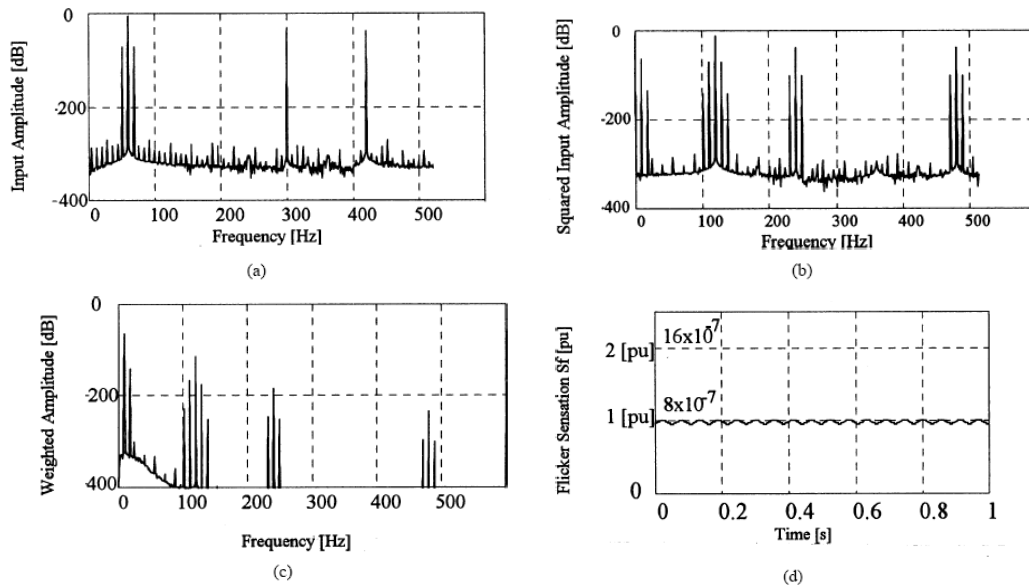


Figura 4.12 Sinais nas saídas dos blocos 1, 2, 3 e 4 para modulação senoidal de 0,125% em 9 Hz.

A grandeza  $P_{LT}$  (*Long Term Probability*) é definida como uma média cúbica de 12 valores consecutivos de  $P_{ST}$  (2 horas de medição) para expressar o efeito flicker para períodos mais longos, de vários dias, para cobrir, por exemplo, o ciclo de carga semanal:

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{STi})^3} \tag{4.3}$$

Os limites indicados no PRODIST (em 2017) são expressos em termos de atendimento percentual, durante um determinado período de observação. Esses limites são os seguintes:

**Limites de severidade de flutuação de tensão**

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
Pst95%	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

ou seja, admite-se violação dos limites durante 5% do respectivo tempo de observação. A edição de 2017 do PRODIST não estabelece valores para o  $P_{LT}$ , embora mantenha sua definição.

**4.3 Exemplo de medição de flicker**

Os resultados seguintes foram obtidos em uma subestação em 138 kV, que alimenta uma indústria siderúrgica com forno a arco de 50 MW. Havia reclamações de consumidores sobre a ocorrência de flicker na região.

Os resultados dessa medição mostram que tanto o nível de  $P_{ST}$  como de  $P_{LT}$  ultrapassam o valor de 1 pu durante quase 30% do tempo. Isto viola o limite aceitável para essa instalação, confirmando as reclamações de consumidores das áreas próximas.

