

## Capítulo VII

# Flutuações de tensão

Por Gilson Paulillo e Mateus Teixeira\*

Flutuações na tensão são variações sistemáticas dos valores eficazes de tensão, ou uma série de mudanças aleatórias, cujas magnitudes normalmente não excedem faixas de valores preestabelecidos (faixa compreendida entre 0,95 pu e 1,05 pu). Estas variações, repetitivas, esporádicas ou aleatórias são em geral provocadas pelas alterações rápidas nas potências ativas e reativas das cargas elétricas, como em fornos a arco.

Cargas industriais que exibem variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga podem causar variações na tensão que são frequentemente referidas como flicker ou oscilação. Dos itens de avaliação da qualidade da tensão, o efeito flicker apresenta destacada importância, uma vez que pesquisas mostram que seus principais efeitos se manifestam sobre as pessoas na forma de incômodo visual, irritação, perda de concentração e, nos casos extremos, sob a forma de problemas neurológicos.

### **Aspectos gerais da flutuação de tensão**

As flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e manifestam-se de diferentes formas:

### **Flutuações aleatórias:**

- A principal fonte destas flutuações são os fornos a arco, em que as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação.

### **Flutuações repetitivas:**

- Máquinas de solda;
- Laminadores;
- Elevadores de minas;
- Ferrovias, etc.

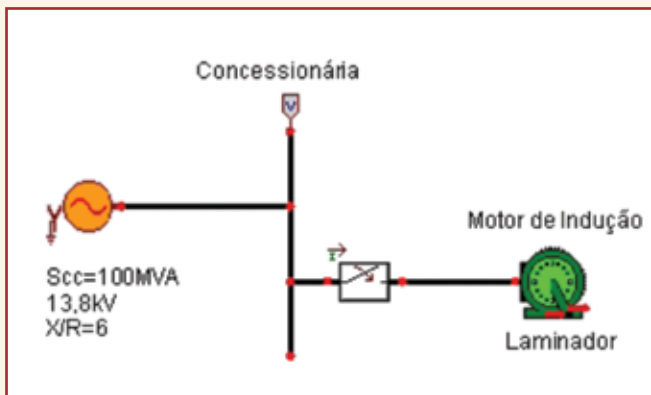
### **Flutuações esporádicas:**

A principal fonte causadora destas oscilações é a partida direta de grandes motores. Os principais efeitos nos sistemas elétricos, resultados das oscilações causadas pelo equipamento mencionado anteriormente, são:

- Oscilações de potência e torque das máquinas elétricas;
- Queda de rendimento dos equipamentos elétricos;

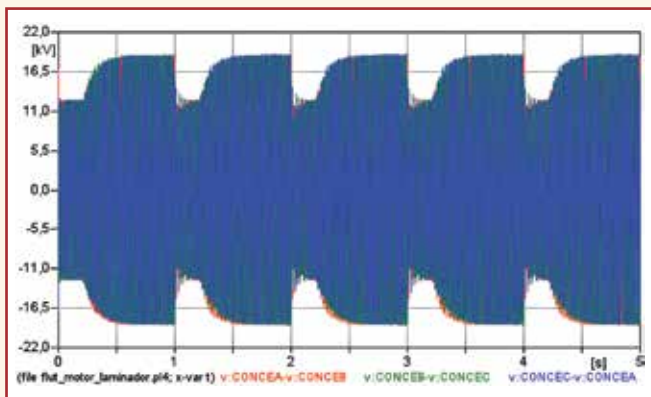
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Efeito flicker ou cintilação luminosa.

Como exemplo da geração de flutuação de tensão, considere o sistema apresentado na Figura 1. Este sistema é composto por uma concessionária e um grande motor, cujo conjugado de carga varia repetitivamente com o tempo, ou seja, este motor pode representar, por exemplo, um laminador.

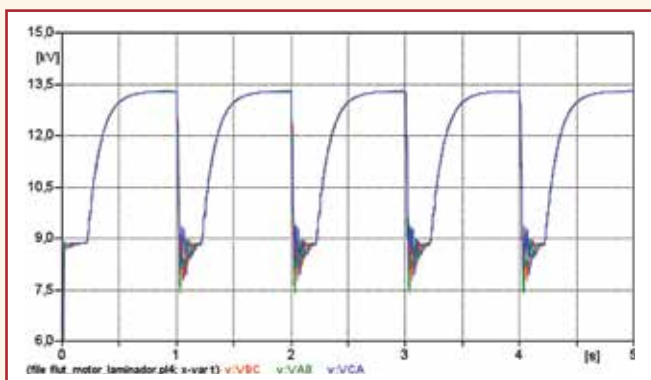


**Figura 1 – Flutuação de tensão.**

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, as formas de onda das tensões fase-fase no barramento da concessionária e os seus valores eficazes.



