



Aula 06 - Qualidade da energia elétrica

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

USP/EESC/SEL

Qualidade da Energia Elétrica

- **Agenda**
 - **Desequilíbrio de tensão**
 - **Flutuação de tensão**
 - **Variação da frequência**



Qualidade da Energia Elétrica

Desequilíbrio de tensão



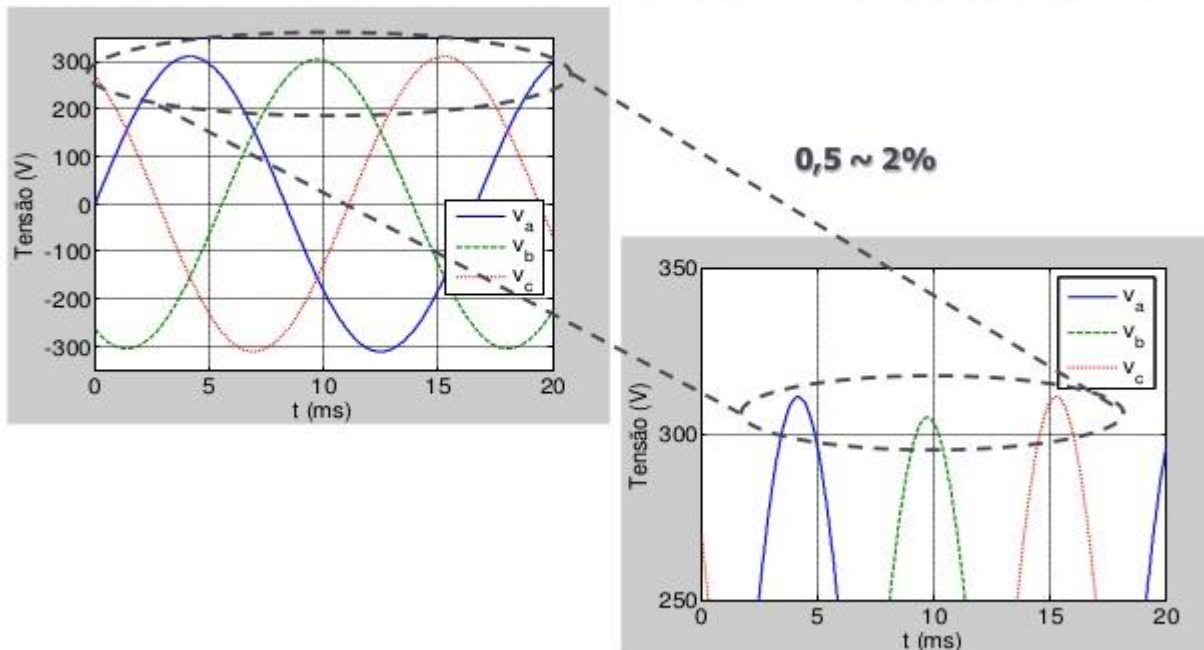
Desvio máximo dos valores médios das tensões e correntes trifásicas, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em percentagem.



O desequilíbrio também pode ser definido usando-se a teoria de *componentes simétricos*, tomando-se a **razão** entre os **componentes de sequência negativo (e/ou zero)** com o de **sequência positiva**.

Qualidade da Energia Elétrica

Desequilíbrios de Tensão



Qualidade da Energia Elétrica

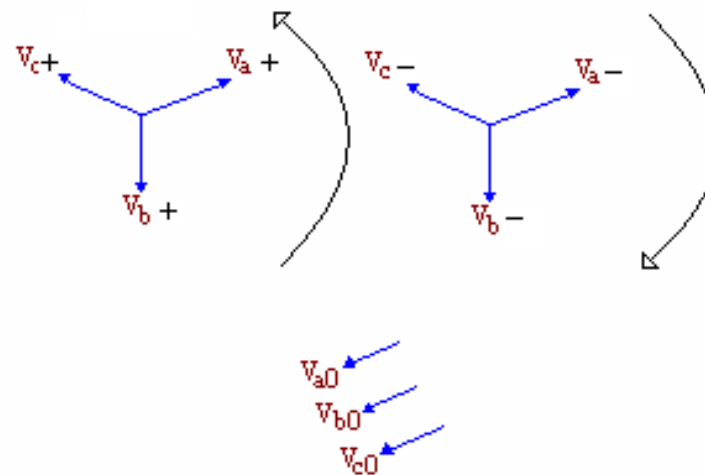
O método de **componentes simétricas** (também conhecido como **Teorema de Fortescue**) é usado para o estudo de sistemas de potência polifásicos desequilibrados. Consiste na decomposição dos elementos de tensão ou corrente das fases, em parcelas iguais, mas com ângulos de fase diferentes. Desta forma é possível desmembrar o circuito polifásico em n circuitos monofásicos, supondo válido o princípio da superposição, ou seja, que os circuitos sejam lineares.

