



Aula 04 – SEL0409

Qualidade da energia elétrica

Prof. Dr. Mário Oleskovicz

USP/EESC/SEL

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

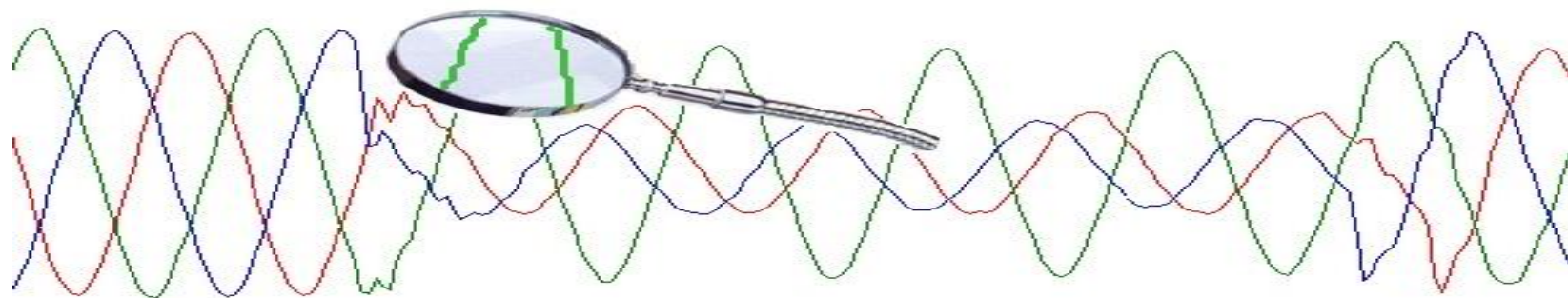
Aumento no valor eficaz da tensão CA, maior do que 110% (valores típicos entre 1,1 a 1,2 p.u.), considerando-se a frequência do sistema, por uma duração maior do que 1 min.

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;

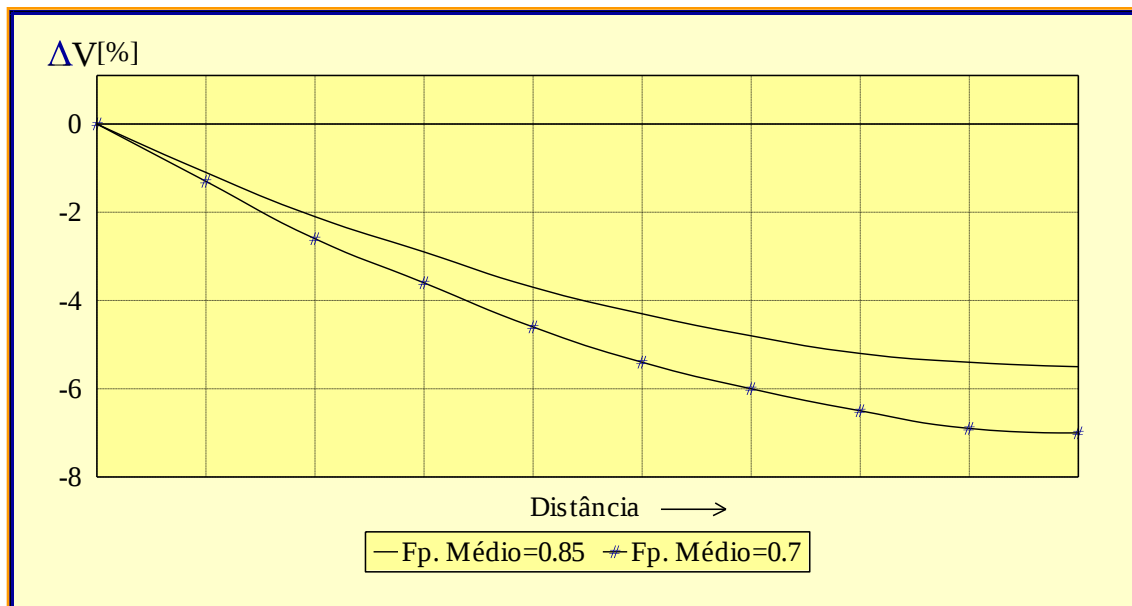
R - resistência por fase da rede;

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.

