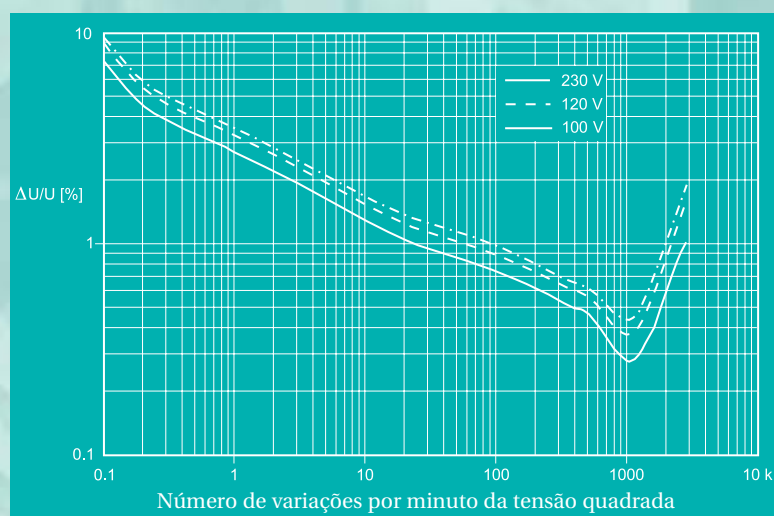
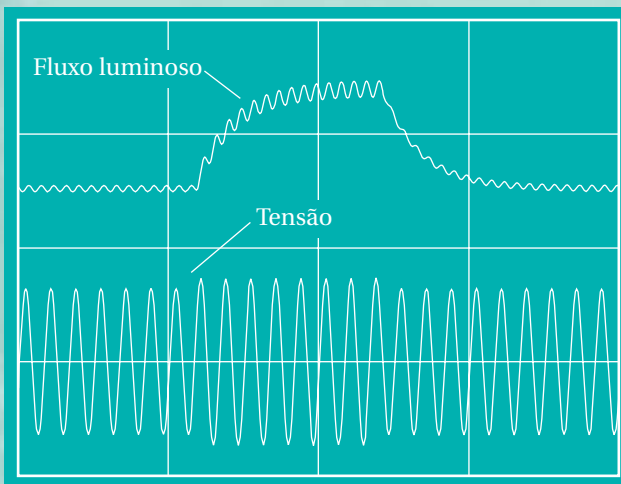


Guia de Aplicação de Qualidade de Energia



Distúrbios de Tensão *Medição de Cintilamento (Flicker)*

5.2.3



Distúrbios de tensão

Medição de Cintilamento (Flicker)

Zbigniew Hanzelka & Andrzej Biéń
AGH University of Science and Technology
October, 2005



Este Guia foi produzido como parte do Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), um programa de educação e treinamento europeu apoiado pela Comissão Européia (sob o Programa Leonardo da Vinci) e pelo International Copper Association (ICA). Para informação adicional sobre o LPQI visite www.lpqi.org.



European Copper Institute (ECI)

O European Copper Institute (ECI) (Instituto de Cobre Europeu) é uma joint venture entre o ICA (International Copper Association) e os fabricantes europeus. O ECI representa os maiores produtores de cobre do mundo e os fabricantes europeus mais importantes para promover o cobre na Europa. Criado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de onze Associações de Desenvolvimento do Cobre ('CDAs') em Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polónia, Rússia, Escandinávia, Espanha e Reino Unido.



Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre no Brasil com a missão de estimular o uso técnico e econômico do metal, promovendo sua utilização correta e eficiente. Desenvolve projetos nas várias áreas de aplicação do metal, divulgando as vantagens da utilização do cobre na energia elétrica, nas instalações hidráulicas e de gás, na arquitetura, no design e decoração de interiores, na saúde e muitas outras.

Aviso de Isenção de Responsabilidades

O conteúdo deste documento não necessariamente reflete a posição da Comunidade Européia, nem implica nenhuma responsabilidade por parte da Comunidade Européia. O European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko e Copper Development Association negam qualquer responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar pelo uso da informação, ou pela impossibilidade do uso da informação ou dos dados contidos nesta publicação.

Copyright© European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko and Copper Development Association.

Reprodução autorizada desde que o material esteja completo e a fonte mencionada.

Distúrbios de Tensão

Medição de Cintilamento (Flicker)

Introdução

A tensão da rede de alimentação varia com o tempo devido às perturbações que acontecem nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Interação de cargas elétricas com a rede causam deterioração adicional da qualidade da energia elétrica.

