

# Aula 06 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD)



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](mailto:heverton.pereira@ufv.br)

[www.gesep.ufv.br](http://www.gesep.ufv.br)  
TEL: +55 (31) 3899-3266

# VTCD

## Capítulo 3 – Dugan – Apostila USP.

- Instantâneas: 0,5 a 30 ciclos;
- Momentâneas: 30 ciclos a 3s;
- Temporárias: 3s a 1 minuto.
- causadas por condições de faltas, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou a perda intermitente de conexões nos cabos do sistema.
- Pode causar afundamento, elevação ou interrupção da tensão.

# Recapitulando, Termos e Definições segundo IEC

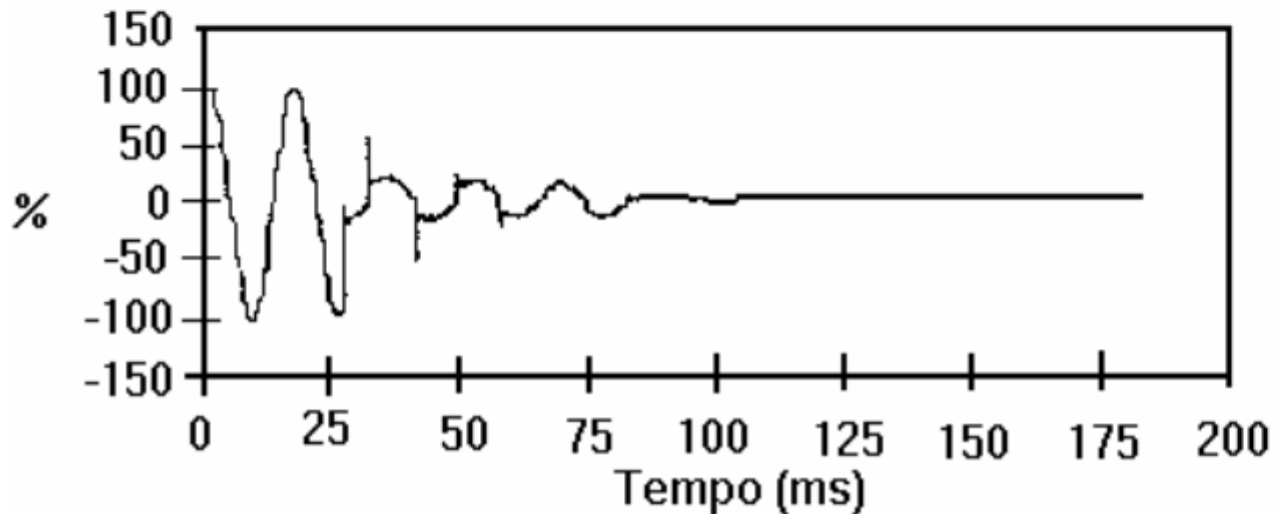
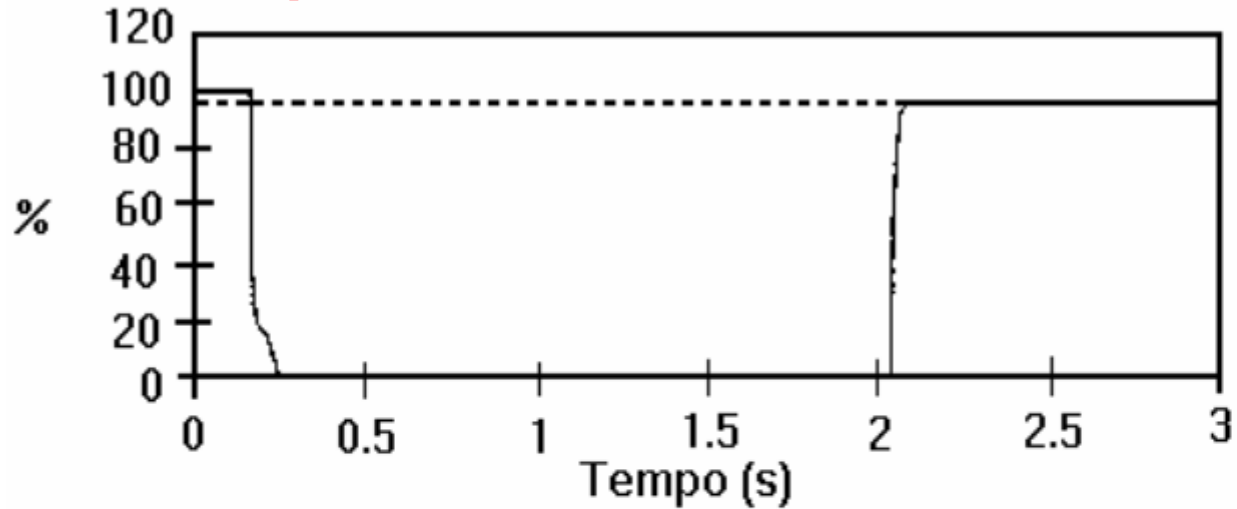
<b>Categorias</b>	<b>Conteúdo Espectral Típico</b>	<b>Duração</b>	<b>Magnitude da tensão</b>
<b>2.0 Variações de curta duração</b>			
<b>2.1 Instantânea</b>			
<b>2.1.1 Interrupção</b>		<b>0.5 – 30 ciclos</b>	<b>&lt;0.1 pu</b>
<b>2.1.2 sag</b>		<b>0.5 – 30 ciclos</b>	<b>0.1 - 0.9 pu</b>
<b>2.1.3 swell</b>		<b>0.5 – 30 ciclos</b>	<b>1.1 – 1.8 pu</b>
<b>2.2 momentânea</b>			
<b>2.2.1 Interrupção</b>		<b>30 ciclos – 3s</b>	<b>&lt;0.1 pu</b>
<b>2.2.2 sag</b>		<b>30 ciclos – 3s</b>	<b>0.1 - 0.9 pu</b>
<b>2.2.3 swell</b>		<b>30 ciclos – 3s</b>	<b>1.1 – 1.4 pu</b>
<b>2.3 Temporária</b>			
<b>2.3.1 Interrupção</b>		<b>3s – 1min</b>	<b>&lt;0.1 pu</b>
<b>2.3.2 sag</b>		<b>3s – 1min</b>	<b>0.1 - 0.9 pu</b>
<b>2.3.3 swell</b>		<b>3s – 1min</b>	<b>1.1 – 1.2 pu</b>
<b>3.0 Variações de longa duração</b>			
<b>3.1 Interrupção sustentada</b>		<b>&gt; 1 min</b>	<b>0.0 pu</b>
<b>3.2 Subtensão</b>		<b>&gt; 1 min</b>	<b>0.8-0.9 pu</b>
<b>3.3 Sobretensão</b>		<b>&gt; 1 min</b>	<b>1.1-1.2 pu</b>

# Interrupção de curta duração

- ocorre quando o fornecimento de tensão ou corrente de carga decresce para um valor **menor do que 0,1 p.u.** por um período de tempo que **não excede 1 min**;
- resultantes de faltas no sistema de energia, falhas nos equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle;
- Religadores automáticos podem gerar interrupções instantâneas, momentâneas ou temporárias, dependendo da escolha das curvas de operação do equipamento;

# Interrupção de curta duração

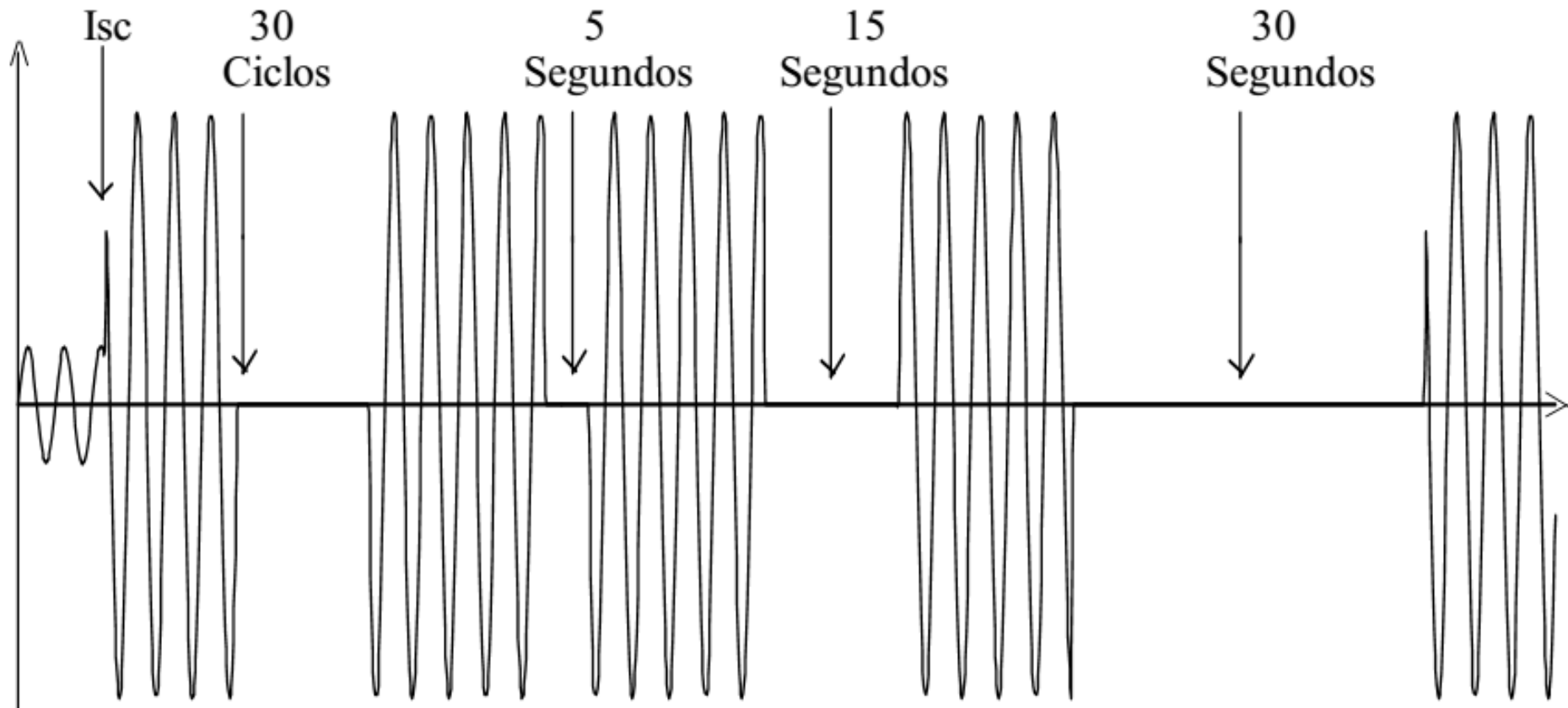
- Tensão na Fase B -  
Variação rms **interrupções podem ser precedidas por um afundamento de tensão;**



Duração  
2300 s  
Min. 0.257  
Méd. 22.43  
Máx. 100.4

# Interrupção de curta duração

- Logo que o dispositivo de proteção detecta a corrente de curto circuito, ele comanda a desenergização da linha com vistas a eliminar a corrente de falta.



- **75% das faltas em redes aéreas são de natureza temporária (3s a 1min).**

# Afundamentos de Tensão

- decréscimo de 10-90% no valor eficaz da tensão do sistema podendo permanecer por um período de meio ciclo até 1 min.
- quando a tensão do sistema **cai de 30%** ou mais, o estado deste é considerado **crítico**.

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

# Afundamentos de Tensão

- **mais significativo distúrbio da qualidade da energia que se manifesta nas redes elétricas.**

- são associados:

- usualmente, às faltas no sistema (curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição);

- podem também ser causados pela energização de grandes cargas ou partida de grandes motores; e

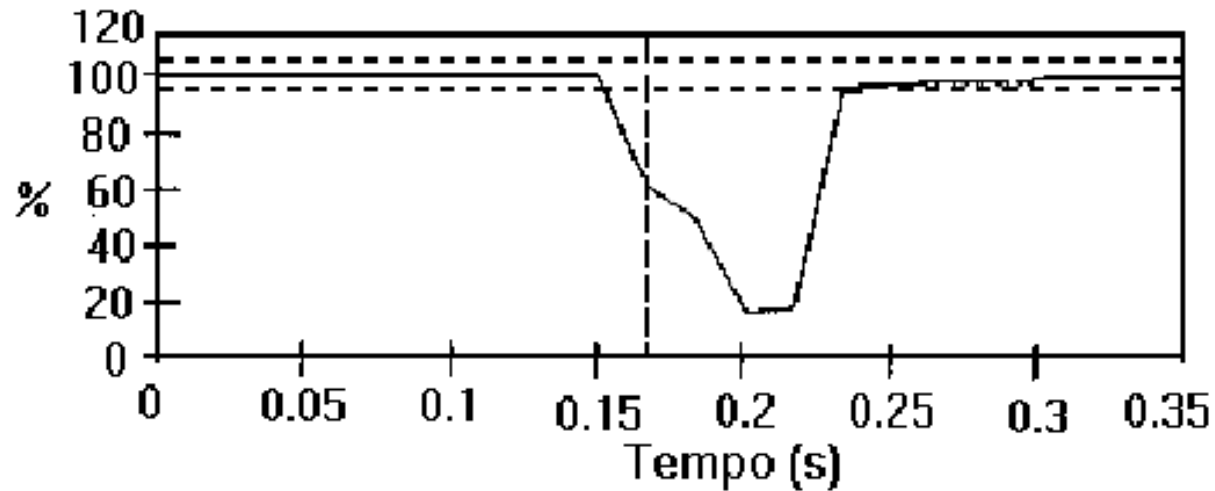
- pela corrente de magnetização de um transformador.