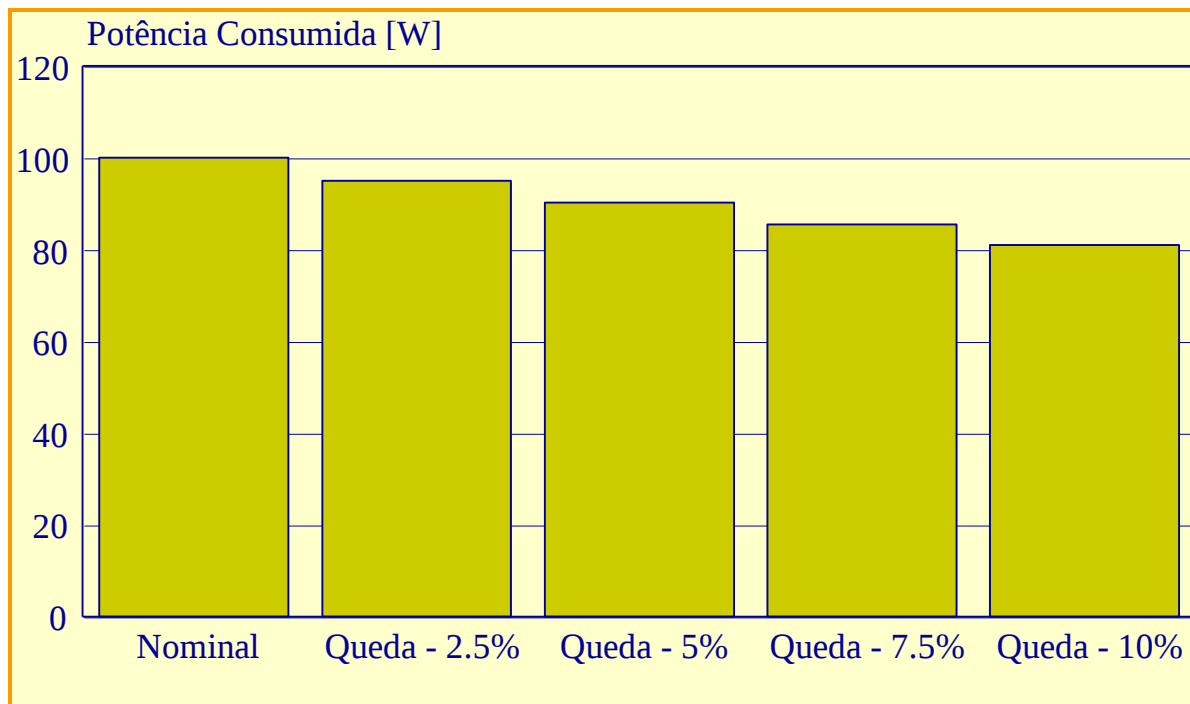
Qualidade da Energia Elétrica



Dentre os problemas causados, destacam-se:

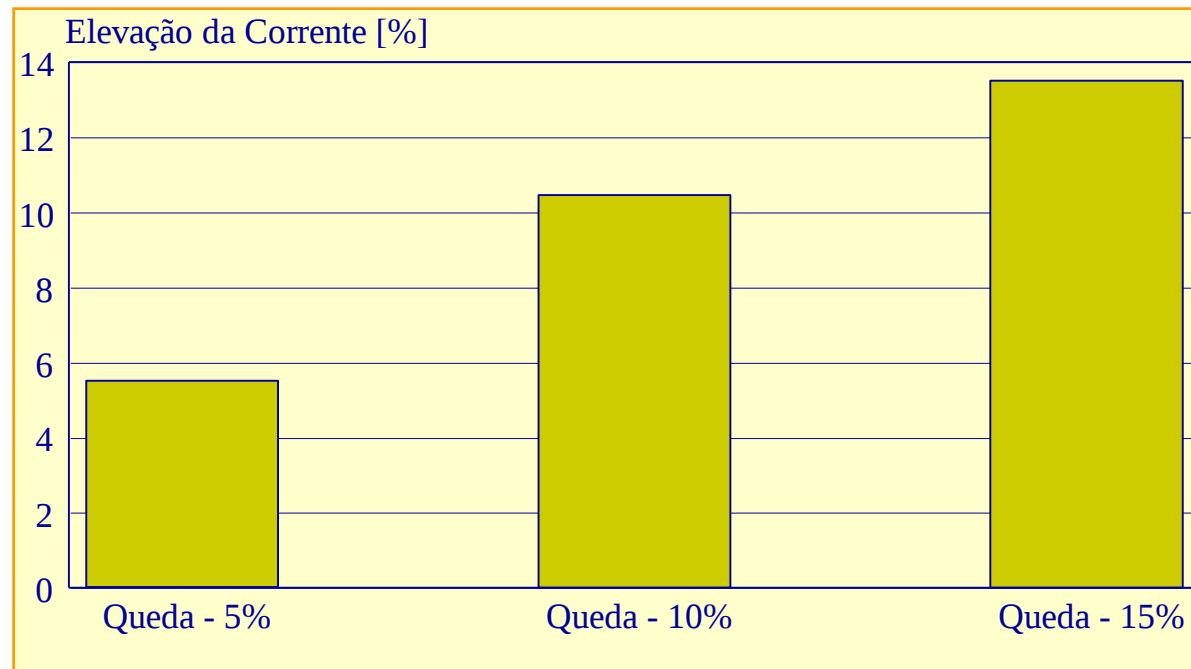
- redução da potência reativa fornecida por bancos de capacitores ao sistema;
- possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos;
- redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente;
- elevação do tempo de partida das máquinas de indução; e
- sobreaquecimento de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



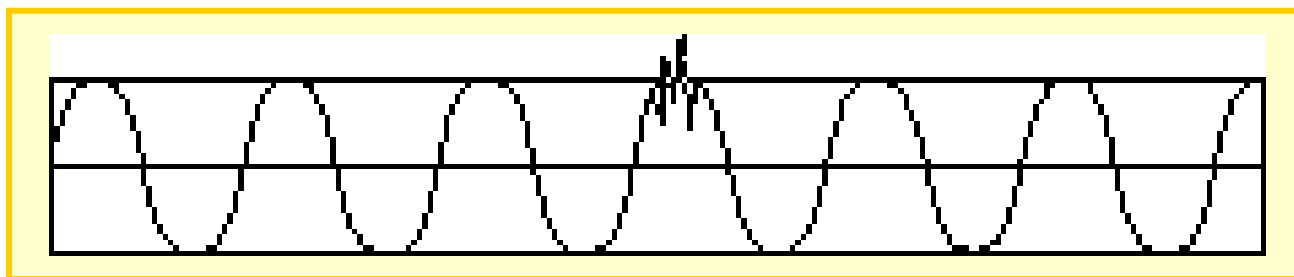
Seja a interrupção inesperada ou planejada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- 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

