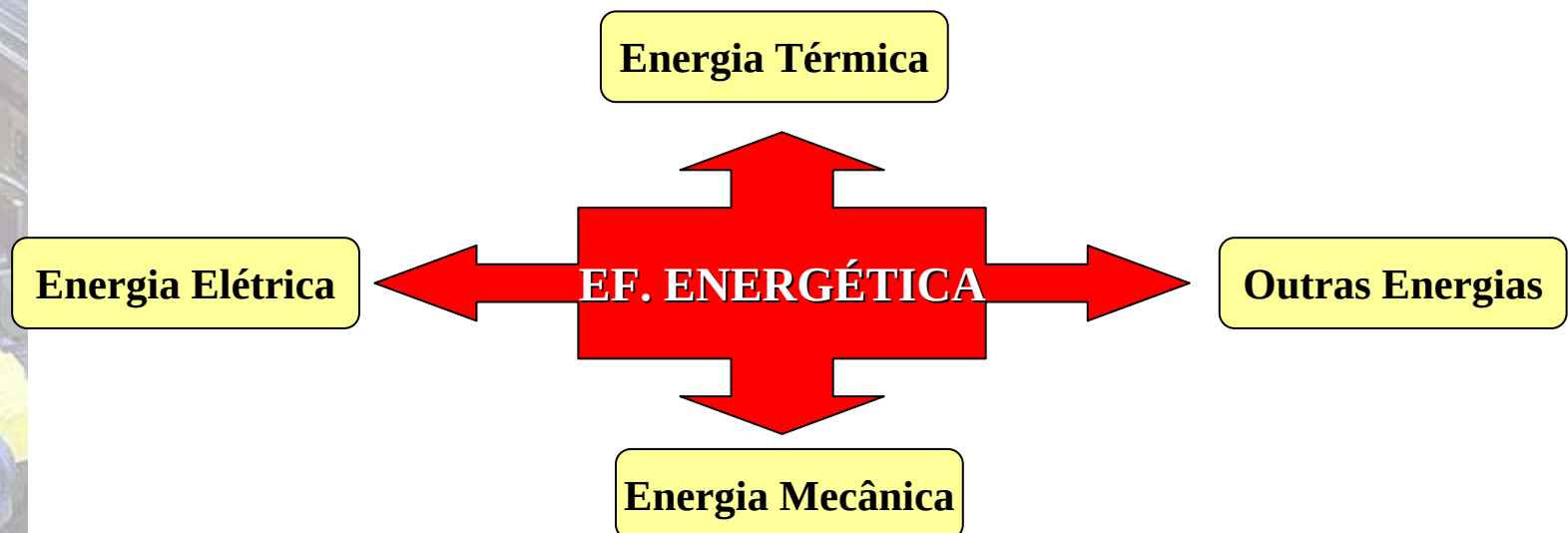




Eficiência Energética X Qualidade de Energia

1 - Eficiência Energética:

- Otimização da Compra de Energia;
- Utilização Eficiente dos Recursos Energéticos - Usos Finais;
- Estudos de Fontes Alternativas de Energia;
- Viabilidade Técnico-Econômica.



1.1 - Eficiência em Energia Elétrica:

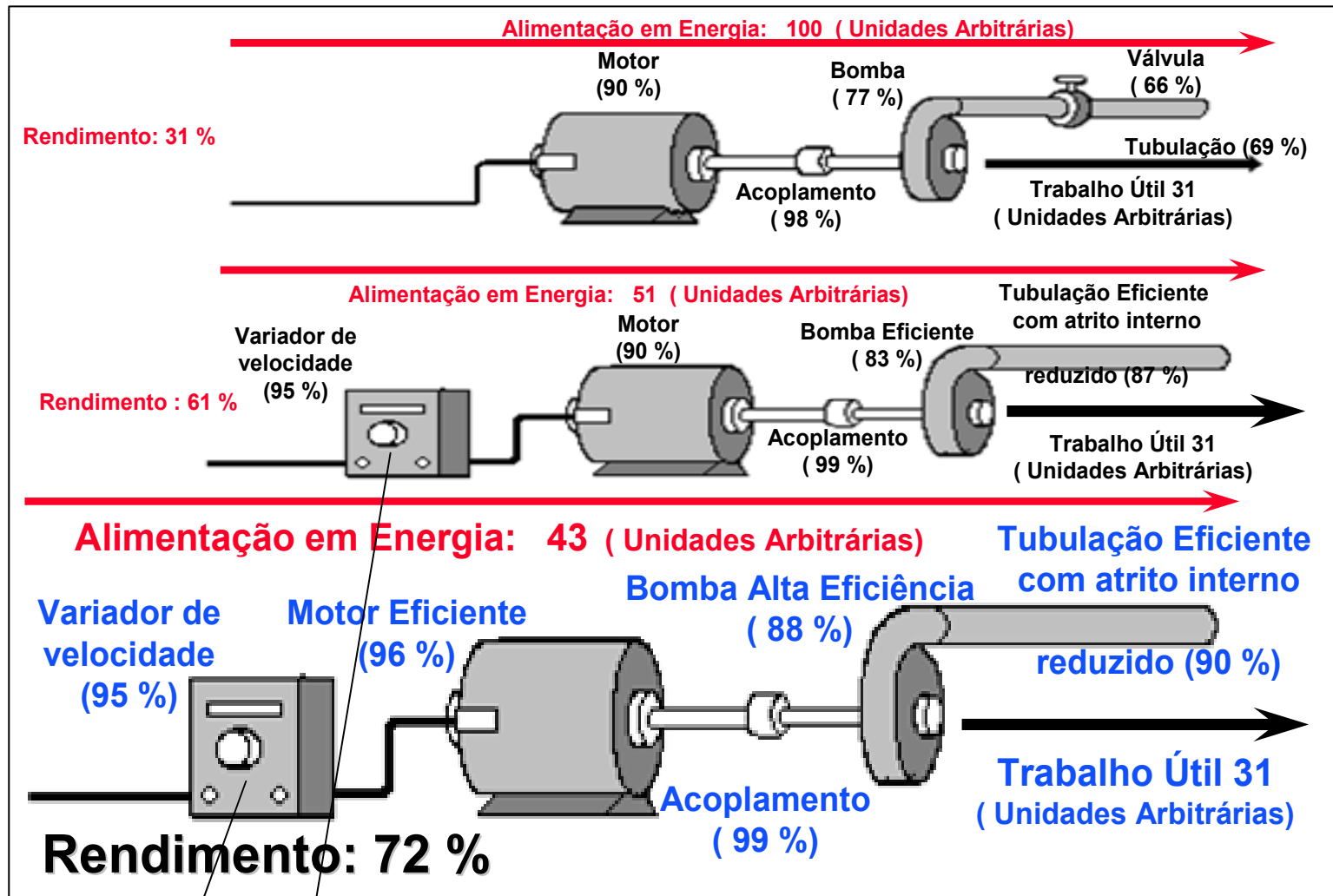
Medidas para Eficientização Elétrica

- Implantação de Controladores de Velocidade em Motores Elétricos (Bombas, Ventiladores, Exaustores,...);
- Motores Elétricos de Alto Rendimento;
- Redimensionamento de Motores Elétricos;
- Iluminação Eficiente de Alto Rendimento;
- Geração Própria ou Co-geração;
- Correção Fator de Potência;
- Qualidade e Continuidade de Energia Elétrica.

1.2 - Principais Equipamentos Elétricos Envolvidos na Eficiência Energética:

- Motores Elétricos Alto Rendimento;
- Controladores de Velocidade;
- Softstarters;
- Luminárias de Alto Rendimento;
- Lâmpadas e Reatores Eletrônicos;
- Equipamentos de Compensação Reativa;
- Geradores de Energia Elétrica, etc...

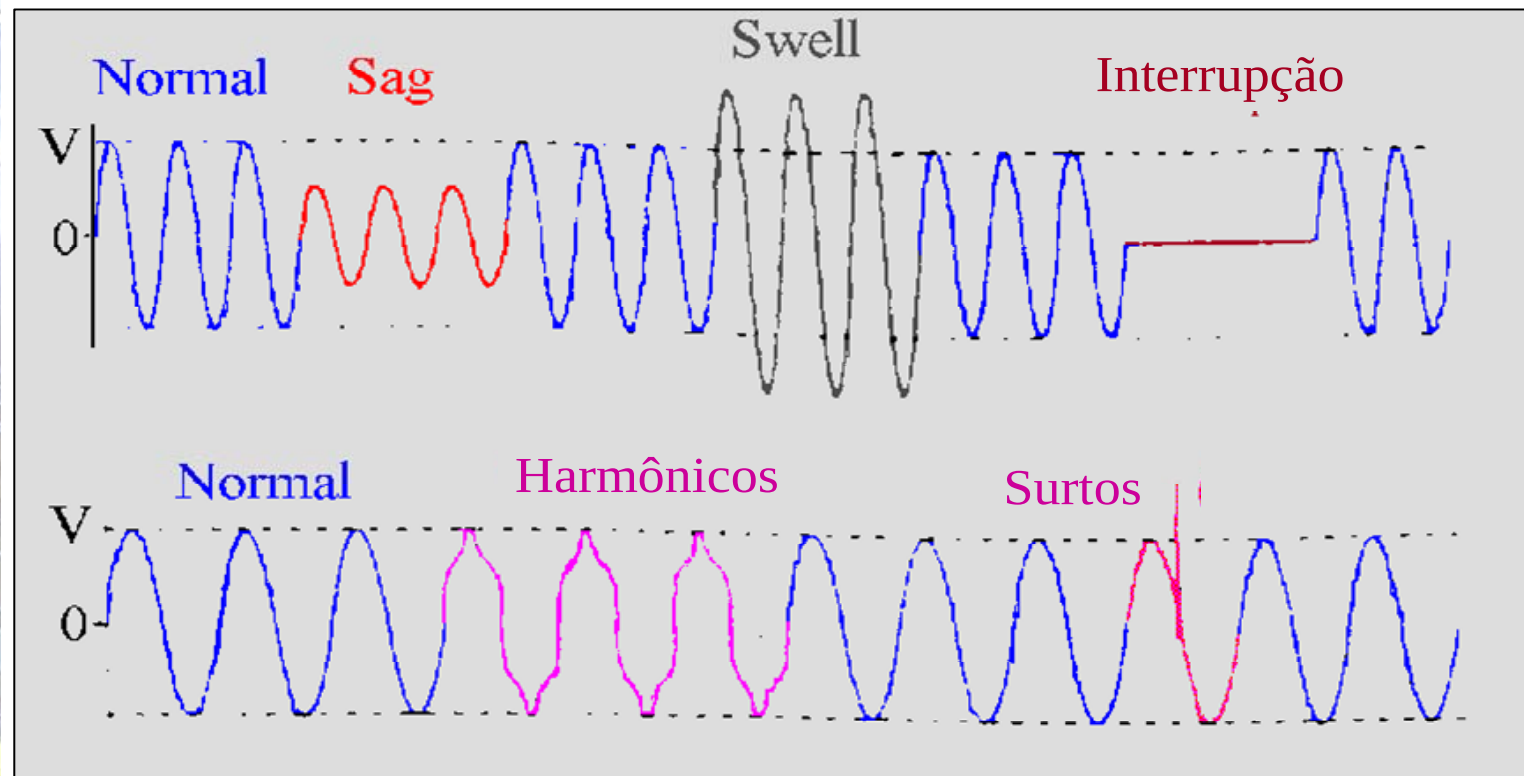
1.3 - Exemplo da EE em Sistemas de Bombeamento:



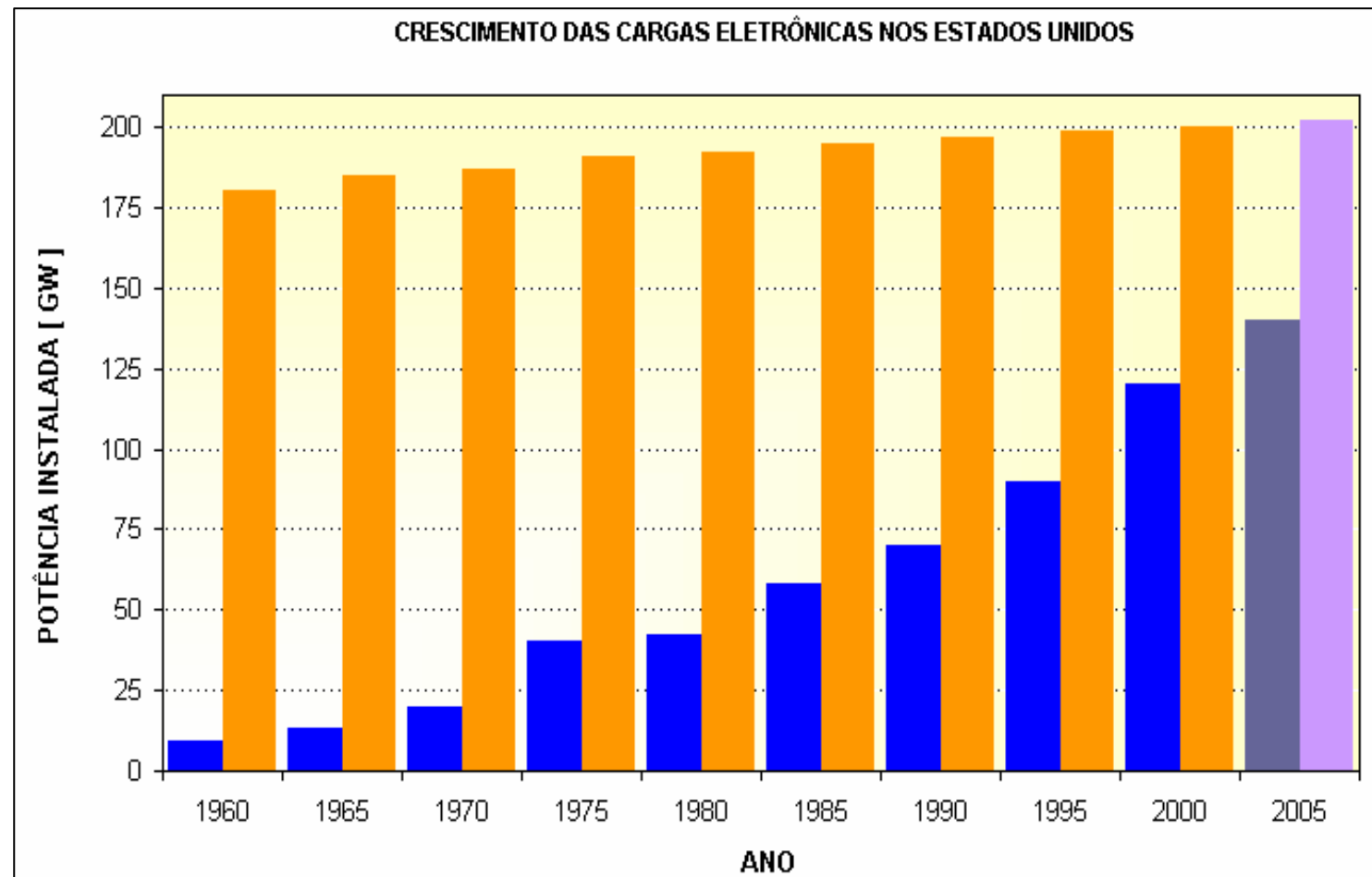
Problemas de Qualidade de Energia

2 - Qualidade de Energia Elétrica – QEE

2.1 - Fenômenos Elétricos:



2.2 – Evolução das Cargas Eletrônicas nos EUA:



Revista BUSINESS WEEK

2.3 – Evolução das Cargas Eletrônicas no Brasil:

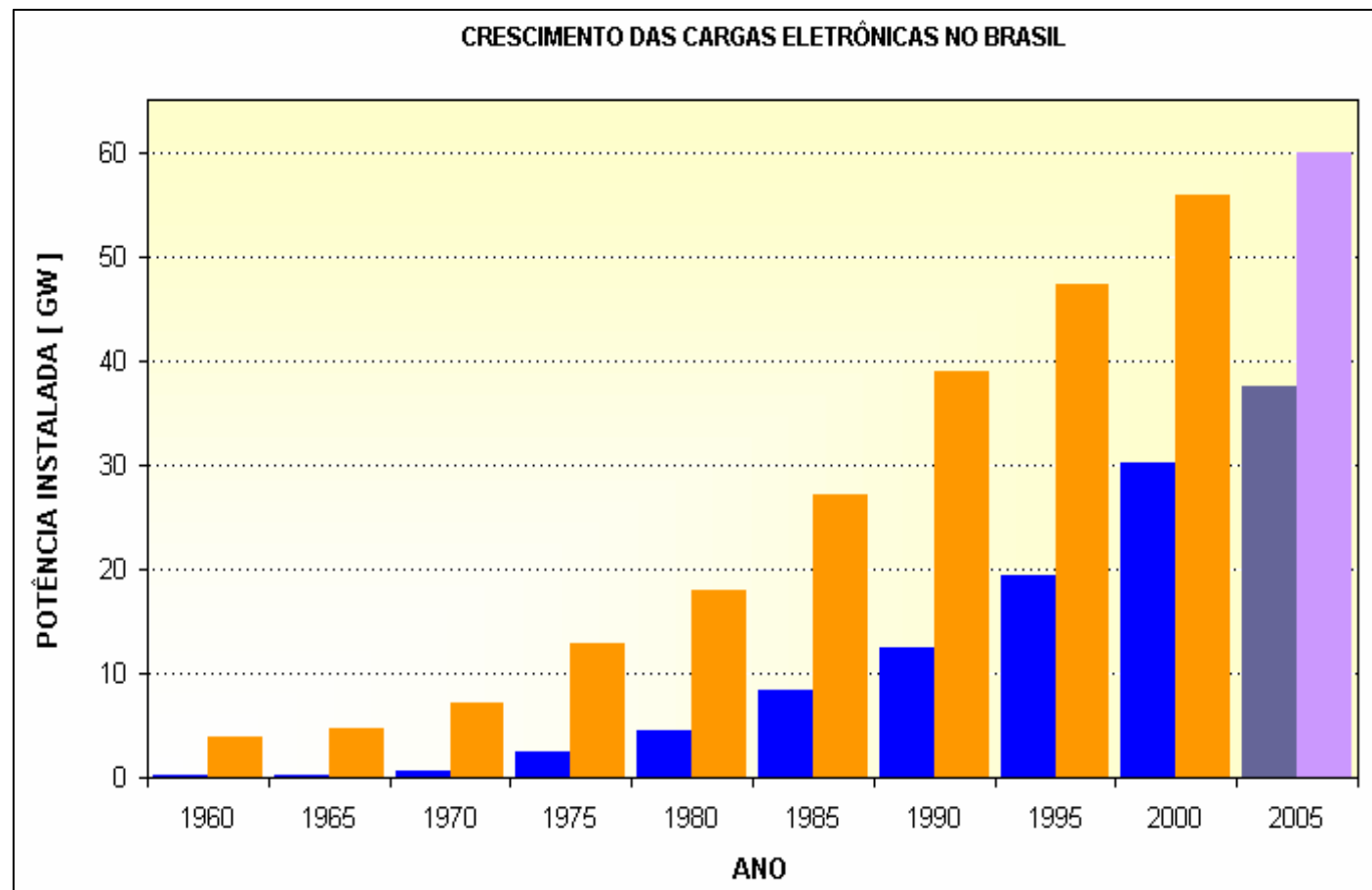


Gráfico estimado a partir de informações da ELETROBRÁS, MME, ABRACE, outros.

