



Aula 06 – SEL0409

Qualidade da energia elétrica

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

USP/EESC/SEL
2018

Qualidade da Energia Elétrica

- **Agenda**

- **Fenômenos de interesse:**

- VTLD - Variações de Tensão de Longa Duração
- Transitórios: impulsivos e oscilatórios

Qualidade da Energia Elétrica

Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD)

- ✓ Período superior a 1 min.
- ✓ Podem ser caracterizadas como desvios que ocorrem no valor eficaz da tensão (frequência do sistema).
- ✓ Estas variações podem estar associadas a sobre ou subtensões e, geralmente, não resultam em falhas do sistema, mas são causadas por:
 - variações na carga e/ou
 - operações de chaveamento.

Qualidade da Energia Elétrica

✓ Sobretensão

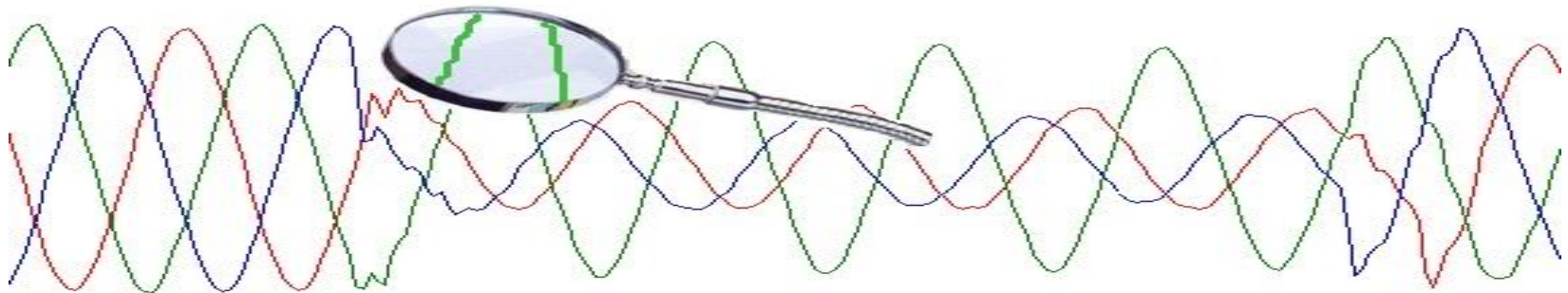
Aumento no valor eficaz da tensão CA, maior do que 110% (valores típicos entre 1,1 a 1,2 p.u.), considerando-se a frequência do sistema, por uma duração maior do que 1 min.

Decorrente do:

- desligamento de grandes blocos/cargas;
- energização de bancos de capacitores; e
- *taps* dos transformadores incorretamente conectados.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **Conseqüências:** falha dos equipamentos (vida útil reduzida).
- ✓ **Solução:** troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, tanto em sistemas das concessionárias como em sistemas industriais.



Qualidade da Energia Elétrica

✓ **Subtensão**

Decréscimo no valor eficaz da tensão CA, para menos de 90% na frequência do sistema com uma duração superior a 1 min.

Decorrente do:

- carregamento excessivo de circuitos alimentadores;
- desligamento de bancos de capacitores; e
- excesso de reativo transportado pelos circuitos de distribuição.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ A queda de tensão por fase é função da **corrente de carga**, do **fator de potência** e dos **parâmetros R e X** da rede:

$$\Delta V = I(R \cos \phi + X \sin \phi)$$

Nesta:

ΔV - queda de tensão por fase;

I - corrente da rede;

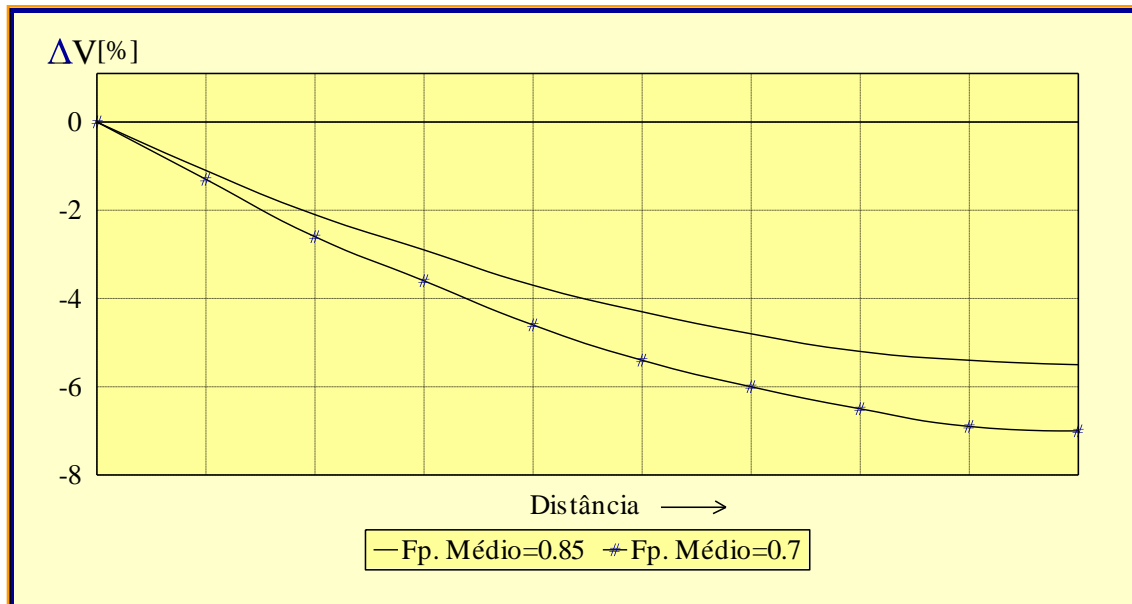
R - resistência por fase da rede;

X - reatância por fase da rede; e

$\cos \theta$ - fator de potência.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Consumidores mais distantes da subestação estarão submetidos a menores níveis de tensão.
- ✓ Quanto menor o fator de potência, maiores serão as perdas reativas na distribuição.



- ✓ Perfil de tensão ao longo de um alimentador em função do fator de potência.