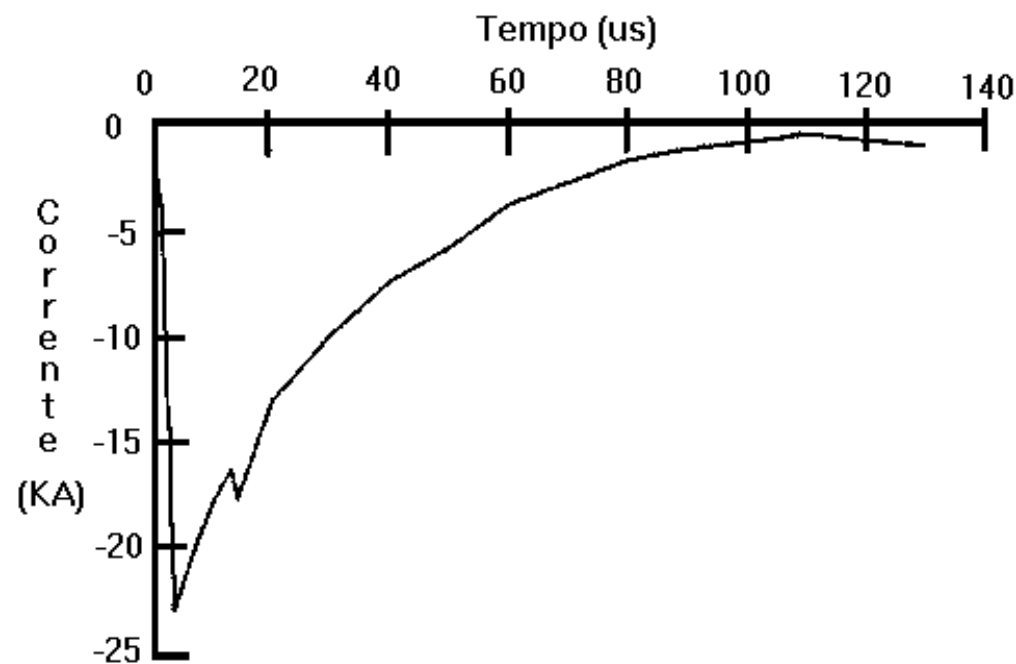


Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ 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 $6 \mu\text{s}$ e decai a um valor médio do seu pico em $22 \mu\text{s}$.

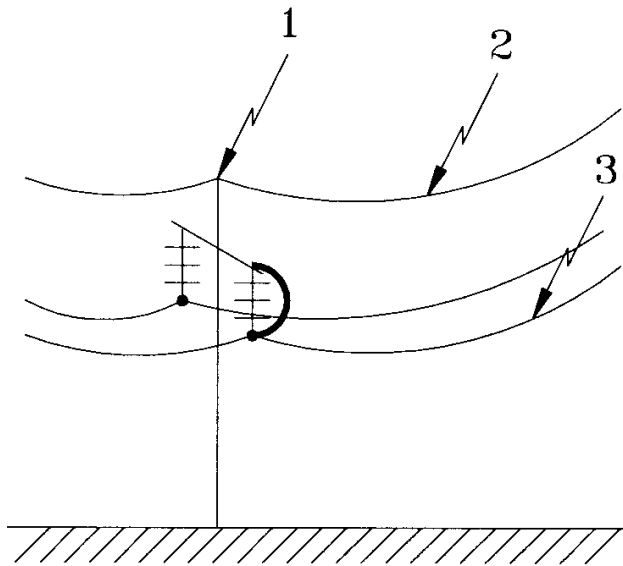
Qualidade da Energia Elétrica



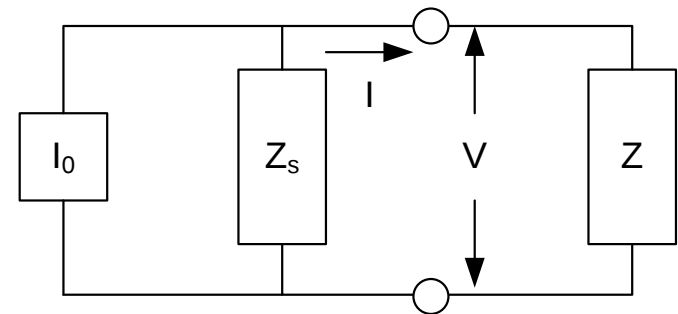
Os principais problemas de qualidade da energia causados por estas correntes no sistema são:

