

Aula 05 – Transitórios e Variações de Tensão de Longa Duração (VTLD)



Prof. Heverton Augusto Pereira
Prof. Mauro de Oliveira Prates

Universidade Federal de Viçosa - UFV
Departamento de Engenharia Elétrica - DEL
Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Gesep

heverton.pereira@ufv.br

www.gesep.ufv.br
TEL: +55 (31) 3899-3266

Transitórios

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ O termo transitório tem sido aplicado à análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é **indesejável, mas momentâneo**, em sua natureza.
- ✓ Entende-se por transitórios eletromagnéticos as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica.

Transitórios

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.
- ✓ Classificados em:
 - ✓ **transitórios impulsivos**, causados por **descargas atmosféricas**,
 - ✓ **transitórios oscilatórios**, causados por **chaveamentos**

Transitório Impulsivo

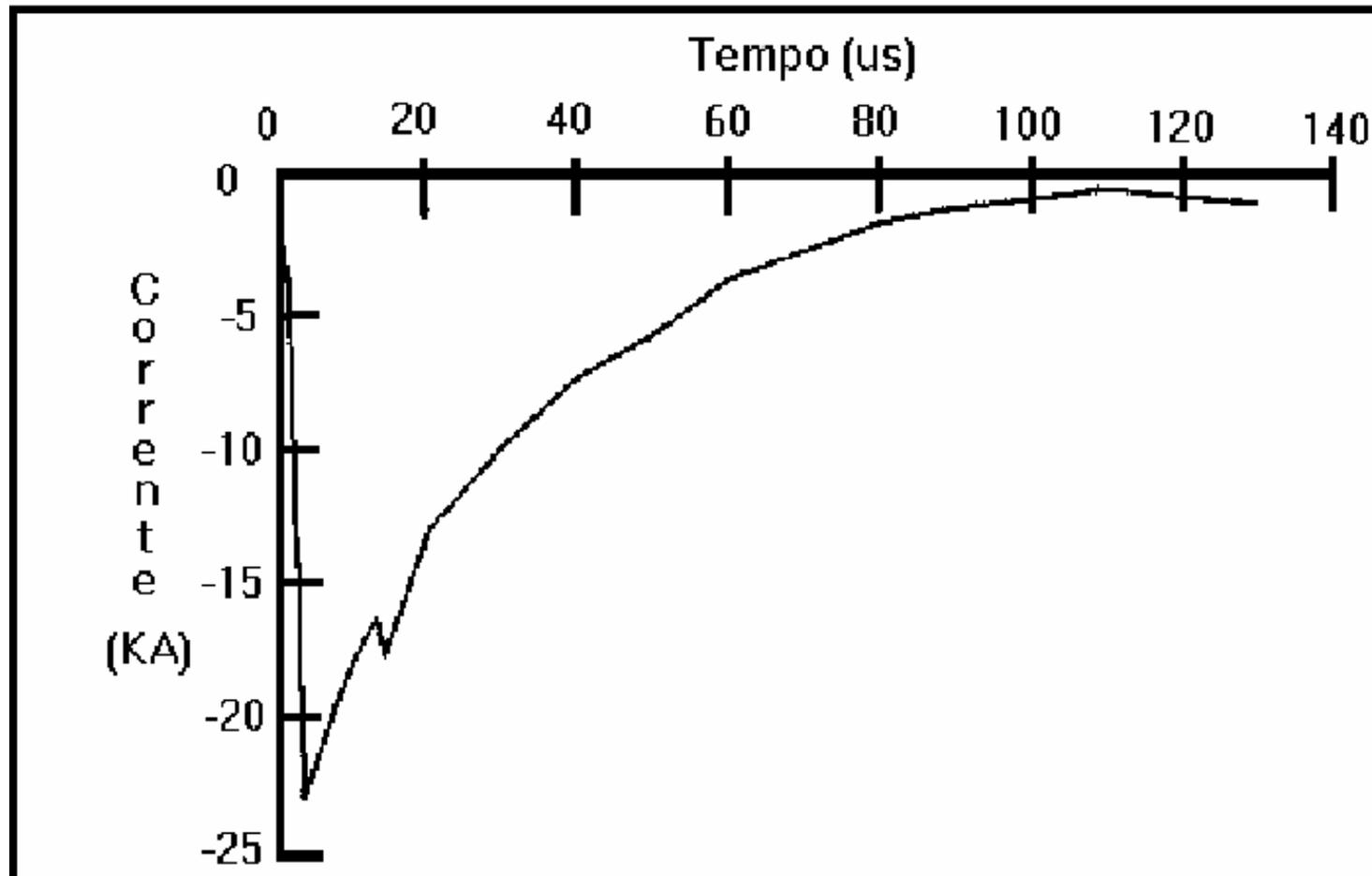
- ✓ É uma súbita alteração não desejável no sistema, que se encontra em condição de regime permanente, refletido nas formas de ondas da tensão e corrente, ou ambas, sendo unidirecional na sua polaridade (primeiramente positivo ou negativo).

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
1.0 Transitórios			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundo	5 ns	<50ns	
1.1.2 Microsegundo	1us	50ns – 1ms	
1.1.3 Milisegundo	0.1 ms	> 1ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa freq.	< 5kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 media freq.	5-500 kHz	20 us	0-8 pu
1.2.3 alta freq.	0.5-5 MHz	5 us	0-4 pu

Transitório Impulsivo

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

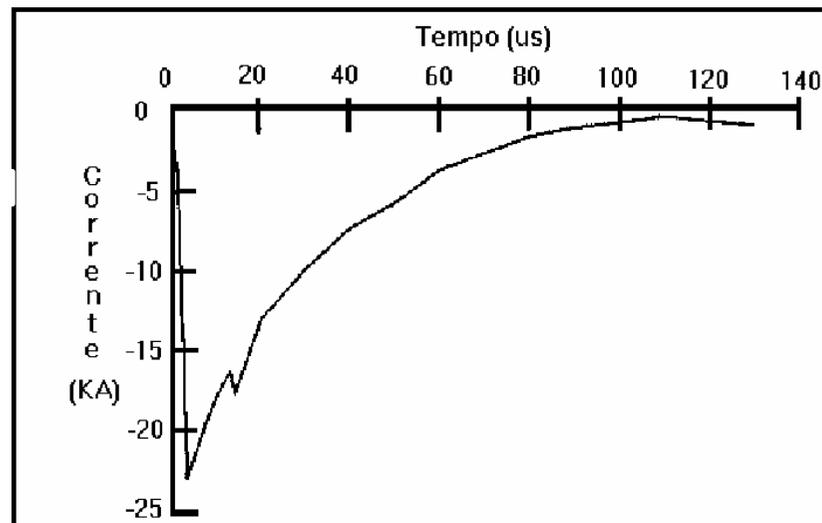
- ✓ Normalmente é causado por **descargas atmosféricas** com freqüências bastante diferentes daquela da rede elétrica.