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0}$$

$$V_b = V_{b1} + V_{b2} + V_{b0}$$

$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0}$$

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$



- Componentes de sequência +, - e 0 (zero).

$$V_{b0} = V_{a0} \quad V_{c0} = V_{a0}$$

$$V_{b1} = a^2 V_{a1} \quad V_{c1} = a V_{a1} \quad a = 1 \angle 120^\circ$$

$$V_{b2} = a V_{a2} \quad V_{c2} = a^2 V_{a2}$$

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ As **origens** estão geralmente nos **sistemas de distribuição**, os quais possuem **cargas monofásicas distribuídas inadequadamente**, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa.
- ✓ Este problema se agrava quando **consumidores** alimentados de forma **trifásica** possuem uma **má distribuição de carga** em seus circuitos internos, impondo **correntes desequilibradas** no circuito da concessionária.

Qualidade da Energia Elétrica



Também podem ser resultado da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.



Manifesta-se sob três formas distintas:

- amplitudes diferentes;
- assimetria nas fases; e
- assimetria conjunta de amplitude e fase.

Qualidade da Energia Elétrica



Motores de indução: quando tensões de **sequência negativa** são aplicadas ao estator do motor, surge um **campo magnético** que **gira no sentido contrário** ao campo da **sequência positiva** (contrário ao sentido de rotação do motor) o que resulta em um conjugado pulsante no eixo da máquina.



Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ As **correntes de sequência negativa** causam um **sobreaquecimento da máquina**.
- ✓ **Redução da vida útil dos motores**: material isolante sofre uma deterioração.



Qualidade da Energia Elétrica



Máquinas síncronas: a corrente de sequência negativa fluindo através do estator, cria um campo magnético girante com velocidade igual a do rotor, porém, no sentido contrário ao de rotação definido pela sequência positiva.



As correntes aumentarão as perdas no rotor, principalmente no enrolamento de amortecimento, que possui baixa impedância onde, conseqüentemente, a corrente será mais elevada.

Qualidade da Energia Elétrica



Retificadores: uma ponte retificadora em condições nominais, controlada ou não, injeta na rede CA, componentes harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem, dentre outras.



Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Quando o **sistema supridor** encontra-se **desequilibrado**, os **retificadores** passam a gerar, além das correntes harmônicas características, o **terceiro harmônico e seus múltiplos**.
- ✓ Possibilita a **manifestação** de **ressonâncias não previstas**, visto que não é prática a instalação de filtros de terceiro harmônico nas instalações.

Qualidade da Energia Elétrica

Flutuações de tensão

- ✓ 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 pré-estabelecidos entre **0,95** e **1,05 p.u.** (ANSI C84.1).
- ✓ Inicialmente, eram decorrentes da operação de cargas com características de **alterações rápidas** e **bruscas nas magnitudes das potências ativa e reativa** (fornos a arco).

Qualidade da Energia Elétrica

Flutuações de tensão

✓ **Agora:** superposição de componentes inter-harmônicas ao sinal de tensão na frequência fundamental.

“ As flutuações de tensão são variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz da tensão no fornecimento, provocadas pela operação de cargas capazes de produzir componentes de frequências inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes de energia elétrica”.