- **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



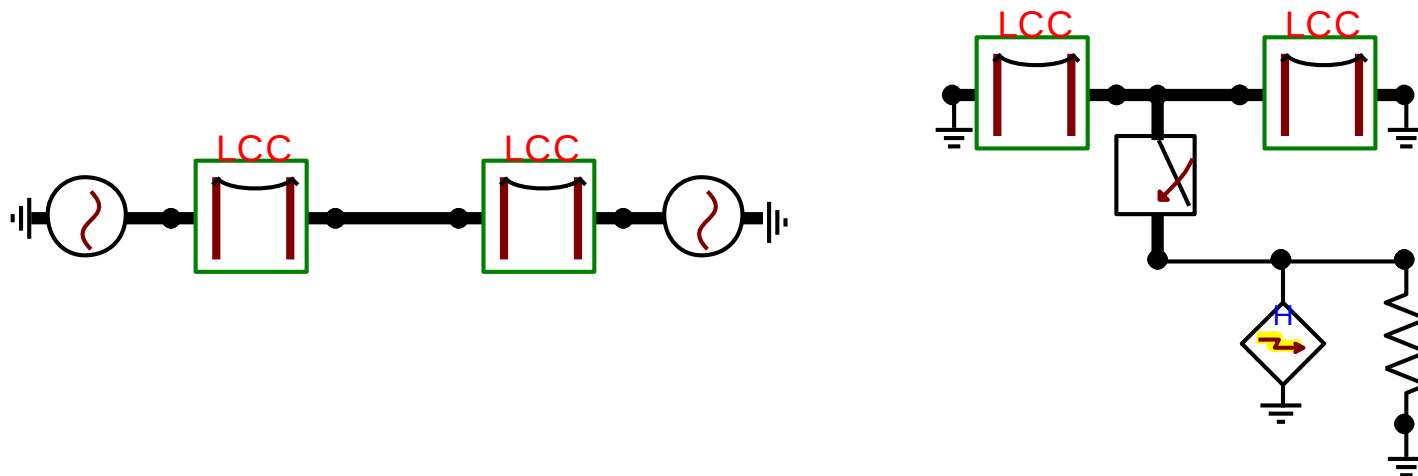
- Descargas diretas: 1- descarga direta na estrutura, 2 – descarga direta no cabo guarda, 3 – descarga direta no cabo energizado.



- Equivalente de Thèvenin para caracterizar descargas atmosféricas.

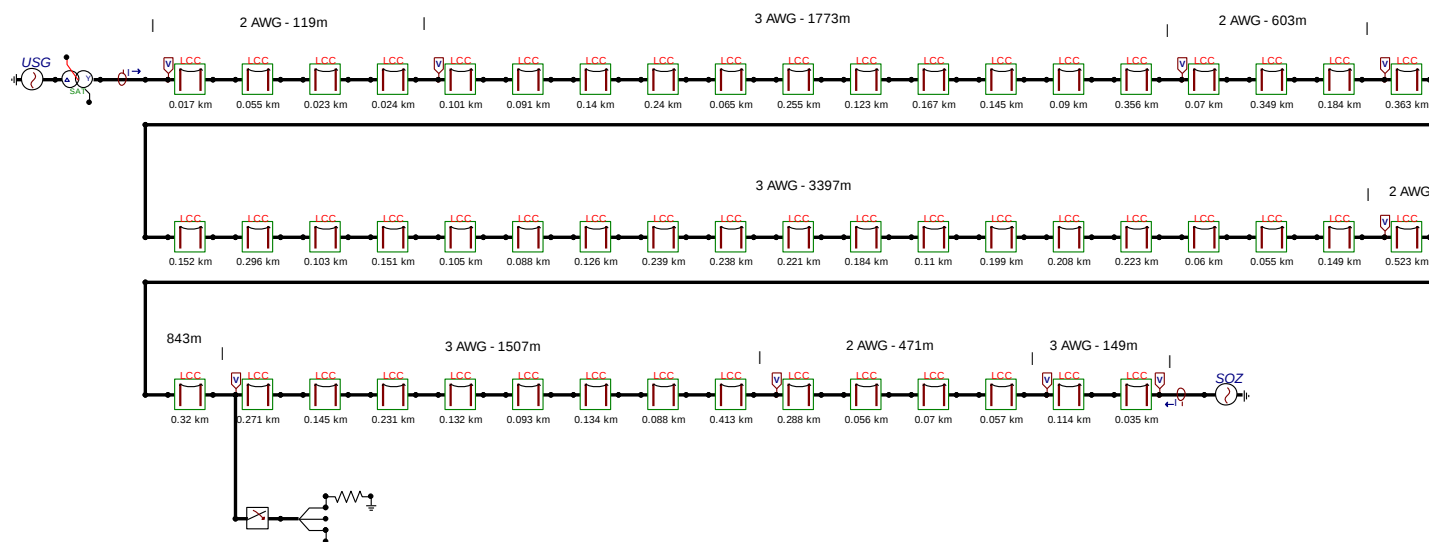
Onde I_0 é a corrente de descarga, Z_s é a impedância variável entre 1.000 e 3.000 Ω e Z representa a impedância equivalente do circuito.