Transitório Impulsivo

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Uma descarga diretamente na **fase** geralmente causa “*flashover*” na linha próxima ao ponto de incidência e pode gerar não somente um transitório impulsivo, mas também uma falta acompanhada de afundamentos de curta duração e interrupções.
- ✓ Altas sobretensões transitórias podem também ser geradas por descargas que fluem ao longo do condutor **terra**.



Transitório Impulsivo

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Os principais problemas de qualidade da energia causados por estas correntes no sistema de **aterramento** são os seguintes:
- ✓ Elevação do potencial do terra local, em relação a outros terras, em vários kV. Equipamentos eletrônicos sensíveis que são conectados entre duas referências de terra, tal como um computador conectado ao telefone através de um “modem”, podem falhar quando submetidos aos altos níveis de tensão.
- ✓ Indução de altas tensões nos condutores fase, quando as correntes passam pelos cabos a caminho do terra.

Transitório Impulsivo

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Em se tratando de descargas em pontos de **extra alta tensão**, o surto se propaga ao longo da linha em direção aos seus terminais podendo atingir os equipamentos instalados em subestações de manobra ou abaixadoras.

Entretanto, a onda de tensão ao percorrer a linha, desde o ponto de incidência até as subestações abaixadoras para a tensão de distribuição, tem o seu valor de máximo consideravelmente atenuado, e assim, consumidores ligados na baixa tensão não sentirão os efeitos advindos de descargas atmosféricas ocorridas a **nível de transmissão**.

Transitório Impulsivo

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Contudo, os consumidores atendidos em tensão de transmissão e supostamente localizados nas proximidades do ponto de descarga, estarão sujeitos a tais efeitos, podendo ocorrer a danificação de alguns equipamentos de suas respectivas instalações.

Transitório Oscilatório

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ É uma súbita alteração não desejável da condição de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, onde as mesmas incluem valores de polaridade positivos ou negativos.
- ✓ São decorrentes da energização de linhas, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, etc.

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
1.0 Transitórios			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanosegundo	5 ns	<50ns	
1.1.2 Microsegundo	1us	50ns – 1ms	
1.1.3 Milisegundo	0.1 ms	> 1ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa freq.	< 5kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2 media freq.	5-500 kHz	20 us	0-8 pu
1.2.3 alta freq.	0.5-5 MHz	5 us	0-4 pu

Transitório Oscilatório de Baixa Frequência

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ São freqüentemente encontrados nos sistemas de subtransmissão e de distribuição das concessionárias e são causados por vários tipos de eventos.
- ✓ O mais comum provem da **energização de uma banco de capacitores**, que tipicamente resulta em uma tensão transitória oscilatória com uma freqüência primária **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.

Transitório Oscilatório de Baixa Frequência

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

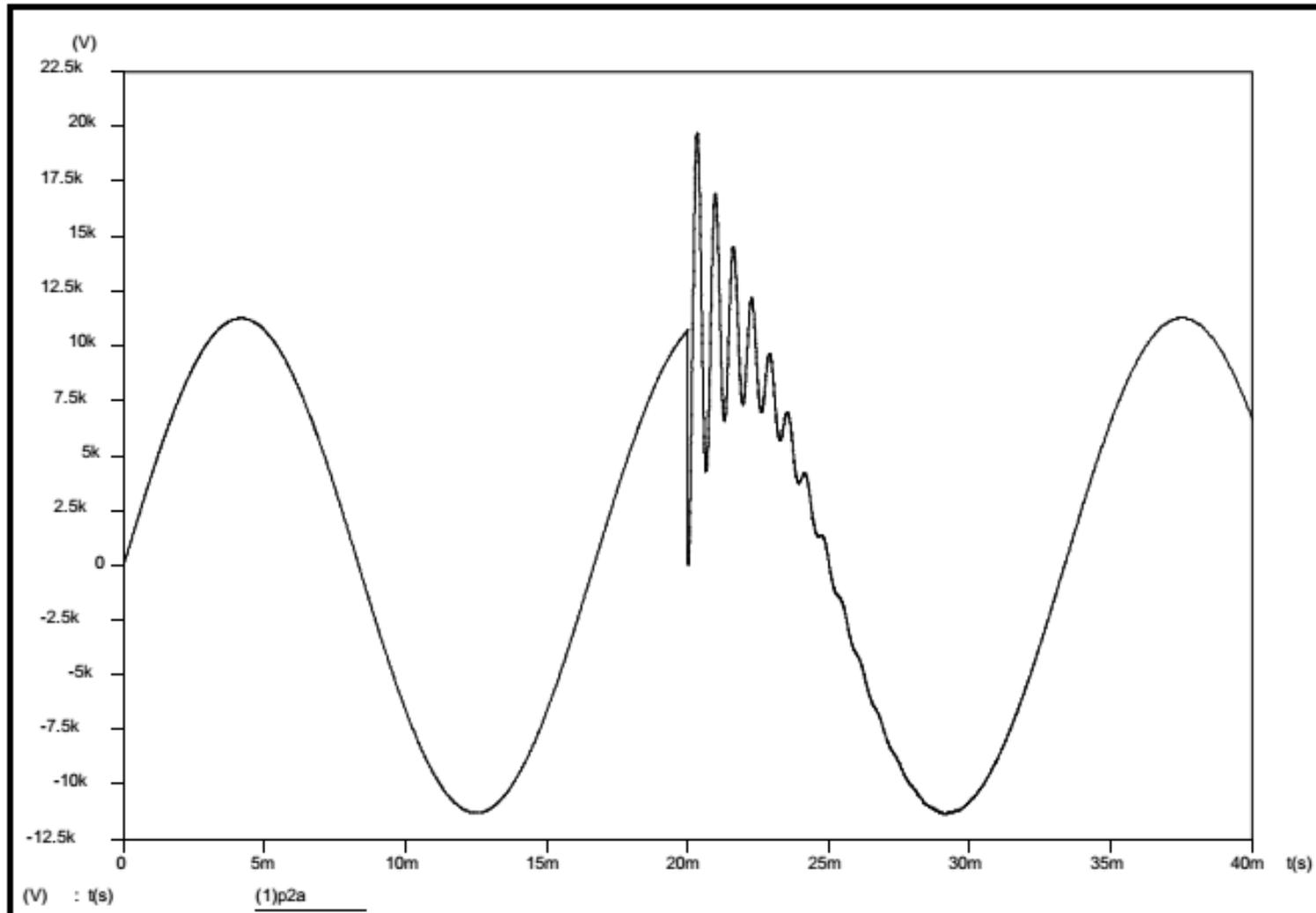
- ✓ Capacitores são automaticamente ligados antecipando um aumento diário da carga.