Grandes cargas que solicitam correntes flutuantes, como grandes acionadores de motores e fornos de arco, causam variações de tensão cíclicas que resultam em:

- Cintilamento de fontes de luz que podem causar desconforto fisiológico significativo, fadiga física e psicológica, e até mesmo efeitos patológicos para seres humanos;
- Problemas com a estabilidade de dispositivos elétricos e circuitos eletrônicos.

A Figura 1 ilustra o modo no qual uma pequena variação de tensão produz um efeito notável no fluxo luminoso de uma lâmpada.

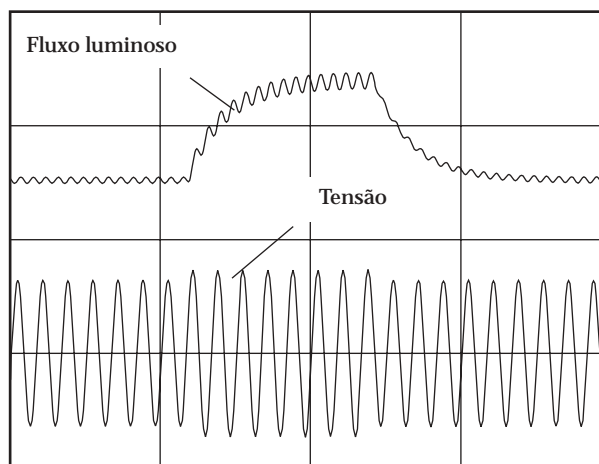


Figura 1 - Variação no fluxo luminoso resultante de uma variação temporária de tensão [1].

Pequenas variações recorrentes da intensidade da tensão de rede causam o cintilamento de fontes de luz. O efeito é popularmente chamado “cintilamento” (flicker, em inglês) e é um parâmetro de qualidade de energia significativo. Um exemplo de um espectro de tensão de uma rede onde o cintilamento é aparente está mostrado na Figura 2. O espectro mostrado é típico de uma tensão de uma rede que alimenta um grande acionador elétrico não estacionário. Uma lâmpada, alimentada pelo mesmo nó, irá cintilar com frequência de aproximadamente 1 Hz.

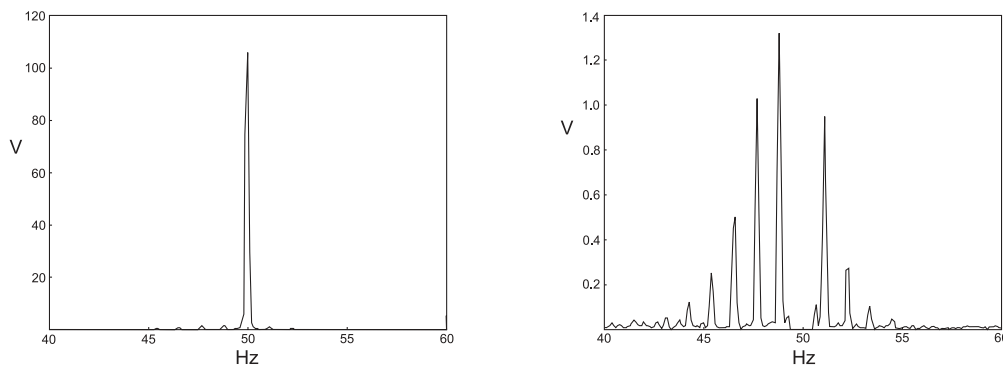


Figura 2 - Espectro de tensão da rede elétrica: à direita, no diagrama, é omitido o componente de 50 Hz.

O cintilamento é expresso em termos de dois parâmetros: severidade de cintilamento em curto prazo (P_{ST}) e severidade de cintilamento em longo prazo (P_{LT}). A medição destes parâmetros é discutida mais adiante neste documento.

Estimativa de flutuações de tensão

O fenômeno de cintilamento de fontes de luz é conhecido desde a introdução das redes de alimentação de energia. Porém, cresceu rapidamente em importância junto com o aumento no número de cargas e o aumento no consumo de energia. Uma quantidade considerável de pesquisa tem sido realizada sobre a medição e a mitigação do cintilamento. Para quantificar a intensidade do fenômeno de cintilamento da luz, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de desenvolver equipamentos de medição, técnicas de retenção e métodos de mitigação. Este artigo discute os princípios de medição e os princípios gerais de projeto de instrumentos de medição.

Inicialmente, os projetos de instrumentos estavam baseados em simples observações do fluxo luminoso. O próximo passo era desenvolver um modelo da reação humana - na forma de desconforto ou perturbação - para a flutuação do fluxo luminoso. O modelo foi baseado em um bulbo de tungstênio de 60 W, 230 V, uma vez que essa era a fonte de luz mais usada na Europa naquela época.