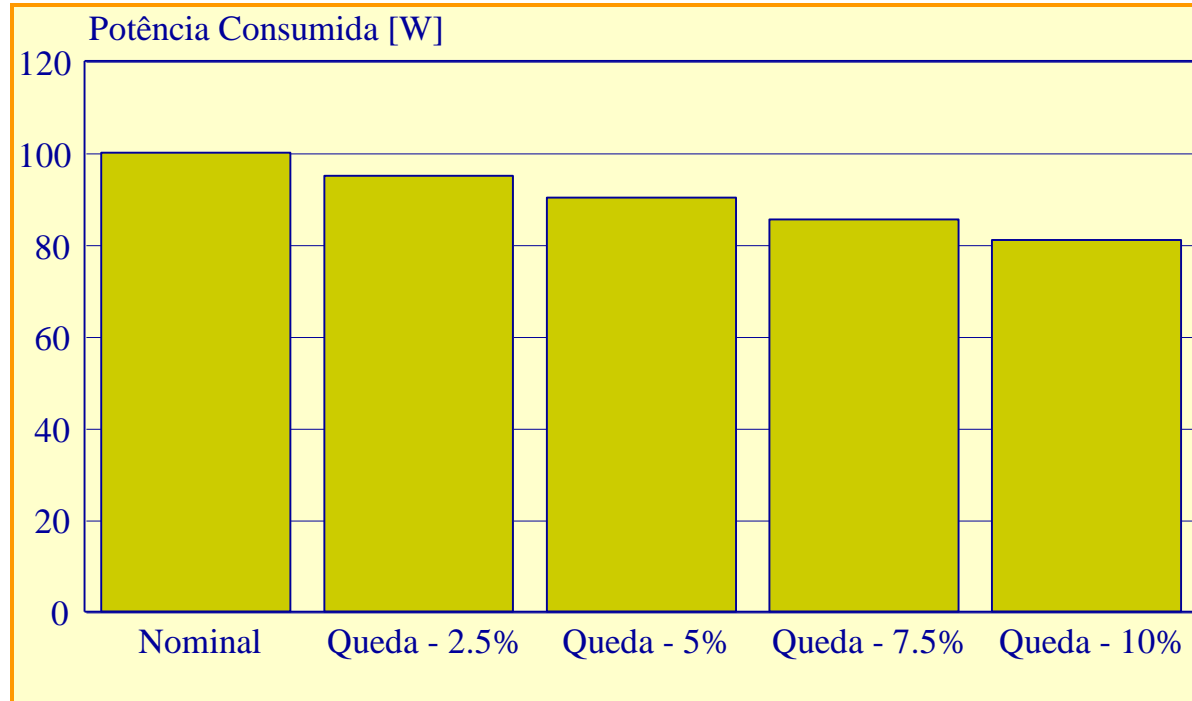
Qualidade da Energia Elétrica



Dentre os problemas causados, destacam-se:

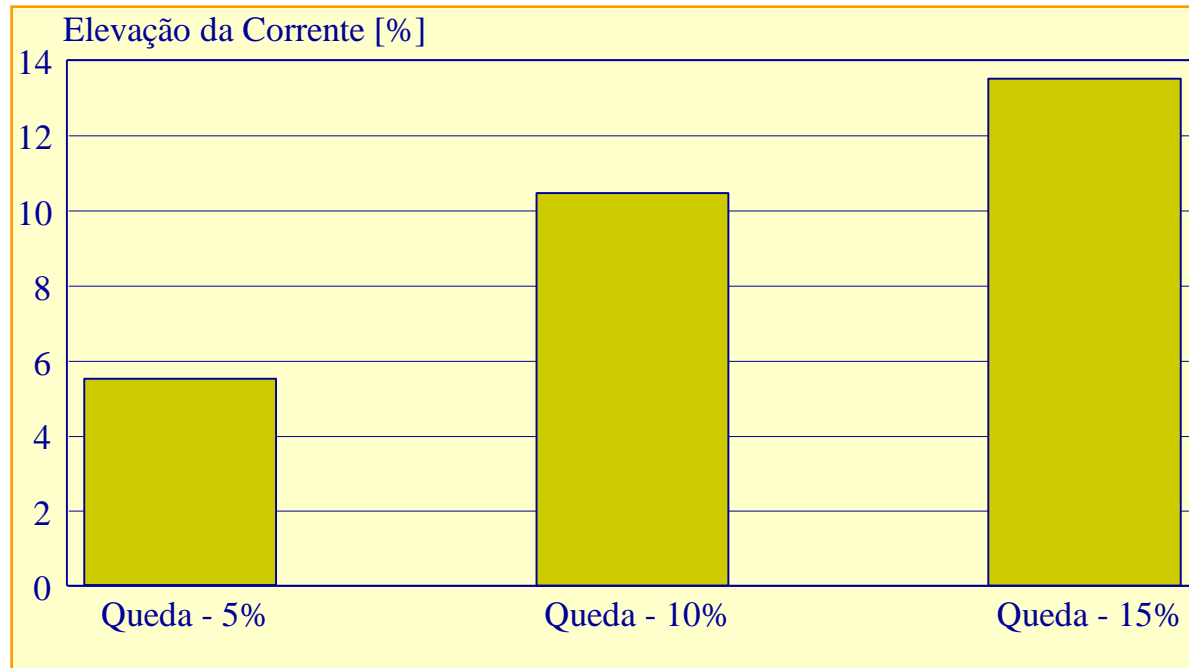
- redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;
- possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos;
- redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente;
- elevação do tempo de partida das máquinas de indução; e
- sobreaquecimento de máquinas.

Qualidade da Energia Elétrica



- ✓ Potência consumida por uma lâmpada incandescente de 100 W para diferentes tensões.

Qualidade da Energia Elétrica



✓ Elevação de corrente num motor de indução de 5 CV ($\pm 4,93$ HP) em função da tensão de alimentação.

Qualidade da Energia Elétrica



Interrupção sustentada

Quando o fornecimento de **tensão permanece em zero** por um período de **tempo que excede 1 min.**

São geralmente permanentes e requerem **intervenção humana** para **reparar e retornar o sistema à operação normal** no fornecimento de energia.

Podem ocorrer de forma **inesperada** ou de forma **planejada**.

Qualidade da Energia Elétrica



A maioria ocorre inesperadamente devido:

- a falhas nos disjuntores;
- queima de fusíveis; e
- falha de componentes do circuito alimentado.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ No caso das **planejadas**, são feitas para executar a **manutenção das redes**.