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
1.0 Transitórios			
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa freq.	< 5kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu

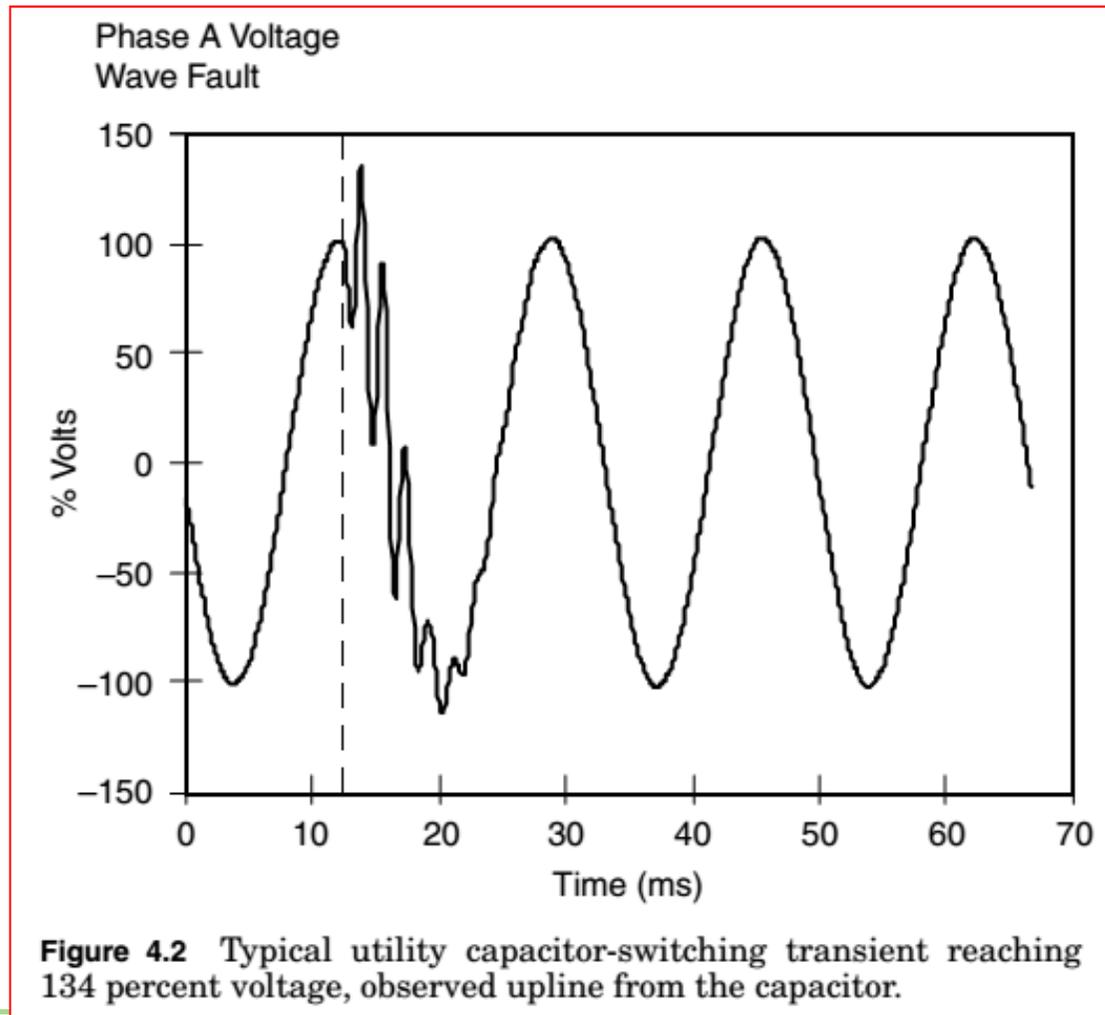
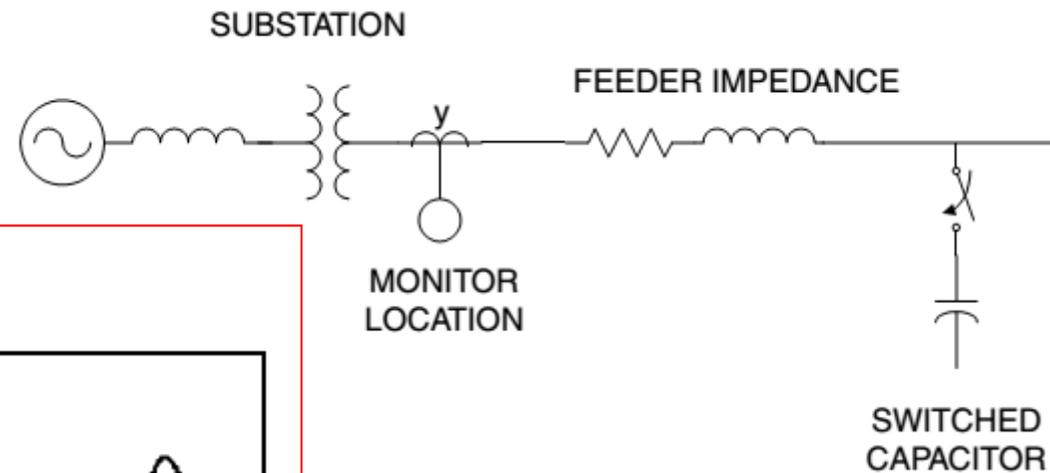
Transitório Oscilatório de **Baixa Frequência**

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Energização de um banco de 600 kVAr na tensão de 13,8 kV.