**Figura 2 – Formas de ondas das tensões fase-fase no barramento da concessionária.**



**Figura 3 – Tensões eficazes fase-fase no barramento da concessionária.**

### Tipos de flutuações de tensão

A Norma IEC 60555-3 define quatro tipos distintos de flutuação de tensão de forma a facilitar a aplicação de métodos de análise e de ensaios de conformidade em equipamentos elétricos.

#### • Tipo A:

Representa uma série repetitiva de variações retangulares em torno de um nível de tensão de referência. Esta flutuação apresenta um padrão (retangular) bem definido, tendo como variáveis importantes a amplitude e a frequência, conforme mostra a Figura 4.

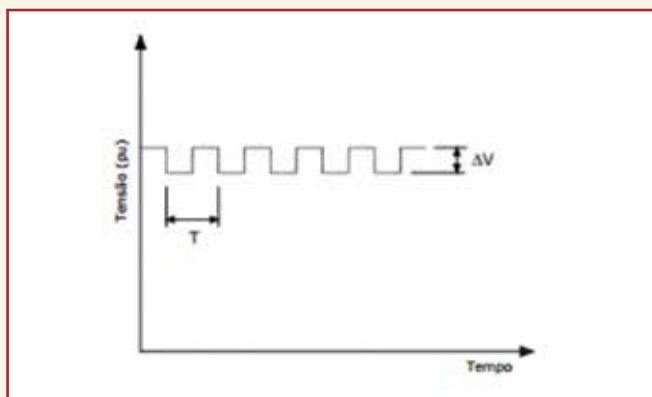


Figura 4 – Flutuação de tensão tipo A.

#### • Tipo B:

Resultado da composição de uma série irregular de variações bruscas, não apresentando um período ou ciclo definido. Este tipo pode representar sucessivos degraus de tensão, crescentes ou decrescentes, caracterizada pela entrada ou saída de cargas que operam por etapas, tais como elevadores, laminadores, prensas, etc. e é mostrada na Figura 5.

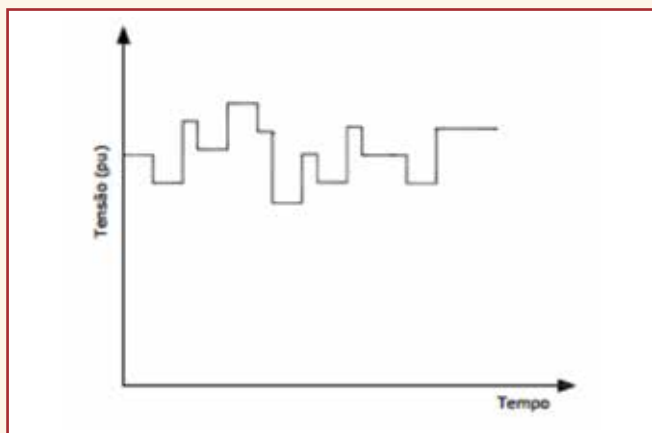


Figura 5 – Flutuação de tensão tipo B.

#### • Tipo C:

Resultado da composição de uma série irregular de formas diversas, as quais podem ser por degraus (retangular), em rampa (triangular) ou oscilatórias (senoidais), conforme mostra a Figura

6. É resultante da combinação de diversos tipos de cargas, tais como motores, prensas, compressores, etc.

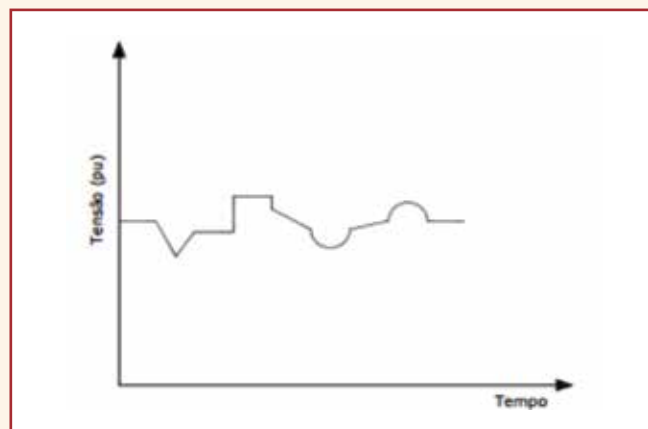


Figura 6 – Flutuação de tensão tipo C.