Qualidade da Energia Elétrica



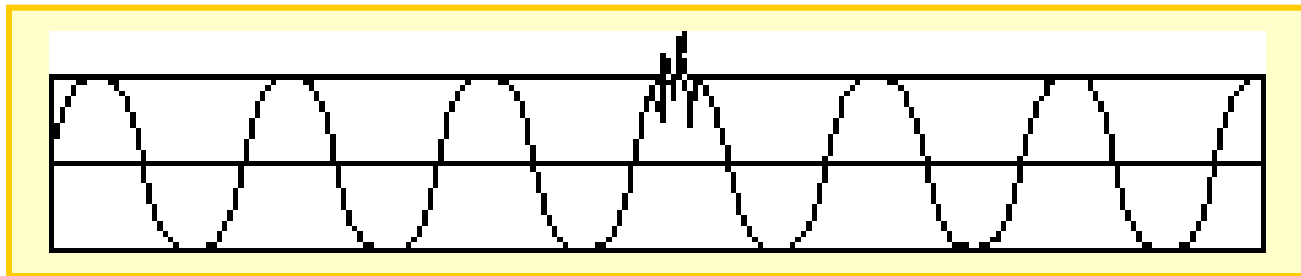
Seja a interrupção inesperada ou planejada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- o número de interrupções seja mínimo;
- uma interrupção dure o mínimo possível; e
- o número de consumidores afetados seja pequeno.

Qualidade da Energia Elétrica

Transitório: impulsivos e oscilatórios

- ✓ Evento que é indesejável, mas momentâneo, em sua natureza.
- ✓ Manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de **alterações súbitas nas condições operacionais** de um sistema de energia elétrica.
- ✓ A **duração** de um transitório é **muito pequena**, mas de grande importância.



Qualidade da Energia Elétrica

Descargas Atmosféricas

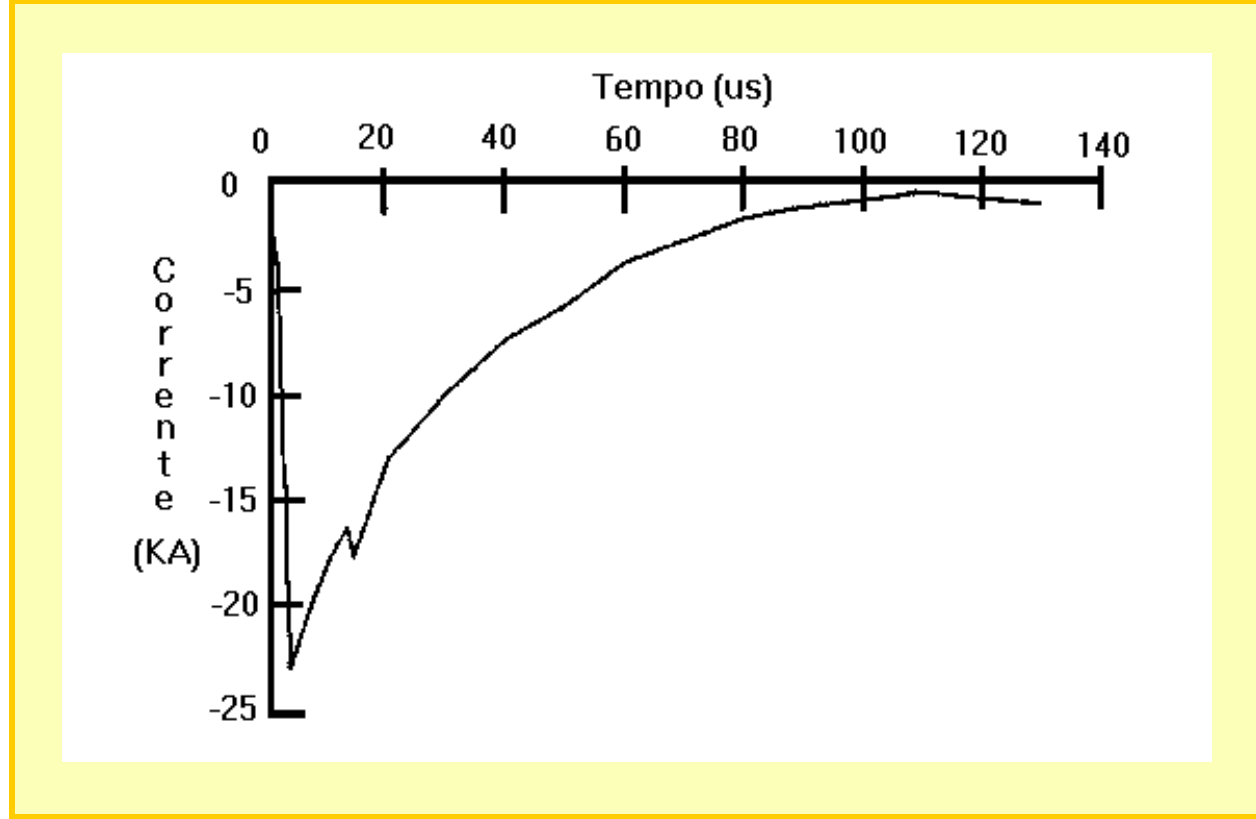


Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Súbita **alteração repentina nas condições de regime permanente**, refletido nas formas de ondas da tensão e corrente, ou ambas.
- ✓ **Impulsos unidirecionais** na sua polaridade (positivo ou negativo).
- ✓ **Descargas atmosféricas** com frequência diferente daquela da rede elétrica.

Qualidade da Energia Elétrica

Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica



Qualidade da Energia Elétrica



Normalmente caracterizados pelos seus tempos de aumento e decaimento, os quais podem ser revelados pelo **conteúdo espectral do sinal em análise.**

- $\pm 6 \times 22 \mu\text{s}$ -23 kA: nominalmente aumenta de zero até seu valor de pico de 23 kA em 6 μs e decai a um valor médio do seu pico em 22 μs .