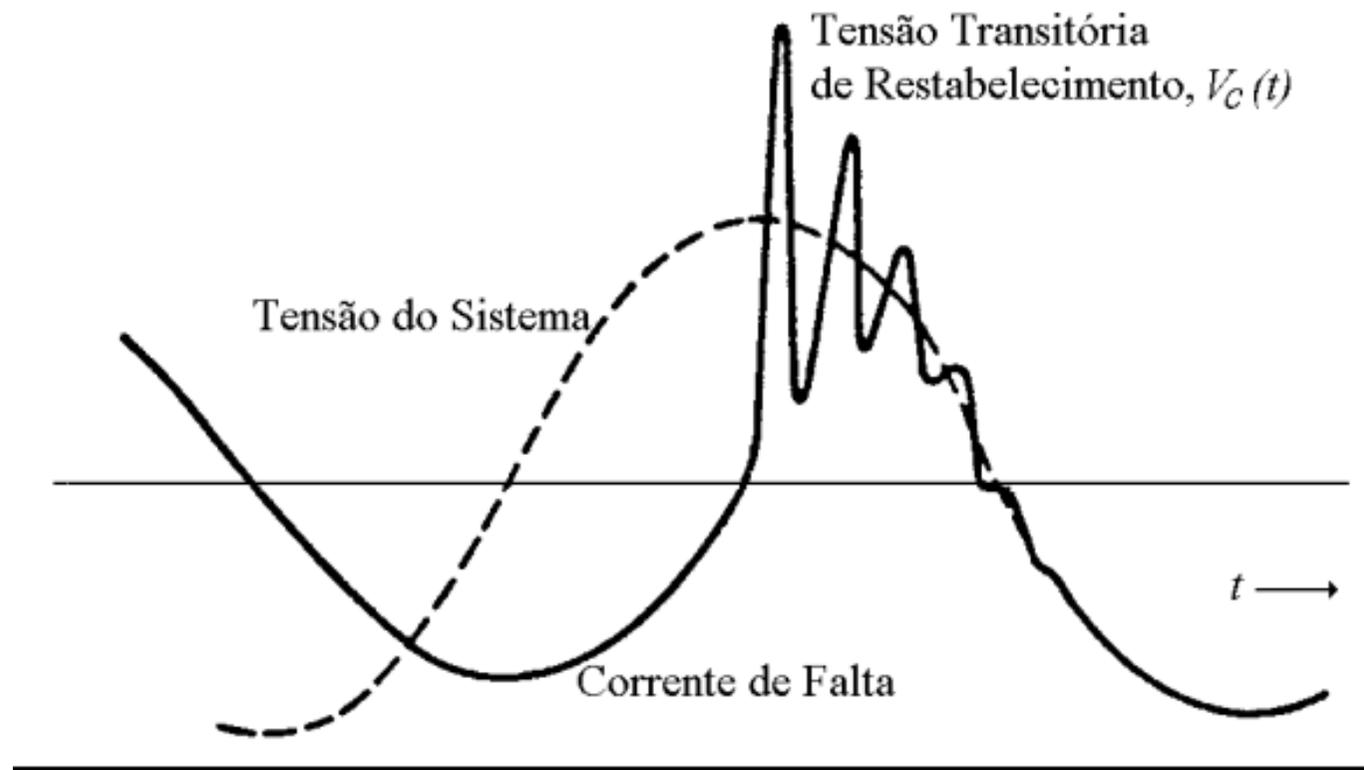
Transitório Oscilatório de Baixa Frequência



Transitório Oscilatório de Média Frequência

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Podem ser causados pelo **chaveamento de disjuntores para a eliminação de faltas** e podem também ser o resultado de uma resposta do sistema á um transitório impulsivo.



Transitório Oscilatório de Alta Frequência

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ São frequentemente resultados de uma resposta local do sistema a um transitório impulsivo. Podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos.
- ✓ 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 de alta-frequência e transformadores isoladores podem ser usados para proteger as cargas contra este tipo de transitório.

Transitório Oscilatório de Alta Frequência

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Correção do FP com o uso de banco de capacitores tem sido 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, e assim ocorrer uma amplificação das tensões transitórias, bem superiores às citadas anteriormente, podendo atingir níveis **de 3 a 4 p.u.**
- ✓ Uma indutância em série com o capacitor reduzirá a tensão transitória na barra do consumidor a níveis aceitáveis.

Curvas CBEMA e ITI

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Conjunto de curvas que representam a suportabilidade de equipamentos eletrônicos em termos da magnitude e duração da perturbação de tensão.
- ✓ Desenvolvido pela *Computer Business Equipment Manufacturers Association* (CBEMA), tornou-se uma curva padrão para medir o desempenho de todos os tipos de equipamentos. Adaptada do padrão IEEE 446.
- ✓ Outra curva, muito utilizada pela indústria é a desenvolvida pela Indústria de Tecnologia da Informação (ITI - *Information Technology Industry*), que tem o mesmo objetivo de avaliação da curva CBEMA.