Qualidade da Energia Elétrica



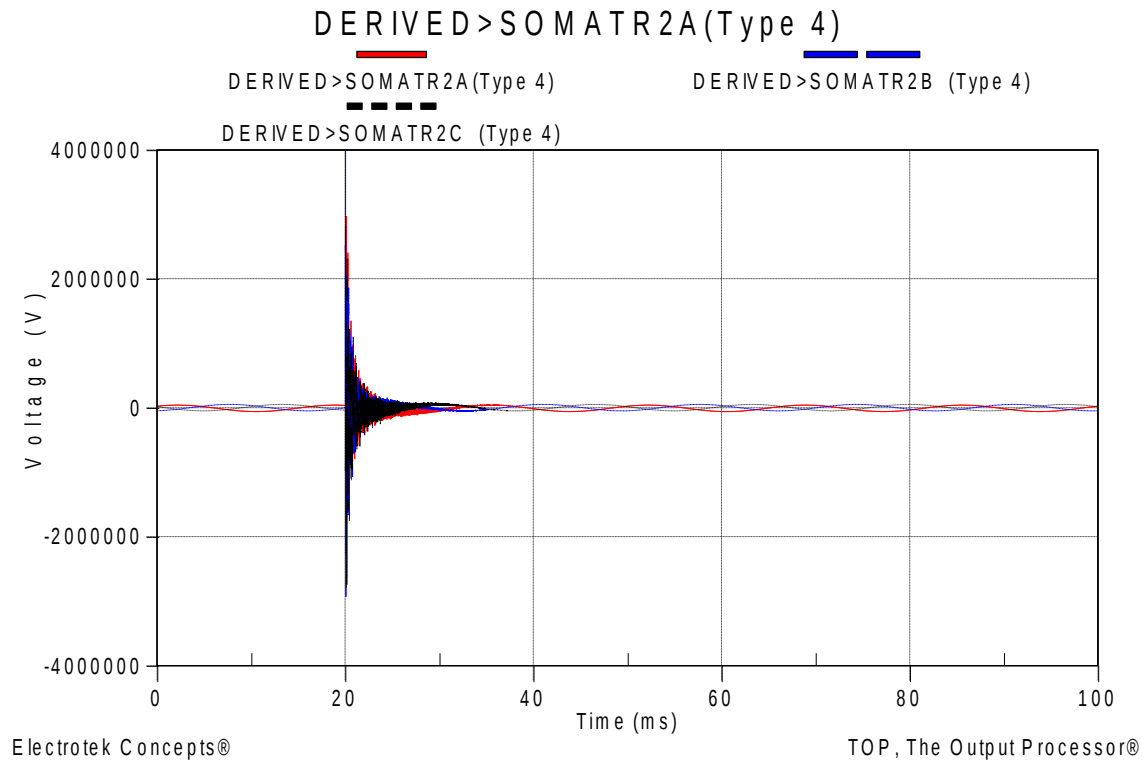
- Regime permanente (representação a esquerda) e a consideração da descarga atmosférica com ambas a extremidades da linha aterrada (representação a direita).

Qualidade da Energia Elétrica



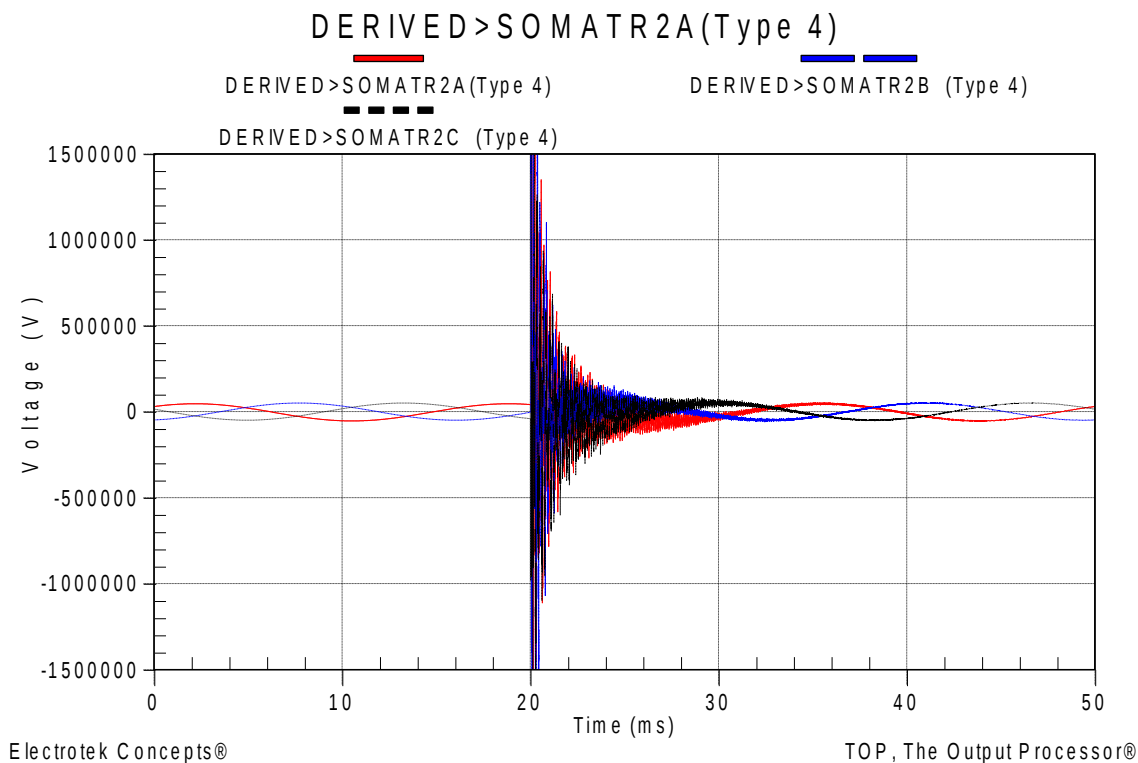
- Modelo completo simulado da linha de transmissão via *software* ATP.