2.4 - Custo da QEE por Evento nas Indústrias:



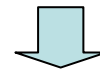
2.5 – Custo Total Anula Estimado da QEE:

“Problemas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica custam anualmente aos Estados Unidos cerca de **US\$ 100 Bilhões** em danos e atitudes preventivas.”

***No Brasil = US\$????? / Ano => **FT Cigre CE C4.4**
(Força Tarefa de Impactos Econômicos da QEE)***



Aumento das Cargas Eletrônicas



Aumento do Custo da QEE

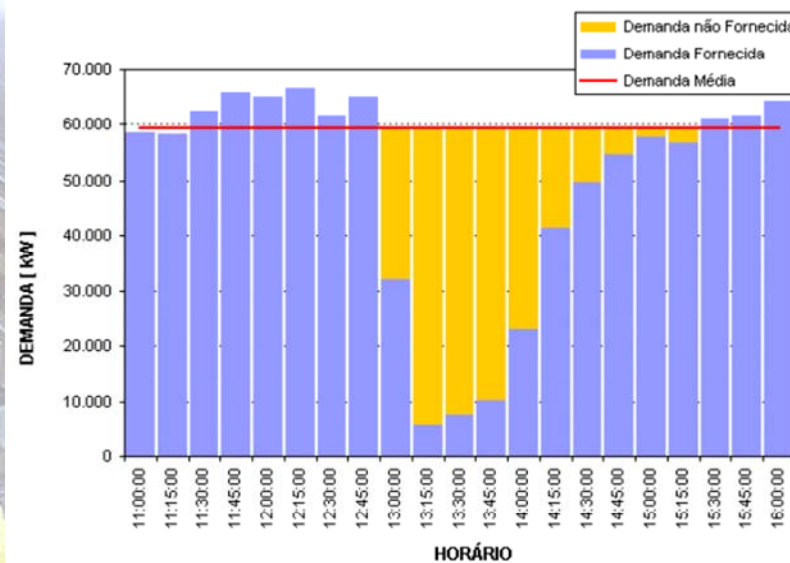
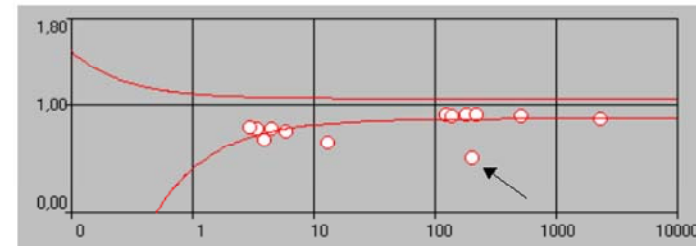
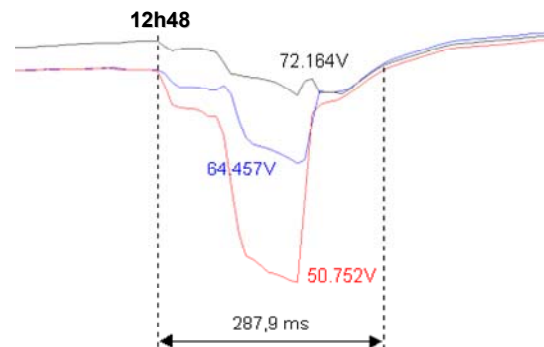
2.6 – Principais Fenômenos Elétricos da QEE:

- ◆ *Fator de Potência*
- ◆ *Variações da Tensão de Curta Duração (AMTs ou Sags, SMTs ou Swells)*
- ◆ **Harmônicos (foco deste trabalho)**
- ◆ *Efeito Flicker*
- ◆ *Desequilíbrios da tensão*



2.7 - Exemplos de Custos da QEE (AMT):

Exemplo real de ocorrência de AMT

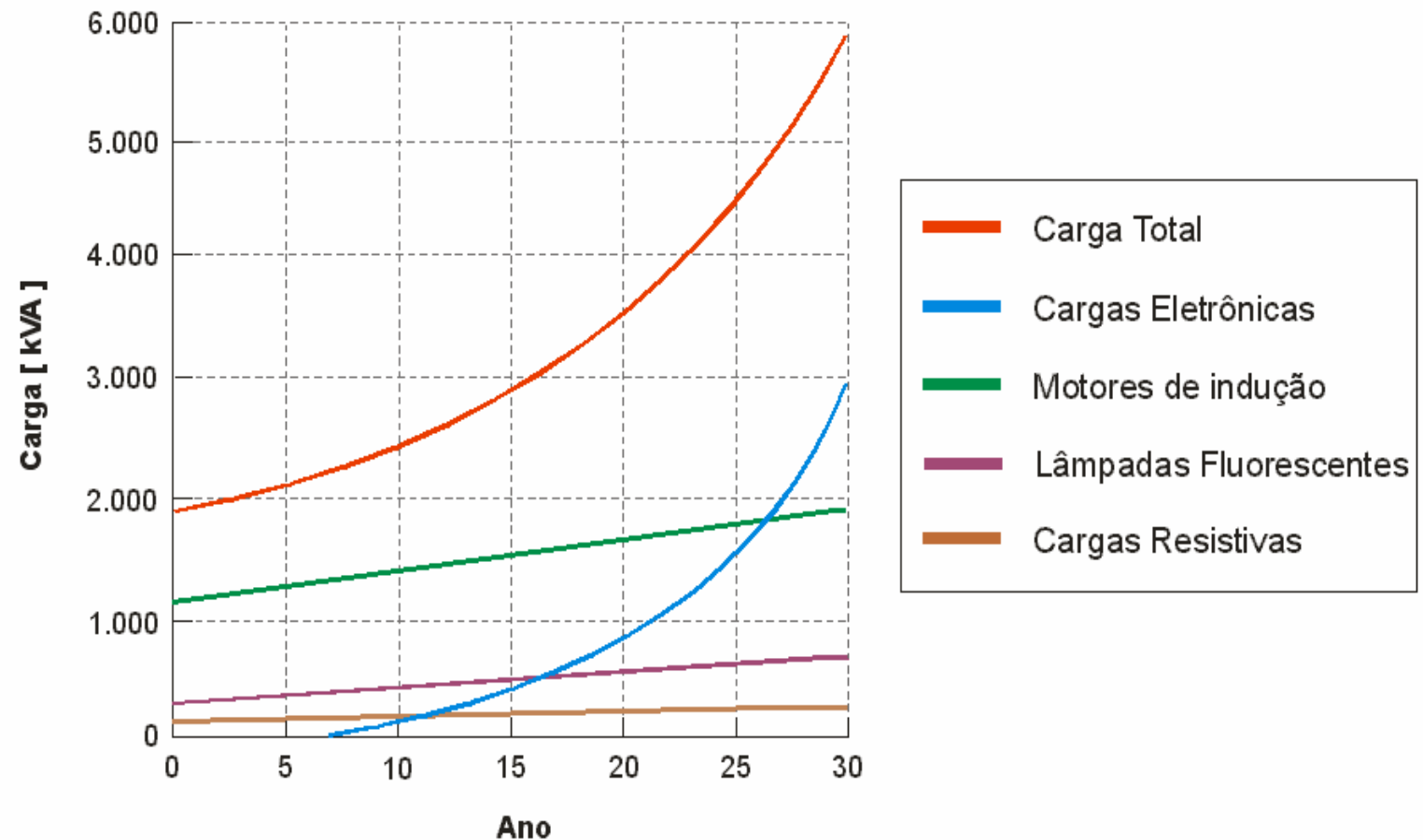


02 horas para retomada de produção

64.000 kWh não fornecidos

2.8 - Exemplos de Custos da QEE (Harmônicos):

Perdas devido a harmônicas em sistemas de distribuição



Fonte: **Alexander E. Emanuel**

Trans. on Power Systems. Vol. 06, No. 03, August 1991



3 - Eficiência Energética x Harmônicos:

- Controladores de Velocidade;
- Softstarters;
- Luminárias de Alto Rendimento;
- Lâmpadas e Reatores Eletrônicos;
- Compensação Reativa;
- Geradores de Energia Elétrica;
- Nobreak's.



**Geração ou
Amplificação de
Harmônicos**



3.1 – HARMÔNICOS:

CARGAS NÃO LINEARES



DISTORÇÕES NA FORMA DE ONDA



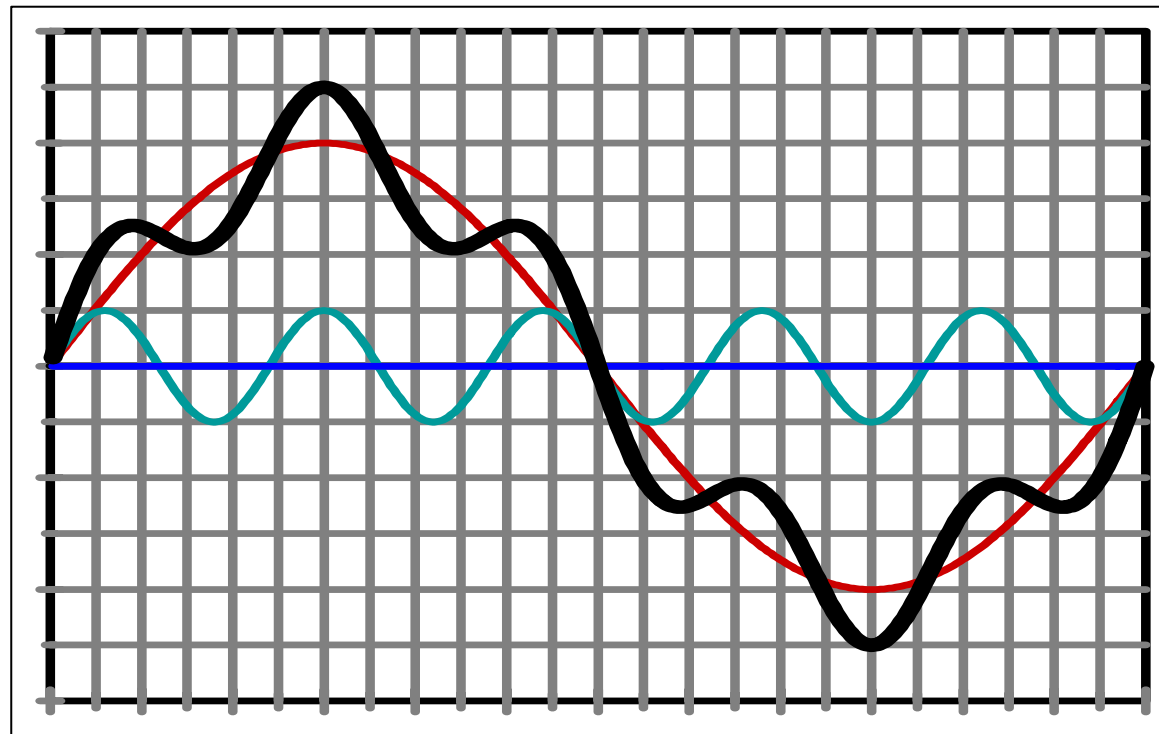
HARMÔNICOS



PROBLEMAS NA REDE ELÉTRICA



3.2 - DISTORÇÃO HARMÔNICA:



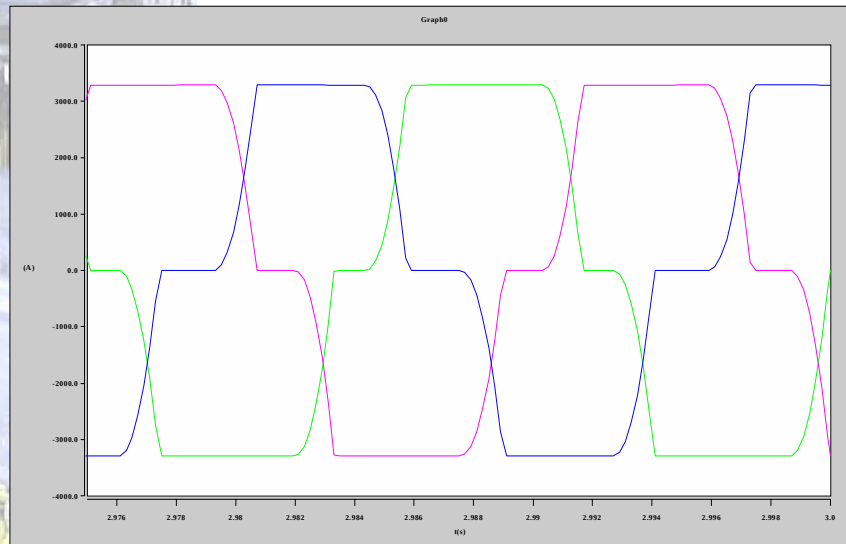
- Total
- Fundamental
- 5a. Harmônica

3.3 - Principais Cargas Geradoras de Harmônicas:

- Conversores;
- Fornos à Arco / Máquina de Solda
- Transformadores Operando à vazio ou em saturação.

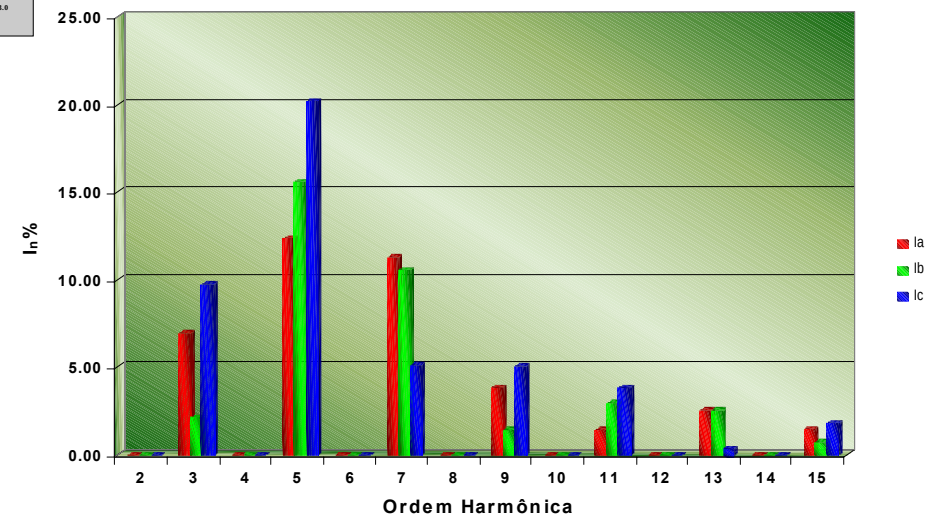


3.3.1 - Harmônicas Geradas por Retificadores CA - CC

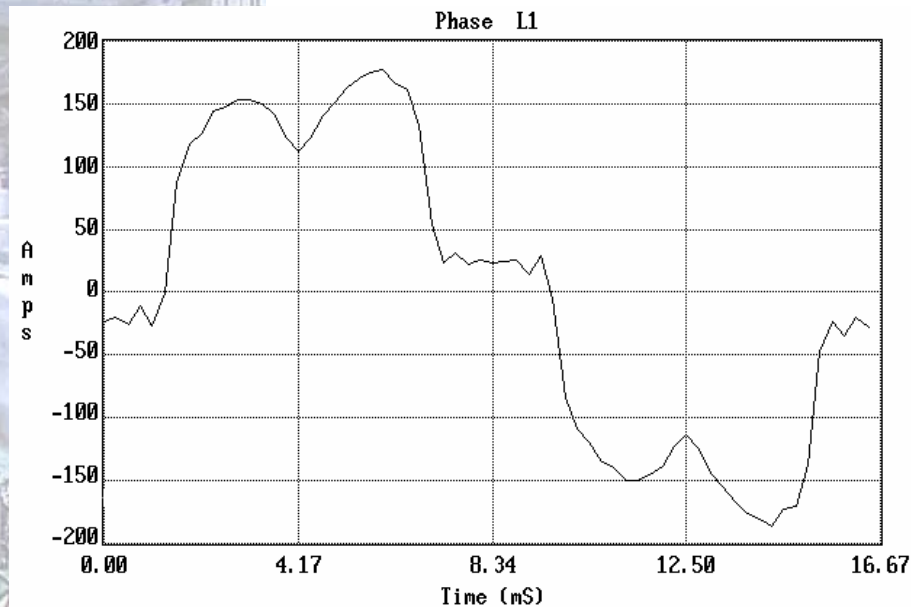


Forma de Onda do
Retificador

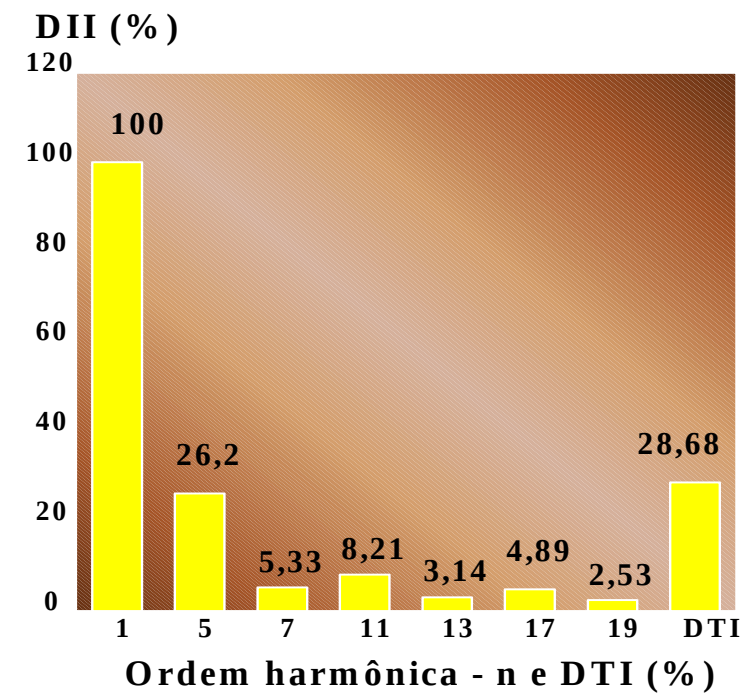
Espectro Harmônico da Forma
De Onda do *Retificador*



3.3.2 - Harmônicas Geradas por Nobreak's:

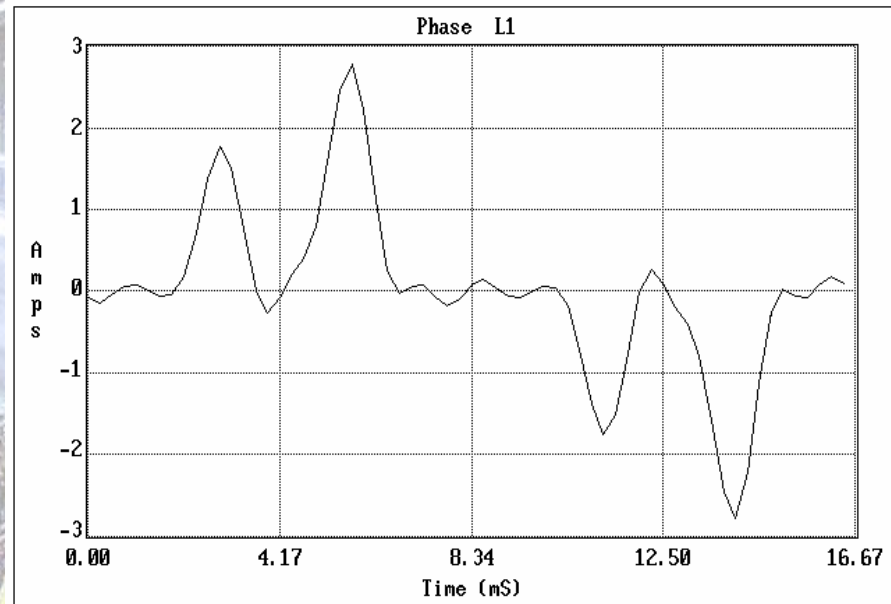


Forma de Onda da Corrente de um *Nobreak*



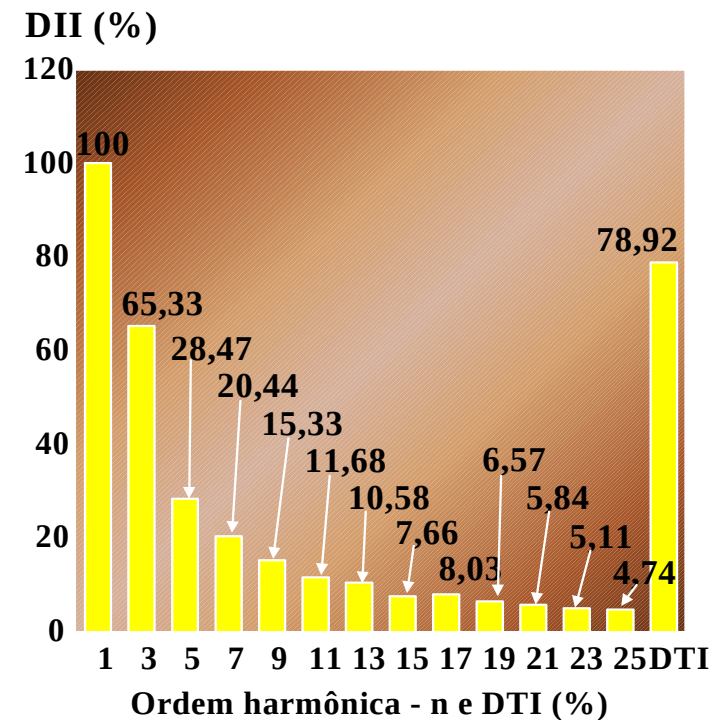
Espectro Harmônico da Forma De Onda de Corrente de um *Nobreak*

3.3.3 - Harmônicas Geradas por Inversores de Frequência:

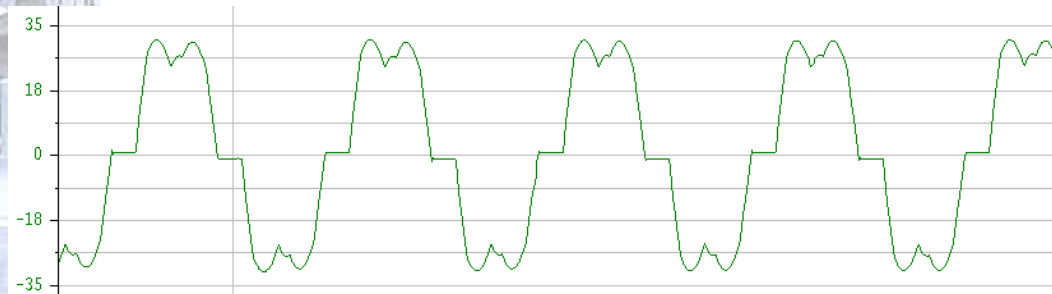


Forma de Onda da Corrente de um *Inversor de Frequencia*

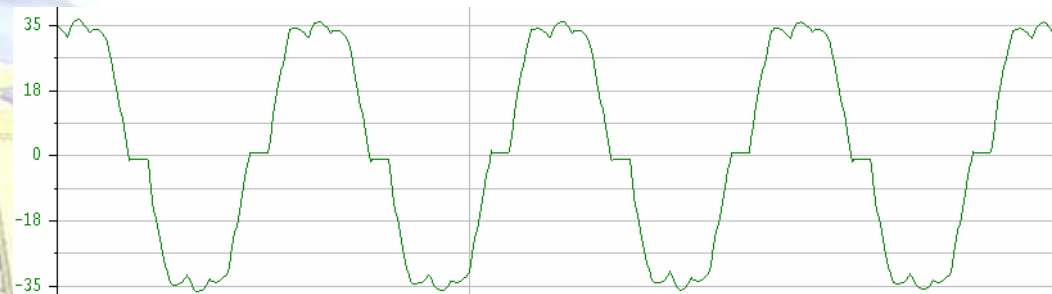
Espectro Harmônico da Forma De Onda de Corrente de um *Inversor de Frequencia*



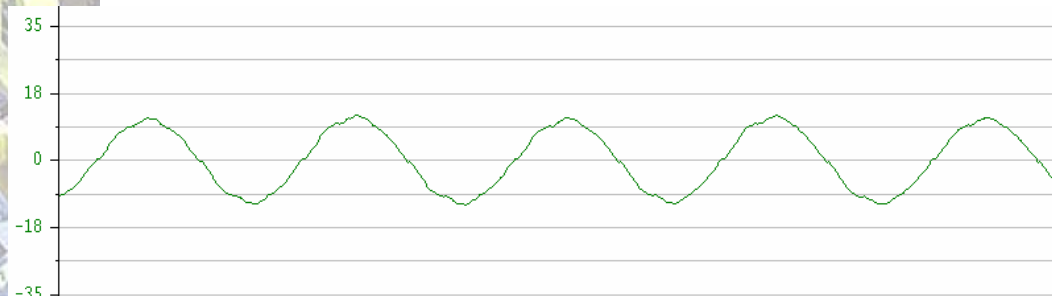
3.3.4 - Harmônicas Geradas por Soft-Starters:



Forma de onda da corrente de alimentação **0,5 seg** após a partida



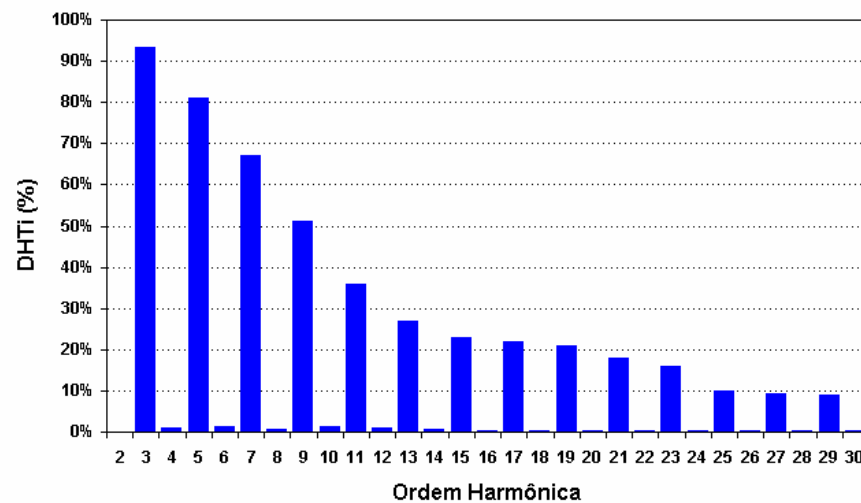
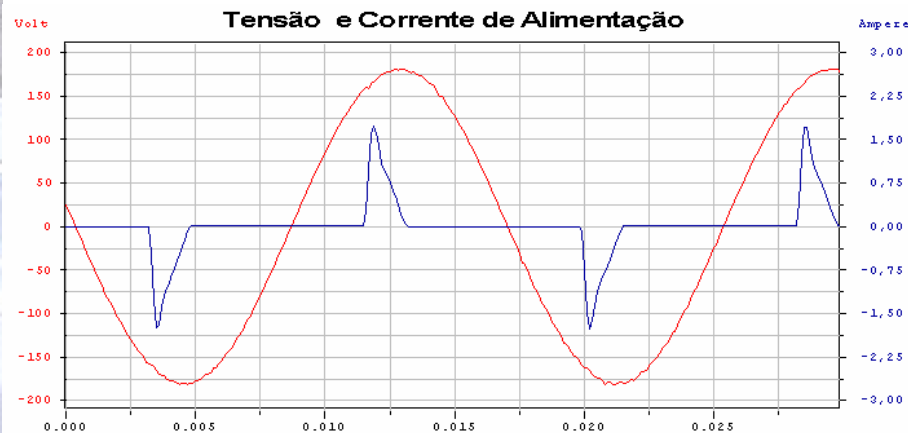
Forma de onda da corrente de alimentação **1,5 seg** após a partida



Forma de onda da corrente de alimentação **em regime**



3.3.5 - Harmônicas por Lâmpadas Fluorescentes Compactas – LFC's:

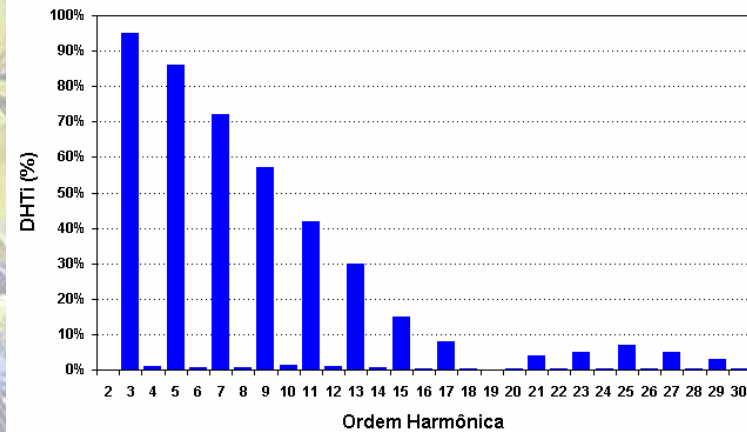
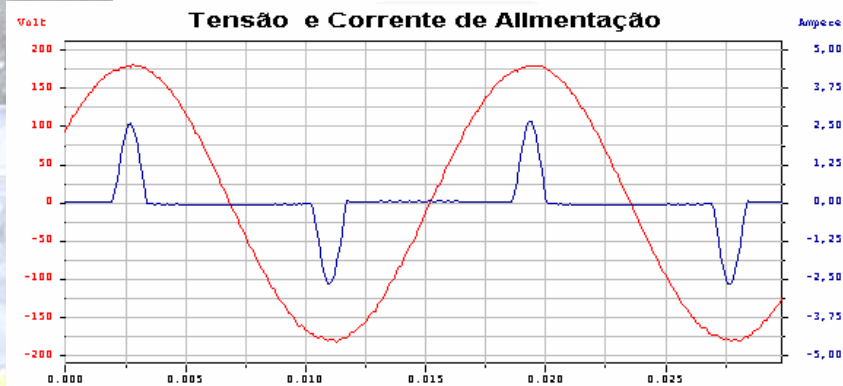