A Figura 3 mostra o limiar de percepção do cintilamento em relação ao percentual de variação de tensão (eixo y) e a variação de frequência (eixo x). Onde a intensidade e a frequência das variações situam-se acima da curva, é provável que o efeito esteja perturbando um observador humano, enquanto que, abaixo da curva, é provável que o efeito seja imperceptível. As linhas tracejadas representam lâmpadas de tungstênio projetadas para diferentes tensões nominais.

Instrumentos de medição de cintilamento antigos incluíam uma lâmpada de tungstênio típica, 60 W, 230 V, um sensor de fluxo luminoso e um modelo analógico para simular a reação humana. Pesquisas posteriores realizadas nos anos oitenta fizeram com que as atividades na área de avaliação de cintilamento convergissem e agora estão centralizadas na UIE (International Union for Electricity Applications). O instrumento-modelo normalizado resultante é completamente eletrônico; ele mede a flutuação de tensão e simula tanto a resposta da fonte de luz quanto a reação humana. São obtidos ainda dois resultados de medição adicionais; um para o efeito de cintilamento em curto prazo (P_{ST}), medido num intervalo de dez minutos, e um para longo prazo (P_{LT}) que é uma média permanente dos valores P_{ST} considerados num período de duas horas.

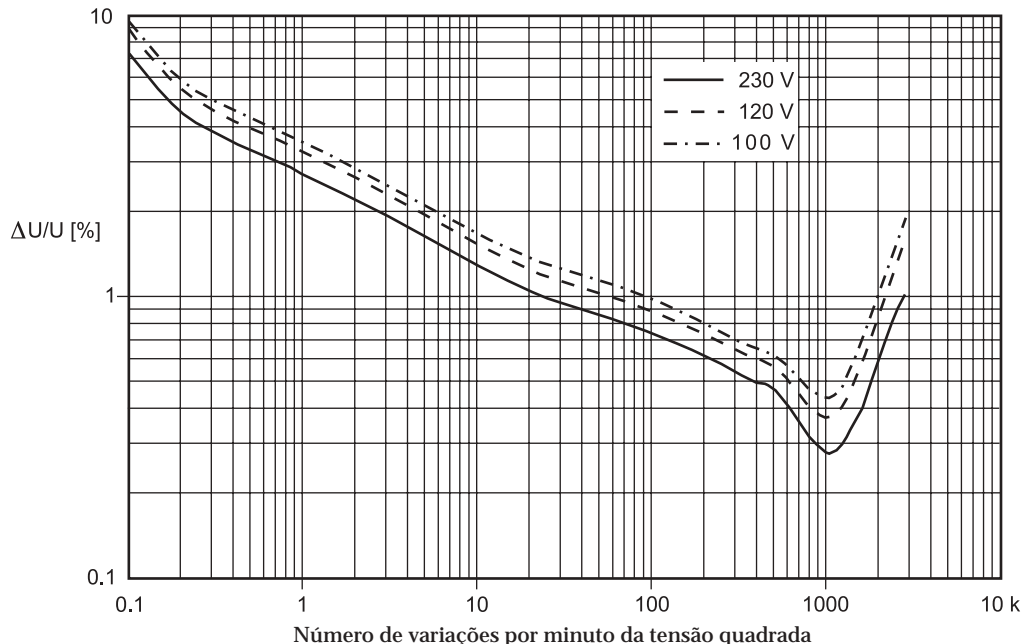


Figura 3 - Característica de percepção do cintilamento para variações de tensão de formas de ondas quadradas aplicadas em lâmpadas de 60 W

Medição da severidade de cintilamento em curto prazo

O diagrama de bloco do instrumento proposto pelo relatório da UIE é mostrado na Figura 4. As flutuações de tensão medidas são processadas usando um modelo de fluxo luminoso versus a característica de tensão da lâmpada de tungstênio e um modelo da reação humana às flutuações do fluxo luminoso. Isto resulta em uma medição de cintilamento instantânea. Porém, cada pessoa reage diferentemente em relação às variações do fluxo luminoso e, assim, o valor P_{ST} é obtido por meio de um modelo estatístico baseado em trabalhos experimentais com um grande grupo de indivíduos.

Medição de Cintilamento

Um diagrama de bloco detalhado do instrumento é mostrado na Figura 5. Ele ilustra o esquema de processamento do sinal de tensão proposto pela UIE e definido no documento normativo [2]. Os instrumentos fabricados de acordo Figura 3 com incerteza menor do que 5%.