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**

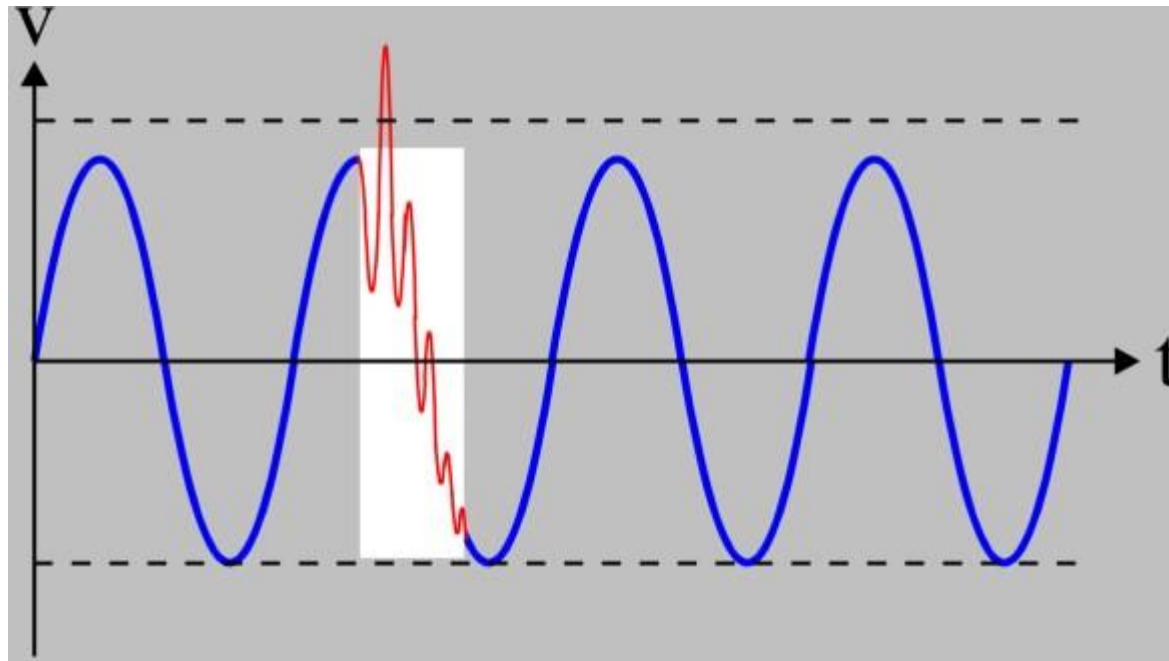
Chaveamento de BCs



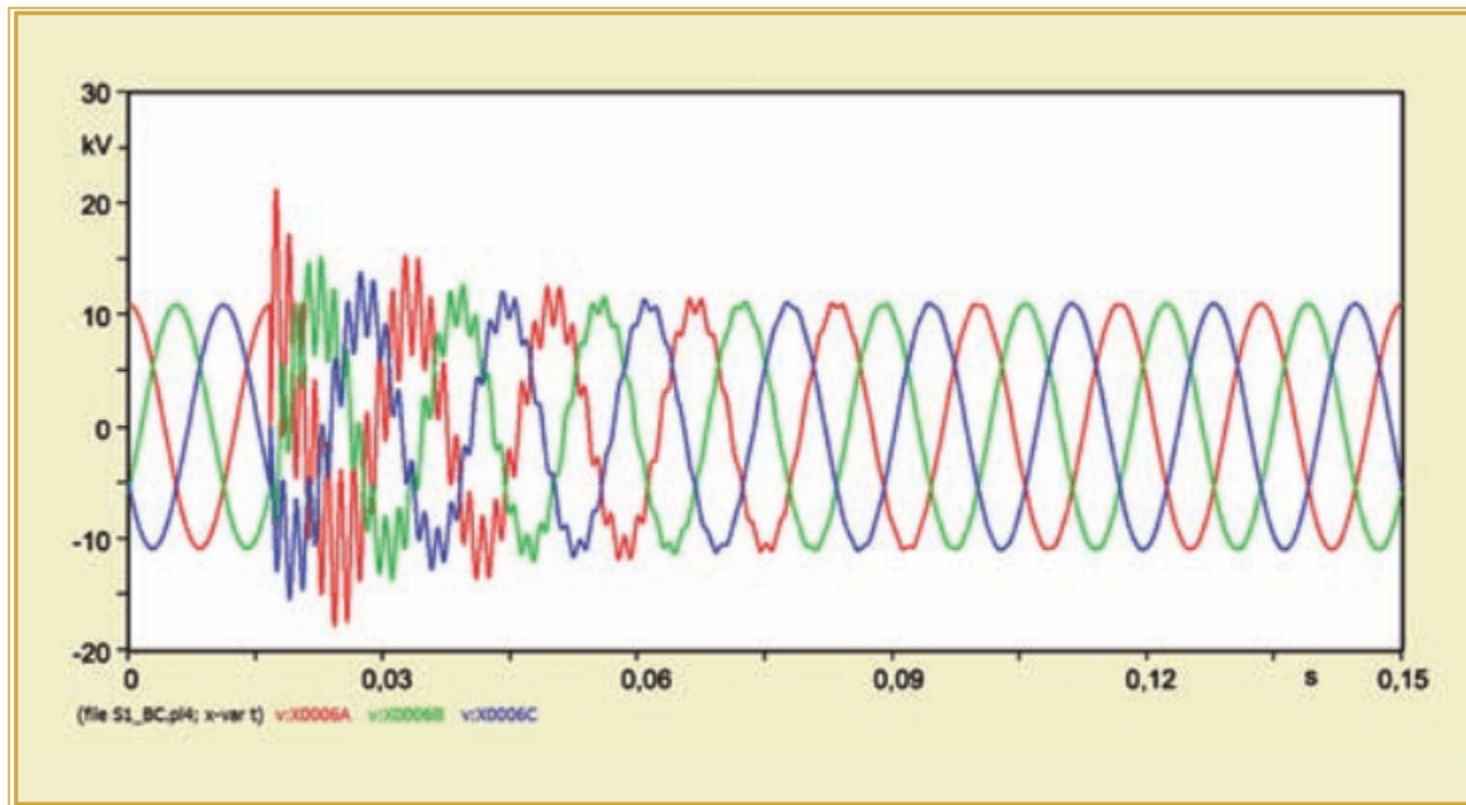
Qualidade da Energia Elétrica