Tensão RMS = **128 Volts**
 Corrente RMS = **0,42 Amperes**
 Potência Ativa = **27 Watts**
 Potência Reativa = **46,3 VAr**

DHTi (%) = **165,75 %**
 DHTv (%) = **0,69 %**

3.3.6 - Harmônicas Geradas por Computadores:

Fonte: ENERSUL

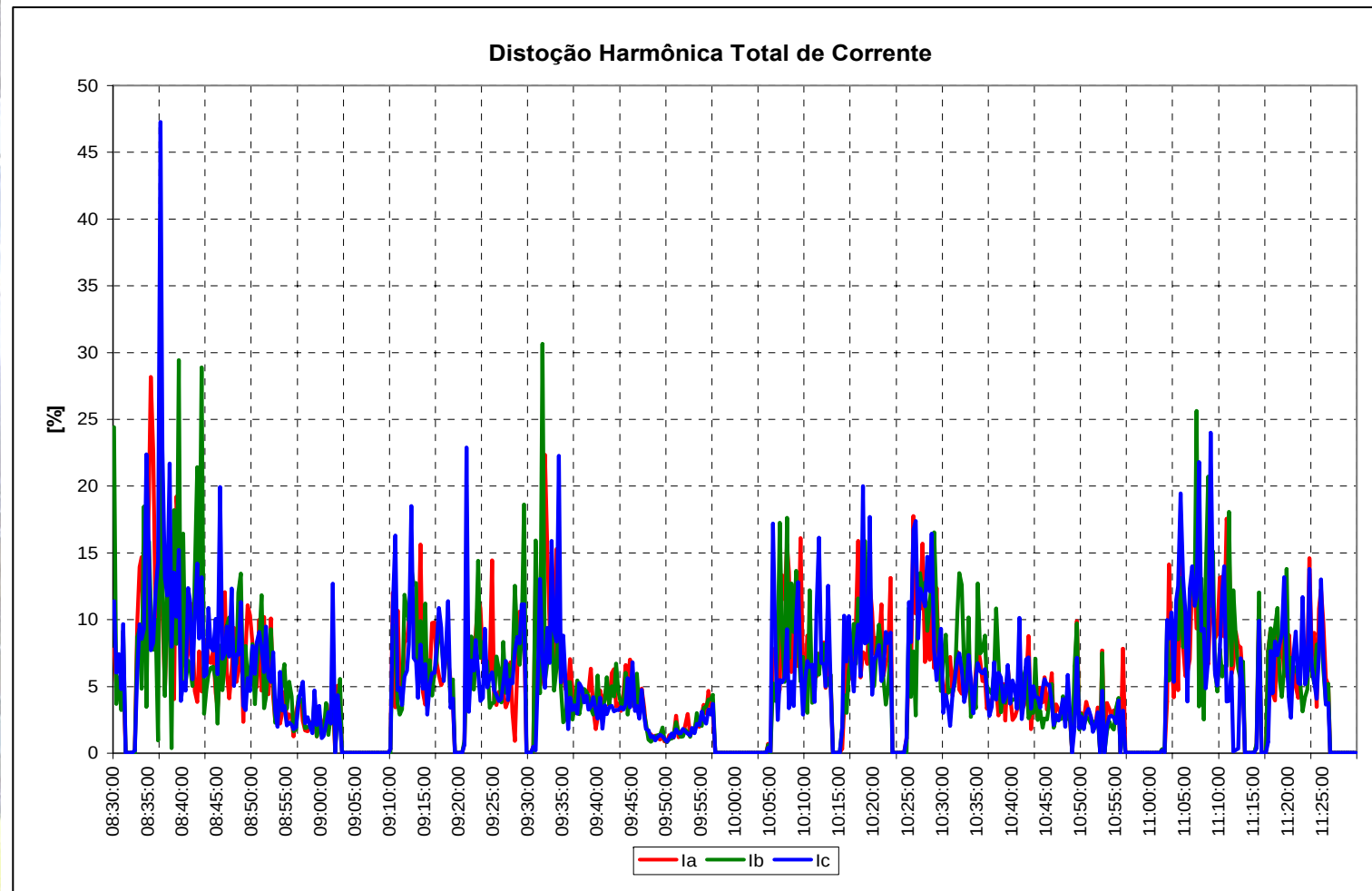


Tensão RMS = **127 Volts**
 Corrente RMS = **0,74 Amperes**
 Potência Ativa = **49 Watts**
 Potência Reativa = **85 VAr**

DHTi (%) = **167,7 %**
 DHTv (%) = **0,62 %**

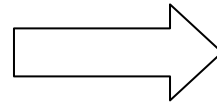


3.3.7 - Distorção Harmônica Gerada pela Operação de Fornos à arco:



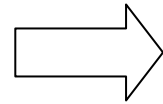
3.3.8 - Transformadores:

Trafo em condições normais de operação



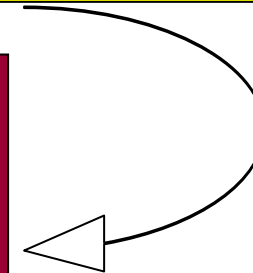
Não há geração harmônica

Trafo operando na região de saturação ou a vazio

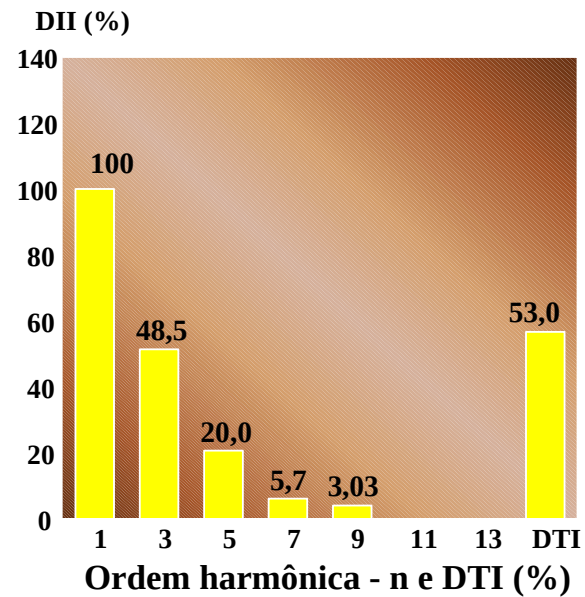
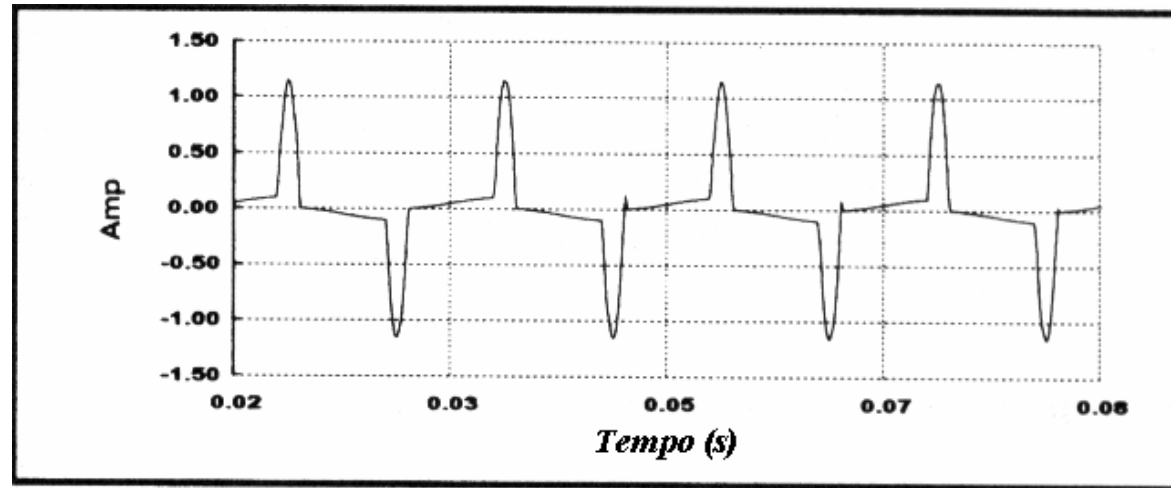