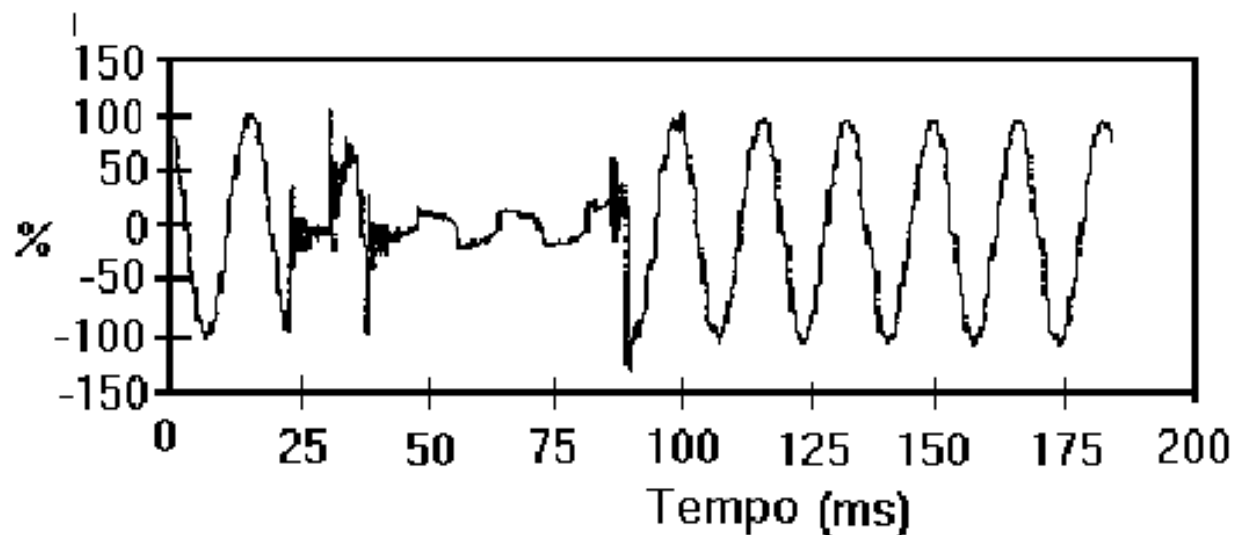
# Afundamentos de Tensão

- **Sag (instantâneo) causado por falta FT:**

Variação da Tensão  
rms



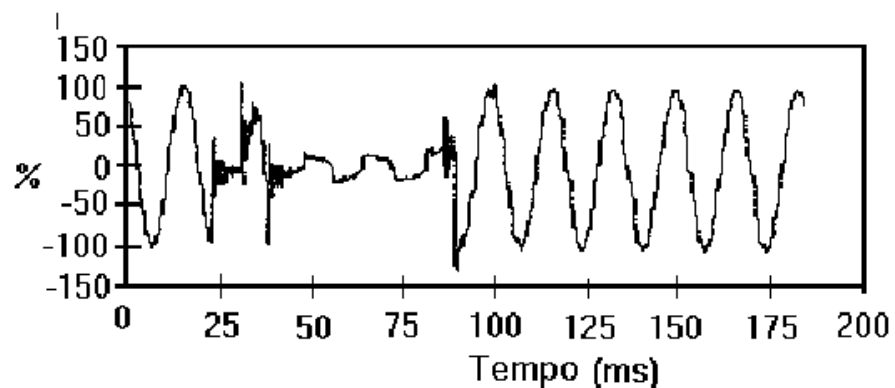
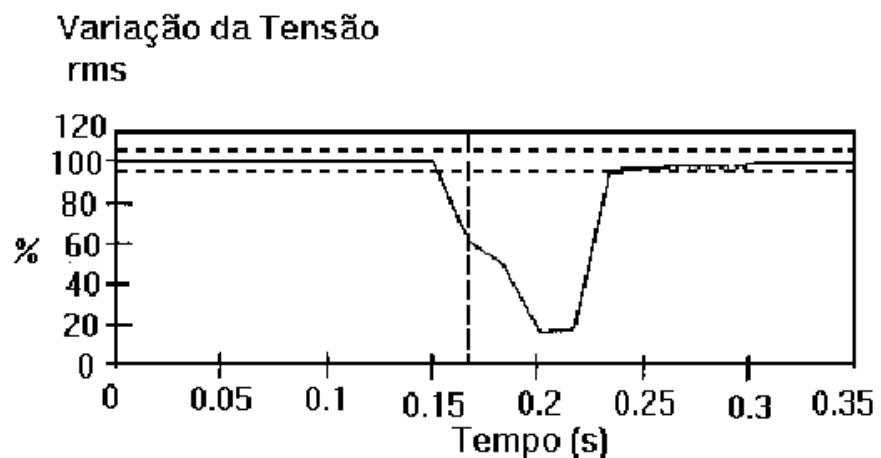
Duração  
0.067 s  
Min. 17.44  
Méd. 71.29  
Máx. 100.3



# Afundamentos de Tensão

Observa-se a concessionária afetando os consumidores. Porém, a falta pode ocorrer dentro de unidades consumidoras, que causarão subtensões em outros consumidores.

Em transformadores  $\Delta$ -Y, a corrente de seqüência zero, oriunda de faltas assimétricas, é eliminada do circuito.

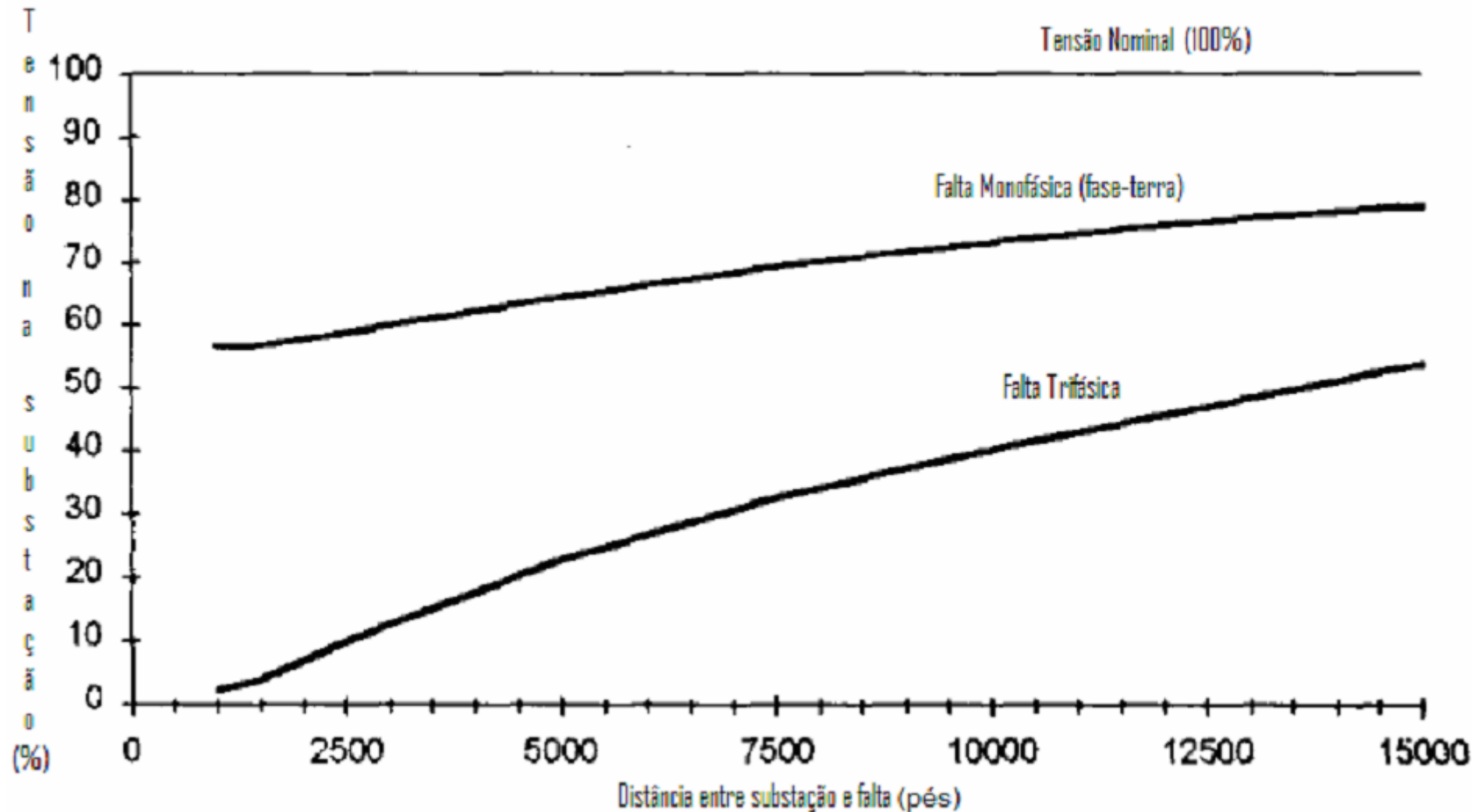


Duração  
0.067 s  
Min. 17.44  
Méd. 71.29  
Máx. 100.3

# Afundamentos de Tensão

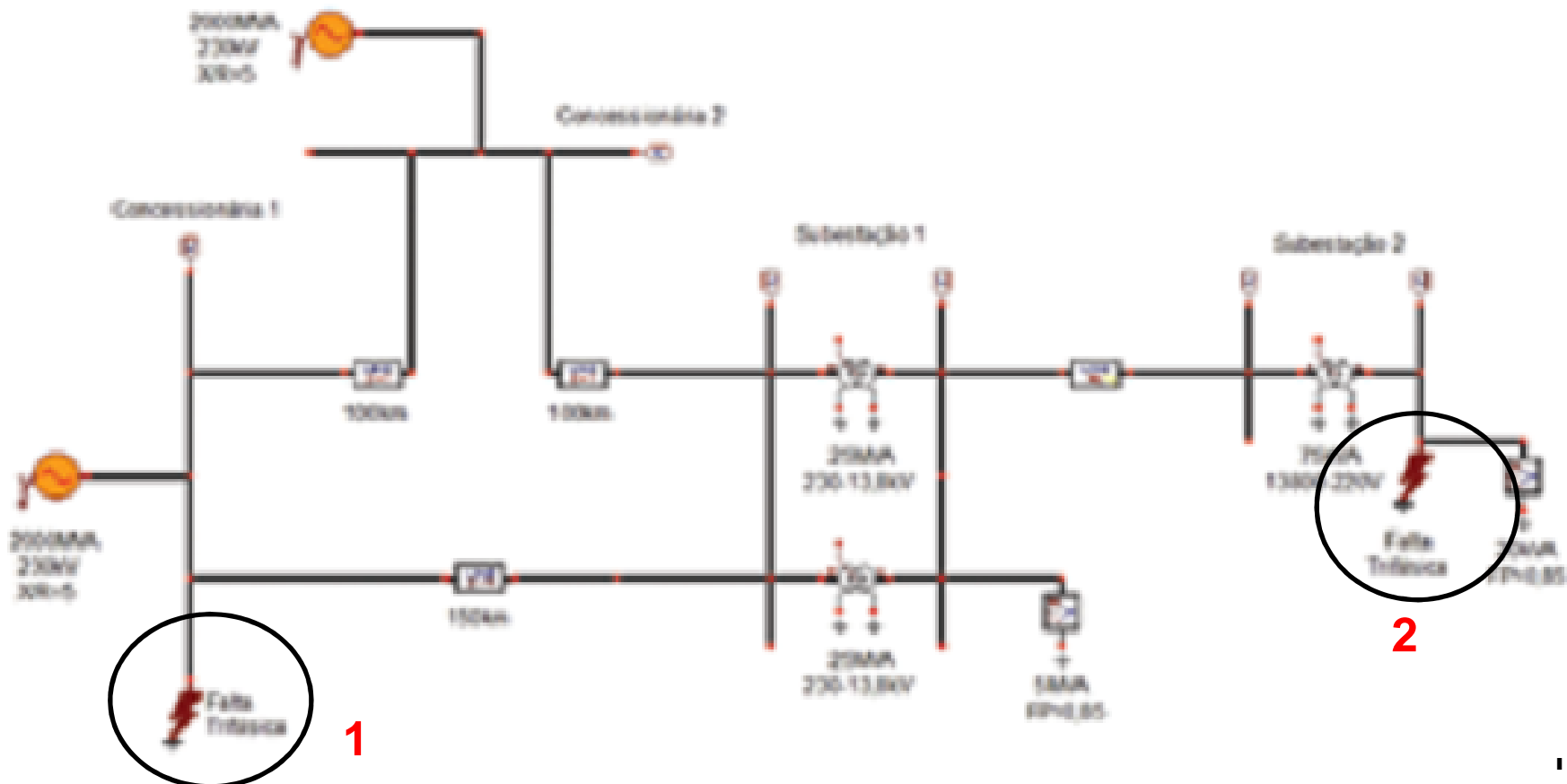
## Sag causado por faltas

Severidade do sag em função da localização da falta no alimentador paralelo ao que está ligada a carga:



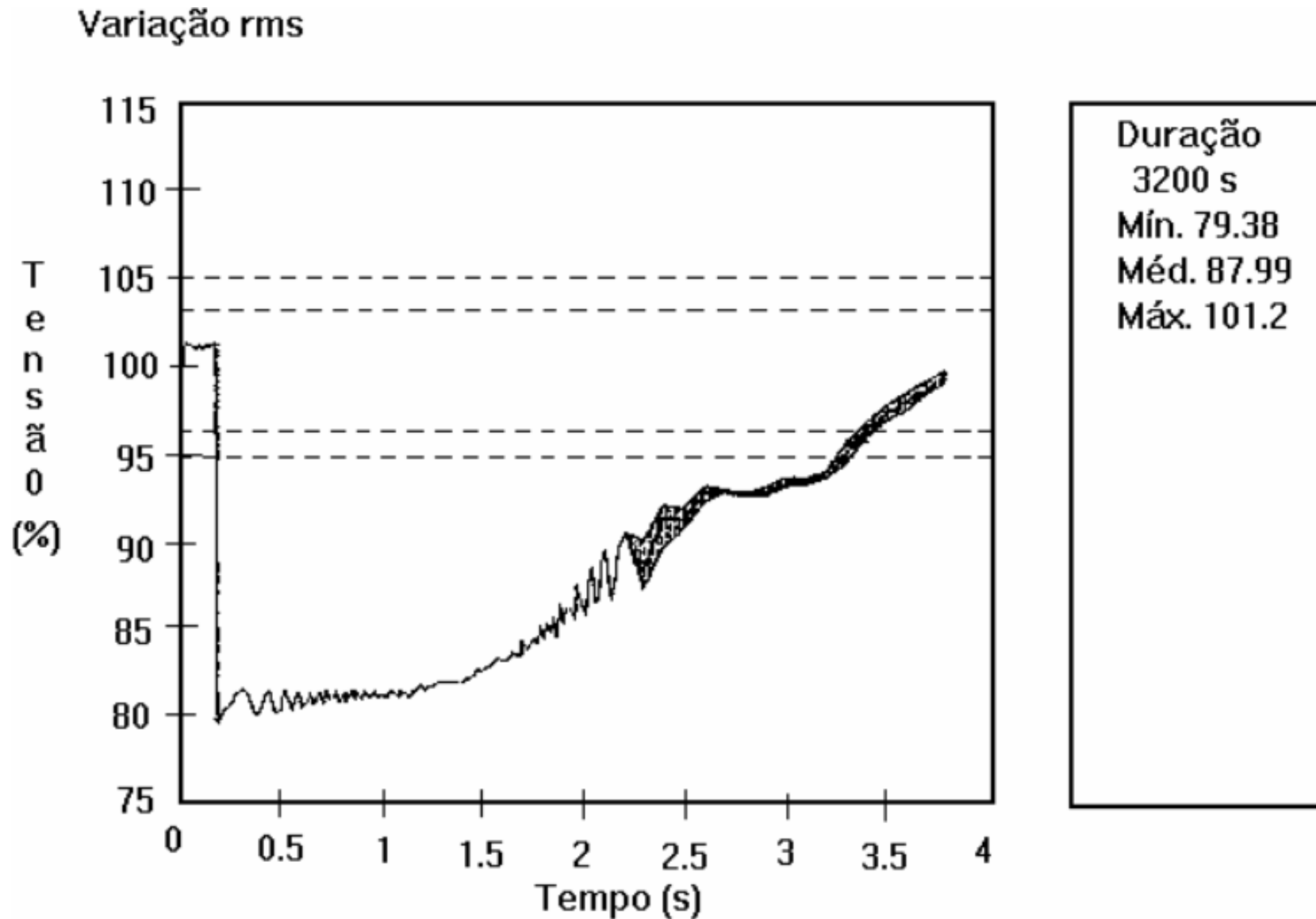
# Afundamentos de Tensão

quando ocorre uma falta na **concessionária 1**, todo sistema irá sentir os efeitos do afundamento de tensão (distribuição e transmissão); já uma falta no lado de baixa da **Subestação 2**, apenas as cargas conectadas a esse alimentador irão percebê-la.



# Afundamentos de Tensão

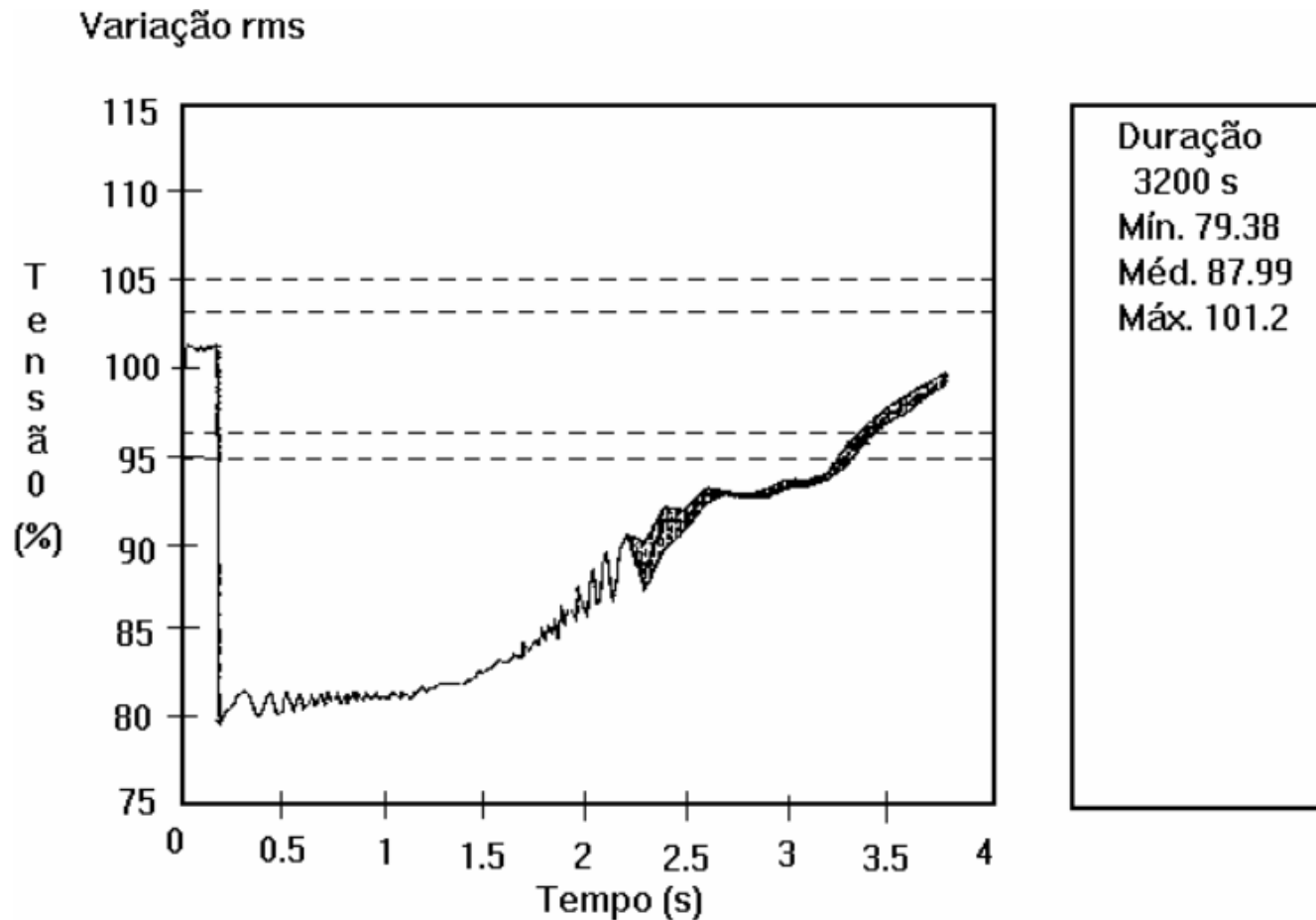
## Sag causado por partida de motor de indução:



# Afundamentos de Tensão

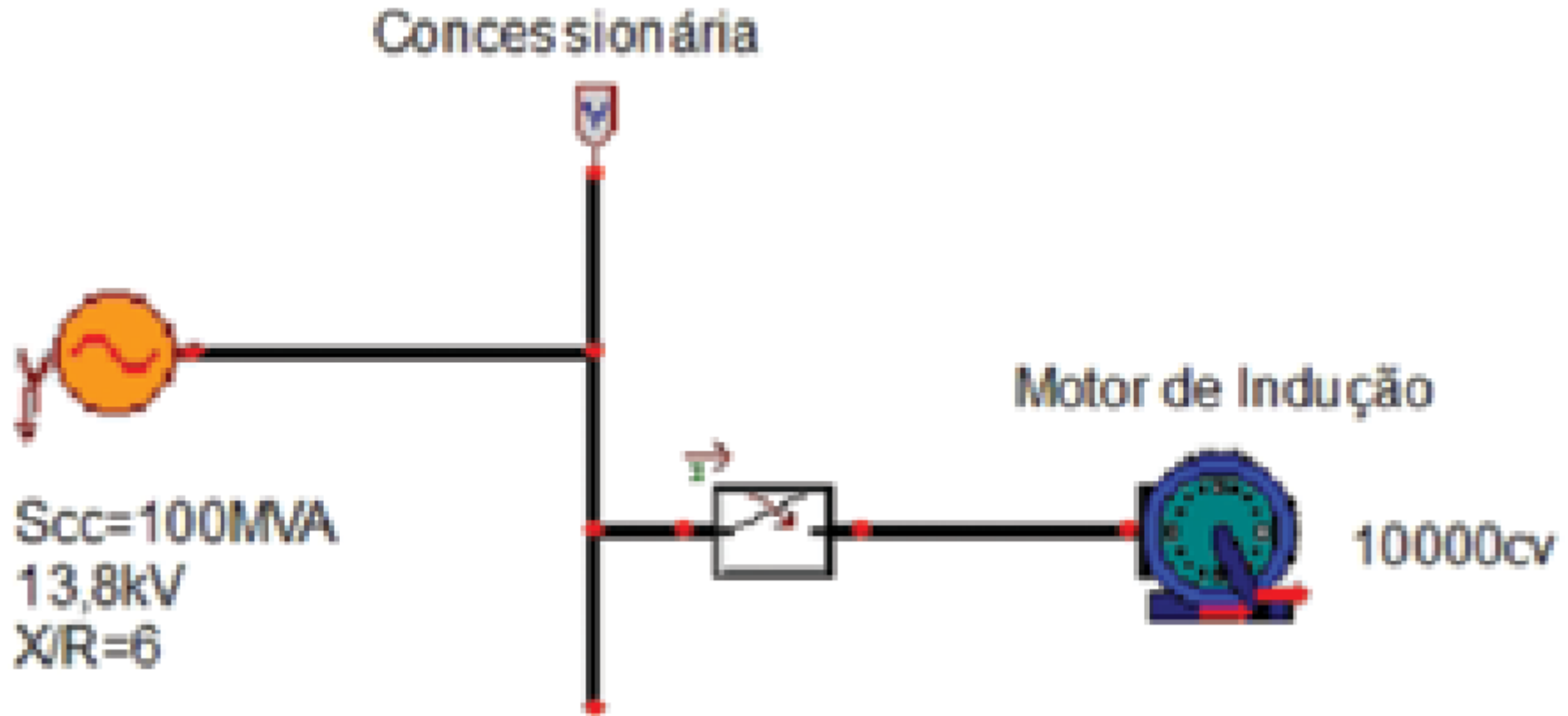
## Sag causado por partida de motor de indução:

o efeito é provocar má operação de circuitos eletrônicos, pois cada um deles possui um nível de sensibilidade associado.