- ✓ 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.

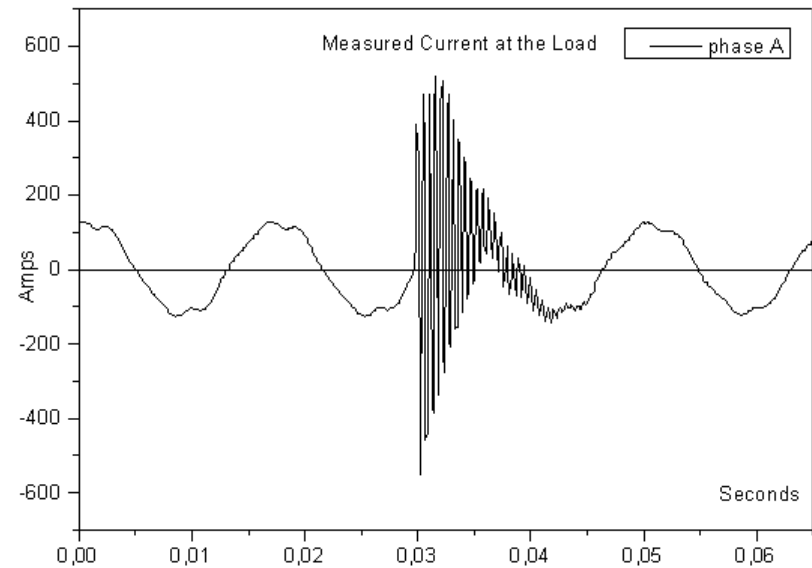
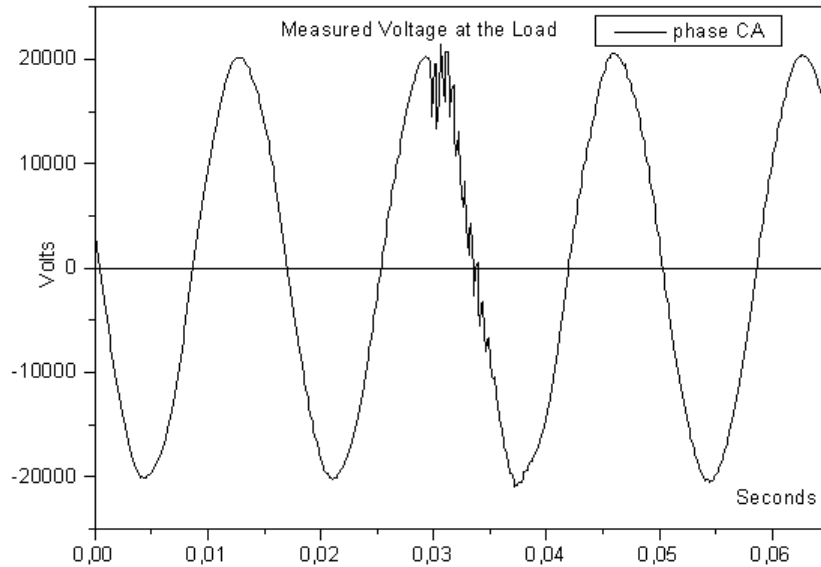
Qualidade da Energia Elétrica