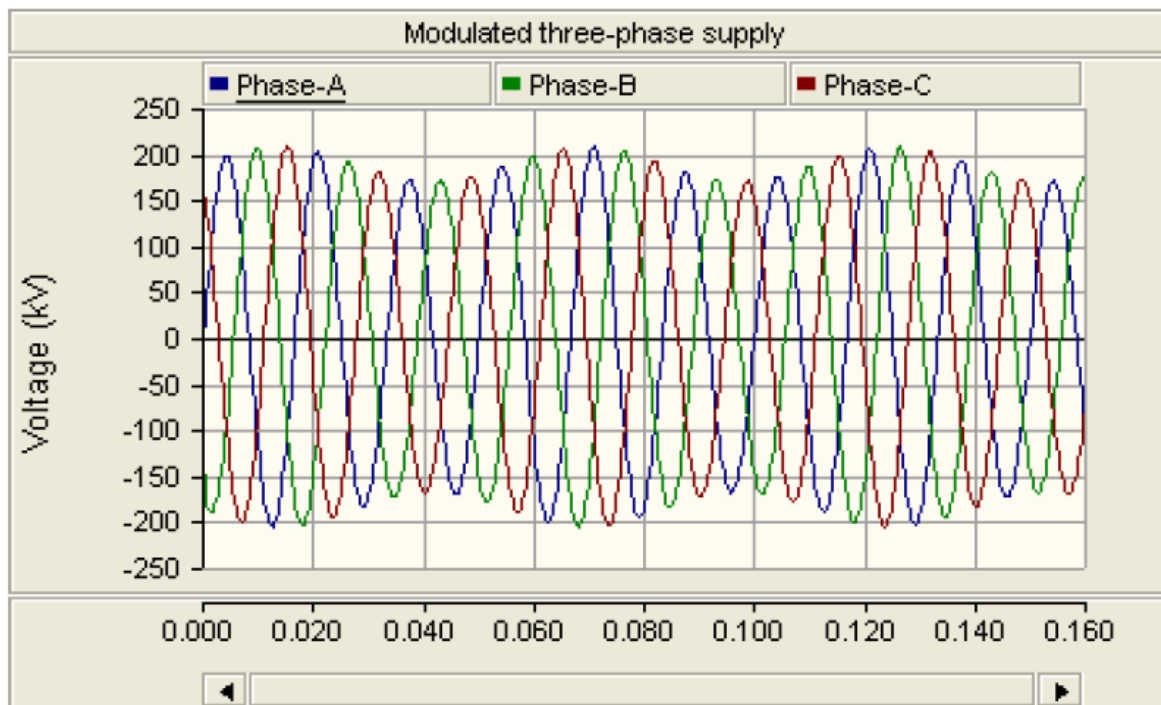
Exemplo de cargas: cicloconversores (converte a corrente alternada em uma frequência ajustável) e cargas com dupla conversão (CA-CC para CC-CA).

Qualidade da Energia Elétrica

Flutuações de tensão

- ✓ Causadas por cargas que consomem grandes volumes de energia reativa que, não suportadas adequadamente pela **potência de curto-circuito** das redes, acabam por causar seguidos afundamentos na tensão de alimentação.
- ✓ Impactos relevantes tanto para pequenos consumidores residenciais quanto para grandes industriais, dos mais variados tipos de processos.
- ✓ Variações rápidas (ciclos de duração), repetitivas e aleatórias, não sendo possível sua estabilização através de equipamentos de regulação (reguladores de tensão, BCs automáticos e tapes automáticos de transformadores).