#### • Tipo D:

Compostas por variações contínuas e aleatórias, em geral provocadas por cargas com operação intermitentes, tais como fornos a arco elétrico (veja a Figura 7). Em função da potência das cargas, esta pode se propagar pelo sistema de transmissão e distribuição.

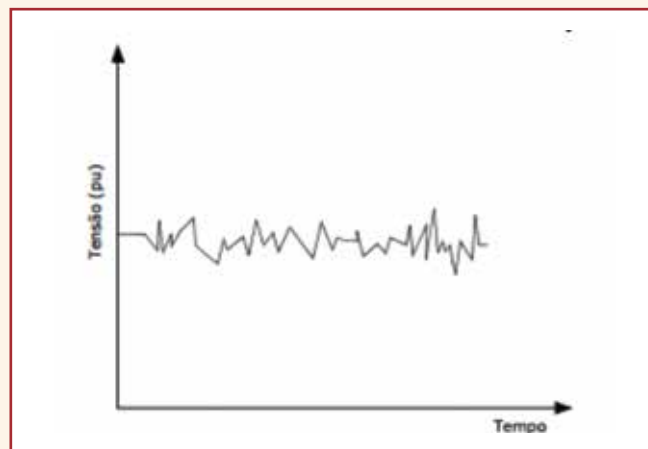


Figura 7 – Flutuação de tensão tipo D.

### Principais cargas geradoras de flutuações de tensão

#### Forno a arco

Um forno elétrico a arco é uma máquina elétrica que transforma energia elétrica em energia térmica. Os principais tipos de forno a arco estão apresentados na Figura 8.

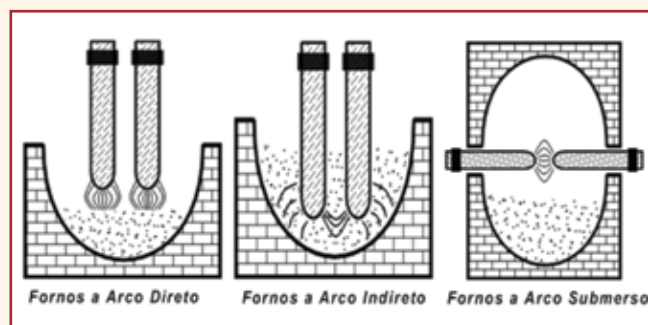


Figura 8 – Principais tipos de fornos a arco.

O comportamento típico da tensão de suprimento de um forno a arco, em um barramento de 14,4 kV, é apresentado na Figura 9.

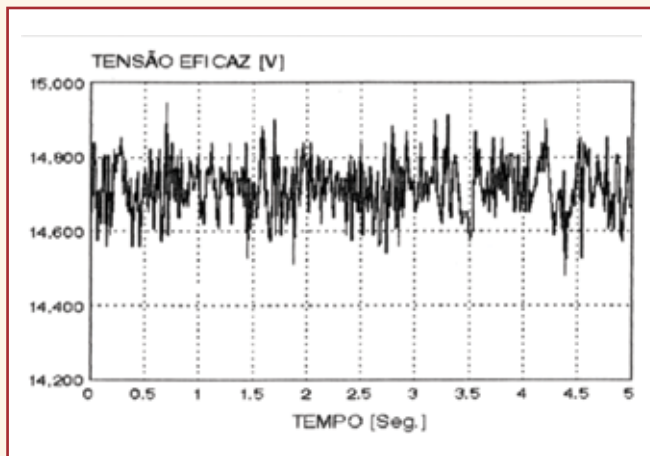


Figura 9 – Oscilações de tensão oriundas da operação de um forno a arco.

#### Laminadores

Os laminadores são usados largamente em processos siderúrgicos para moldar chapas de ferro e aço. A Figura 10 mostra o esquema típico de operação de um laminador.