Curvas CBEMA e ITI

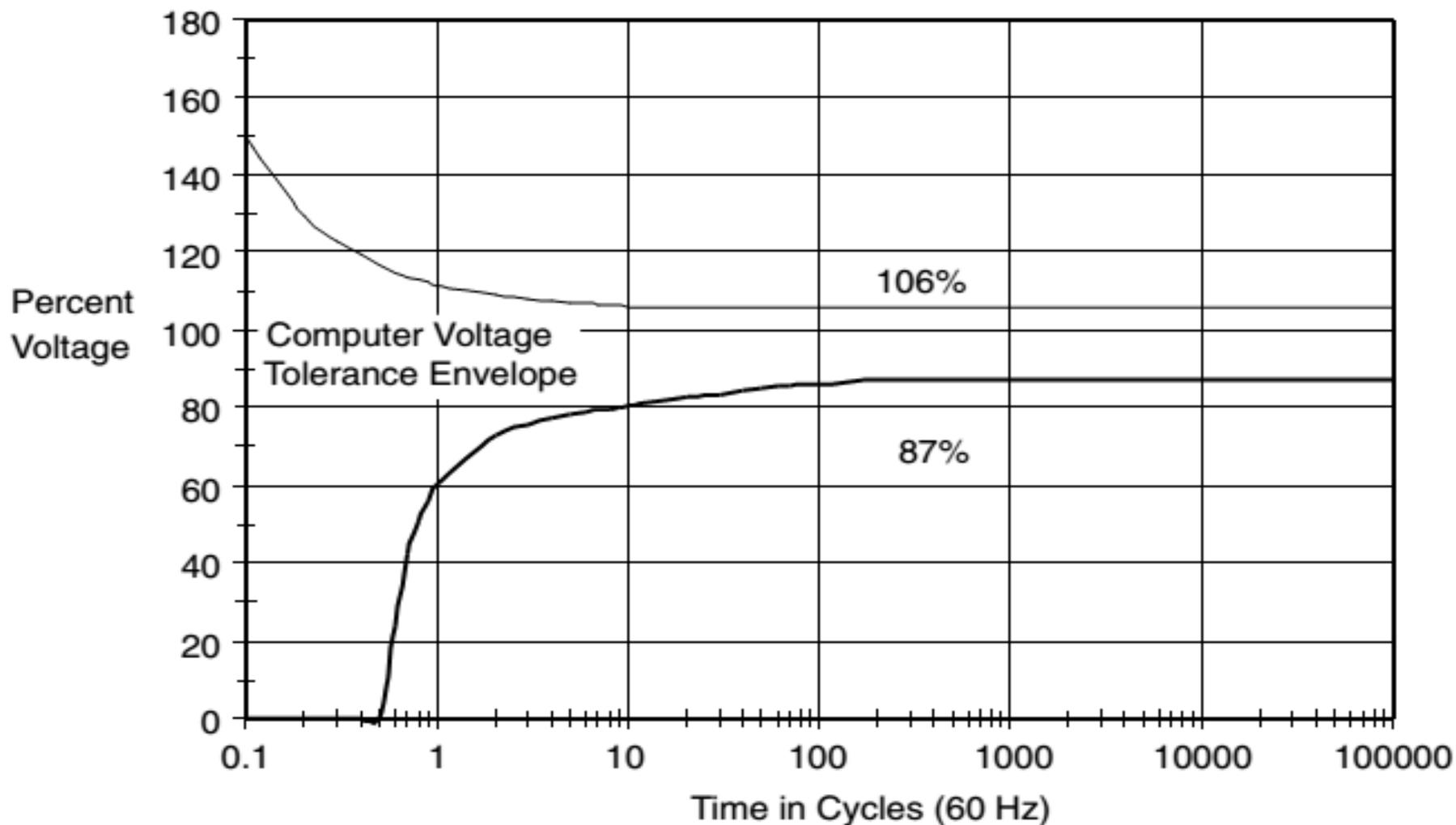


Figure 2.15 A portion of the CBEMA curve commonly used as a design target for equipment and a format for reporting power quality variation data.

VTLD

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Período superior a 1 min;
- ✓ Podem estar associadas à sobre ou subtensão e faltas sustentadas;
- ✓ No caso de sobre ou subtensão, geralmente, não resultam de falhas do sistema, mas são causadas por variações na carga e ou operações de chaveamento sobre o mesmo.

Recapitulando, Termos e Definições segundo IEC

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Interrupção		0.5 – 30 ciclos	<0.1 pu
2.1.2 sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
2.1.3 swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 momentânea			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos – 3s	<0.1 pu
2.2.2 sag		30 ciclos – 3s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 swell		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3s – 1min	<0.1 pu
2.3.2 sag		3s – 1min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 swell		3s – 1min	1.1 – 1.2 pu

3.0 Variações de longa duração			
3.1 Interrupção sustentada		> 1 min	0.0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1.1-1.2 pu

Sobretensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Um aumento no valor eficaz da tensão CA, **maior do que 110%**;
- ✓ Usualmente resultam do desligamento de grandes cargas ou energização de um banco de capacitores. *Taps* dos transformadores incorretamente conectados também podem resultar em sobretensões no sistema.
- ✓ Geralmente, são instalados nas indústrias bancos de capacitores, normalmente fixos, para correção do fator de potência ou mesmo para elevação da tensão nos circuitos internos da instalação.

✓ Conseqüências das sobretensões de longa duração:

- Os dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensões, embora transformadores, cabos, disjuntores, TCs, TPs e máquinas rotativas, geralmente, não apresentam falhas imediatas (mas tem sua vida útil diminuída).
- Relés de proteção também poderão apresentar falhas de operação durante as sobretensões.

Para a solução de tais problemas, destaca-se a troca de bancos de capacitores fixos por bancos automáticos, possibilitando um maior controle do nível da tensão.

Recapitulando, Termos e Definições segundo IEC

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Interrupção		0.5 – 30 ciclos	<0.1 pu
2.1.2 sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
2.1.3 swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 momentânea			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos – 3s	<0.1 pu
2.2.2 sag		30 ciclos – 3s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 swell		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3s – 1min	<0.1 pu
2.3.2 sag		3s – 1min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 swell		3s – 1min	1.1 – 1.2 pu

3.0 Variações de longa duração			
3.1 Interrupção sustentada		> 1 min	0.0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1.1-1.2 pu