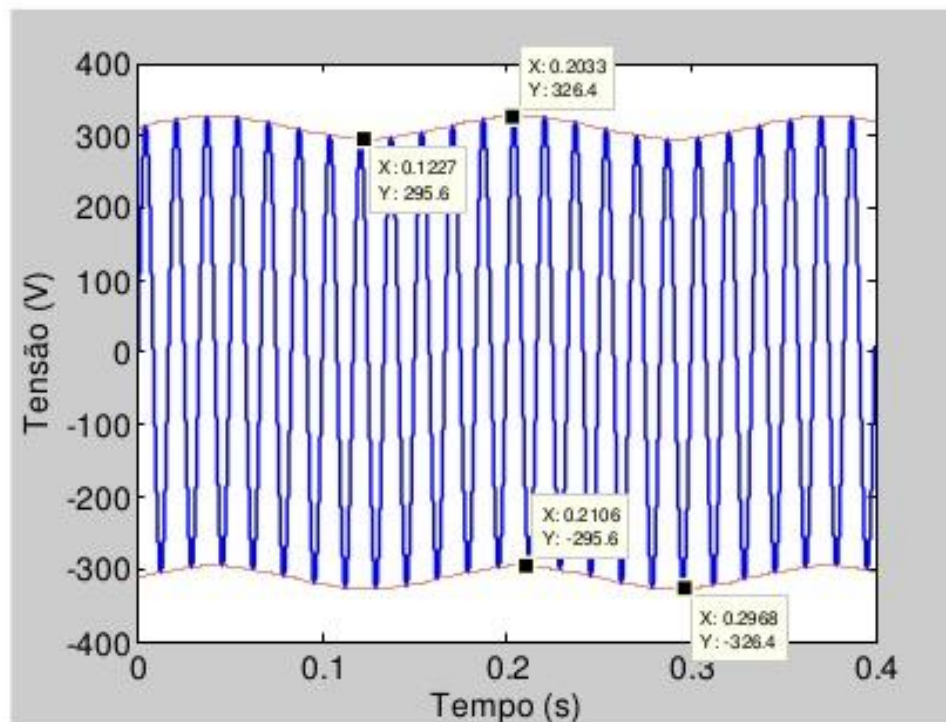
Qualidade da Energia Elétrica



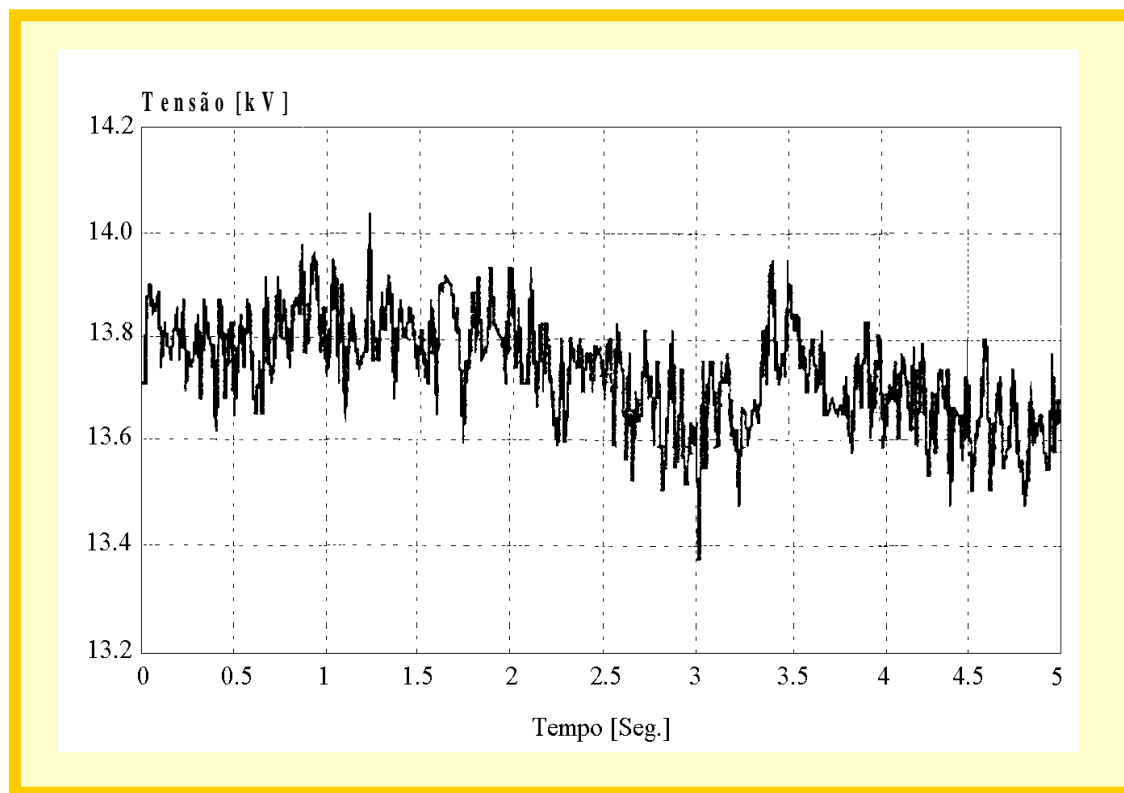
- ✓ **Flicker** observado sobre um sistema trifásico.
- ✓ Na prática, o comportamento do envelope de modulação é totalmente aleatório em termos de frequência e amplitude da modulação.

Qualidade da Energia Elétrica

Flutuação de Tensão



Qualidade da Energia Elétrica



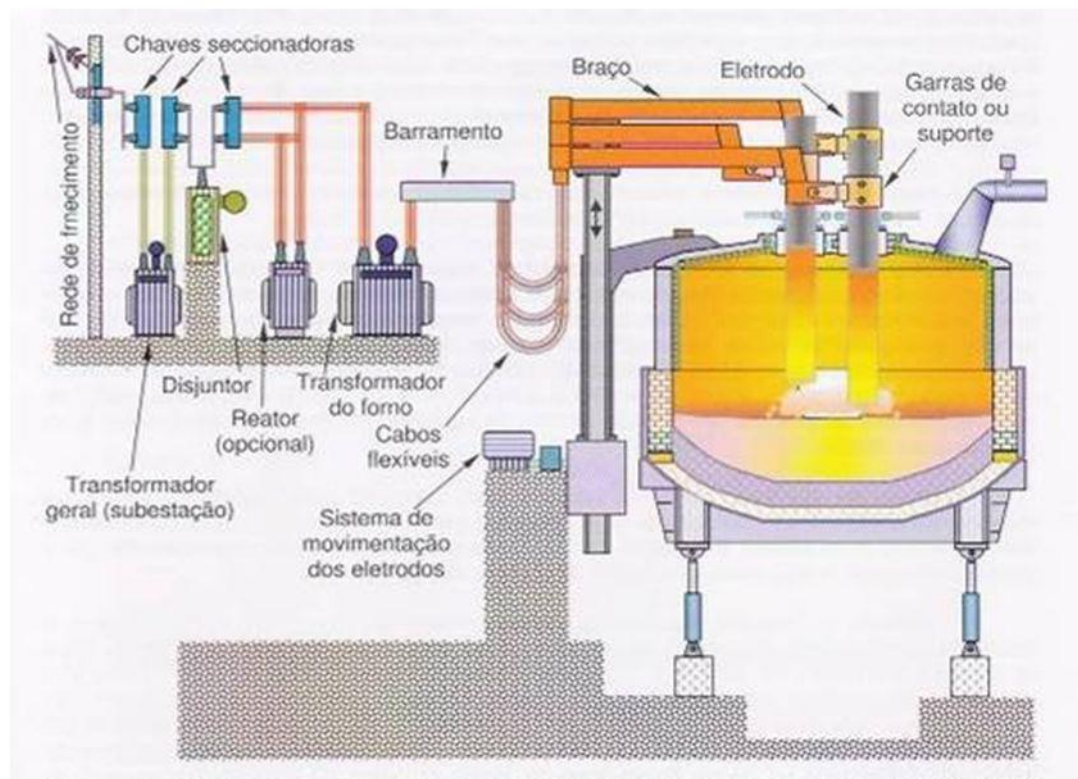
Flutuação de tensão oriundas da operação de um laminador