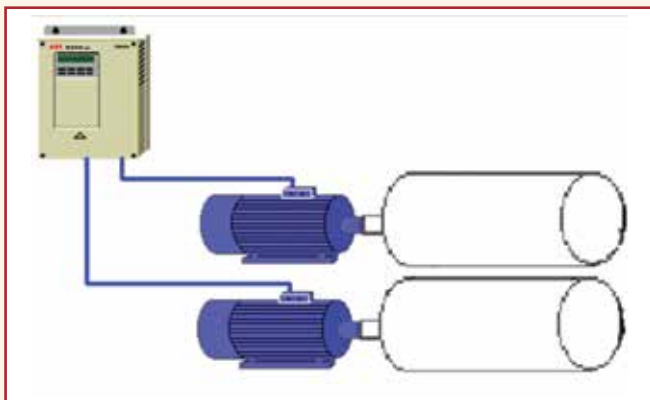


Figura 10 – Princípio de construção de um laminador.

O comportamento da tensão de suprimento de um laminador em um barramento de 13,8 kV está mostrado na Figura 11.

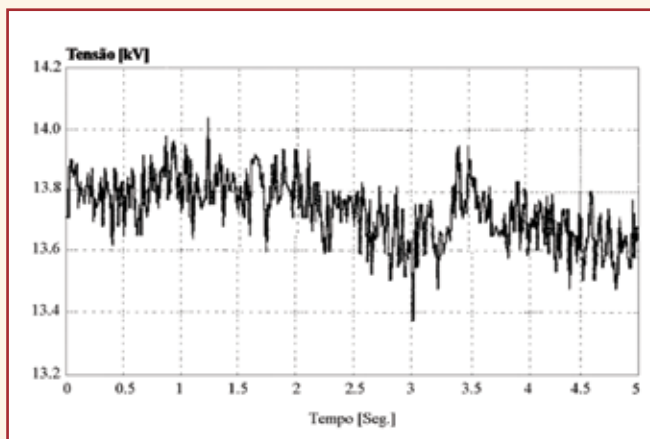


Figura 11 – Oscilograma de tensão do funcionamento de um laminador.

#### Máquinas elétricas de solda

Este tipo de equipamento, utilizado nas mais diversas indústrias, trabalha com o princípio do arco elétrico. A Figura 12 apresenta o esquema elétrico básico desses equipamentos.

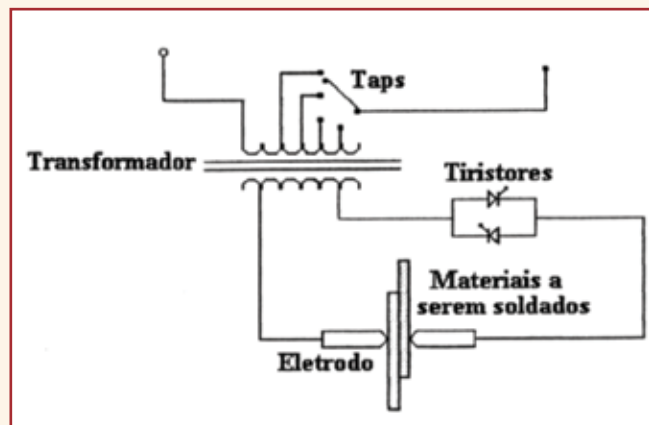


Figura 12 – Esquema elétrico de uma máquina de solda.

O comportamento da corrente de uma máquina elétrica de solda é apresentado na Figura 13.

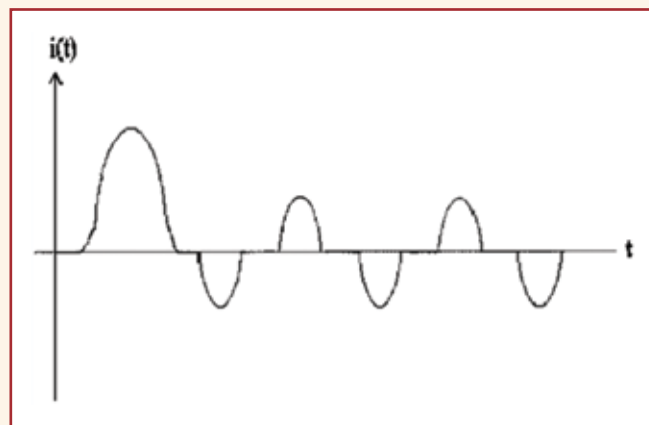


Figura 13 – Comportamento da corrente de uma máquina de solda.