Subtensão

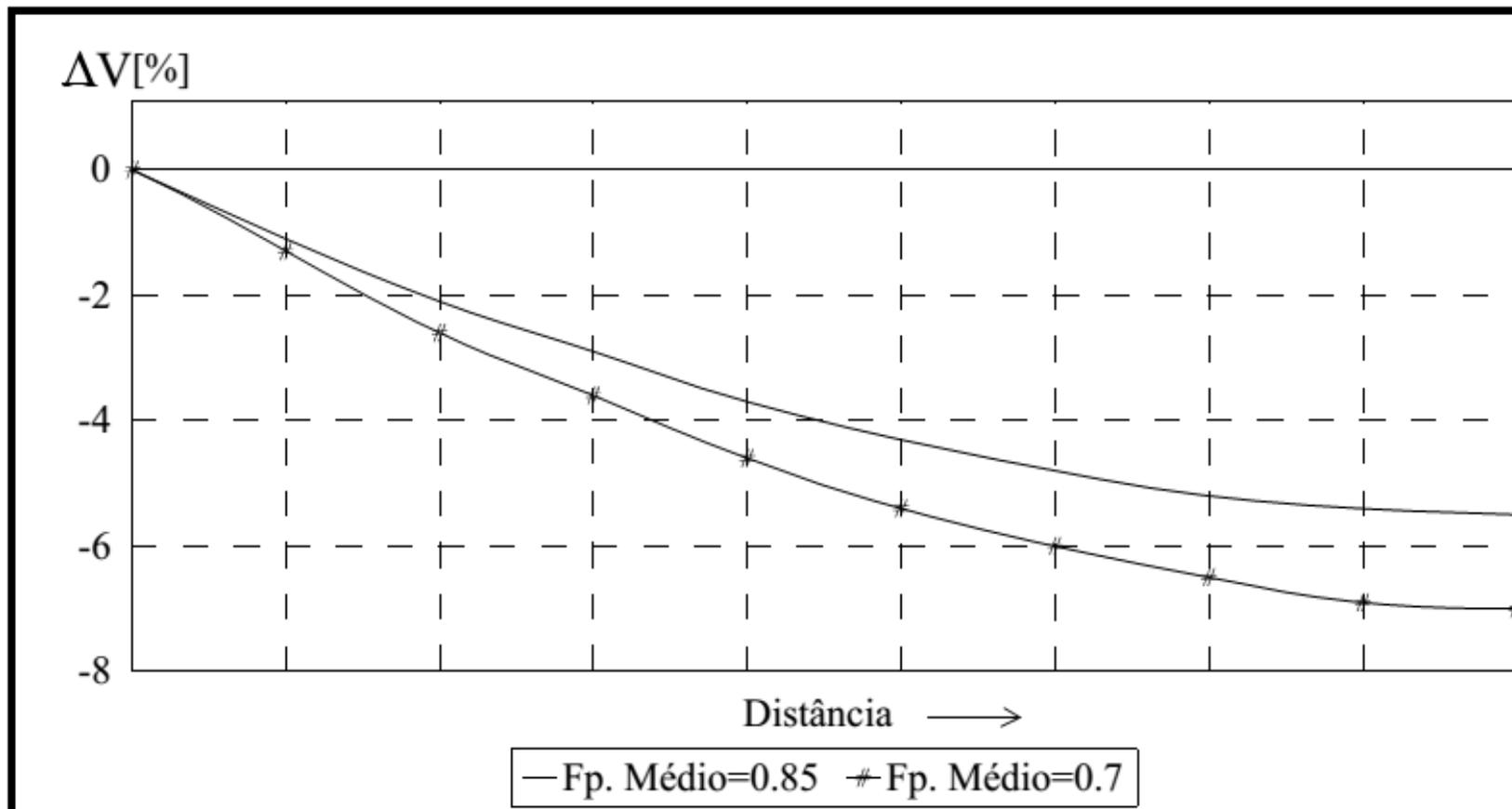
ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Decréscimo no valor eficaz da tensão AC para menos de 90% com uma duração superior a 1 min. São decorrentes:
 - principalmente, do carregamento excessivo de circuitos alimentadores, que interagem com a impedância da rede;
 - do desligamento de bancos de capacitores, que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão.

Subtensão

- ✓ É função da corrente de carga, do fator de potência e dos parâmetros R e X da rede.

$$\Delta V = I(R\cos\phi + X\text{sen}\phi)$$



Subtensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ **Dentre os problemas causados por subtensões de longa duração, destacam-se:**
 - Redução da potência reativa fornecida capacitores ao sistema;
 - Possível interrupção da operação de equipamentos eletrônicos;
 - Elevação do tempo de partida das máquinas de indução, o que contribui para a elevação de temperatura dos enrolamentos; e

Subtensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

✓ **Dentre os problemas causados por subtensões de longa duração, destacam-se:**

- Aumento nos valores das correntes do estator de um motor de indução quando alimentado por uma tensão inferior à nominal. Desta forma tem-se um sobreaquecimento da máquina, o que certamente reduzirá a expectativa de vida útil da mesma.

Subtensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ **As opções para o melhoramento da regulação de tensão são:**
 - instalar reguladores de tensão para elevar o nível da tensão;
 - instalar capacitores “shunt” para reduzir a corrente do circuito;
 - instalar capacitores série para cancelar a queda de tensão indutiva (IX);
 - instalar cabos com bitolas maiores para reduzir a impedância;

Dispositivos usados para regulação de tensão:

- **Transformadores de *tap* variável:** podem ser com acionamento mecânico ou eletrônico. Os do tipo mecânico são para cargas que variam lentamente, enquanto que os eletrônicos podem responder rapidamente às mudanças de tensão.

- ✓ **Dispositivos usados para regulação de tensão:**
 - **Dispositivos de isolamento com reguladores de tensão independentes:** incluem sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supply*), transformadores ferroressonantes (tensão constante), conjuntos M-G, etc. Estes são equipamentos que isolam a carga da fonte de suprimento através de algum método de conversão de energia. Assim, a saída do dispositivo pode ser separadamente regulada e manter constante a tensão, desprezando as variações provenientes da fonte principal.

Subtensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

✓ Dispositivos usados para regulação de tensão:

- transformadores ferroressonantes (tensão constante):