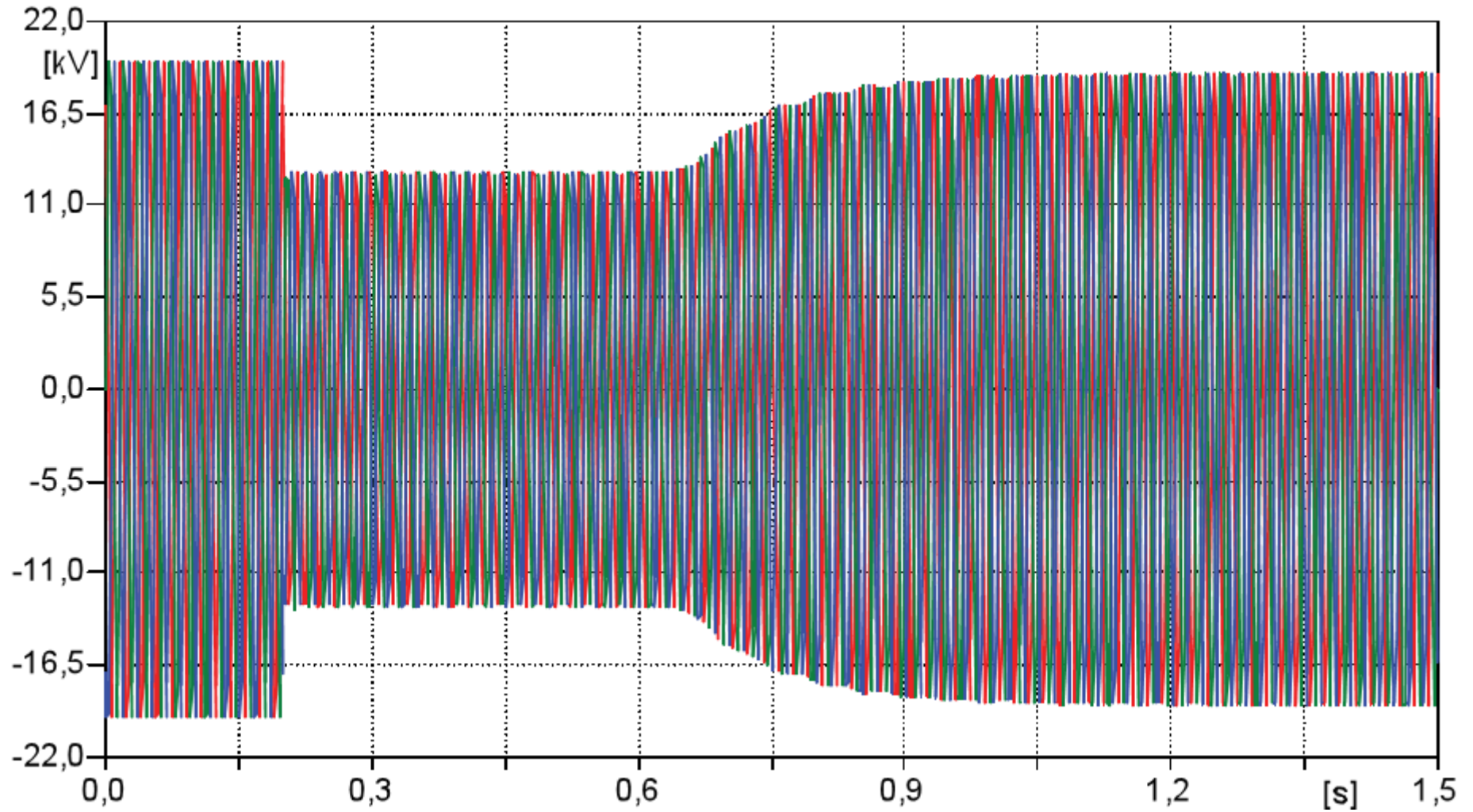
# Afundamentos de Tensão

Sag causado por partida de motor de indução:



# Afundamentos de Tensão

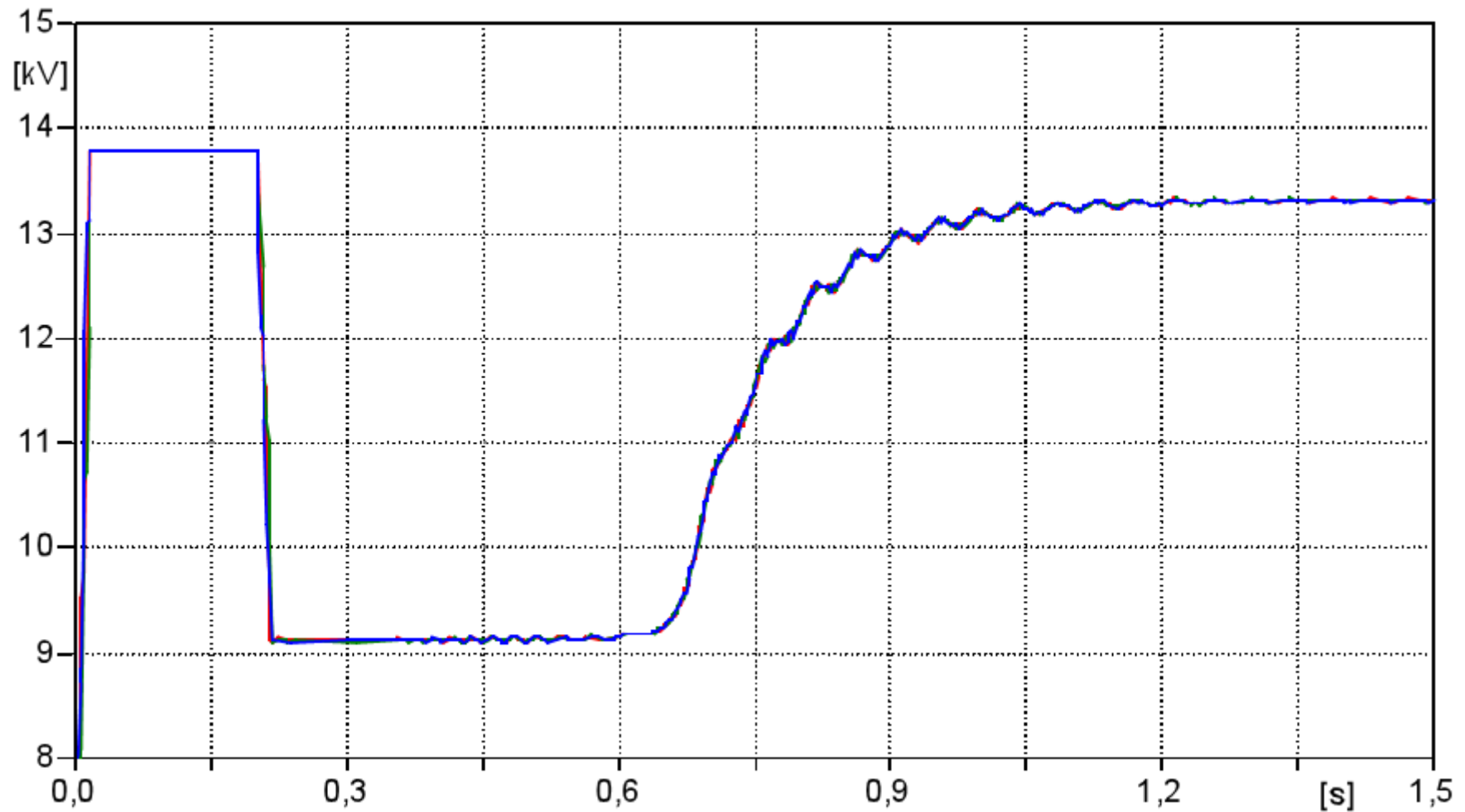
Tensão de linha no barramento da concessionária:





# Afundamentos de Tensão

**Tensão de linha RMS no barramento da concessionária:**



# Afundamentos de Tensão

**a) Controladores de resfriamento:** são prejudicados quando os sag's atingem níveis em torno de 80% da nominal.

**b) Testadores de “chips” eletrônicos:** requerem 30 minutos ou mais para reiniciarem a linha de testes. Tais testadores, compostos de cargas eletrônicas tipo: impressoras, computadores, monitores, etc., normalmente saem de operação se a tensão excursionar abaixo de 85% da nominal.

**c) Acionadores CC:** estes se mostram sensíveis quando a tensão é reduzida para próximo de 88% da nominal, ou seja, apresentam um alto nível de sensibilidade.

# Afundamentos de Tensão

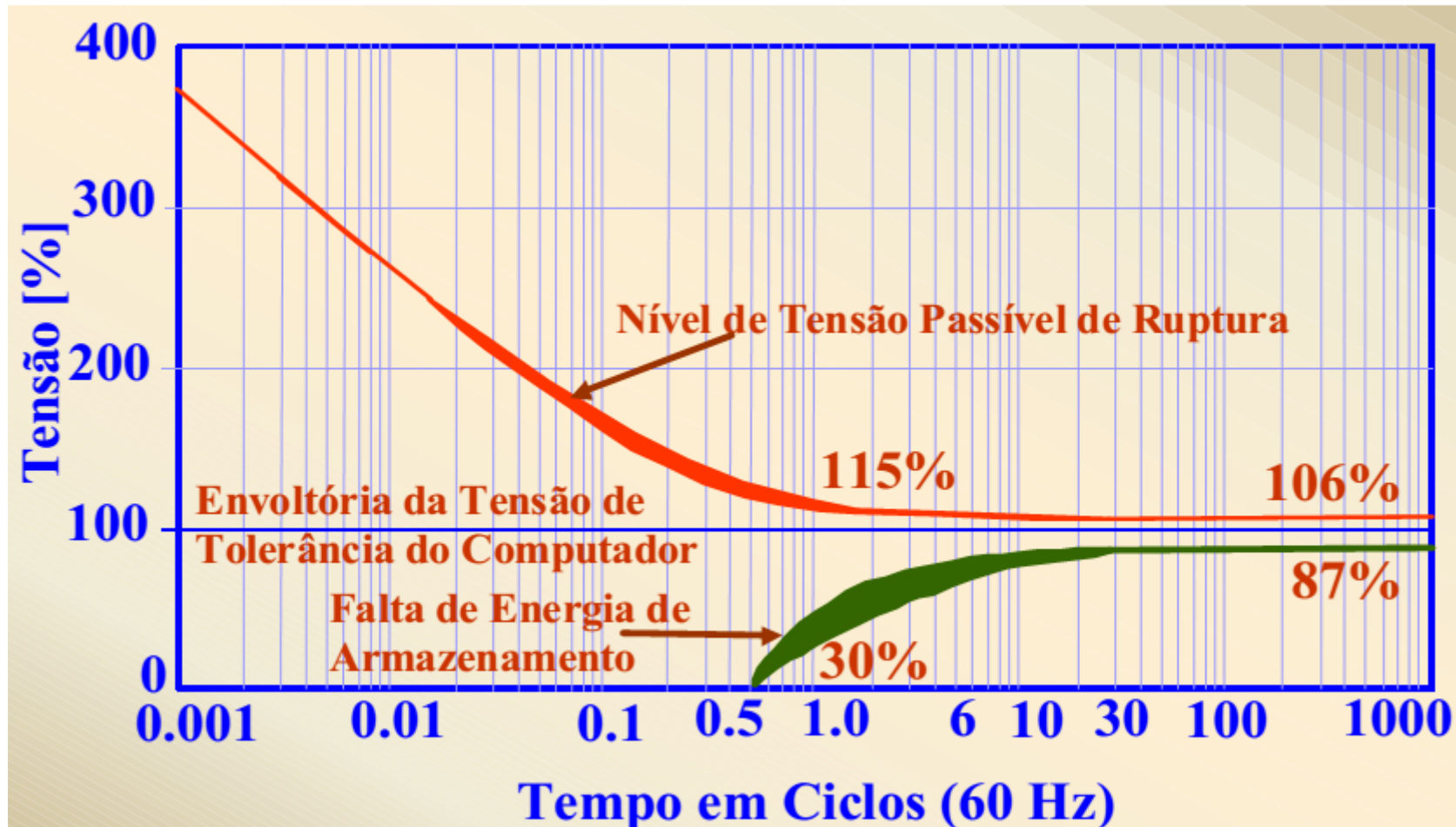
**d) PLCs:** os mais modernos, dotados de uma eletrônica mais sofisticada, começam a apresentar problemas na faixa de 50-60% da tensão nominal.