Figura 4 - Operações para determinar a severidade de cintilamento PST.

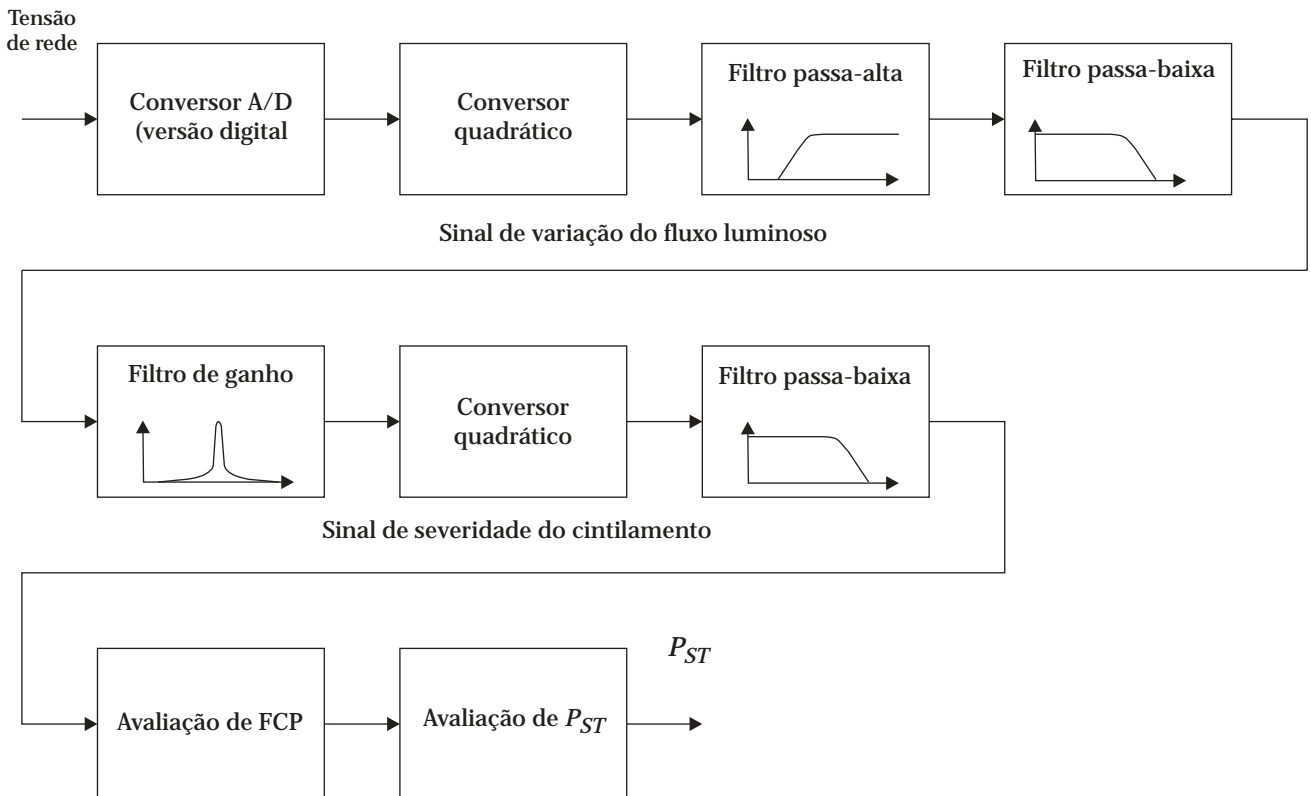


Figura 5 - Estrutura do instrumento de medição de severidade de cintilamento da UIE.

O conversor analógico-digital só é usado em implementações digitais do instrumento. O conversor quadrático e os filtros formam o modelo de uma lâmpada de tungstênio 60 W, 230 V. O filtro passa-alta de 0,05 Hz serve apenas para remover o componente constante, uma vez que apenas variações de fluxo são medidas, e o filtro passa-baixa de 35 Hz representa as propriedades dinâmicas da lâmpada.

A segunda linha na Figura 5 modela a reação humana às variações de fluxo luminoso. As reações do olho e do cérebro são modeladas com o uso de um filtro passa-faixa com a seguinte fórmula:

$$K(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)}$$

Medição de Cintilamento

onde, para uma lâmpada incandescente de 60 W 230 V:

$$k = 1,74802$$

$$\lambda = 2 \pi 4,05981$$

$$\omega_1 = 2 \pi 9,15494$$

$$\omega_2 = 2 \pi 2,27979$$

$$\omega_3 = 2 \pi 1,22535$$

$$\omega_4 = 2 \pi 21,9$$

Este filtro foi projetado com base na pesquisa psico-fisiológica sobre a influência da variação do fluxo luminoso em um ser humano. Esta pesquisa incluiu a análise do efeito das variações de frequência e intensidade do fluxo luminoso em seres humanos. O conversor quadrático e o filtro passa-baixa de 0,53 Hz modelam o efeito de fadiga das variações de fluxo luminoso.