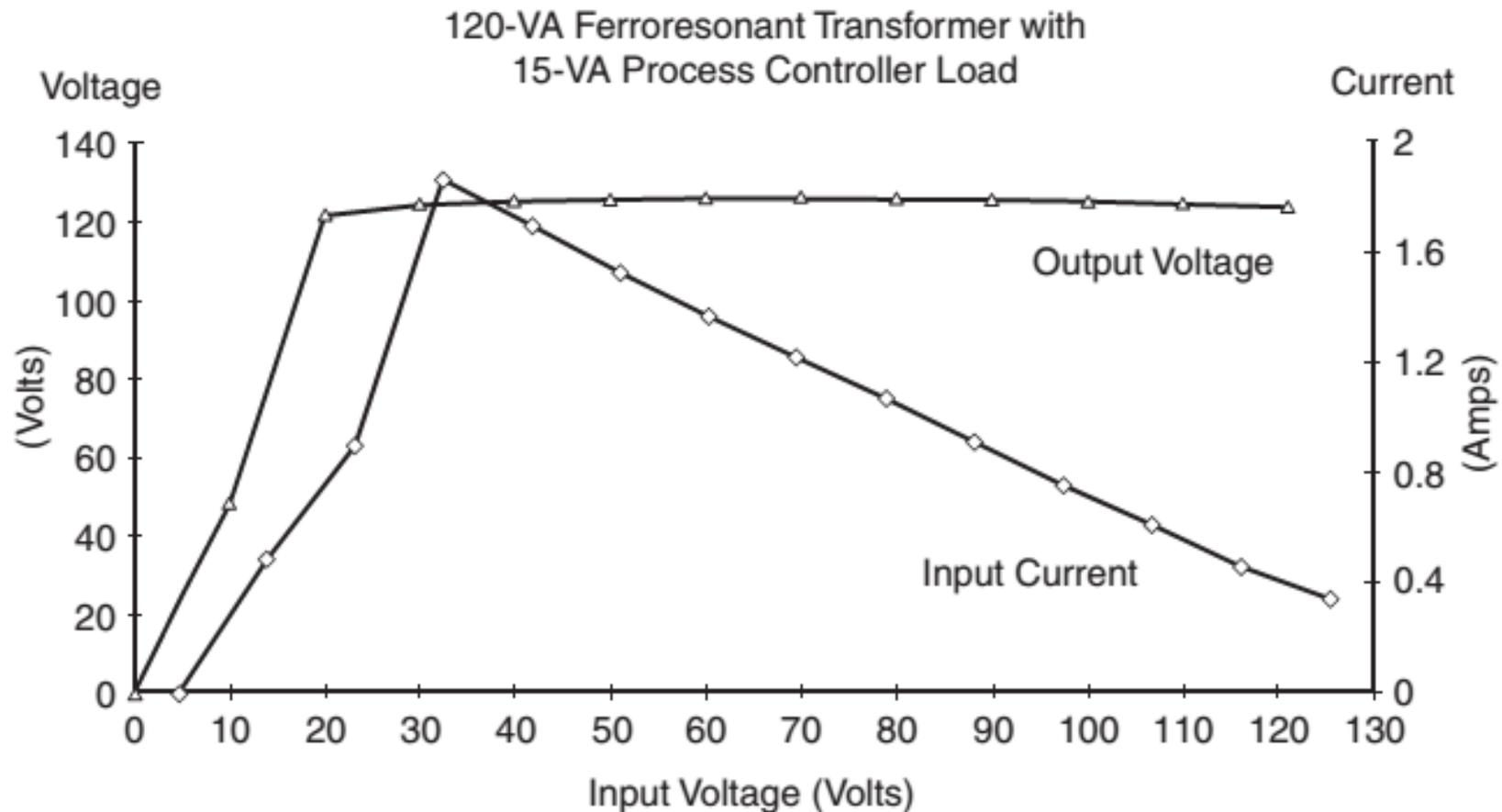
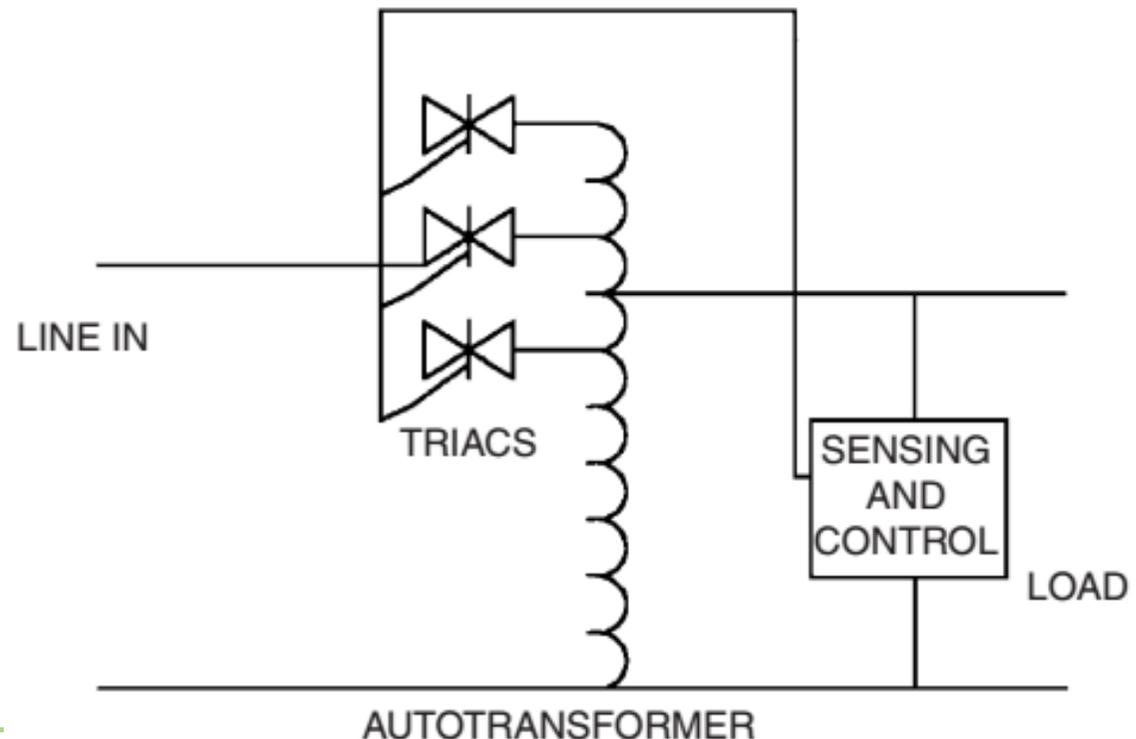


Figure 7.3 Ferroresonant transformer steady-state characteristics.

Subtensão

Dispositivos usados para regulação de tensão:

- **Transformadores de *tap* variável:** mais eficientes que os trafos ferroressonantes. Tempo de resposta de comutação de taps muito rápidos (meio ciclo), com a utilização de triacs. Populares para aplicações de média potência.



Subtensão

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

✓ Dispositivos usados para regulação de tensão:

- **Dispositivos de compensação de impedância:**
Capacitores “shunt” ou série ajudam a manter a tensão pela redução da corrente de linha ou através da compensação de circuitos indutivos.