Corrente não varia linearmente com a tensão

Surgimento de Corrente harmônicas



3.3.8.1 - Transformador operando à vazio



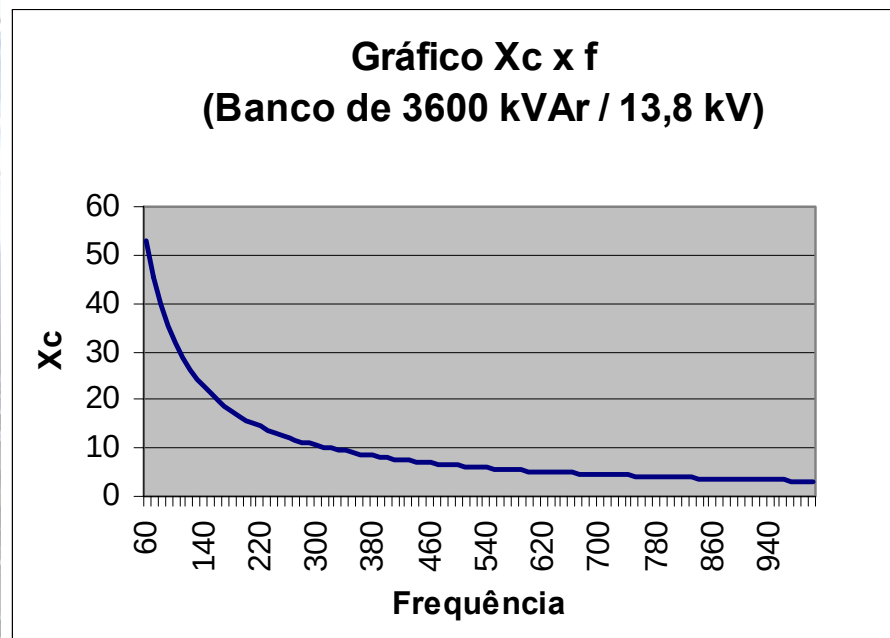
3.4 – Efeitos dos Harmônicos nos Equipamentos Elétricos:

- **Má operação de Equipamentos:**
 - Ex.: Relés (Atuação Indevida)
Medidores (A/D do Disco)
Falha de operação nos controles eletrônicos
- **Sobretensão Harmônica:**
 - Danos à Isolação Elétrica e queima de equipamentos elétricos.
- **Sobrecorrente**
 - Aumento da temperatura de operação (Efeito Joule) e perda de vida útil de equipamentos elétricos.
- **Interferências em Sistemas de Comunicação**
 - Ex.: Sistema Carrier em LT's
- **Ressonâncias Paralelas**



3.4.1 – Efeitos dos Harmônicos em Capacitores:

3.4.1.1 - Variação da Reatância com a Frequência:



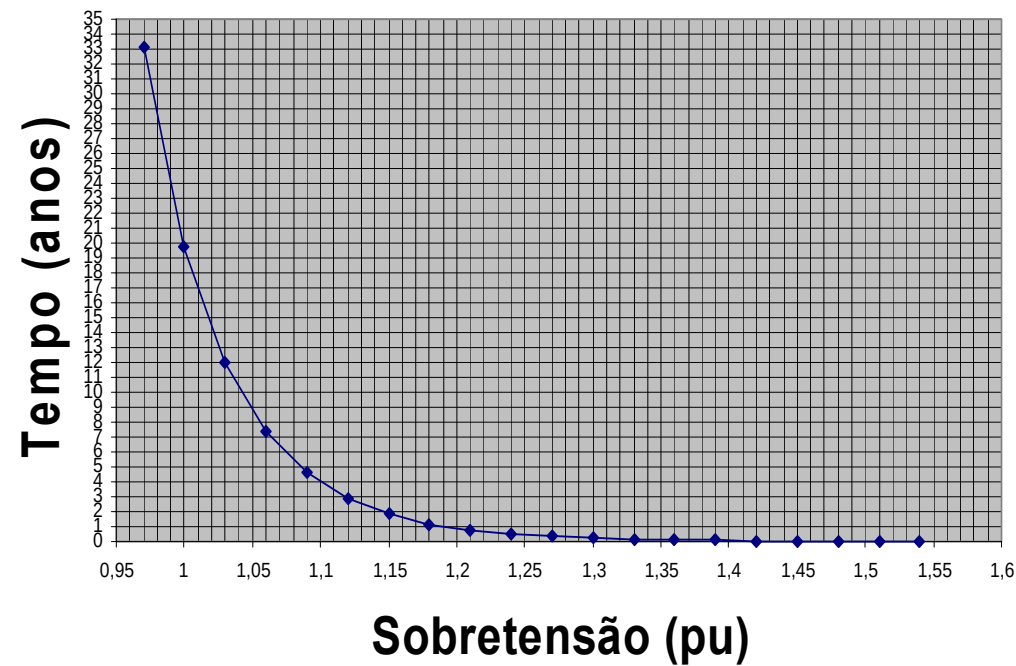
$$X_c = \frac{1}{\omega.C} = \frac{1}{2.\pi.f.C}$$



$$\downarrow X_c = \uparrow f$$

3.4.1.2 – Perda de Vida Útil em Bancos de Capacitores por Sobretenção:

Expectativa de vida - Capacitores

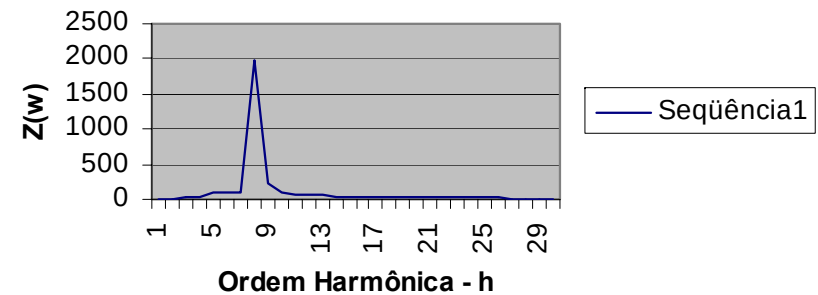


3.4.2 - Ressonância Paralela:

$$f_s \Rightarrow X_L = X_C$$



Barra BTR8 - Com Correção do FP



$$Z = \frac{X_L \times X_C}{X_L - X_C} \rightarrow \infty$$

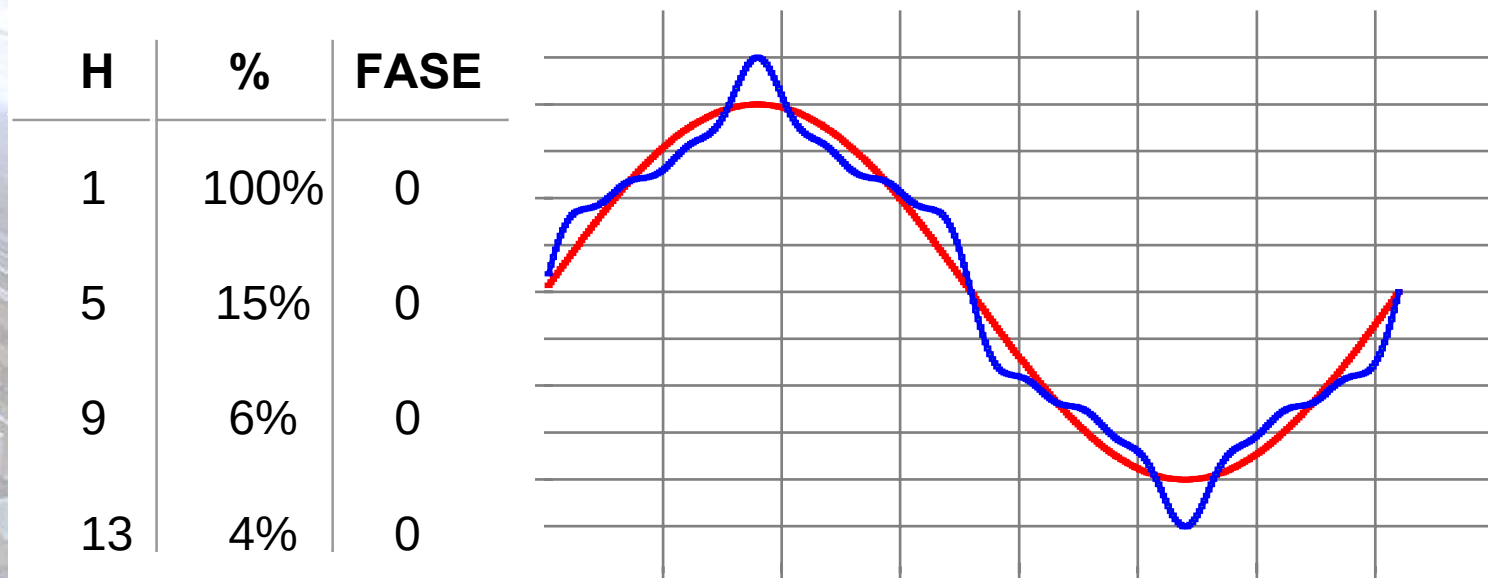


Sobretensão dv/dt
Sobrecorrente di/dt

3.4.2 - Ressonância Paralela (continuação):

FORMA DE ONDA DE TENSÃO - CAPACITOR

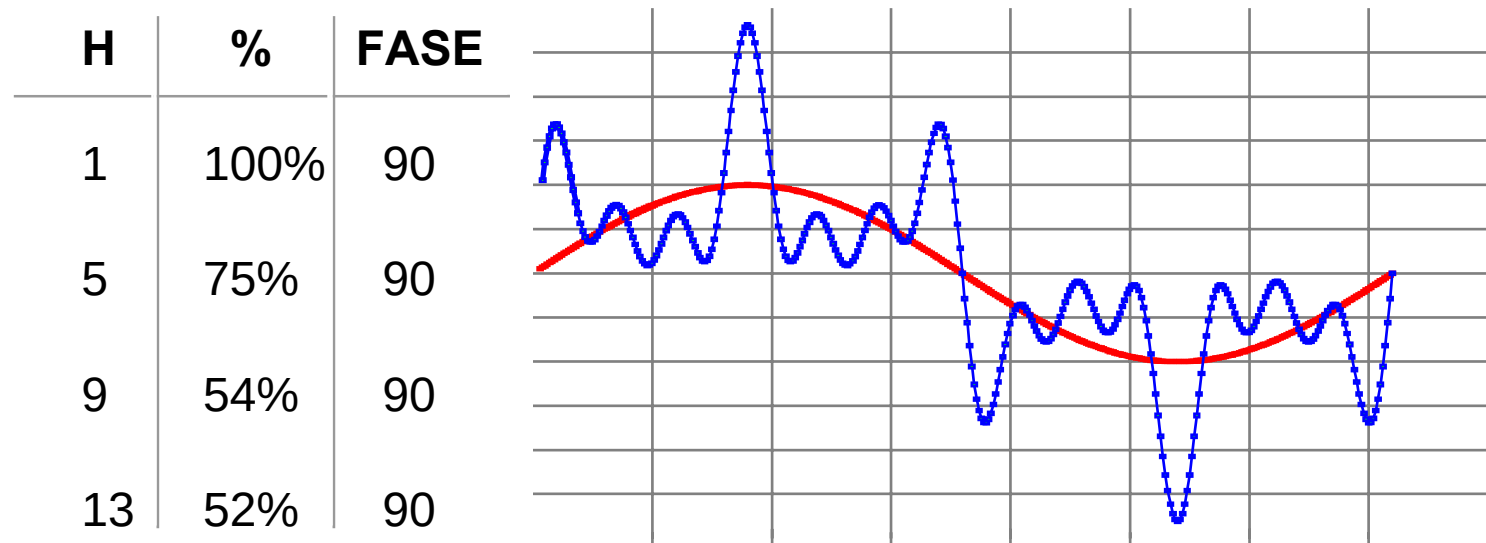
Ressonância Paralela



3.4.2 - Ressonância Paralela (continuação):