**e) Robôs:** estes tipos de máquinas são freqüentemente ajustadas para saírem de operação, quando a tensão atinge níveis de 90% da nominal;

**f) Computadores:** configuram-se a principal fonte de preocupação no que se refere aos afundamentos.

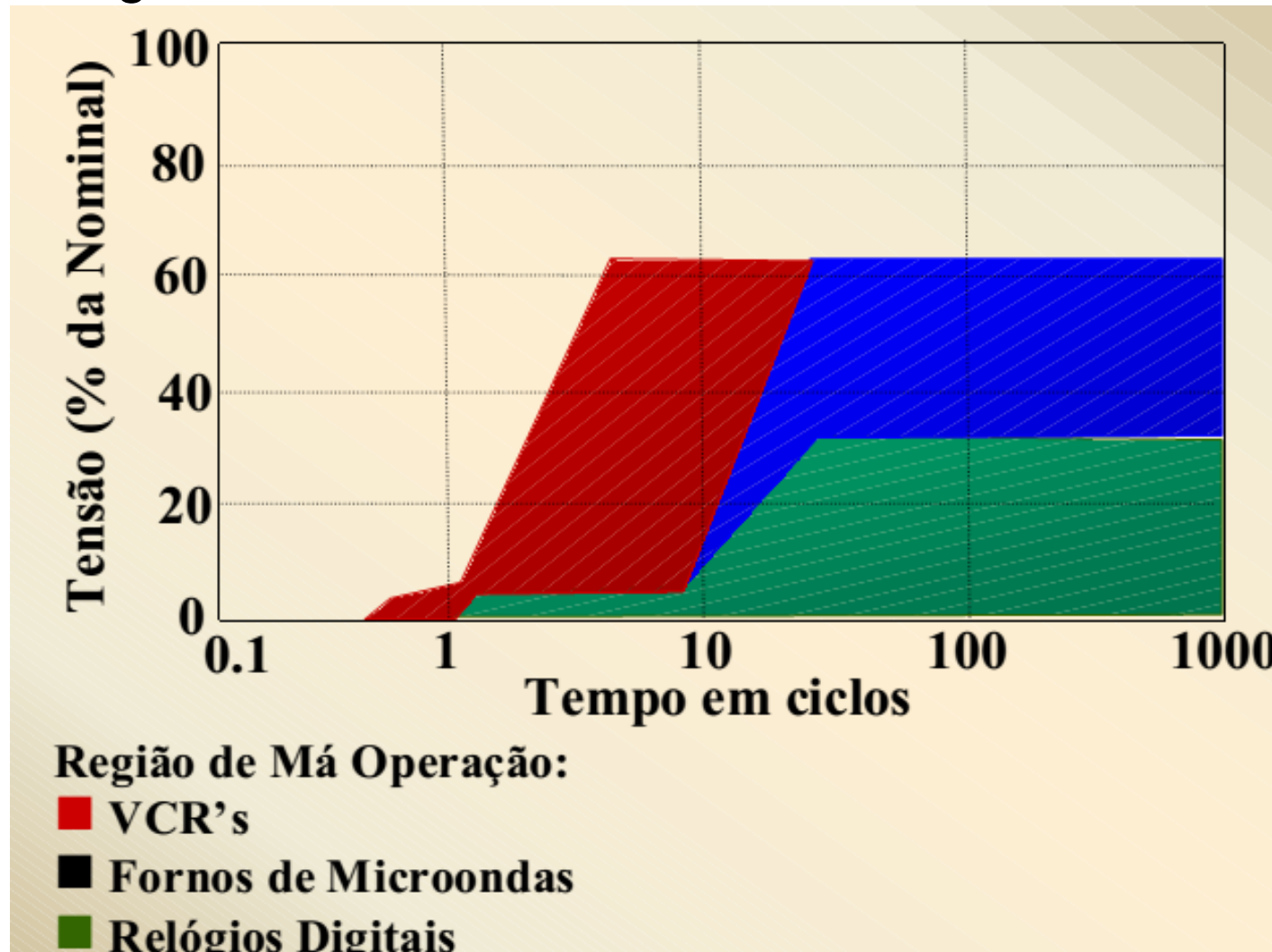
# Afundamentos de Tensão

f) **Computadores:** configuram-se a principal fonte de preocupação no que se refere aos afundamentos.



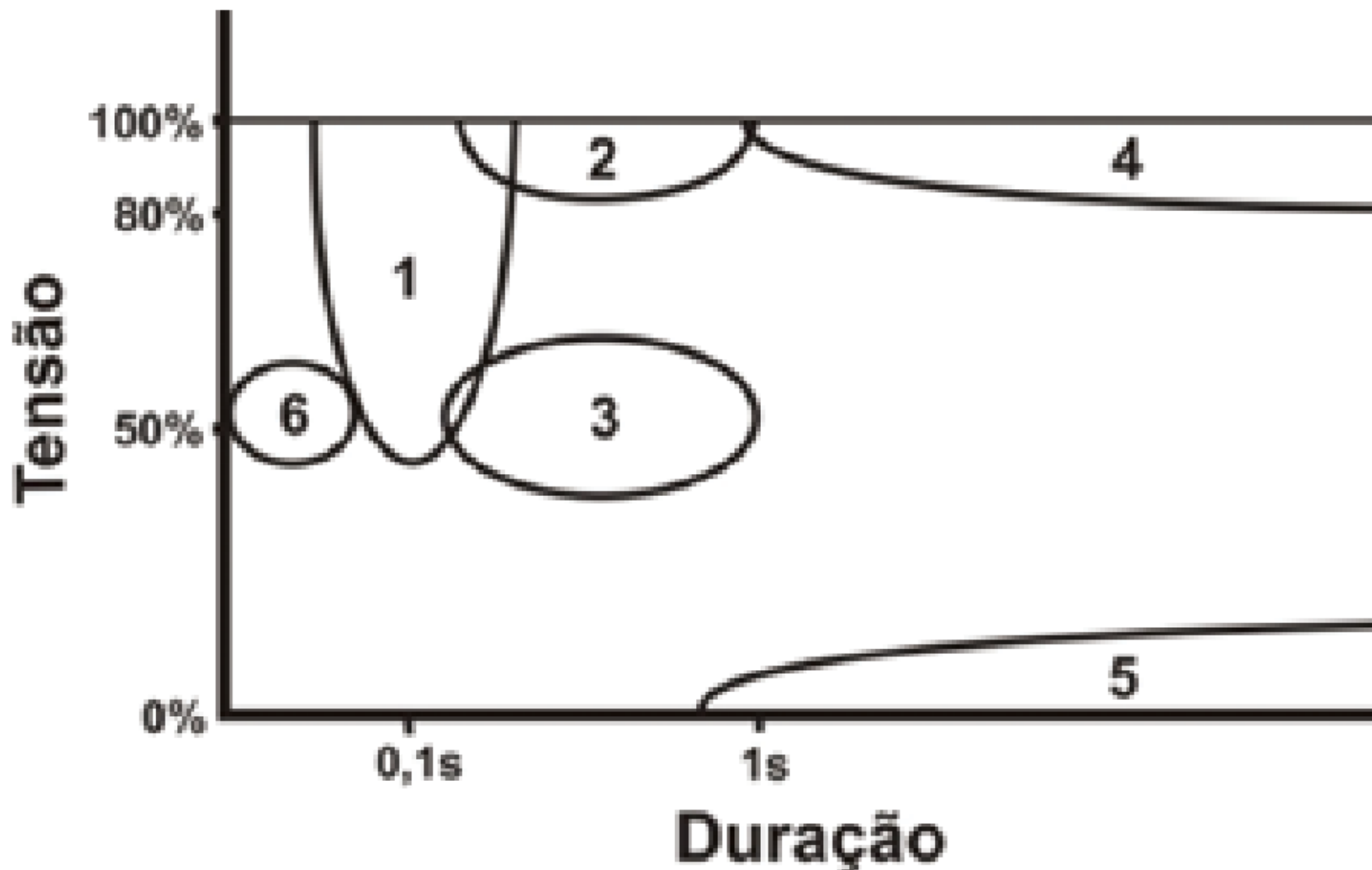
# Afundamentos de Tensão

g) forno de microondas e relógios digitais pouco sensíveis às variações de tensão, o que pode ser verificado através da Figura

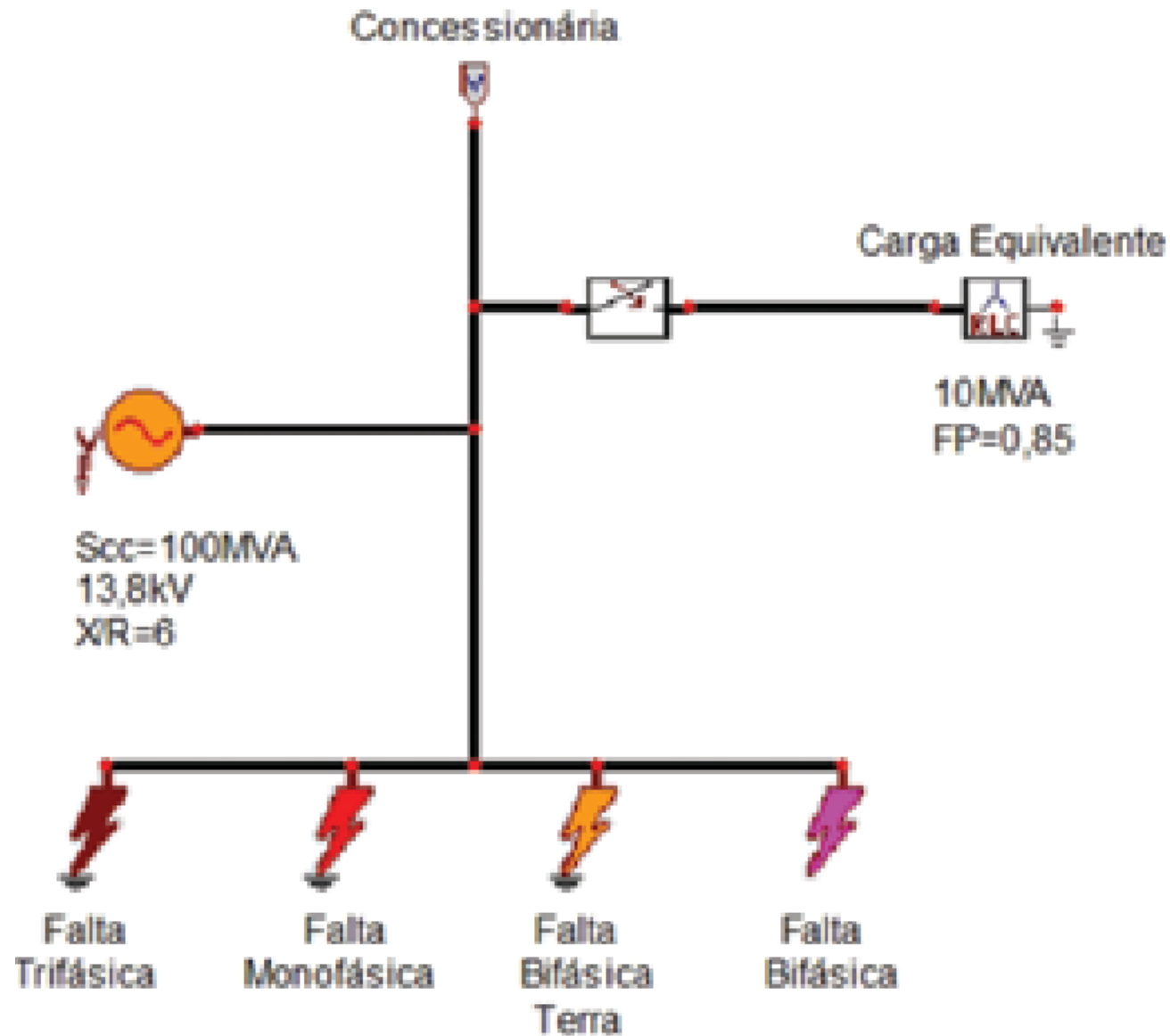


# Afundamentos de Tensão

1. Falhas em sistema de transmissão; 2. Falhas em sistemas de distribuição remotos; 3. Falhas em sistemas de distribuição local; 4. Partida de grandes motores; 5. Interrupções curtas; 6. Fusíveis.



# Afundamentos de Tensão



# Afundamentos de Tensão

## Tipos:

**Sete tipos principais**, classificados como tipos **A, B, C, D, E, F e G**, resultam da associação entre os diferentes tipos de faltas (trifásica, bifásica, bifásica à terra e monofásica) e as duas formas tradicionais de se conectar uma carga trifásica, bem como, do tipo de conexão dos transformadores.