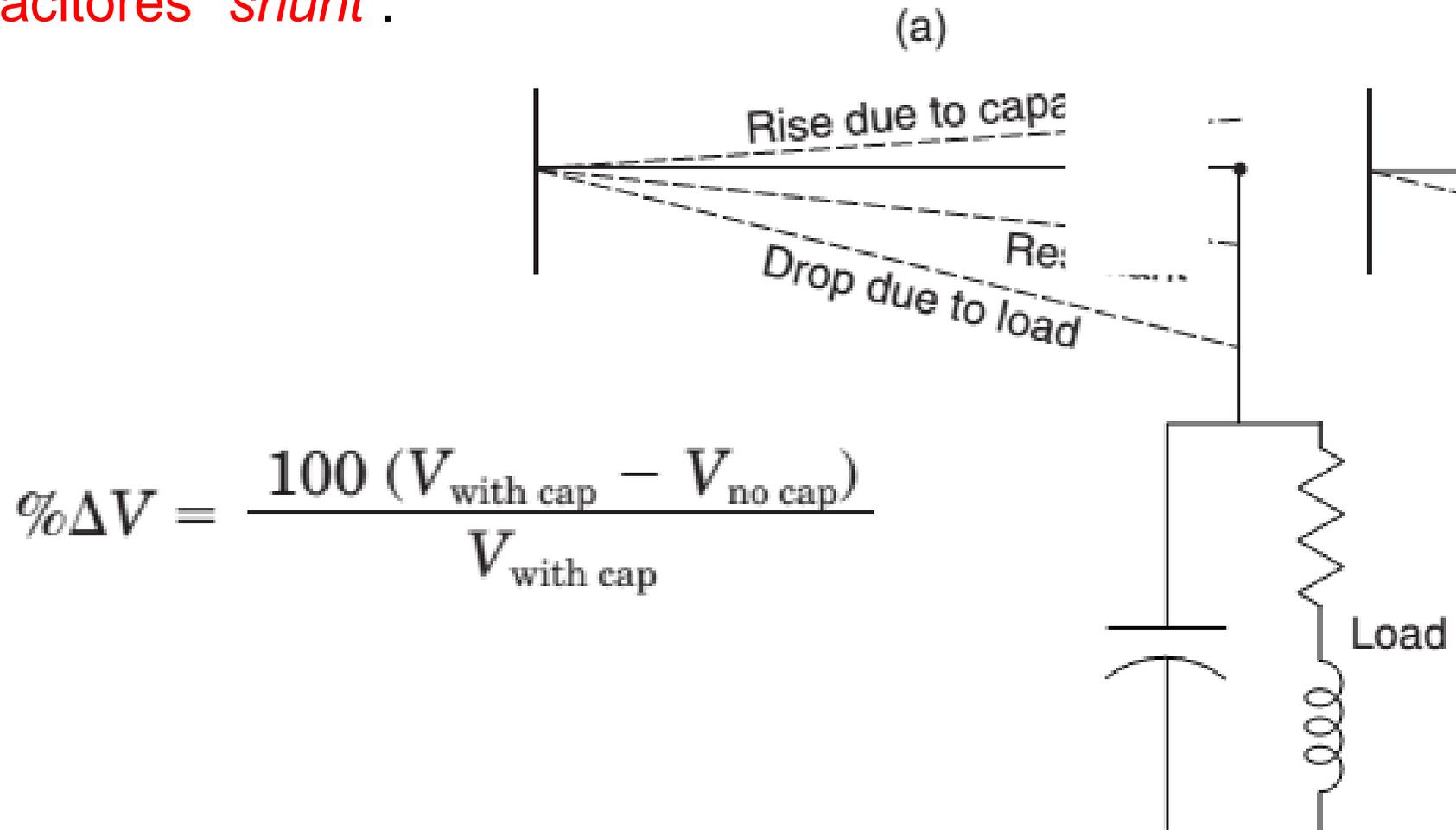
- podem ser fixos ou chaveados

- Capacitores em série são relativamente raros, mas são muito úteis em algumas cargas impulsivas como britadeiras, etc. Estes capacitores compensam grande parte da indutância dos sistemas.

Subtensão

✓ Dispositivos usados para regulação de tensão:

- Dispositivos de compensação de impedância:
Capacitores “*shunt*”.



Recapitulando, Termos e Definições segundo IEC

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Categorias	Conteúdo Espectral Típico	Duração	Magnitude da tensão
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instantânea			
2.1.1 Interrupção		0.5 – 30 ciclos	<0.1 pu
2.1.2 sag		0.5 – 30 ciclos	0.1 - 0.9 pu
2.1.3 swell		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
2.2 momentânea			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos – 3s	<0.1 pu
2.2.2 sag		30 ciclos – 3s	0.1 - 0.9 pu
2.2.3 swell		30 ciclos – 3s	1.1 – 1.4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3s – 1min	<0.1 pu
2.3.2 sag		3s – 1min	0.1 - 0.9 pu
2.3.3 swell		3s – 1min	1.1 – 1.2 pu

3.0 Variações de longa duração			
3.1 Interrupção sustentada		> 1 min	0.0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Sobretensão		> 1 min	1.1-1.2 pu

Interrupção Sustentada

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Ocorre 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;
- ✓ A maioria delas ocorre inesperadamente e as principais causas são falhas nos disjuntores, queima de fusíveis, falha de componentes de circuito alimentador, etc.
- ✓ Interrupções planejadas são feitas geralmente para executar manutenção na rede, ou seja, serviço como troca de cabos e postes, mudança do tap do transformador, alteração dos ajustes de equipamentos de proteção, etc.

Interrupção Sustentada

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Seja a interrupção de natureza inesperada e ou sustentada, 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.
- ✓ Ao ocorrer uma falta de caráter permanente, o dispositivo de proteção do alimentador principal executa 3 ou 4 operações na tentativa de se restabelecer o sistema, até que o bloqueio definitivo seja efetuado.

Interrupção Sustentada

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Em redes aéreas, a localização do defeito não demora muito tempo, ao passo que em redes subterrâneas necessita-se de um tempo considerável;
- ✓ Entretanto, a probabilidade de ocorrer uma falta em redes subterrâneas é muito menor do que em redes aéreas;
- ✓ A consequência de uma interrupção sustentada é o desligamento dos equipamentos, e consequente perda na produção;