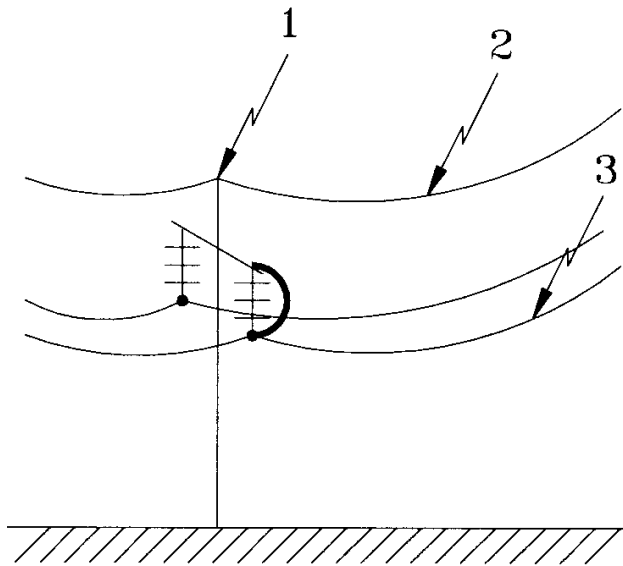
Qualidade da Energia Elétrica



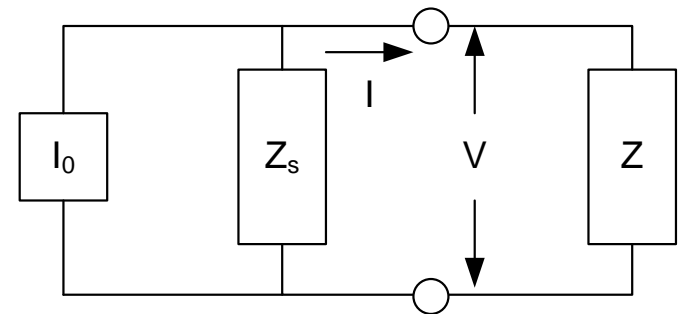
Os principais problemas de qualidade da energia causados por estas correntes no sistema são:

- **elevação do potencial do terra local**, em relação a outros terras, em vários kV; e
- **indução de altas tensões** nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.

Qualidade da Energia Elétrica



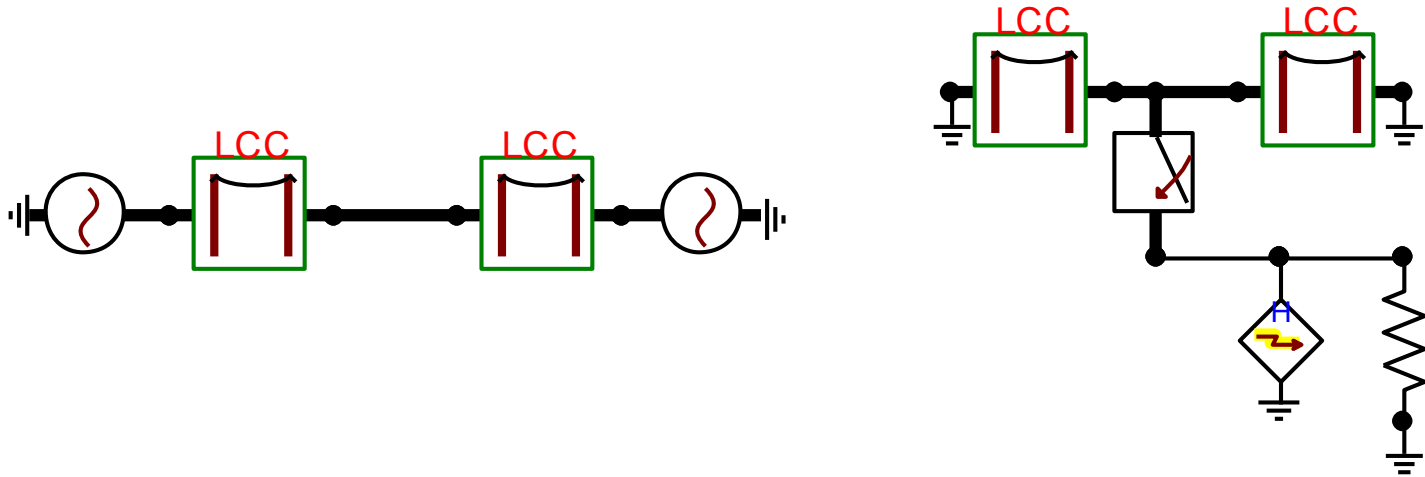
- Descargas diretas: 1- descarga direta na estrutura, 2 – descarga direta no cabo guarda, 3 – descarga direta no cabo energizado.



- Equivalente de Thèvenin para caracterizar descargas atmosféricas.

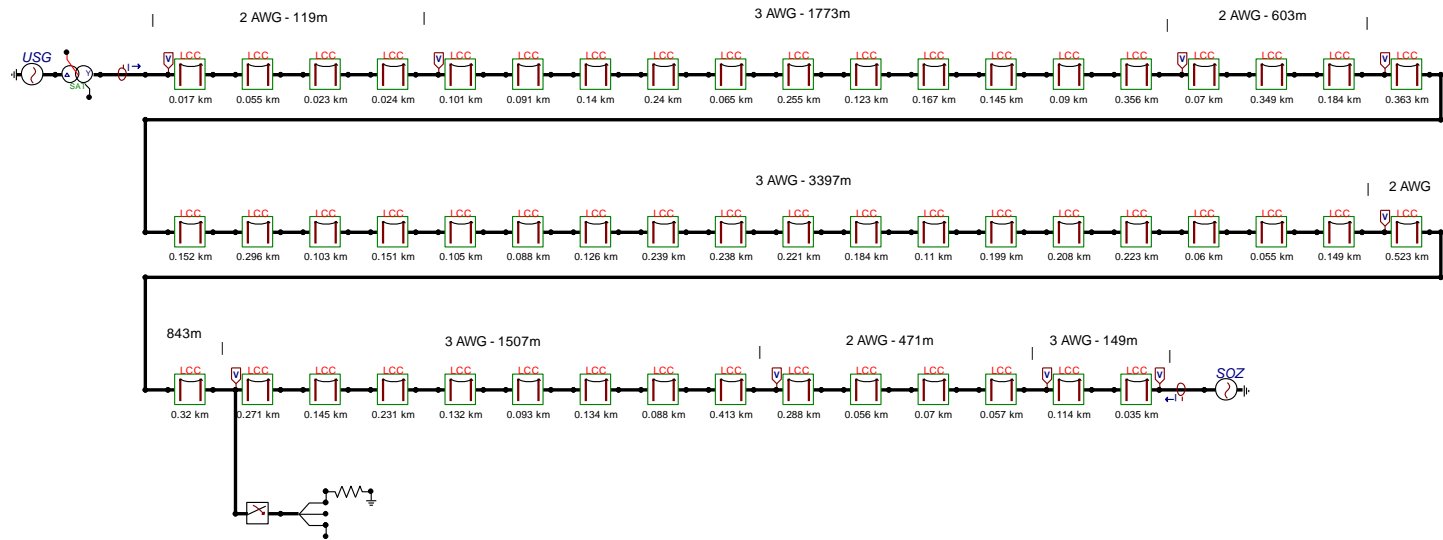
Onde I_0 é a corrente de descarga, Z_s é a impedância variável entre 1.000 e 3.000 Ω e Z representa a impedância equivalente do circuito.