Qualidade da Energia Elétrica

- **Flutuações Aleatórias:** causadas por **fornos a arco**, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material e do nível de curto-circuito da instalação.
- **Flutuações Repetitivas:** causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias.
- **Flutuações Esporádicas:** causadas pela partida direta de grandes motores.

Qualidade da Energia Elétrica

Principais Equipamentos Elétricos do FEA



Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos gerais das flutuações de tensão:

- Falhas de sensores e equipamentos de comando elétrico que operam através da identificação da passagem por zero ou de picos dos valores instantâneos da tensão e/ou corrente.
- Aquecimento adicional em máquinas e condutores devido ao incremento de parcelas de perdas joulicas.
- Saturação de transformadores de correntes.
- Interferências em sistemas de telecomunicação.
- Incremento de vibrações mecânicas e ruídos audíveis.
- **Cintilação luminosa, ou *flicker*.**

Qualidade da Energia Elétrica

Efeitos gerais das flutuações de tensão:

- **Máquinas elétricas:** frequências entre 0,2 e 2 Hz – oscilações eletromecânicas (variações no torque e no escorregamento da máquina, podendo levar à fadiga mecânica do motor e a redução da vida útil).
- **Retificadores e inversores de frequência:** geração de harmônicas não características e de inter-harmônicas (falha de comutação e até a perda total).
- **Equipamentos de aquecimento:** redução da eficiência e maiores tempos para cada ciclo de operação, aumentando o custo do processo. Exemplo de cargas: estufas, fornos a arco e a indução.

Qualidade da Energia Elétrica

Métodos de atenuação das flutuações de tensão:

- **Elevação do nível de curto-circuito:** recondutoramento do circuito de alimentação da planta industrial (redução da impedância série do circuito); elevação dos níveis de tensão no fornecimento (redução da corrente de linha); implantação de sistema de compensação série no circuito de alimentação da planta industrial; duplicação do circuito de alimentação da planta industrial (redução da impedância série); e instalação de compensador síncrono.
- **Instalação de compensadores estáticos e auto comutados:** capacitor chaveado a tiristores, reatores controlados a tiristores, compensador automático (STATCOM).
- **Instalação de reatores a núcleo saturado**

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ O termo **flicker** é derivado do impacto da flutuação de tensão sobre as lâmpadas como o observado pelo olho humano.
- ✓ **Flutuação de tensão** é um fenômeno eletromagnético, enquanto **flicker (cintilação)** é o resultado indesejável da flutuação de tensão em algumas cargas.
- ✓ **Flicker**: definido por sua magnitude em valor RMS e expresso como uma porcentagem da fundamental.
- ✓ **Forno a arco**: causa mais comum de flutuação de tensão nas companhias de transmissão e de distribuição.