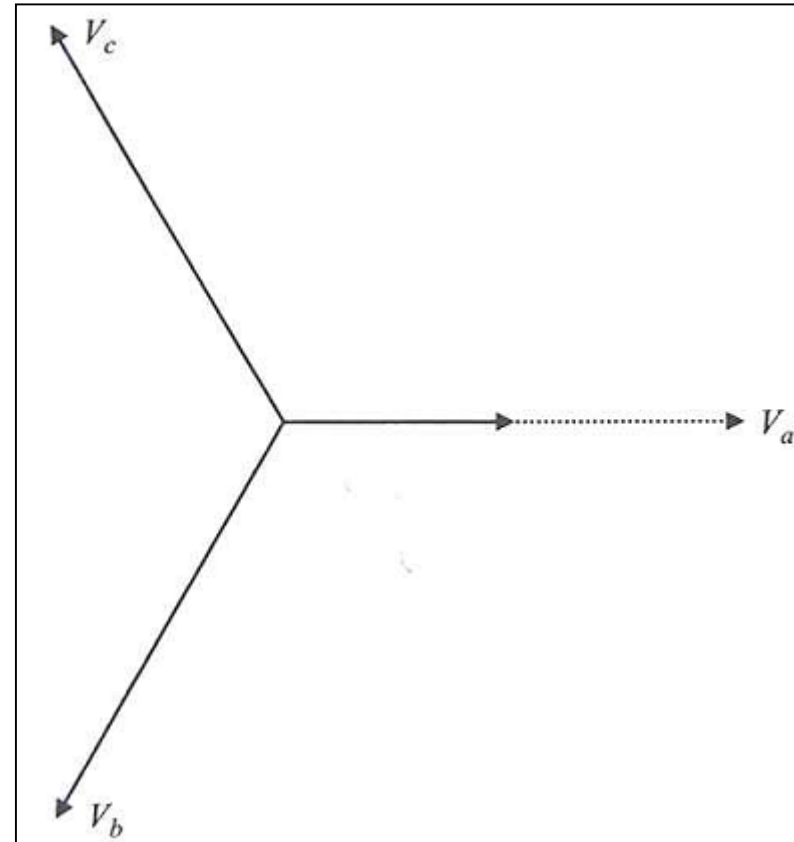


# Afundamentos de Tensão

Falta Fase-Terra, na fase a:

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned}$$

**Sag Tipo B para cargas ligadas Em Y**



# Afundamentos de Tensão

Falta Fase-Terra, na fase a:

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned}$$

Vamos analisar as tensões de linha! Seja:

$$V'_a = j \frac{V_b - V_c}{\sqrt{3}}$$

$$V'_b = j \frac{V_c - V_a}{\sqrt{3}}$$

$$V'_c = j \frac{V_a - V_b}{\sqrt{3}}$$

# Afundamentos de Tensão

Falta Fase-Terra, na fase a.

Tensão pré falta de 1,0 pu.

Vamos analisar as tensões de linha! Seja:  
Eliminando o símbolo ` :

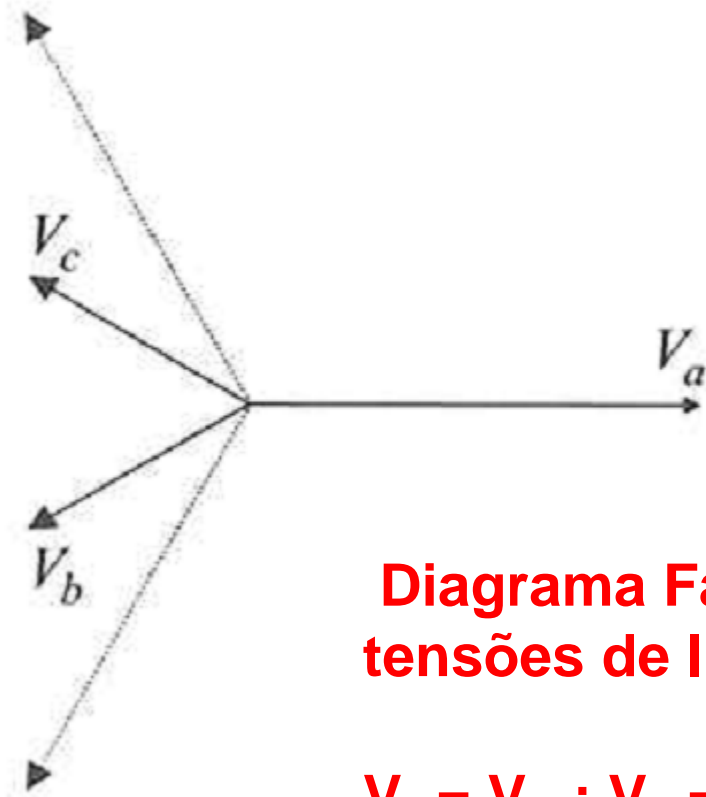


Diagrama Fasorial das tensões de linha, onde:

$$V_a = V_{bc}; V_b = V_{ca}; V_c = V_{ab}$$

$$V'_a = j \frac{V_b - V_c}{\sqrt{3}}$$

$$V'_b = j \frac{V_c - V_a}{\sqrt{3}}$$

$$V'_c = j \frac{V_a - V_b}{\sqrt{3}}$$

$$V_a = 1$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} V\right) j \sqrt{3}$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} V\right) j \sqrt{3}$$

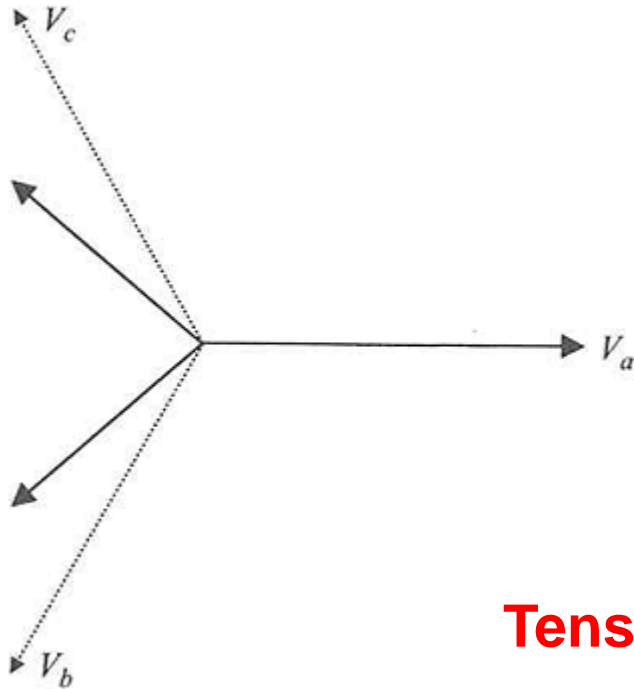
Sag tipo C em cargas ligadas em DELTA!

# Afundamentos de Tensão

Falta Fase-Fase, nas fase b e c.

Tensão pré falta de 1,0 pu.

**Tensões de Fase (sag tipo C – Y)**



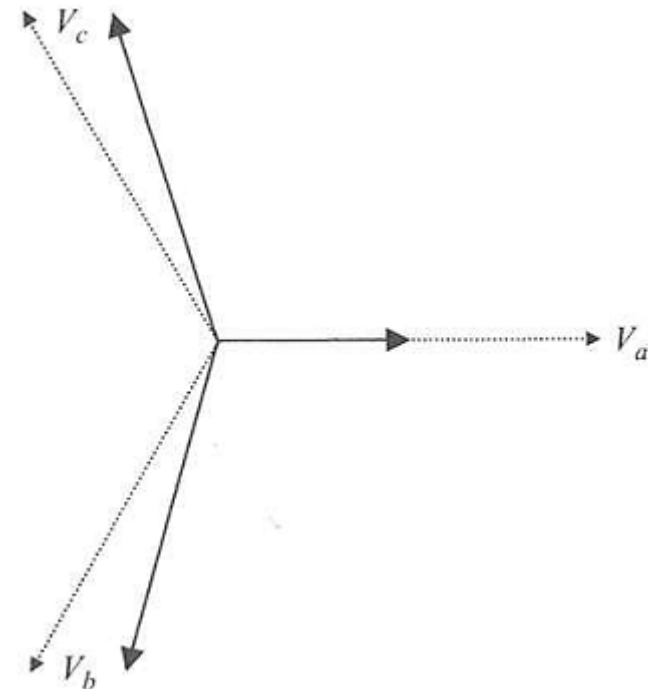
$$V'_a = j \frac{V_b - V_c}{\sqrt{3}}$$

$$V'_b = j \frac{V_c - V_a}{\sqrt{3}}$$

$$V'_c = j \frac{V_a - V_b}{\sqrt{3}}$$

**Tensões de Linha:**

**$V_a = V_{bc}; V_b = V_{ca}; V_c = V_{ab}$   
(sag tipo D – DELTA)**



# Afundamentos de Tensão

Resumindo:

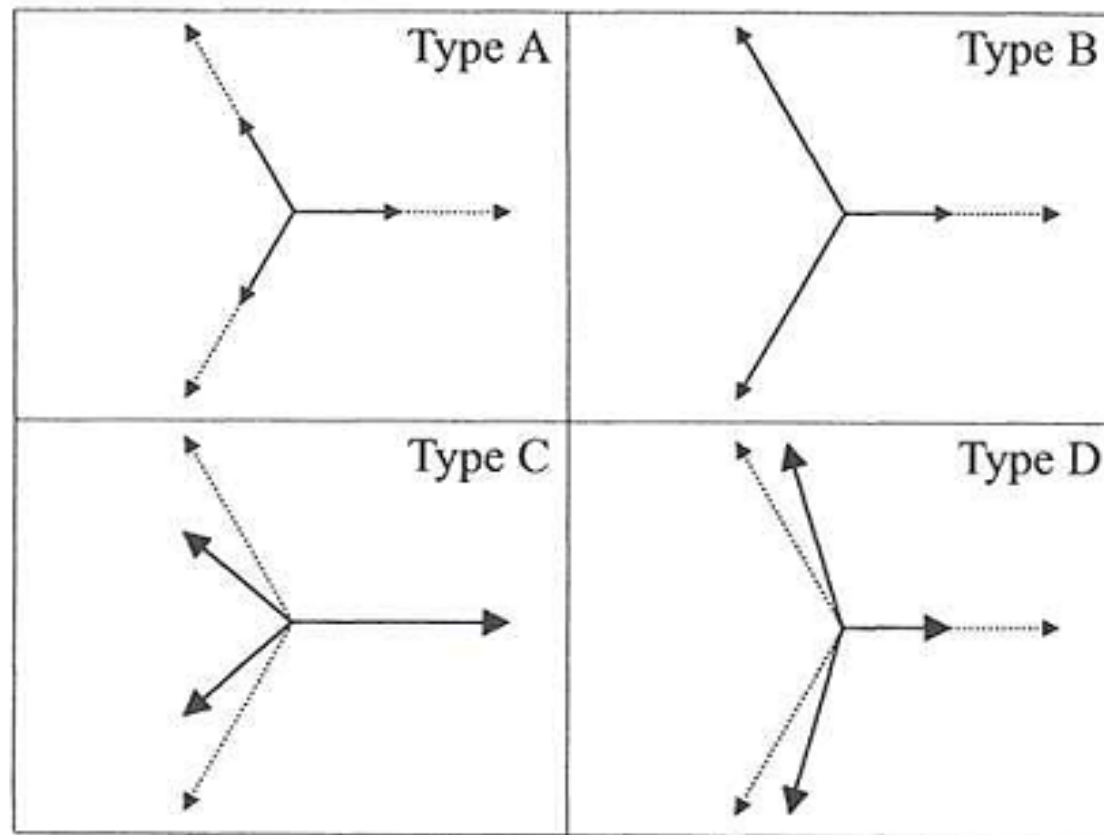


TABLE 4.10 Fault Type, Sag Type, and Load Connection

Fault Type	Star-connected Load	Delta-connected Load
Three-phase	sag A	sag A
Phase-to-phase	sag C	sag D
Single-phase	sag B	sag C*

# Afundamentos de Tensão

## Principais tipos de transformadores:

1. Transformadores que não introduzem defasamento angular e nem filtram as componentes de sequência zero: **YN-yn (estrela-estrela, aterrado em ambos os lados);**
2. São aqueles que somente filtram as componentes de sequência zero: **Y-y,  $\Delta$ - $\Delta$ , YN-Y (estrela-estrela, aterrado no primário), Y-YN (estrela-estrela, aterrado no secundário) e  $\Delta$ Z (delta – zig-zag);**
3. Transformadores em que cada tensão em um dos enrolamentos (primário ou secundário) é função da diferença fasorial entre duas tensões aplicadas ao outro enrolamento: além de filtrarem a componente de sequência zero da tensão, estes introduzem ainda defasamentos angulares entre as tensões primária e secundária: **Y- $\Delta$ ,  $\Delta$ -Y, Yn- $\Delta$  (aterrado no primário),  $\Delta$ -Yn ( aterrado no secundário) e Yn- Z (estrela – zig-zag).**

# Afundamentos de Tensão

Resumindo:

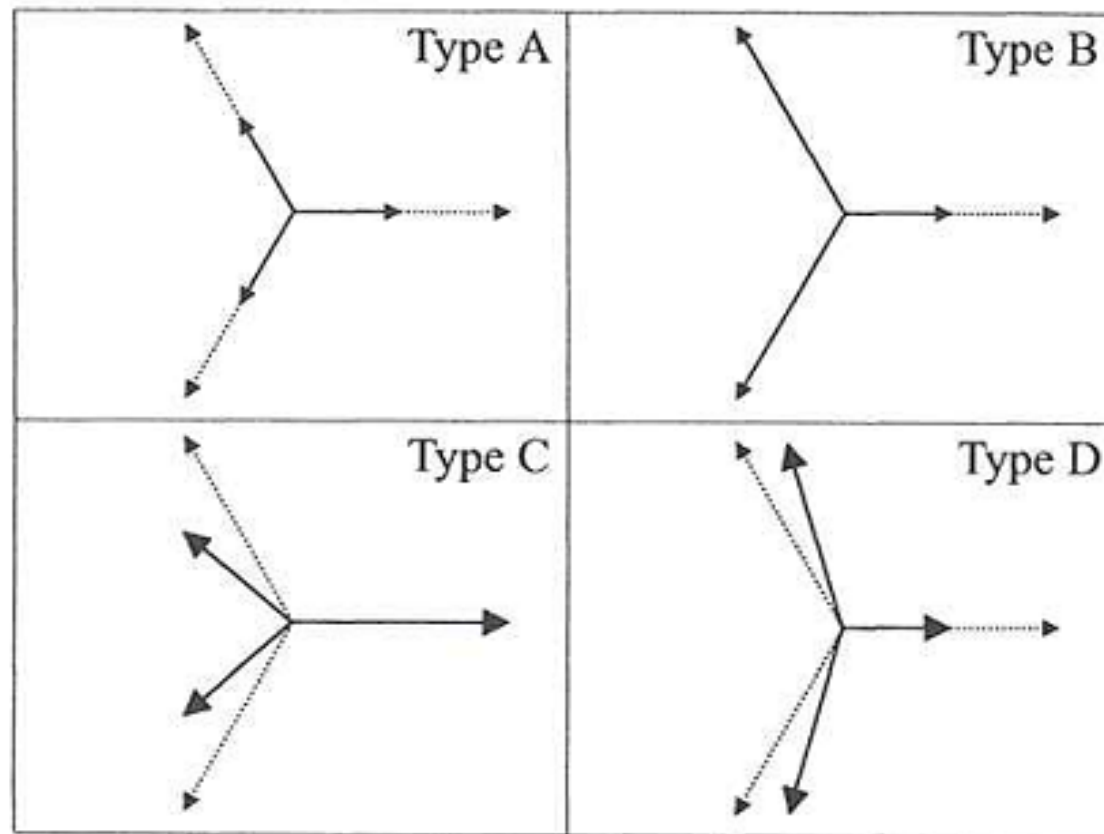
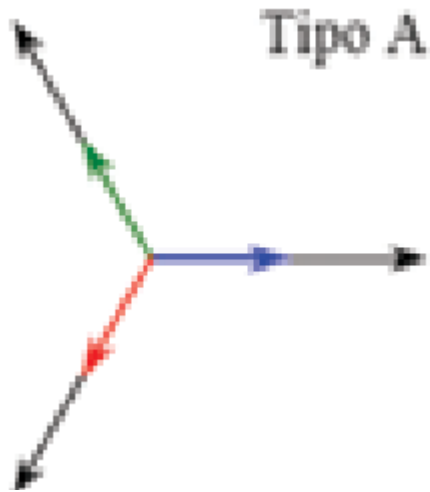


TABLE 4.11 Transformation of Sag Type to Lower Voltage Levels

Transformer Connection	Sag Type A	Sag Type B	Sag Type C	Sag Type D
YNyn	type A	type B	type C	type D
Yy, Dd, Dz	type A	type D*	type C	type D
Yd, Dy, Yz	type A	type C*	type D	type C

# Afundamentos de Tensão

Tipos A:



$$V_a = h \times V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$$

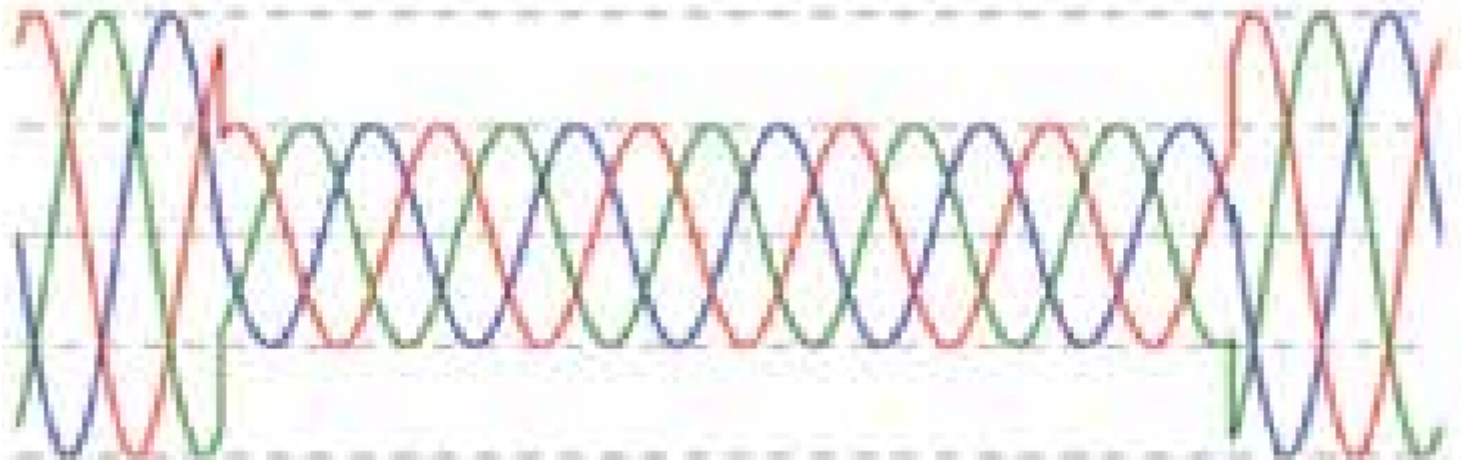
$$V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$$

$$V_a = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos(\omega \times t)$$

$$V_b = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_c = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

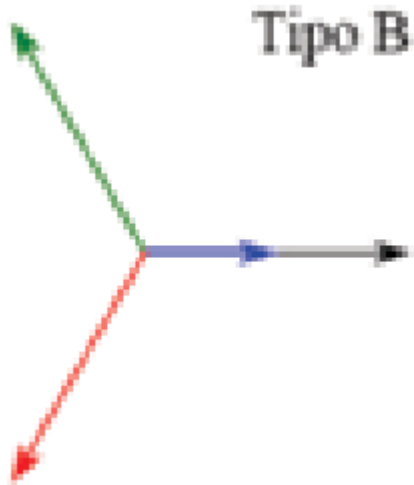
h = magnitude do afundamento;  
V = magnitude da tensão nominal.





# Afundamentos de Tensão

Tipos B:

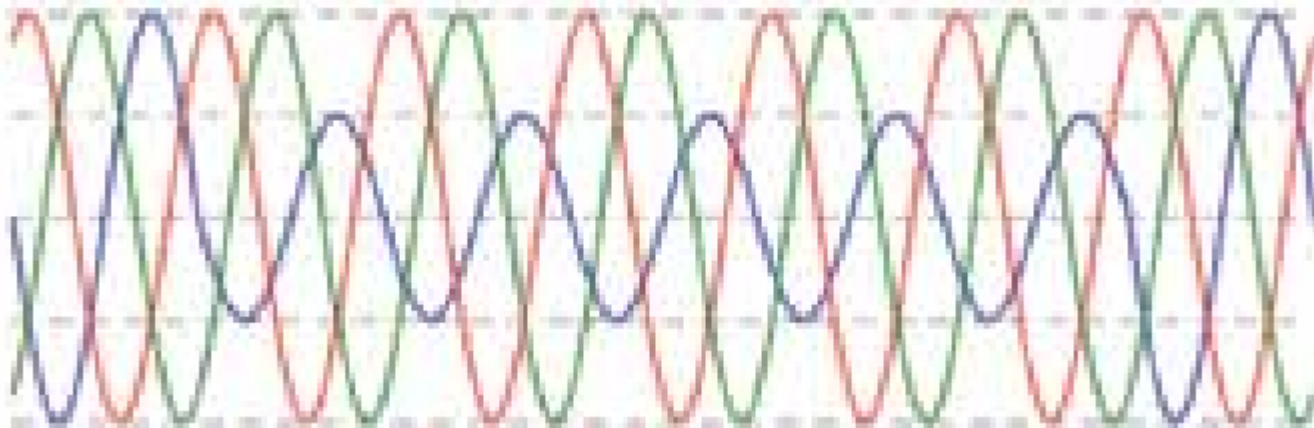


$$V_a = h \times V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} \times V - j \frac{\sqrt{3}}{2} \times V$$

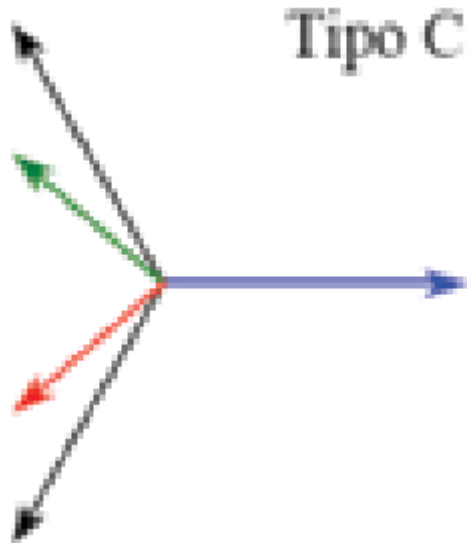
$$V_c = -\frac{1}{2} \times V + j \frac{\sqrt{3}}{2} \times V$$

h = magnitude do afundamento;  
V = magnitude da tensão nominal.



# Afundamentos de Tensão

Tipos C:

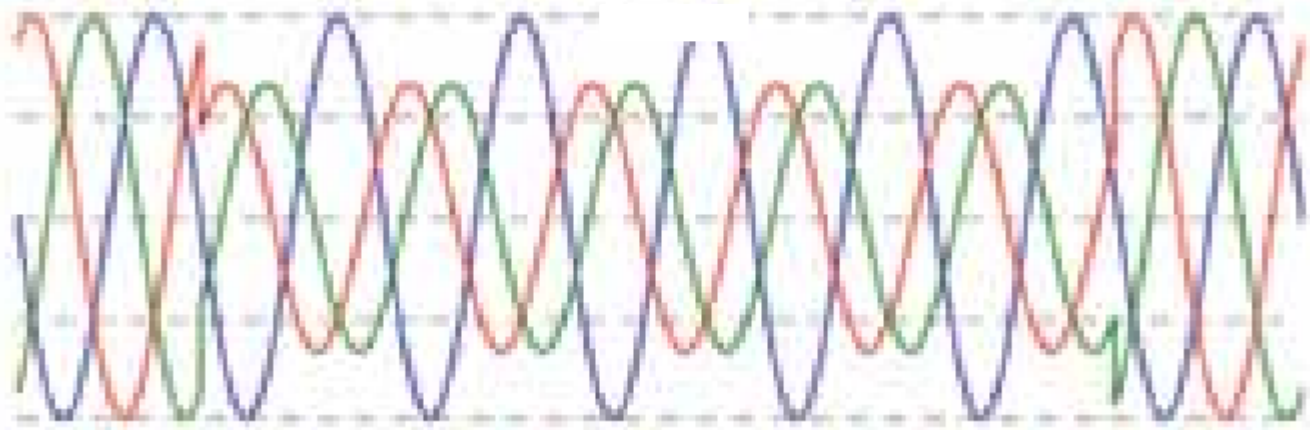


$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} \times V - j \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$$

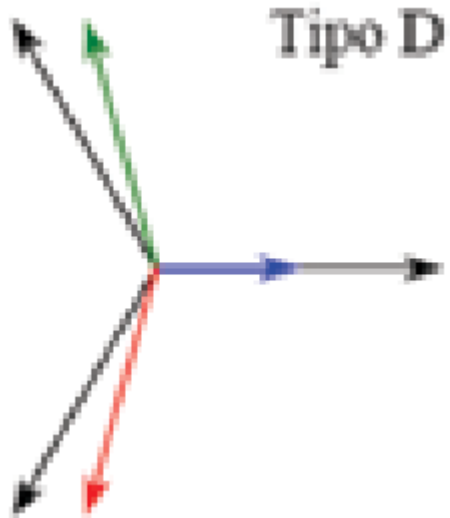
$$V_c = -\frac{1}{2} \times V + j \frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$$

h = magnitude do afundamento;  
V = magnitude da tensão nominal.