A Figura 6 mostra a resposta de intensidade de todos os filtros usados no instrumento.

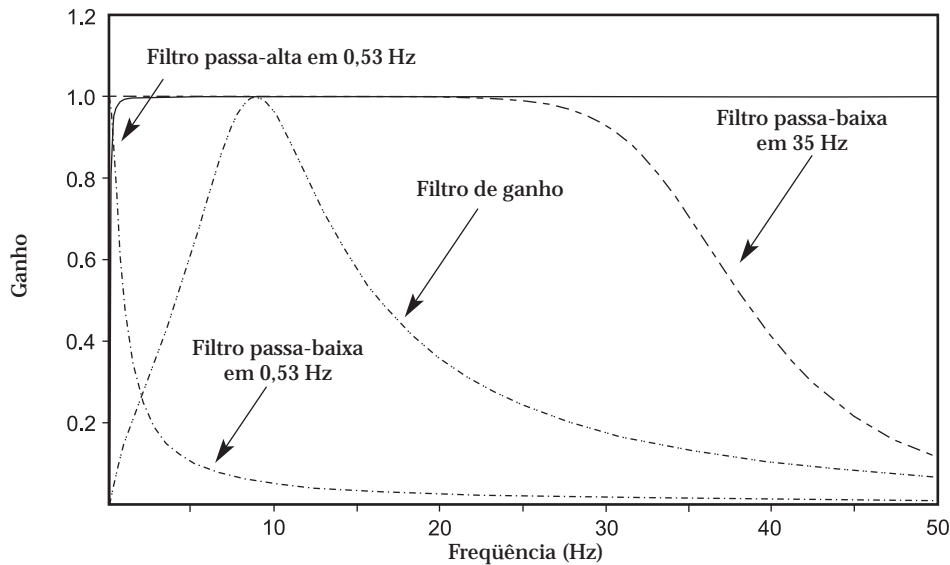


Figura 6 - Resposta de intensidade dos filtros de medição de cintilamento.

A terceira linha na Figura 5 mostra a seção de processamento estatístico digital. Avaliação de P_{ST} é baseada na Função de Probabilidade Cumulativa (FPC) calculada durante o período de observação. O método de avaliação de FPC está mostrado na Figura 7.

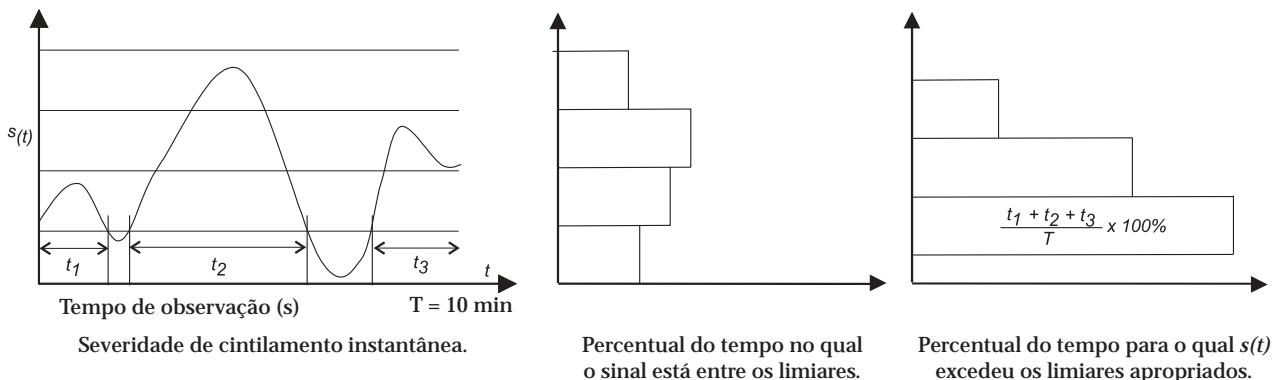


Figura 7 - Processo de avaliação de FPC.

Medição de Cintilamento

A curva no lado esquerdo mostra a severidade de cintilamento instantânea (eixo y) em relação ao tempo (eixo x) para um período de observação de 10 minutos. As linhas de grade horizontais representam limiares que são usados para agrupar medições como mostrado no lado direito. Aqui o eixo x representa a porcentagem do tempo de observação que os valores instantâneos discretos excedem o limiar apropriado. (Ver exemplo para o grupo mais baixo).