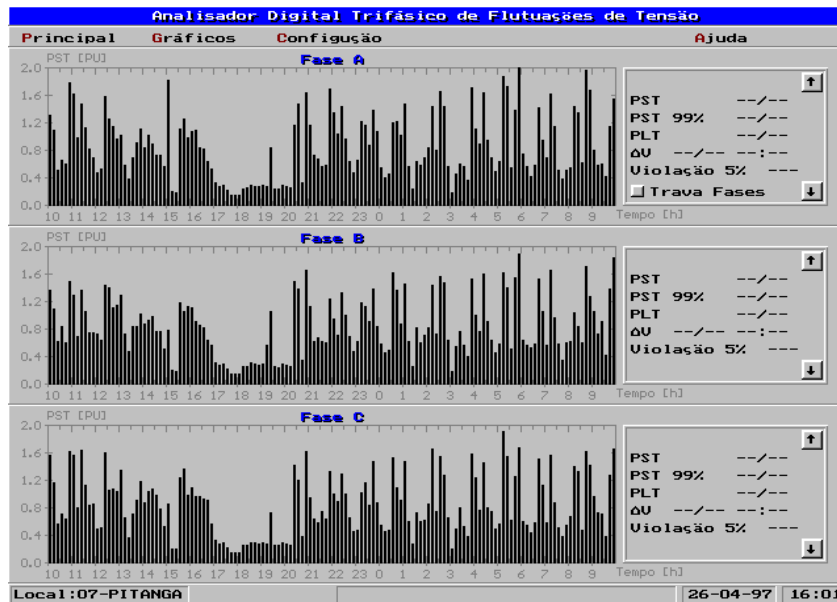


Figura 4.13 Valores de  $P_{ST}$  medidos durante 24 horas em instalação com forno a arco <sup>[9]</sup>.

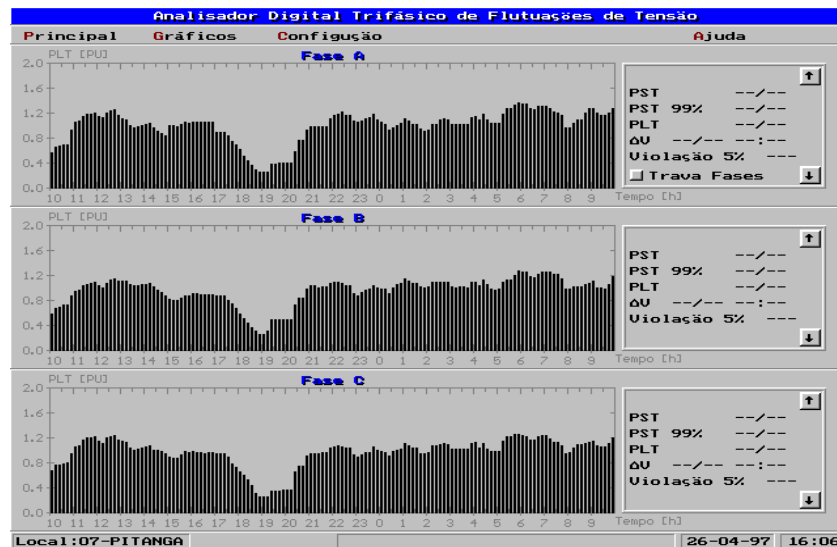


Figura 4.14 Valores de  $P_{LT}$  medidos durante 24 horas em instalação com forno a arco.

#### 4.4. Formas de atenuar o efeito *flicker*

A atenuação do efeito *flicker* exige capacidade de controlar dinamicamente o nível de tensão na presença das cargas variáveis responsáveis pelo fenômeno. Para isso utilizam-se normalmente compensadores reativos com capacidade de resposta em até meio ciclo de 60 Hz, uma vez que o espectro de *flicker* vai até 30 Hz. Compensadores estáticos como o CCT - Capacitor Chaveado a Tiristores tem sido usado para garantir o fator de potência da carga variável, enquanto o RCT - Reator Controlado por Tiristores tem sido a solução mais eficiente quando se trata de instalações com fornos a arco <sup>[10]</sup>. Reatores saturados também já foram empregados, porém o seu uso aumenta o nível de perdas introduzidas no sistema <sup>[11]</sup>.

No caso de novas instalações industriais com cargas variáveis, para se evitar problemas de *flicker*, deve-se prever já na fase de projeto do alimentador, um nível de curto-circuito no ponto de entrega da energia ao consumidor com pelo menos 50 vezes a capacidade da maior carga reativa a ser chaveada. Dessa forma se estará limitando a máxima variação da tensão local, que pode ser aproximada pela relação seguinte, baseada no equivalente de Thevenin do sistema no ponto de entrega, ou seja:

$$\Delta Vc \cong \frac{\Delta Qc}{Scc} . 100\% = 2\% \quad (4.4)$$

onde:  $\Delta Qc$  corresponde à variação reativa da carga;  
 $Scc$  corresponde à potência de curto-circuito local;  
 $\Delta Vc$  corresponde à variação porcentual da tensão.

Essa mesma expressão também pode ser usada para estimar a capacidade reativa do compensador a ser utilizado para atenuar as variações da tensão. Indústrias com geração própria ou com compensadores síncronos, que em geral são usados para melhorar o fator de potência da instalação, dispõem de controle da tensão local através do reajuste da excitação. Além disso, essas máquinas síncronas aumentam o nível de curto-circuito local, contribuindo para atenuar o problema de regulação da tensão reduzindo com isso o nível de *flicker*.