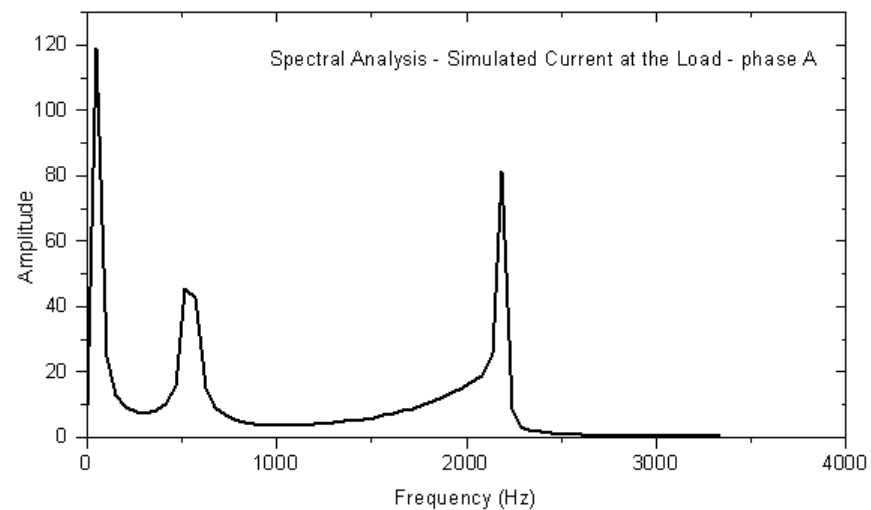
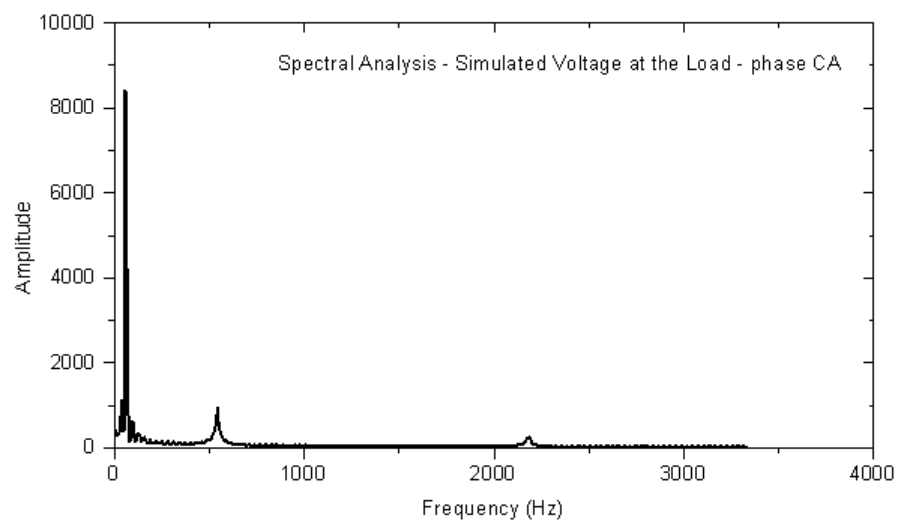
Qualidade da Energia Elétrica



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

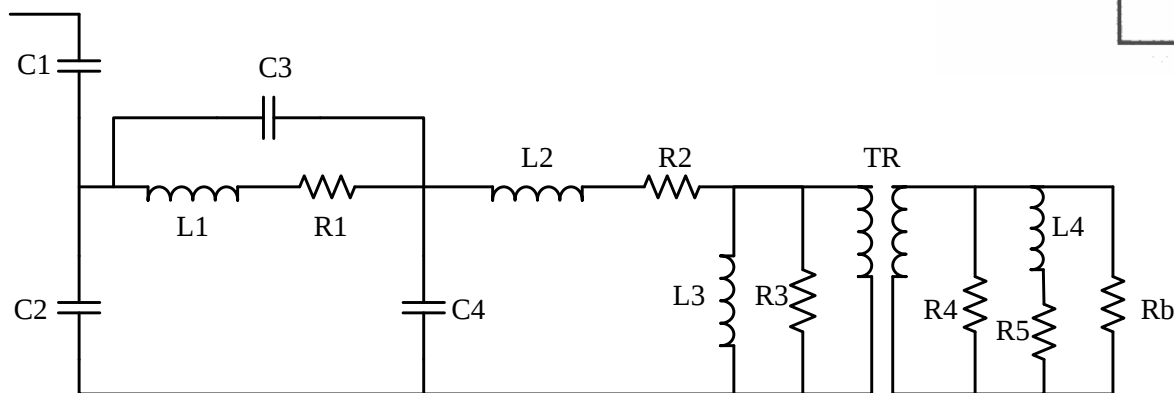
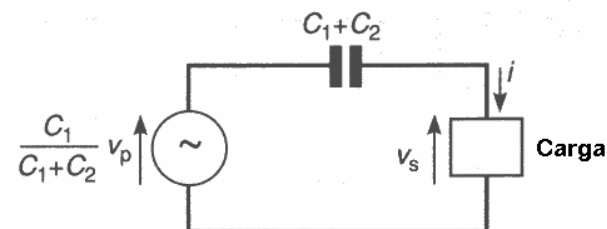
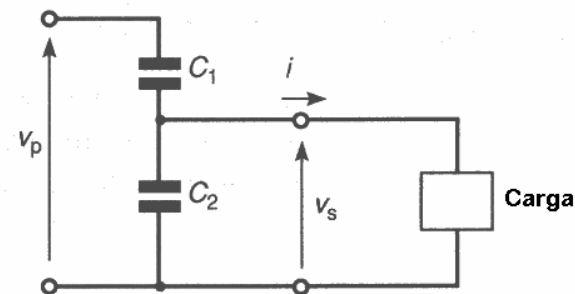
- ✓ O mais comum provem da **energização de uma banco de capacitores**, que tipicamente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma **frequência** entre **300** e **900** Hz.
- ✓ O **pico da magnitude** pode alcançar **2,0 p.u.**, mas é tipicamente **1,3** a **1,5 p.u.** com uma duração entre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