Na prática, depois que as amostras são coletadas durante o tempo de observação de dez minutos, os limiares são fixados de modo a corresponderem a percentuais, ou seja, por terem sido excedidos em 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50% do tempo de observação de dez minutos. No texto a seguir, estes percentuais são designados por $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , etc., enquanto que o subscrito "s" (por exemplo, P_{1S} , P_{3S}) indica que a média foi aplicada de acordo com as seguintes fórmulas:

$$P_{1S} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,3}) / 3$$

$$P_{3S} = (P_{2,2} + P_3 + P_4) / 3$$

$$P_{10S} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}) / 5$$

$$P_{50S} = (P_{30} + P_{50} + P_{80}) / 3$$

P_{ST} é calculado de acordo com a fórmula:

$$P_{ST} = \sqrt{0.0314P_{0,1} + 0.0525P_{1S} + 0.0657P_{3S} + 0.28P_{10S} + 0.08P_{50S}}$$

Os valores de P_{ST} são usados para avaliar P_{LT} para tempos de observação mais longos de acordo com:

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{STi}^3}{N}}$$

onde N é o número de períodos de P_{ST} dentro do período de observação de P_{LT} , ou seja, 12 medições de P_{ST} (10 minutos) seriam exigidas para calcular o P_{LT} (2 horas).

A Figura 8 mostra um registro de P_{ST} no nó da rede aonde um forno a arco foi conectado. Pode ser visto que a condição operacional do forno influencia o valor de P_{ST} . Neste caso, o valor de P_{ST} varia por uma relação de 15:1.

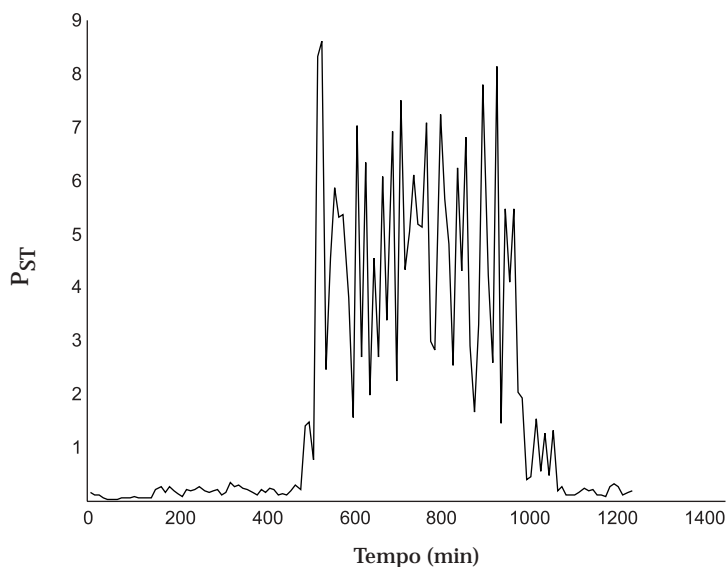


Figura 8 - Valores de P_{ST} determinado durante a operação de um forno a arco.

Calibração e verificação de um instrumento de medição de severidade de cintilamento

Como descrito anteriormente, a medição de cintilamento é um processo complexo. Se instrumentos de projetos e fabricantes diferentes devem produzir resultados consistentes no campo, são necessários procedimentos corretos de aprovação de funcionamento e calibração.

Aprovação de funcionamento requer a validação do projeto, por exemplo, verificando-se que as precisões da modelagem e do cálculo estatístico sejam suficientemente adequadas, através da aplicação de sinais de teste predeterminados e monitorando as respostas apropriadas. Os sinais de teste seriam definidos em termos de modulação da forma de onda (senoidal ou retangular), intensidade e frequência de forma que eles sejam consistentemente reproduzíveis e previsíveis.

A calibração requer a verificação de cada amostra do instrumento, novamente com sinais predeterminados de entrada, de modo a assegurar que o resultado indicado é suficientemente preciso. Os fabricantes têm que indicar com que frequência o processo de calibração deve ser repetido e fornecer os serviços para esta finalidade.

Medição e avaliação do cintilamento na rede de alimentação

Como mencionado na introdução, as fontes básicas de flutuações de tensão (e o conseqüente cintilamento das fontes de luz) são as grandes cargas elétricas.

Este mecanismo está ilustrado na Figura 9.