# Afundamentos de Tensão

Tipos D:

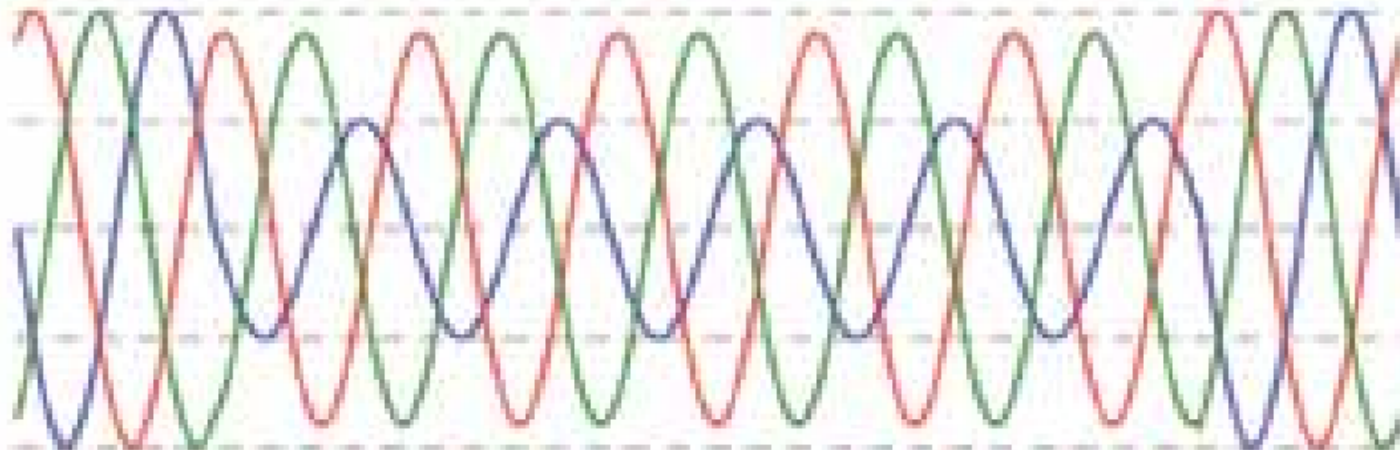


$$V_a = h \times V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j \frac{\sqrt{3}}{2} \times V$$

$$V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j \frac{\sqrt{3}}{2} \times V$$

$h$  = magnitude do afundamento;  
 $V$  = magnitude da tensão nominal.



# Afundamentos de Tensão

Os principais **custos** industriais gerados por afundamentos de tensão são:

- Comprometimento da qualidade do produto;
- Atrasos em entregas gerando multas e perda de clientes e competitividade;
- Danos a equipamentos elevando os custos com manutenção;
- Perda de matéria prima;
- Custos devido ao uso de geração auxiliar;

Apesar da maioria dos consumidores serem residenciais, os prejuízos causados na indústria é cerca de 1000 vezes maior.

# Afundamentos de Tensão

Existem várias medidas que podem ser tomadas no sentido de diminuir o número e a severidade das afundamentos de curta duração.

## **Medidas Preventivas:**

- Especificação adequada dos equipamentos.
- Redução da resistência de aterramento das torres de transmissão.
- Instalação de disjuntores e religadores mais rápidos próximos às cargas críticas.
- Poda de árvores.
- Limpeza de isoladores.

# Afundamentos de Tensão

## Medidas Corretivas:

**Utilização de transformadores ferro-ressonante, conhecidos também como CVTs (*“Constant Voltage Transformers”*):**

consiste em um transformador com um **único** enrolamento **primário** e **dois** (ou eventualmente **três**) enrolamentos **secundários** associados a um **capacitor** de derivação (ressonante).

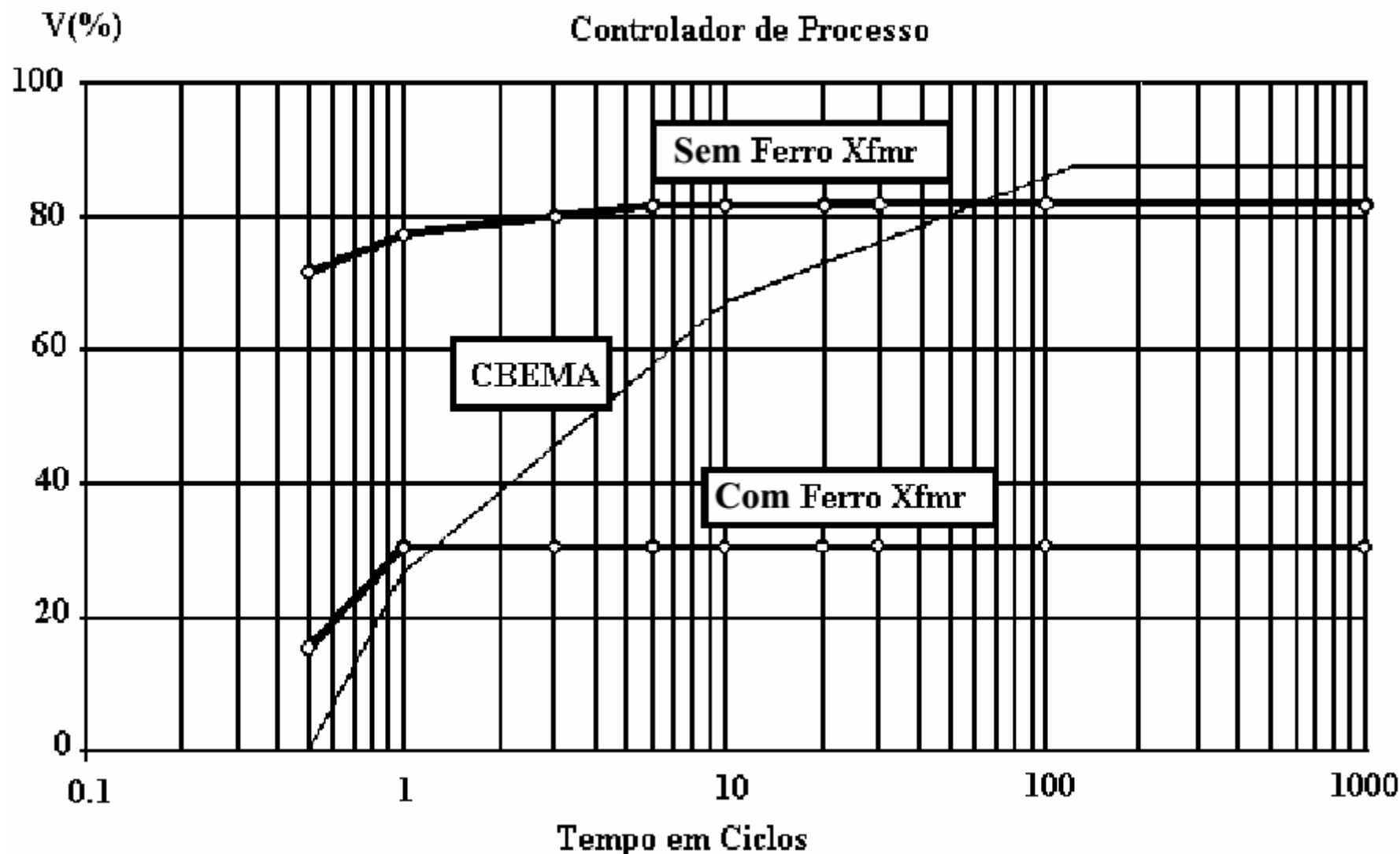
Altamente excitados em suas curvas de saturação, fornecendo uma tensão de saída que não é significativamente afetada pelas variações da tensão de entrada.

Uma descrição detalhada das aplicações e variações construtivas podem ser encontradas em IEEE Std 449, 1998.

# Afundamentos de Tensão

## transformadores ferro-ressonantes:

Pode suportar sag abaixo de 30% com um trafo ferro-ressonante de 120VA. Sem ele, seria 82%.



# Afundamentos de Tensão

## Medidas Corretivas:

**Sistemas de Energia Ininterrupta – UPS** (*“Uninterruptible Power Supplies”*).

Têm como objetivo garantir o fornecimento constante de energia para um equipamento ou um conjunto com qualidade suficiente para o funcionamento ininterrupto durante faltas de curta e longa duração.

Também chamados sistemas *“no-break”*.

Todas as configurações de UPS utilizam baterias para armazenamento de energia, retificadores, inversores e chaves estáticas.

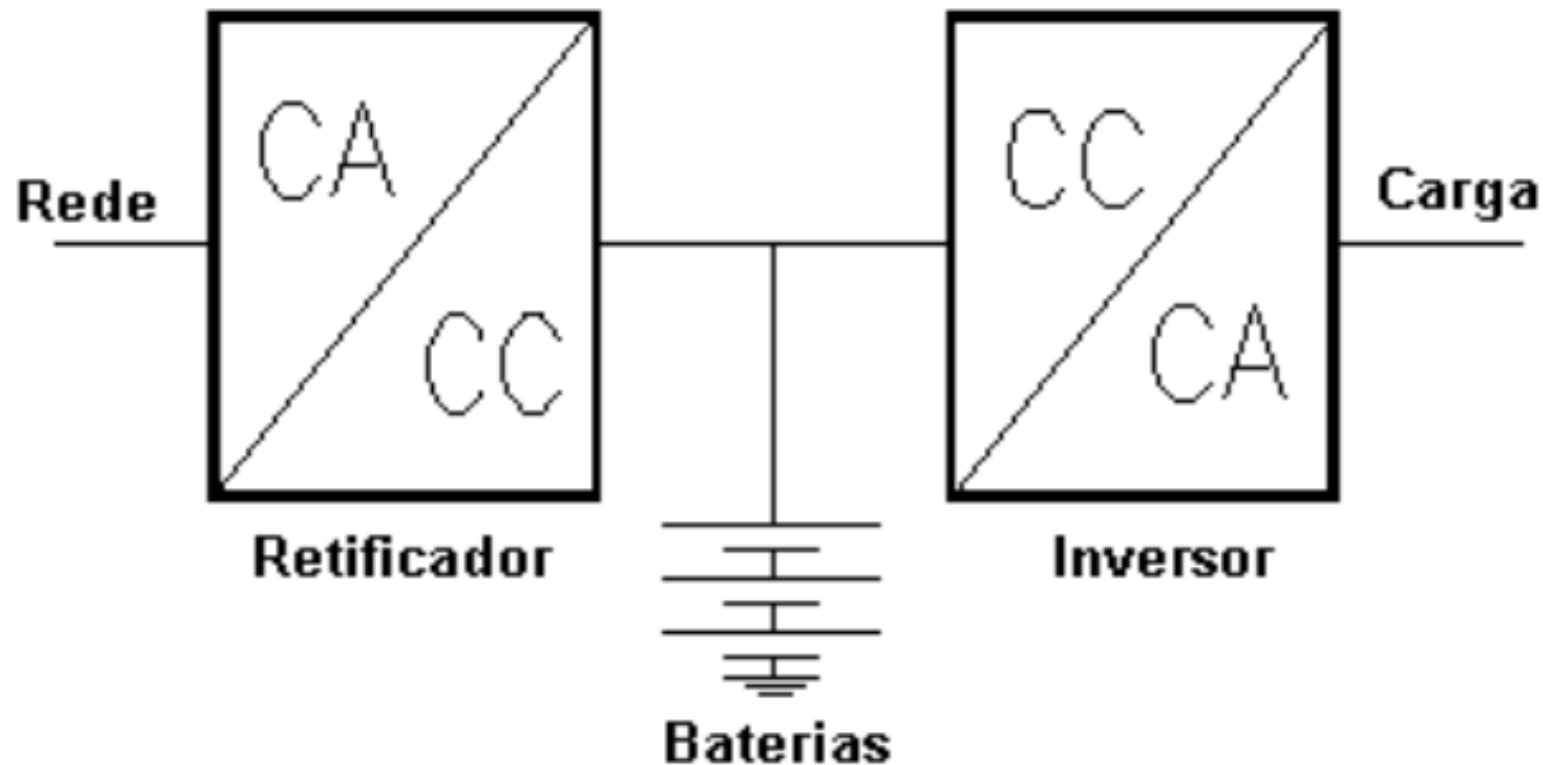


# Afundamentos de Tensão

## Medidas Corretivas:

### Sistemas de Energia Ininterrupta – UPS

Todas as configurações de UPS utilizam baterias para armazenamento de energia, retificadores, inversores e chaves estáticas.



**Representação Genérica do UPS**

# Afundamentos de Tensão

## Medidas Corretivas:

### Utilização de métodos de partida de motores

- Partida suave (*Soft Started e Inversores de Frequência*);
- Partida pelo método estrela-triângulo;

### Melhorar as práticas para o restabelecimento do sistema da concessionária em caso de faltas;

Adicionar religadores;

### Adotar medidas de prevenção contra faltas no sistema da concessionária

poda de árvores, colocar pára-raios de linha, manutenção dos isoladores, blindagem de cabos, modificar o espaçamento entre condutores e melhorar o sistema de aterramento.