Qualidade da Energia Elétrica



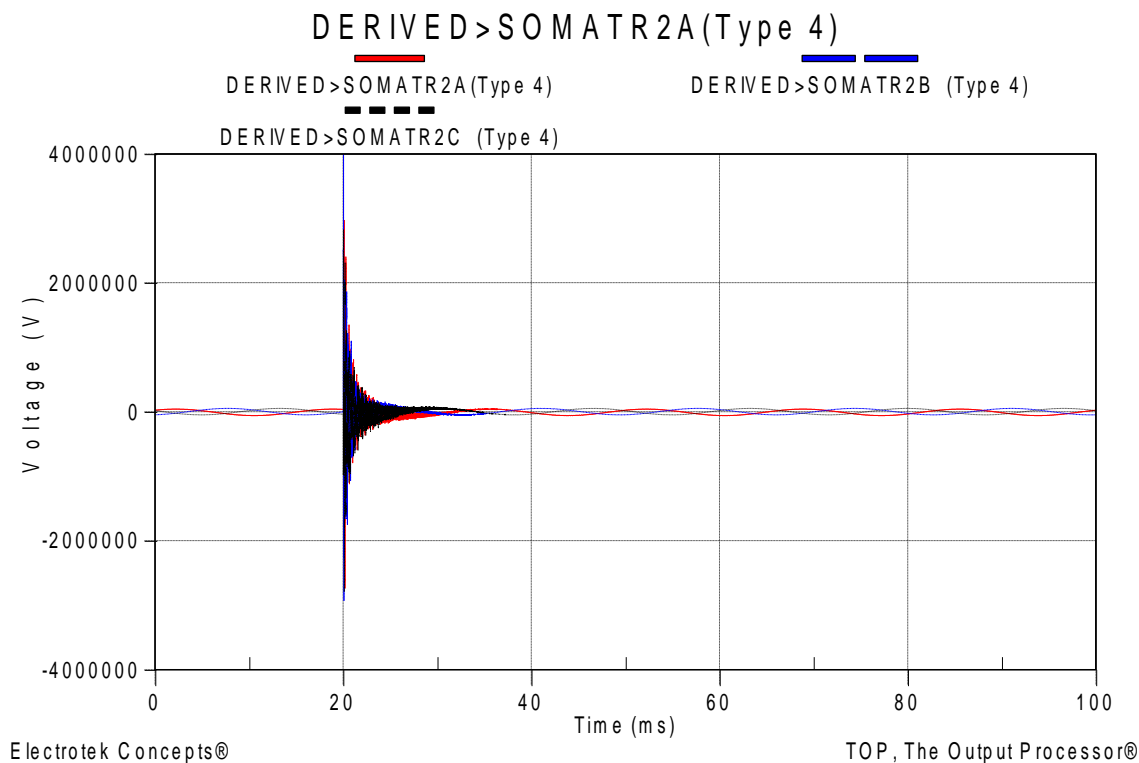
- Regime permanente (representação a esquerda) e a consideração da descarga atmosférica com ambas a extremidades da linha aterrada (representação a direita).

Qualidade da Energia Elétrica



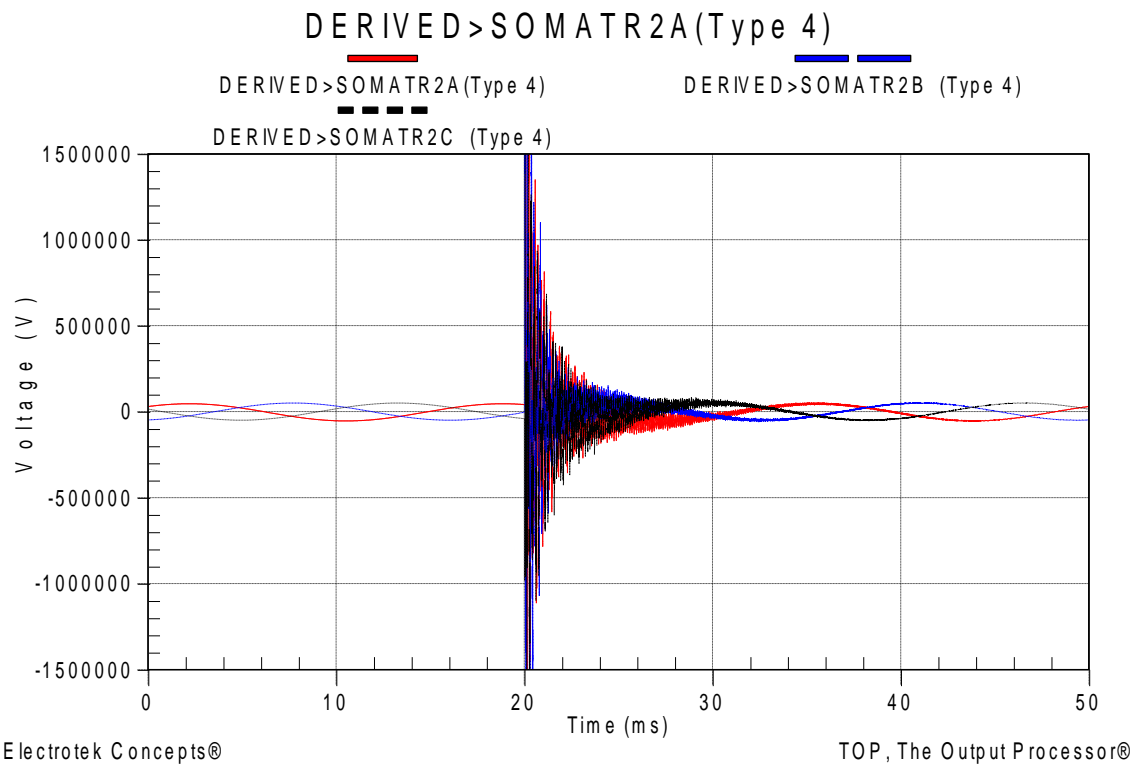
- Modelo completo simulado da linha de transmissão via *software* ATP.