A tensão no ponto de conexão da carga é menor do que a tensão da fonte por causa da queda de tensão.

$$U_{zn} = I_{Load} \cdot Z_{zn}$$

onde:

I_{Load} = corrente de carga;

Z_{zn} = impedância da rede;

vista pelo pontos de conexão da carga (a, b).

Uma vez que a tensão nos pontos (a, b) é

$$U_{ab} = U_n - U_{zn}$$

pode ser notado que qualquer variação na corrente I_{Load} , particularmente na componente reativa, causará uma variação indesejável na tensão U_{ab} .

Em uma rede de potência real, este fenômeno é muito mais complexo, mas o princípio é válido.

Freqüentemente, a pergunta que surge é sobre se uma ligação planejada de uma carga à rede causaria o cintilamento ou aumentaria o nível cintilamento acima do limite prescrito. A resposta para esta pergunta depende dos parâmetros da rede e de quaisquer cargas conectadas que possam causar efeitos negativos.

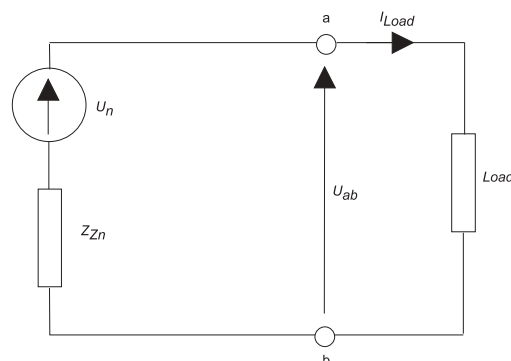


Figura 9 - Influência de uma carga sobre uma rede.

Medição de Cintilamento

Uma vez que o efeito não pode ser medido antes da conexão, ele deve ser estimado. Questões de compatibilidade são tratadas na norma IEC 61000-3-3 [5], na qual se assume uma impedância de referência da fonte Z_{Zn} equivalente a $\text{Re}(Z_{Zn}) = 0,4 \text{ W}$ e $\text{Im}(Z_{Zn}) = 0,25 \text{ W}$ em 50 Hz.

Adicionalmente, a norma indica um método para melhorar a avaliação levando em conta o perfil da modulação da tensão de alimentação, ou seja, os cálculos assumem o pior caso de uma modulação de forma de onda quadrada, requerendo, então, modificações para outras formas de ondas.

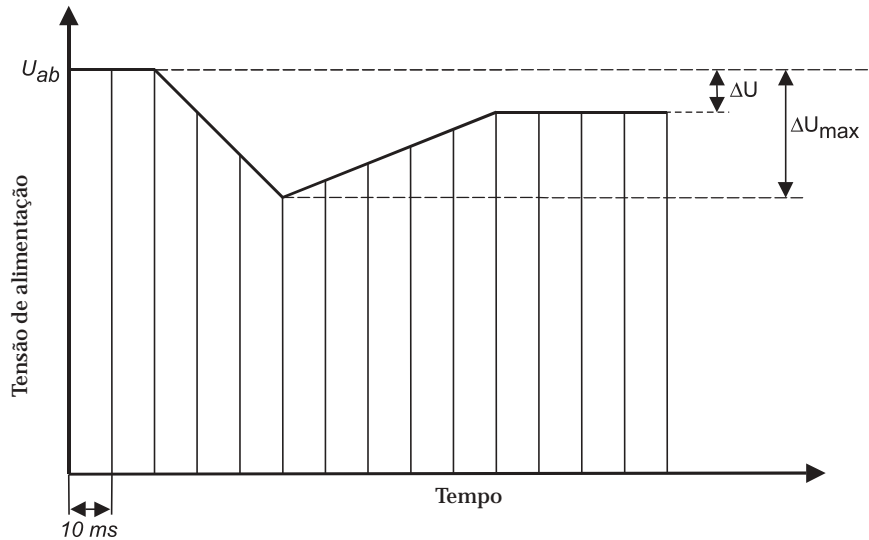


Figura 10 - Exemplo de um perfil de carga da referência [5].

A Figura 10, obtida de [5], mostra um perfil, típico de um acionador de motor, mostrando como as variações de tensão ΔU são determinadas para o cálculo de $d = \Delta U/U_{ab}$. Os valores dos parâmetros de passo equivalentes dependem de t_1 , t_2 , t_3 etc, como ilustrado na norma. O cálculo do valor efetivo da tensão é realizado a cada meio ciclo.

A norma [5] determina que:

- o valor do índice de severidade de cintilamento em curto prazo $P_{ST} \leq 1,0$;
- o valor do índice de severidade de cintilamento em longo prazo $P_{LT} \leq 0,65$;
- variação da tensão relativa estacionária $d \leq 3\%$;
- variação da tensão relativa máxima $d_{max} \leq 4\%$;
- o valor de d durante a variação de tensão não deveria exceder 3% para uma duração maior do que 200 ms.