#### 4.5 *Flicker* em outros tipos de dispositivos de iluminação

O Centro de Aplicações de Eletrônica de Potência do EPRI <sup>[12]</sup> realizou testes de cintilação em vários tipos de iluminação moderna. Observou-se durante estes testes a característica de amplificação da cintilação luminosa (fator de ganho) devido a flutuações de tensão. Testes adicionais mostram como inter-harmônicas (harmônicas não inteiras) e mudança na fase de harmônicas na alimentação podem causar cintilação em lâmpadas fluorescentes, apesar de terem fatores de baixo ganho quando comparados às lâmpadas incandescentes. Relembre-se que as lâmpadas fluorescentes, por terem uma característica dinâmica de uma resistência negativa (a corrente aumenta quando a tensão diminui) necessitam de um circuito que limite a corrente, o chamado *ballast* ou reator eletrônico. Assim, o efeito luminoso depende não apenas da lâmpada, mas também (e principalmente) da reação do reator às alterações na tensão.

O fator de ganho é definido e calculado medindo mudanças relativas no nível de luz, a partir da indução de flutuações controladas de tensão. Ao controlar a magnitude e a frequência das flutuações de tensão, a resposta da lâmpada pode ser determinada usando um fotômetro. Se a porcentagem de variação de luz relativa é maior que a porcentagem de flutuação de tensão, a lâmpada é dita ter um efeito amplificador, resultando um fator de ganho superior à unidade. A Figura 4.15 mostra um exemplo de fator de ganho para lâmpadas incandescentes e lâmpadas fluorescentes.

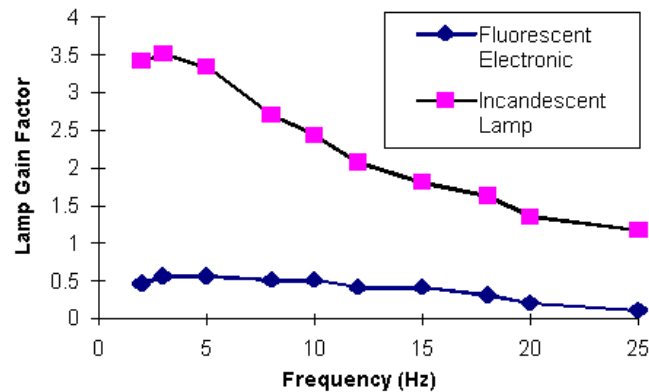


Figura 4.15 Variação do “Fator de ganho” para diferentes lâmpadas.

As lâmpadas fluorescentes têm muito pouca inércia térmica e reagem mais rápido do que as incandescentes. A constante de tempo para uma lâmpada incandescente de 120 V é de cerca de 28 ms e para uma lâmpada de 230V é cerca de 19 ms. Uma lâmpada fluorescente típica tem uma constante de tempo de menos de 5 ms. No entanto, como se observa na figura 4.15, o fator de amplificação é muito menor na lâmpada fluorescente. A razão é que o circuito eletrônico que alimenta o tubo de descarga é alimentado por uma tensão CC, obtida da retificação da tensão da rede. As variações na tensão CA ficam minimizadas. Este tipo de lâmpada se mostra mais sensível ao valor de pico da tensão CA, o qual é influenciado pelas harmônicas e suas fases. O mesmo comportamento é válido para lâmpadas LED, uma vez que estas também são alimentadas a partir de um retificador.

#### 4.8 Outros fenômenos que podem produzir *flicker*

A figura 4.16 mostra uma situação em que a componente fundamental permanece constante mas ocorre uma alteração na amplitude da 5ª e da 7ª harmônicas [13]. Tais harmônicas estão dentro do limite das normas (3% da fundamental). Sua variação pode ser causada, por exemplo, pela alteração no ângulo de disparo de uma ponte retificadora ou de um RCT. Observe-se que o limite tolerável de sensação de *flicker* é ultrapassado. Isto significa que outros fenômenos podem provocar a cintilação luminosa, além da alteração na tensão da componente fundamental.