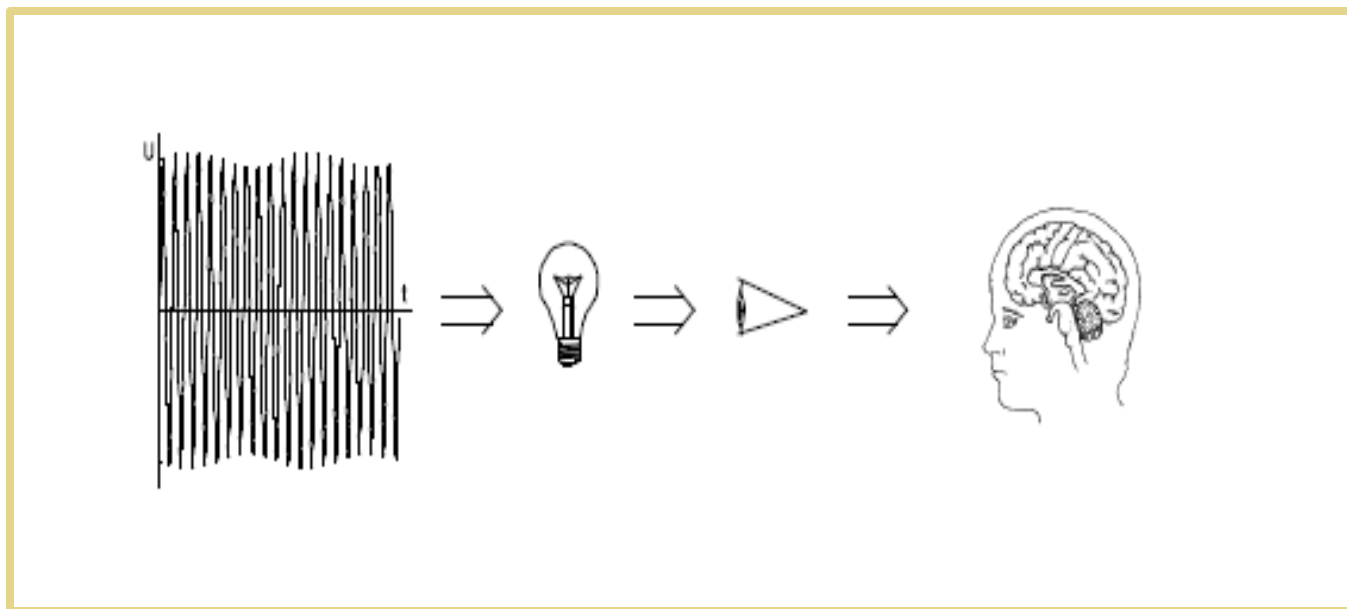
Qualidade da Energia Elétrica

Flutuações de tensão

- ✓ O que se pode verificar é um efeito “pisca-pisca” do sistema de iluminação existente (fluorescente e de vapor), além de má operação de sistemas de controle e automação instalados.
- ✓ Situação típica em localidades (mesmo em cidades) que possuem siderúrgicas com fornos a arco ou indústrias que possuem em seus processos sistemas de solda a ponto e outras cargas com elevado consumo de energia reativa.
- ✓ A solução para estes fenômenos é o reforço da rede (**elevação da potência de curto-circuito**) ou a adequada **compensação dos reativos**.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Medido com respeito a sensibilidade do olho humano.
- ✓ Variações nas magnitudes abaixo de 0,5% podem resultar em um efeito perceptível (frequência na faixa de 6 a 8 Hz).



Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **IEC 61000-4-15** define a metodologia e especificações da instrumentação para medir *flicker*.
- ✓ **Short-term flicker sensation (Pst): severidade de tempo curto**, medido pelo período de tempo contínuo de 10 min.
- ✓ **Long-term flicker sensation (Plt): severidade de tempo longo**, medido por um período contínuo de 2h - 12 intervalos de Pst.
- ✓ Estes valores são derivados da medição e processamento das tensões dos barramentos, traduzidas em níveis de sensação de cintilação luminosa, com posterior classificação em faixas de probabilidade de ocorrência.
- ✓ Valor é normalizado (1.0) para representar o nível de flutuação suficiente para causar um *flicker* perceptível a 50% do grupo observador.

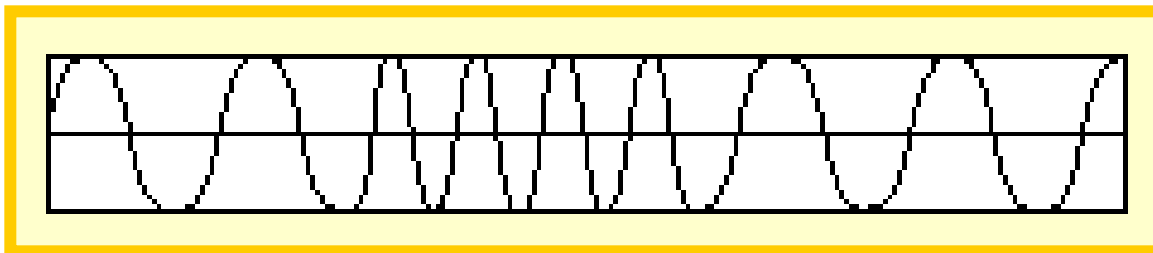
Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **PstD95%:** Valor diário do indicador ***Pst*** que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24h.
- ✓ **PltS95%:** Valor semanal do indicador ***Plt*** que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos.
- ✓ IEC (*International Electrotechnical Commission*): IEC 61000-4-15. Flickermeter – Functional and Design Specifications.