Se a carga causa variações da tensão U_{ab} menos do que uma vez por hora, ou se as variações são resultantes de chaveamentos manuais, então os valores permitidos são aumentados em 33%. É importante notar que é assumida uma tensão de rede constante, ou seja, sem a presença da carga sob teste não haveria nenhuma flutuação de tensão na rede.

O fenômeno de severidade de cintilamento não é aditivo - operações matemáticas não podem ser executadas sobre os resultados das medições de P_{ST} ou P_{LT} .

Conclusão

O cintilamento tem sido um problema nas redes elétricas desde o principio. A partir dos anos oitenta, os progressos na compreensão do fenômeno e do processo de percepção resultaram na normalização dos métodos de medição e dos instrumentos de modo a permitir a medição confiável do cintilamento. Os instrumentos modernos, que empregam técnicas rápidas de processamento de sinal digitais, permitem avaliar e resolver os problemas de cintilamento mais rapidamente.

Medição de Cintilamento

Referência:

- [1] *Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations, Part 5, Flicker and Voltage Fluctuations, Power Quality Working Group WG2, 2000.*
- [2] *IEC 60868, Flickermeter, Functional and Design Specifications, 1986.*
- [3] *IEC 60868-0, Amendment 1, Flickermeter, Functional and Design Specifications, 1990.*
- [4] *IEC 61000-4-15:1997, Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 15: Flickermeter - Functional and Design Specifications.*
- [5] *IEC 61000-3-3:1995, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 3: Limitation of Voltage Fluctuations and Flicker in Low-voltage Supply Systems for Equipment with Rated Current $\leq 16A$.*
- [6] *Mombauer W: EMV Messung von Spannungs-schwankungen und Flickern mit dem IEC-Flickermeter, VDE VERLAG, Berlin und Offenbach 2000.*

Referências & Membros Fundadores

European Copper Institute* (ECI) <i>www.eurocopper.org</i>	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid <i>www.etsii.upm.es</i>	LEM Instruments <i>www.lem.com</i>
Akademia Gorniczko-Hutnicza (AGH) <i>www.agh.edu.pl</i>	Fluke Europe <i>www.fluke.com</i>	MGE UPS Systems <i>www.mgeups.com</i>
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC) <i>www.citcea.upc.es</i>	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) <i>www.htw-saarland.de</i>	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg <i>www.uni-magdeburg.de</i>
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) <i>www.ceiuni.it</i>	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH <i>www.pih.be</i>	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) <i>www.miedz.org.pl</i>
Copper Benelux* <i>www.copperbenelux.org</i>	International Union for Electricity Applications (UIE) <i>www.uie.org</i>	Università di Bergamo* <i>www.unibg.it</i>
Copper Development Association* (CDA UK) <i>www.cda.org.uk</i>	ISR - Universidade de Coimbra <i>www.isr.uc.pt</i>	University of Bath <i>www.bath.ac.uk</i>
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) <i>www.kupferinstitut.de</i>	Istituto Italiano del Rame* (IIR) <i>www.iir.it</i>	The University of Manchester <i>www.manchester.ac.uk</i>
Engineering Consulting & Design* (ECD) <i>www.ecd.it</i>	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) <i>www.kuleuven.ac.be</i>	Wroclaw University of Technology* <i>www.pwr.wroc.pl</i>
EPRI Solutions Inc <i>www.epri.com/eprisolutions</i>	Laborelec <i>www.laborelec.com</i>	

Conselho Editorial

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof. Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr. Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof. Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr. Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof. Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof. Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr. ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr. Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczko-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	ERA Technology s	tephanie.horton@era.co.uk
Dr. Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Kees Kokee	Fluke Europe BV	kees.kokee@fluke.nl
Prof. Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof. Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI Solutions	mmcgranaghan@eprisolutions.com
Dr. Jovica Milanovic	The University of Manchester	jovica.milanovic@manchester.ac.uk
Dr. Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr. ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof. Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA-UPC	sumper@citcea.upc.edu
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl



Prof Zbigniew Hanzelka



AGH-UST
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Poland

Tel: (012) 617 28 78
Fax: (012) 633 22 84
Email: hanzel@uci.agh.edu.pl
Web: www.agh.edu.pl



Dr eng Andrzej Biń



AGH-UST
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Poland

Tel: (012) 617 28 73
Fax: (012) 633 22 84
Email: abien@uci.agh.edu.pl
Web: www.agh.edu.pl



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128 - cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
e-mail: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org