Qualidade da Energia Elétrica



- Sobretensões observadas próximo à Usina Salto Grande devido à aplicação de uma situação de descarga atmosférica (escala completa).

Qualidade da Energia Elétrica



- Sobretensões observadas próximo à Usina Salto Grande devido à aplicação de uma situação de descarga atmosférica (escala reduzida).

Qualidade da Energia Elétrica

Transitórios **oscilatórios**

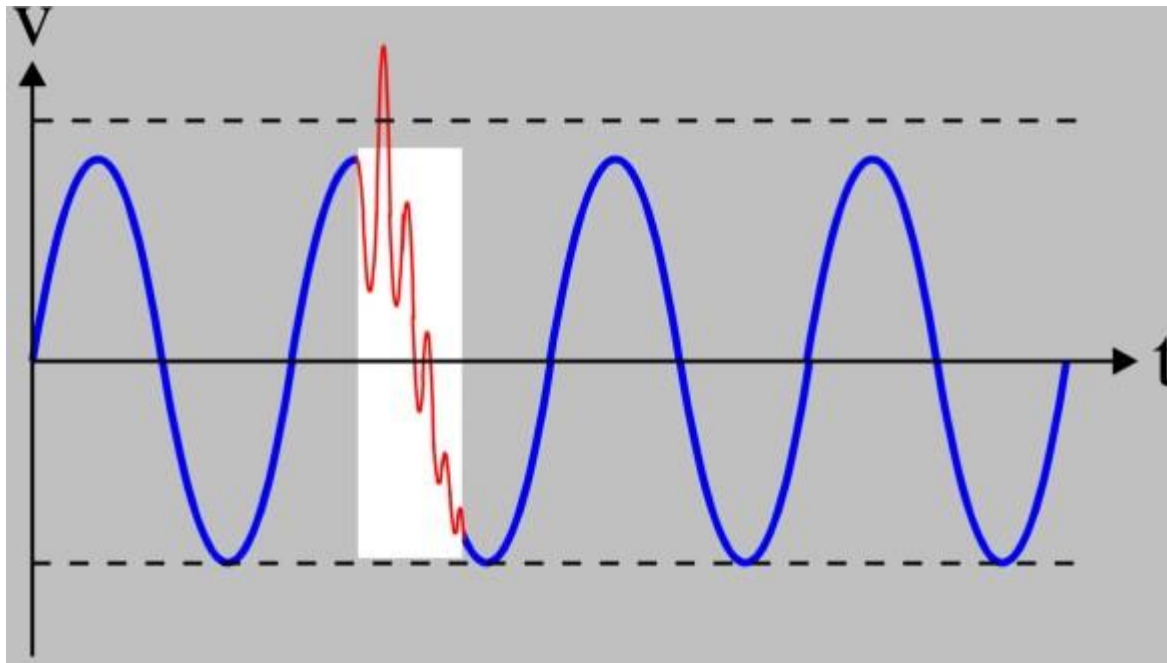
Chaveamento de BCs



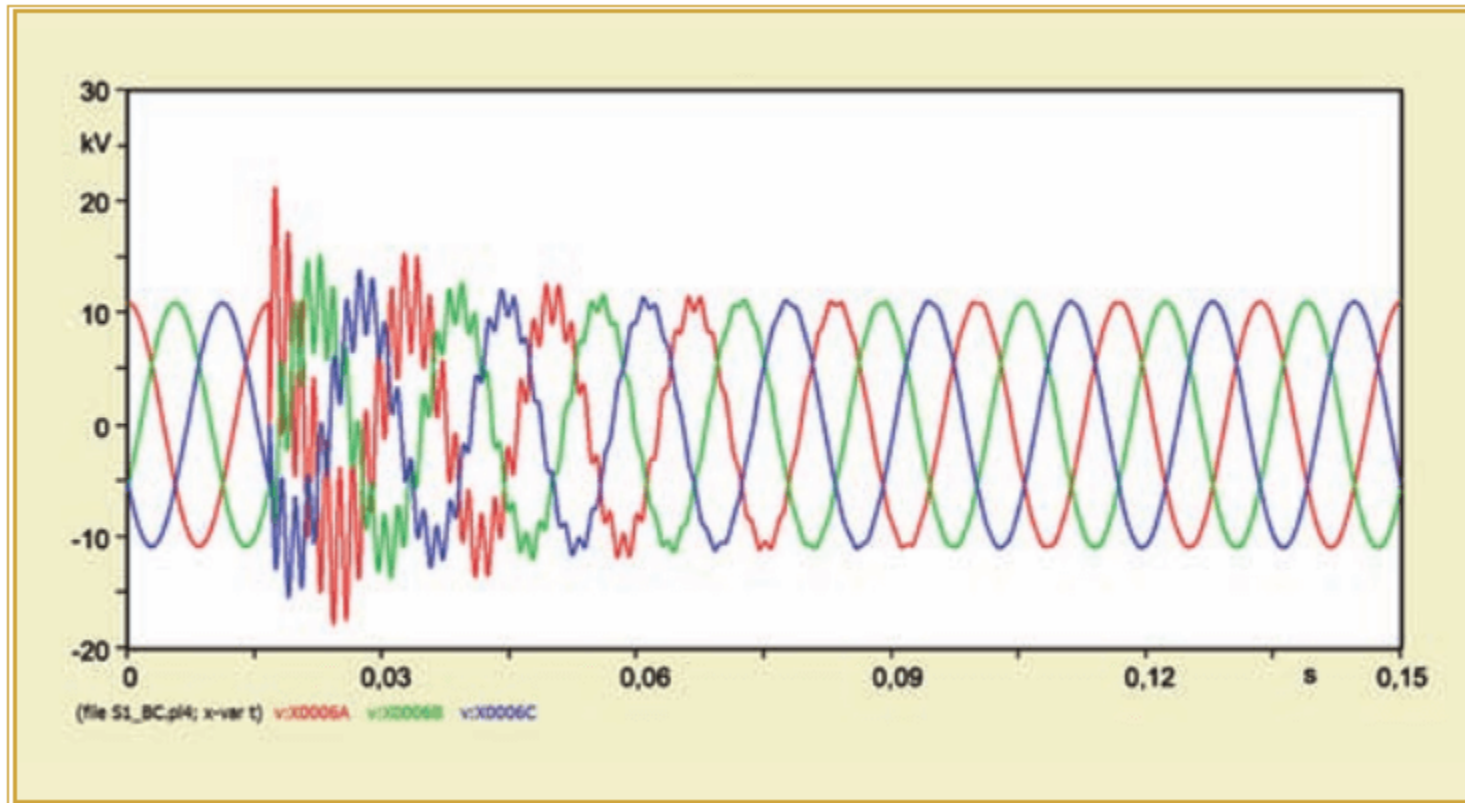
Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ Súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, onde as mesmas incluem valores de polaridade positivos e negativos.
- ✓ Caracterizados pelo seu **conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão.**
- ✓ Decorrentes da **eliminação de faltas, chaveamentos de bancos de capacitores e transformadores, etc.**