Qualidade da Energia Elétrica

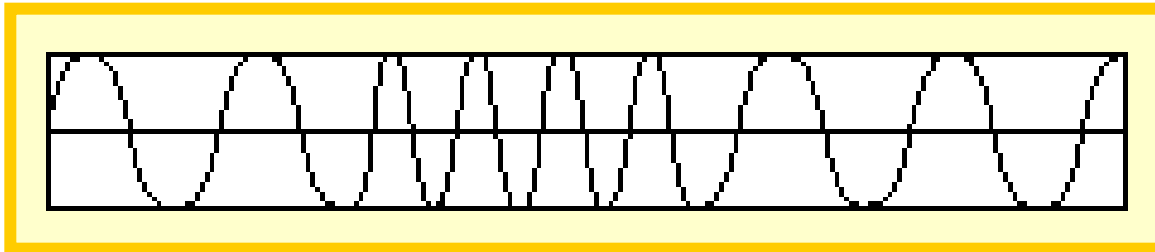
Variação na frequência do sistema

- ✓ Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como o **desvio no valor da frequência fundamental**, de seus valores nominais especificados (50 ou 60 Hz).
- ✓ A **frequência do sistema** de potência está diretamente relacionada à **velocidade de rotação dos geradores** que suprem o sistema.



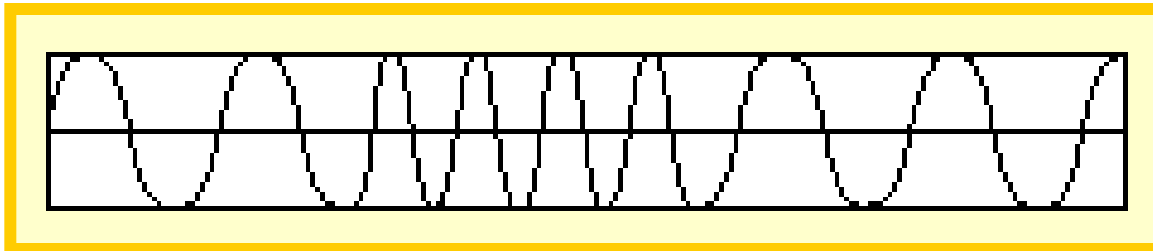
Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Há pequenas variações na frequência em decorrência do balanço dinâmico entre carga e geração.
- ✓ A variação observada depende da característica da carga e da resposta dos controladores do sistema de geração às alterações.



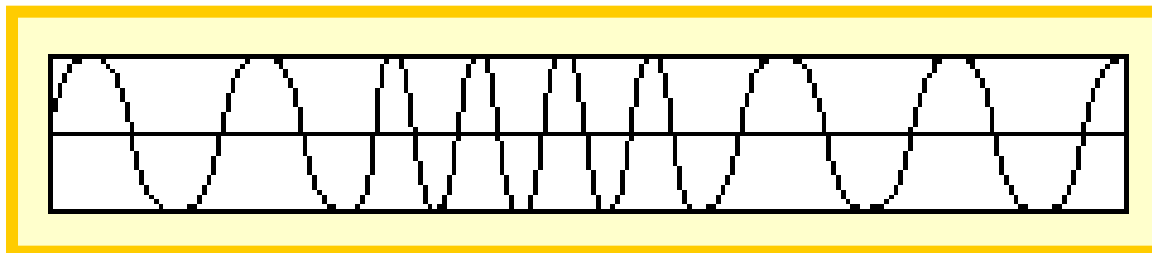
Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Variações na frequência que ultrapassem os limites para a operação em regime permanente podem ser causadas por **faltas no sistema de transmissão, desconexão de um grande bloco de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.**