#### Efeitos da flutuação de tensão

Os efeitos das flutuações de tensão basicamente são:

- Oscilações de potência e torque de motores elétricos;
- Interferência na instrumentação eletrônica, equipamentos de processamento de dados e de controle de processos industriais;
- Interferência em aparelhos residenciais, tais como: vídeos, relógios digitais e TVs;
- Redução da velocidade de fusão e da produtividade de fornos a arco;
- Falhas ou comprometimento do processo de soldagem;
- Desconforto visual provocado pela cintilação luminosa das lâmpadas, principalmente das incandescentes, também conhecido como efeito flicker.

Entretanto, o fenômeno flicker consiste no efeito mais comum provocado pelas oscilações de tensão. Este tema merece especial atenção, uma vez que o desconforto visual associado

à perceptibilidade do olho humano às variações da intensidade luminosa é, em toda sua extensão, indesejável.

### ***Métodos para a avaliação do flicker***

Os métodos de medição mais difundidos, em nível internacional, para a avaliação do efeito flicker são os seguintes:

- Método britânico: proposto pela Electrical Research Association (ERA);
- Método francês: apresentado pela “Electricité de France”;
- Método padrão: proposto pela União Internacional de Eletrotermia (UIE).

Cada um dos métodos de avaliação do efeito flicker possui filosofias distintas, no entanto, alguns fundamentos comuns podem ser destacados:

- A lâmpada incandescente é adotada como referência para a quantificação do efeito flicker;
- Os procedimentos baseiam-se no princípio de modulação de sinais;
- Os métodos britânico e padrão utilizam teorias estatísticas considerando o caráter aleatório das flutuações de tensão;
- Os métodos francês e padrão valorizam as frequências críticas existentes no sinal modulante, causadoras de maior incômodo ao olho humano.

A seguir, uma descrição detalhada do método padrão empregado na quantificação do fenômeno de cintilação luminosa.

#### ***Método padrão UIE***

O método padrão foi idealizado com o objetivo de unificar, em nível internacional, os critérios de medição mais difundidos. Como resultado, este método reúne as principais vantagens dos métodos francês e britânico e, por consequência, tornou-se mais flexível e abrangente do que os outros dois.

A uniformização foi proposta no âmbito da União Internacional de Eletrotermia (UIE), que propôs uma metodologia estatística para a avaliação da severidade de flicker, reconhecendo a característica aleatória do fenômeno. Desta forma, o método avalia, não somente o valor máximo num dado período, como também a porcentagem do tempo no qual um determinado nível de flicker foi excedido.

Para a realização da análise estatística, devem-se correlacionar os níveis de flicker e as correspondentes porcentagens de tempo de duração. Deste modo, os níveis instantâneos de flicker são classificados, ou seja, são organizados de forma a obter a distribuição de frequências da amostra e, por conseguinte, a correspondente Curva Função de Probabilidade Acumulada (FPC), em pu. Esta construção pode ser também designada por porcentagem de tempo não excedido para os níveis instantâneos de flicker. Logo, pode-se dizer que o procedimento adotado para a obtenção dos níveis instantâneos de flicker e sua distribuição de frequências engloba, respectivamente, o método francês e o método britânico. Pelo método francês, pelo cálculo das doses, tem-se o nível de flicker instantâneo e pelo método britânico, com levantamento das Curvas de Função de Probabilidade Acumulada (FPC) e sua complementar, obtém-se, respectivamente, os níveis que não foram ultrapassados e aqueles que foram excedidos durante uma determinada porcentagem de tempo do período de observação.

Se todas as curvas FPCs seguissem o mesmo tipo de distribuição, como a Gaussiana, por exemplo, a severidade do efeito flicker seria perfeitamente caracterizada por meio dos parâmetros média e desvio padrão. Entretanto, esta situação não corresponde à realidade. Verificou-se que, dependendo do tipo de distúrbio, as curvas FPCs obtidas apresentam-se sensivelmente diferentes.