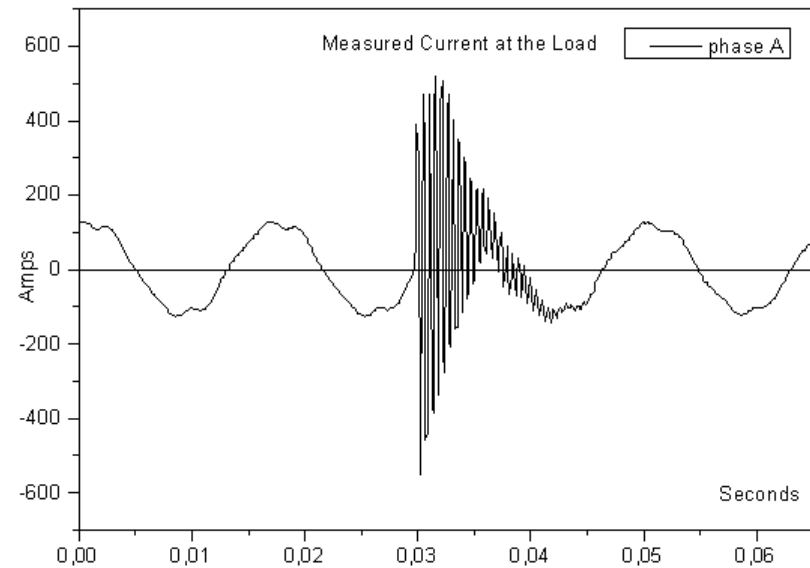
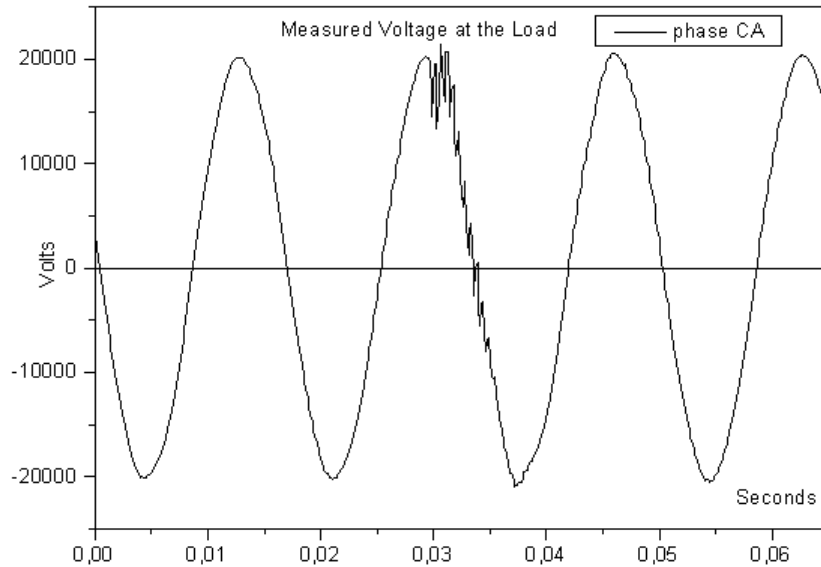
Qualidade da Energia Elétrica



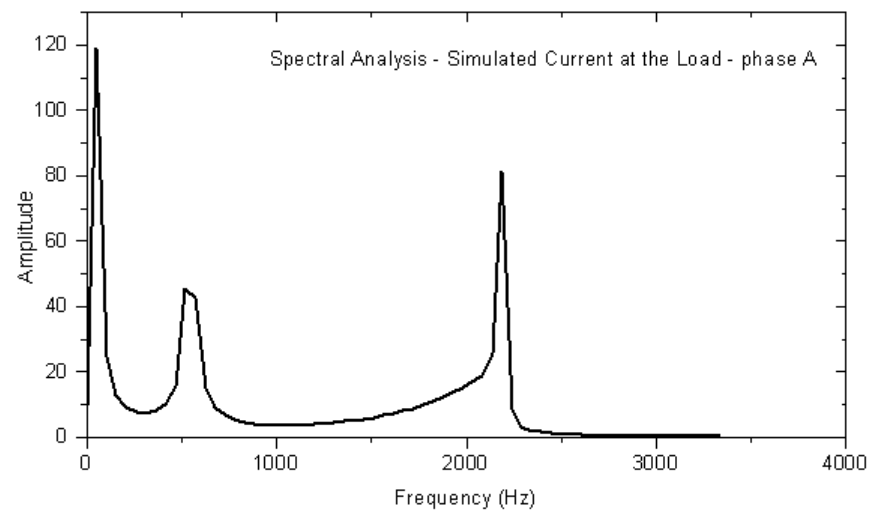
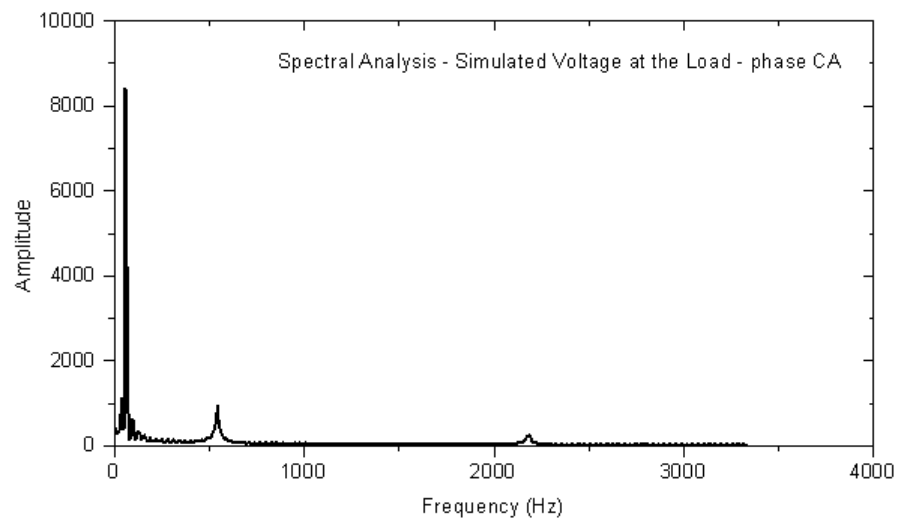
Qualidade da Energia Elétrica



Qualidade da Energia Elétrica



Qualidade da Energia Elétrica



Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **Transitório oscilatório de baixa frequência:** componente de frequência menor do que 5 kHz, com uma duração de 0,3 a 50 ms.
- ✓ Geralmente encontrados nos **sistemas de subtransmissão e de distribuição das concessionárias** e são causados por vários tipos de eventos.