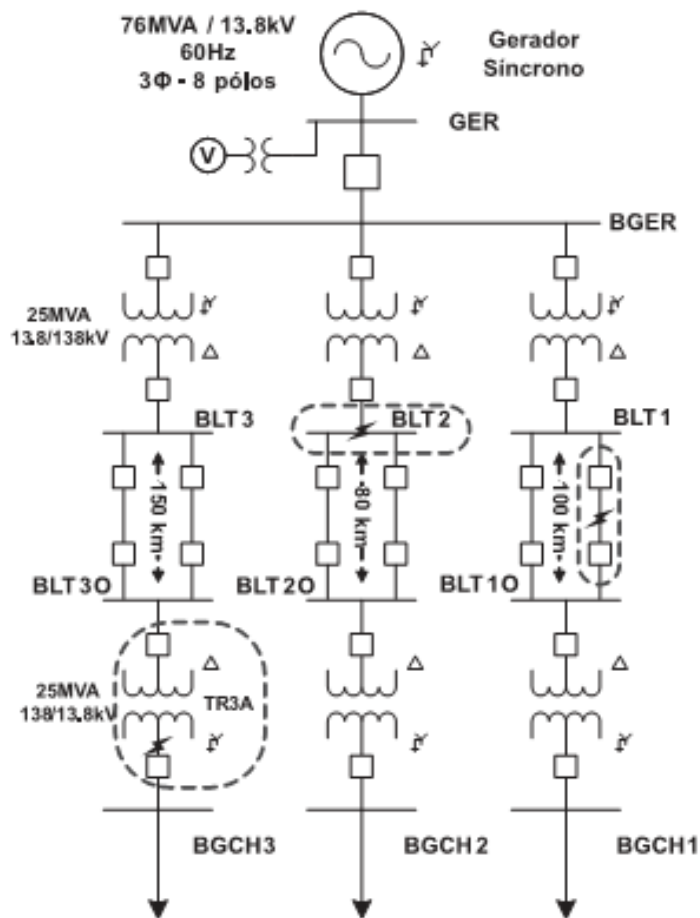


Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Em um sistema interconectado, são raras as ocorrências de variação da frequência.
- ✓ São mais frequentes em cargas supridas por geradores isolados do sistema da companhia.

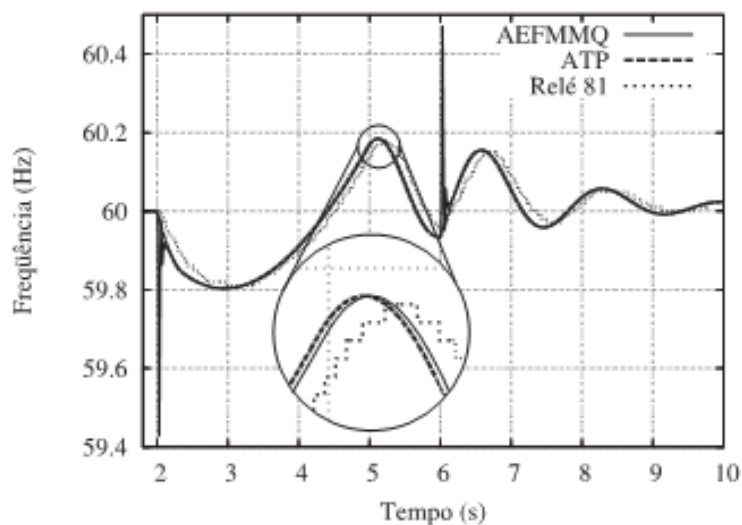


Qualidade da Energia Elétrica

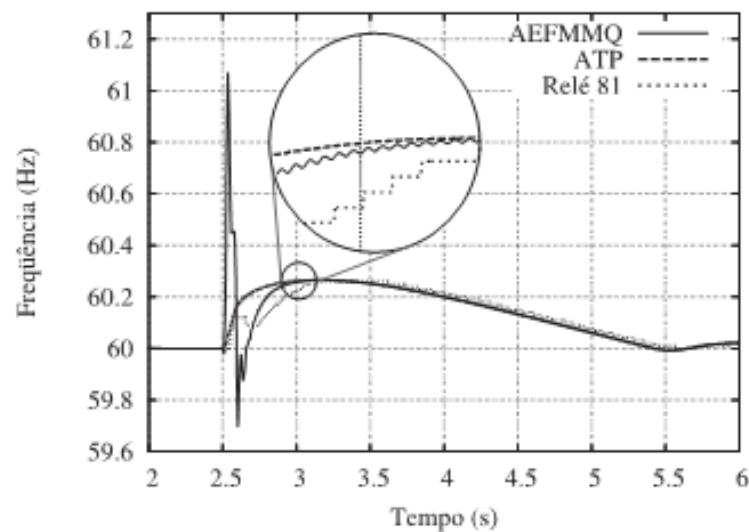


- Representação do sistema elétrico em análise utilizando o software ATP.

Qualidade da Energia Elétrica



- Ligamento e desligamento súbito do barramento BGCH3 em 2 e 6 s, respectivamente.



- Falta 3F a 50% do comprimento da linha 1 com posterior desligamento.