Pelo que foi apresentado em relação às FPCs, no tocante às diferenças entre os resultados para cada tipo de distúrbio, constata-se a necessidade do estabelecimento de um único critério que quantifique a severidade de flicker, independentemente da forma do distúrbio. Esse critério, de acordo com o Método Padrão UIE, baseia-se na conversão da curva FPC em um índice representativo da severidade de flicker. Para tal, o procedimento adotado pela UIE, foi o desenvolvimento de um algoritmo que avaliasse a curva FPC em múltiplos pontos. Assim, este processo requer o cálculo de duas variáveis, a saber:

- PST – Índice de severidade de “Flicker” pelo método de curta duração ou “Short-TermProbability”;
- PLT – Índice de severidade de “Flicker” pelo método de longa duração ou “Long-TermProbability”.

O nível de severidade de flicker de curta duração, PST, é definido pela Equação 1.

$$PST = \sqrt{(K_1 \cdot P_1) + (K_2 \cdot P_2) + \dots + (K_n \cdot P_n)}$$

Em que:

PST – Valor correspondente ao índice de severidade de “Flicker” de curta duração;

K1, K2,.....Kn – Coeficiente de ponderação;

P1, P2,.....Pn – Probabilidade de determinados níveis de flicker serem excedidos.

Para a obtenção de um número adequado de pontos e de coeficientes, houve a necessidade de se resolver equações múltiplas, relacionando a severidade de flicker com as várias curvas FPCs. Analisados os resultados, verificou-se que uma solução equilibrada foi alcançada com a aplicação de cinco níveis probabilísticos, conforme o que segue:

- P0,1 – Nível excedido por 0,1% do período de observação;
- P1 – Nível excedido por 1% do período de observação;
- P3 – Nível excedido por 3% do período de observação;
- P10 – Nível excedido por 10% do período de observação;
- P50 – Nível excedido por 50% do período de observação.

O ponto de avaliação correspondente a 50% reflete o nível médio de flicker, fornecendo uma indicação geral da magnitude do distúrbio. Os demais pontos de avaliação caminham em direção ao final da escala de probabilidade (FPCC), objetivando ponderar de maneira apropriada os níveis mais elevados de flutuação, causadores de maior incômodo ao olho humano.

Observa-se que o máximo nível de flicker constatado durante o intervalo analisado, não é incluído nos níveis probabilísticos utilizados, descartando-se, assim, eventuais picos esporádicos. A escolha do ponto de avaliação correspondente a 0,1% fornece uma resposta adequada na análise deste tipo de evento.

Uma vez estabelecidos os pontos de avaliação, o próximo passo consiste na determinação do tempo dispensado para a avaliação do índice de severidade de flicker de curta duração. Embora as cargas perturbadoras possuam diferentes ciclos de operação, o tempo de análise deve ser independente da fonte de distúrbio considerada. Desta maneira, faz-se necessário considerar, novamente, o fenômeno fisiológico induzido no olho humano, na determinação do intervalo médio de tempo que melhor caracterize o efeito flicker. Por meio de testes de percepção realizados em seres humanos e suas reações ao fenômeno de cintilação luminosa, estipulou-se o período de dez minutos que, embora possa ser considerado longo para a pessoa exposta ao distúrbio, evita a supervalorização de picos esporádicos e ainda permite caracterizar, detalhadamente, distúrbios procedentes de equipamentos com ciclos de carga distintos.

Os valores P0,1, P1, P3, P10 e P50 são obtidos da curva complementar da FPC, ou seja, da curva 1-FPC no período de

dez minutos, consistindo dos níveis que foram excedidos em 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50%, respectivamente.

Com relação aos valores obtidos para os coeficientes  $K_i$ , estes foram determinados a partir da curva recomendada pelo documento IEC 555-3, a qual, baseada em investigações de sensibilidade do olho humano, correlaciona a variação de tensão com variações retangulares de tensão, por minuto, para a obtenção de PST igual a 1.

Simplificadamente, a conversão da curva FPC, em um índice representativo da severidade do incômodo visual para um período de dez minutos, é determinada de modo que o valor de PST seja igual a 1 para todos os valores de variação de tensão expressos pela curva IEC 60555-3. O estabelecimento de um valor limite para PST foi resultante de testes em laboratório; verificou-se que uma proporção substancial de observadores mostrou-se sensível ao flicker para PST igual a 1.

Os valores determinados para os coeficientes  $K_i$  são apresentados na Tabela 1.