Qualidade da Energia Elétrica

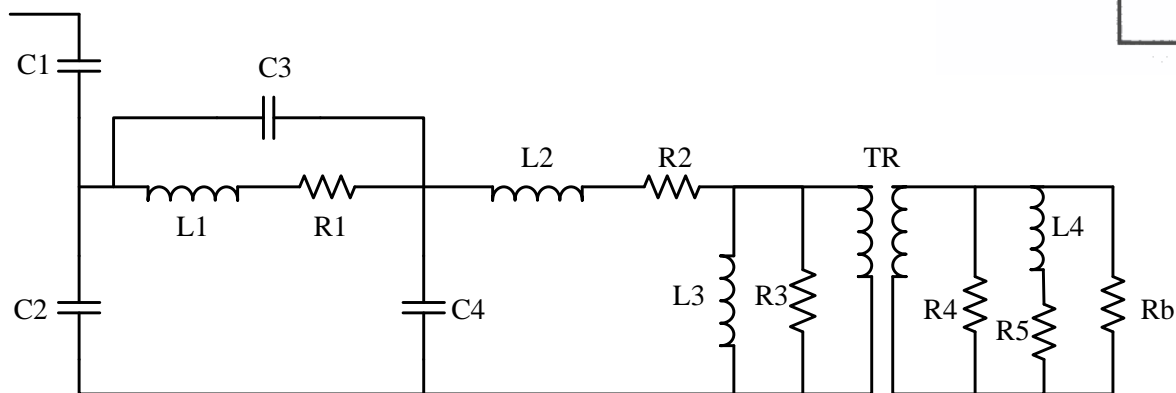
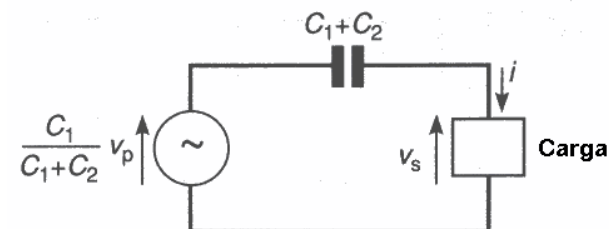
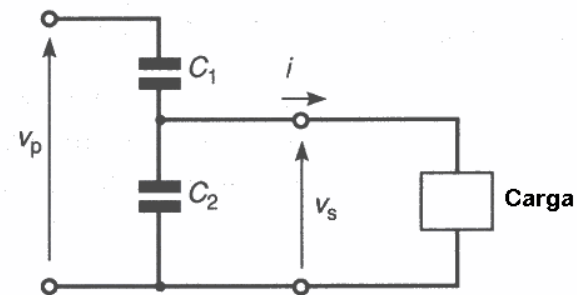
- ✓ O mais comum provem da **energização de uma banco de capacitores**, que tipicamente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma **frequência** entre **300** e **900** Hz.
- ✓ O **pico da magnitude** pode alcançar **2,0 p.u.**, mas é tipicamente **1,3** a **1,5 p.u.** com uma duração entre **0,5** e **3 ciclos** dependendo do amortecimento do sistema.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ A caracterização de transitórios não é desejável no caso dos **TPCs**, uma vez que **informações indesejáveis** poderiam ser transferidas aos **relés** e aos **instrumentos de medição**.

Qualidade da Energia Elétrica

- Modelo simplificado do TPC.



- Modelo completo do TPC.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **Transitório oscilatório de média frequência:**
componentes de frequência entre 5 e 500 kHz, com uma **duração** medida em **microssegundos** (ou vários ciclos da frequência fundamental).
- ✓ Podem ser causados pela:
 - energização de um BCs;
 - chaveamento de disjuntores para eliminação de faltas; e
 - como resultado de uma resposta do sistema a um transitório impulsivo.

Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ **Transitório oscilatório de alta frequência:** componente de frequência maior do que 500 kHz e com uma **duração** típica medida em **microssegundos** (ou vários ciclos da frequência fundamental).
- ✓ São frequentemente resultados de uma resposta local do sistema a um impulso transitório. Podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos.

Qualidade da Energia Elétrica



A **desenergização** de **cargas indutivas** pode **gerar impulsos de alta frequência**. Apesar de serem de curta duração, estes transitórios podem interferir na operação de cargas eletrônicas.



Filtros para as altas frequências e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transitório.

Qualidade da Energia Elétrica



Considerando o crescente emprego de capacitores pelas **concessionárias** para a manutenção dos **níveis de tensão**, e pelas **indústrias** com vistas à **correção do fator de potência**, tem-se tido uma preocupação especial no que se refere à possibilidade de se estabelecer uma condição de ressonância, devido às oscilações de altas frequências, entre o sistema da concessionária e a indústria.

Qualidade da Energia Elétrica

Amplificação das tensões transitórias, podendo atingir níveis de 3 a 4 p.u.

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{cc}}{S_{cap}}}$$

- Onde h_r é a ordem da harmônica, S_{cc} é a potência de curto-circuito do sistema em kVA e S_{cap} é a potência do banco de capacitores em kvar.

Qualidade da Energia Elétrica



Um procedimento comum para **limitar a magnitude da tensão transitória** é **transformar os bancos de capacitores do consumidor**, utilizados para corrigir o fator de potência, em **filtros harmônicos**.



Na concessionária, utiliza-se o **chaveamento dos bancos com resistores de pré-inserção**.

Qualidade da Energia Elétrica

olesk@sc.usp.br

Fone: 016 3373 8142

Muito obrigado pela atenção!