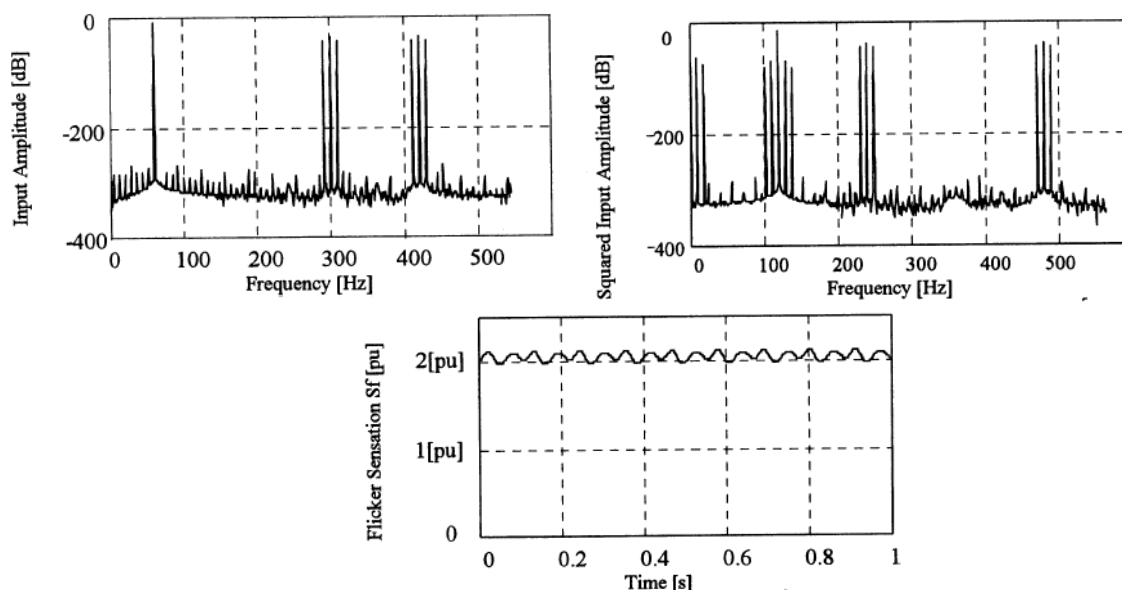


Figura 4.16 Espectros e valor final de  $S_f$  para modulação em harmônicas (3%), produzindo *flicker* acima do limite tolerável.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 
- [1] IEC 61000-3-3:2013, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-3: Limits - *Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current  $\leq 16$  A per phase and not subject to conditional connection*
- [2] IEC 61000-3-11:2000, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-11: Limits – *Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems - Equipment with rated current  $\leq 75$  A and subject to conditional connection*
- [3] IEC/TS 61000-3-5:2009 Electromagnetic compatibility (EMC). Limits. *Limitation of voltage fluctuations and flicker in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 75 A*
- [4] IEC 555-3: "Disturbances in Supply Systems caused by Household Appliances and Similar Electrical Equipment". Part 3 - Voltage Fluctuations. International Electrotechnical Commission, Subcommittee 77, 1982.
- [5] UIE Disturbance Study Committee "UIE Flickermeter - Functional and Design Specifications", 1982.
- [6] IEC 868 "Flickermeter - Functional and Design Specifications". International Electro-technical Commission, Subcommittee 77, 1986.
- [7] EN 61000-4-15:2011 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications
- [8] J. P. S. Rocha, S. M. Deckmann, "Sistema Digital para Medição e Análise de Flicker". X Congresso Brasileiro de Automática, Rio de Janeiro, RJ, Out. 1994.
- [9] S.Deckmann, J.P.Rocha, F.Junqueira Jr, E.Melo, A.Arruda, F.Cavalcanti, N.Vilares, R.Monteiro, "A Compact Three-Phase Digital Flickermeter". Artigo premiado no BIEL'97 Bienal de la Industria Electrica y Luminotecnica, Buenos Aires, Out. 1997.
- [10] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", Proc. IEEE, Vol.76, No. 4., 1988.
- [11] T.J.E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems", Ed. John Wiley&Sons, 1982.
- [12] S. Mark Halpin, R. Bergeron, T. Blooming, R. F. Burch, L. E. Conrad, T. S. Key, "Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 18, NO. 3, JULY 2003
- [13] J. A. Pomilio and S. M. Deckmann: "Flicker produced by Harmonic Modulation". IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 18, no. 2, April 2003, pp. 387-392.