**TABELA 1 – VALORES DOS COEFICIENTES  $K_i$**

COEFICIENTES DE PONDERAÇÃO	VALOR
$\kappa_{0,1}$	0.0314
$\kappa_1$	0.0525
$\kappa_3$	0.0657
$\kappa_{10}$	0.28
$\kappa_{50}$	0.08

A expressão resultante para o índice de severidade de flicker de curta duração, incluindo os valores dos coeficientes  $K_i$ , é dada pela Equação 2.

$$PST = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}} \quad (2)$$

A avaliação da severidade no nível flicker pelo método de curta duração é empregada, adequadamente, quando se realiza a análise de distúrbio causada por fontes individuais. Quando da existência de várias fontes de distúrbio ou cargas com longos e variáveis ciclos, torna-se necessária e conveniente uma análise criteriosa pelo índice de severidade de flicker de longa duração (PLT).

O índice de severidade de flicker de longa duração – PLT – mais utilizado é derivado do parâmetro PST a partir do cálculo da raiz cúbica dos valores de PST cúbicos, expresso pela Equação 3.

$$PLT = \left( \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (PST_i)^3 \right)^{1/3} \quad (3)$$

Conforme já citado, este método é empregado quando o distúrbio é provocado por várias fontes como máquinas de solda e motores, assim como quando as fontes possuem longos e variáveis ciclos de carga, como os fornos a arco.

O tempo requerido para a quantificação do nível de



“flicker”, segundo a avaliação pelo PLT, foi estipulado para cada duas horas de operação de carga.

Quanto aos limites aceitáveis do método padrão UIE, têm duas referências importantes no Brasil, as quais são representadas pelos valores indicados pelo Módulo 8, dos Procedimentos de Distribuição (Prodinst), definidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), bem como pelo submódulo 2.8, do Procedimento de Rede, definido pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

No caso do Prodinst, consideram-se três faixas para classificação dos indicadores PST e PLT: adequado, precário e crítico. Os valores de referência para cada uma das faixas é mostrado na Tabela 2 e o valor a ser considerado para o fator de transferência na Tabela 3:

**TABELA 2 – VALORES DE REFERÊNCIA – PRODINST**

VALOR DE REFERÊNCIA	$P_{ST}D95\%$	$P_{LT}D95\%$
ADEQUADO	$<1 \text{ p.u.} / FT$	$<0,8 \text{ p.u.} / FT$
PRECÁRIO	$1 \text{ p.u.} - 2 \text{ p.u.} / FT$	$0,8 \text{ p.u.} - 1,6 \text{ p.u.} / FT$
CRÍTICO	$>2 \text{ p.u.} / FT$	$>1,6 \text{ p.u.} / FT$

**TABELA 3 – FATORES DE TRANSFERÊNCIA – FT**

TENSÃO NOMINAL DO BARRAMENTO	FT
$TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} \geq 230 \text{ kV}$	0.65
$69 \text{ kV} \leq TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} < 230 \text{ kV}$	0.8
$TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} < 69 \text{ kV}$	1,0

Para o caso do procedimento de rede, consideram-se dois limites globais para avaliação de desempenho da qualidade da tensão: global inferior e superior, cujos valores são mostrados nas Tabelas 4 e 5:

**TABELA 4 – VALORES DE REFERÊNCIA – PROCEDIMENTO DE REDE**

LIMITE	$P_{ST}D95\%$	$P_{LT}D95\%$
GLOBAL INFERIOR	$1 \text{ p.u.} / FT$	$0,8 \text{ p.u.} / FT$
GLOBAL SUPERIOR	$2 \text{ p.u.} / FT$	$1,6 \text{ p.u.} / FT$

**TABELA 5 – FATORES DE TRANSFERÊNCIA - FT**

TENSÃO NOMINAL DO BARRAMENTO	FT
$TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} \geq 230 \text{ kV}$	0.65
$69 \text{ kV} \leq TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} < 230 \text{ kV}$	0.8
$TENSÃO \text{ DO BARRAMENTO} < 69 \text{ kV}$	1,0

\*GILSON PAULILO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em qualidade de energia elétrica pela universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Sua atuação é voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.

MATEUS DUARTE TEIXEIRA é engenheiro eletricista e mestre em sistemas de potência - qualidade de energia elétrica. Atua há mais de dez anos em projetos de tecnologia aplicada ao setor elétrico nas áreas de qualidade da energia, geração distribuída, eficiência energética e proteção de sistemas elétricos para empresas do setor.

**Continua na próxima edição**

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atituedeitoria.com.br](mailto:redacao@atituedeitoria.com.br)