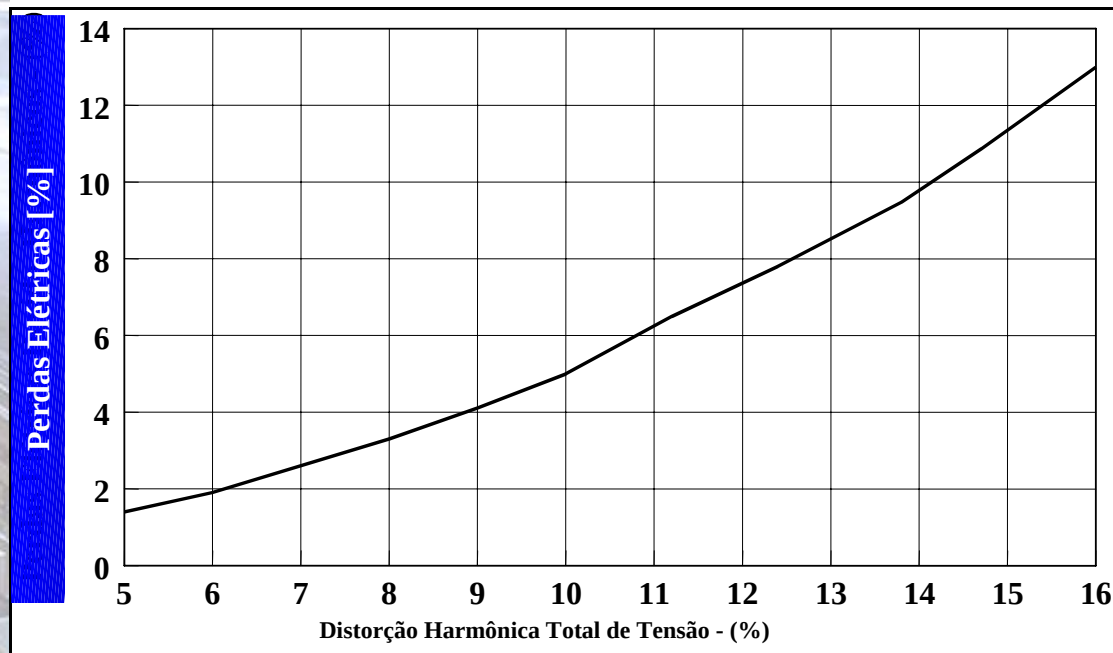
FORMA DE ONDA DE CORRENTE CAPACITOR

Ressonância Paralela



3.4.3 - Efeitos de Harmônicos em Motores de Indução:

-As perdas dentro de um motor de indução são compostas pelas perdas por Histerese e Foucault e também de perdas Joule .

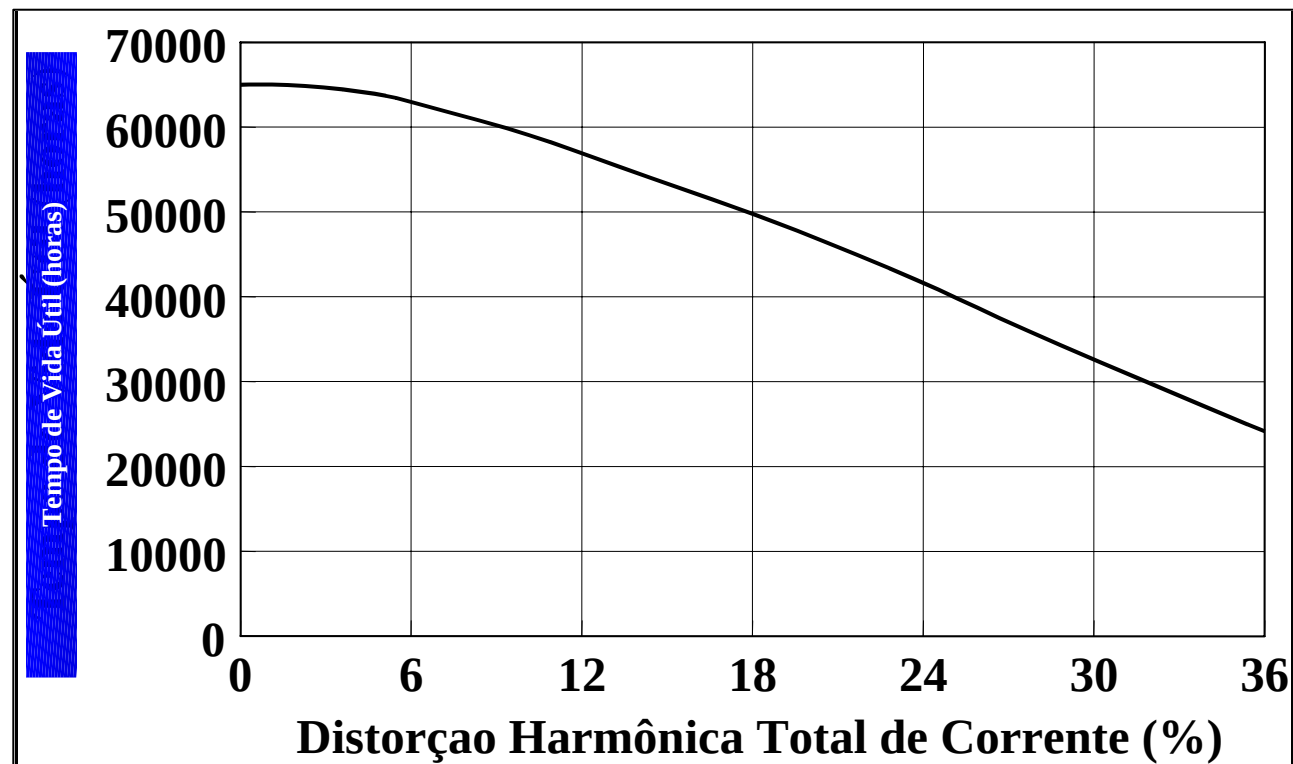


**Perdas no Ferro
são pouco
influenciadas**

**Perdas Joule
são consideráveis
devido à variações
na resistência e
aumento da
Corrente Eficaz**

3.4.4 - Efeitos dos Harmônicos em Transformadores:

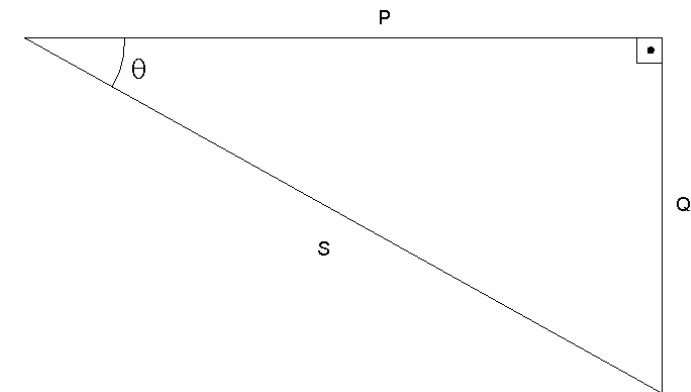
Redução da vida útil de transformadores submetidos à distorção harmônica



3.4.5 - Efeitos dos Harmônicos no FP das Instalações:

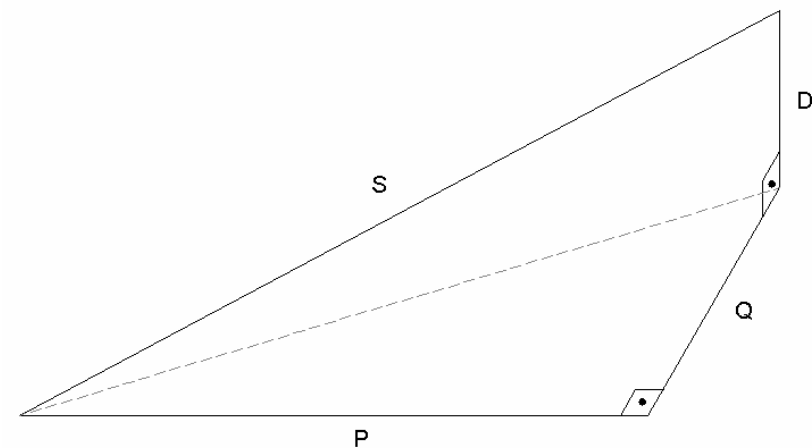
Fator de Potência em Condições **Senoidais**:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V \times I \times \cos(\theta)}{V \times I} = \cos(\theta)$$

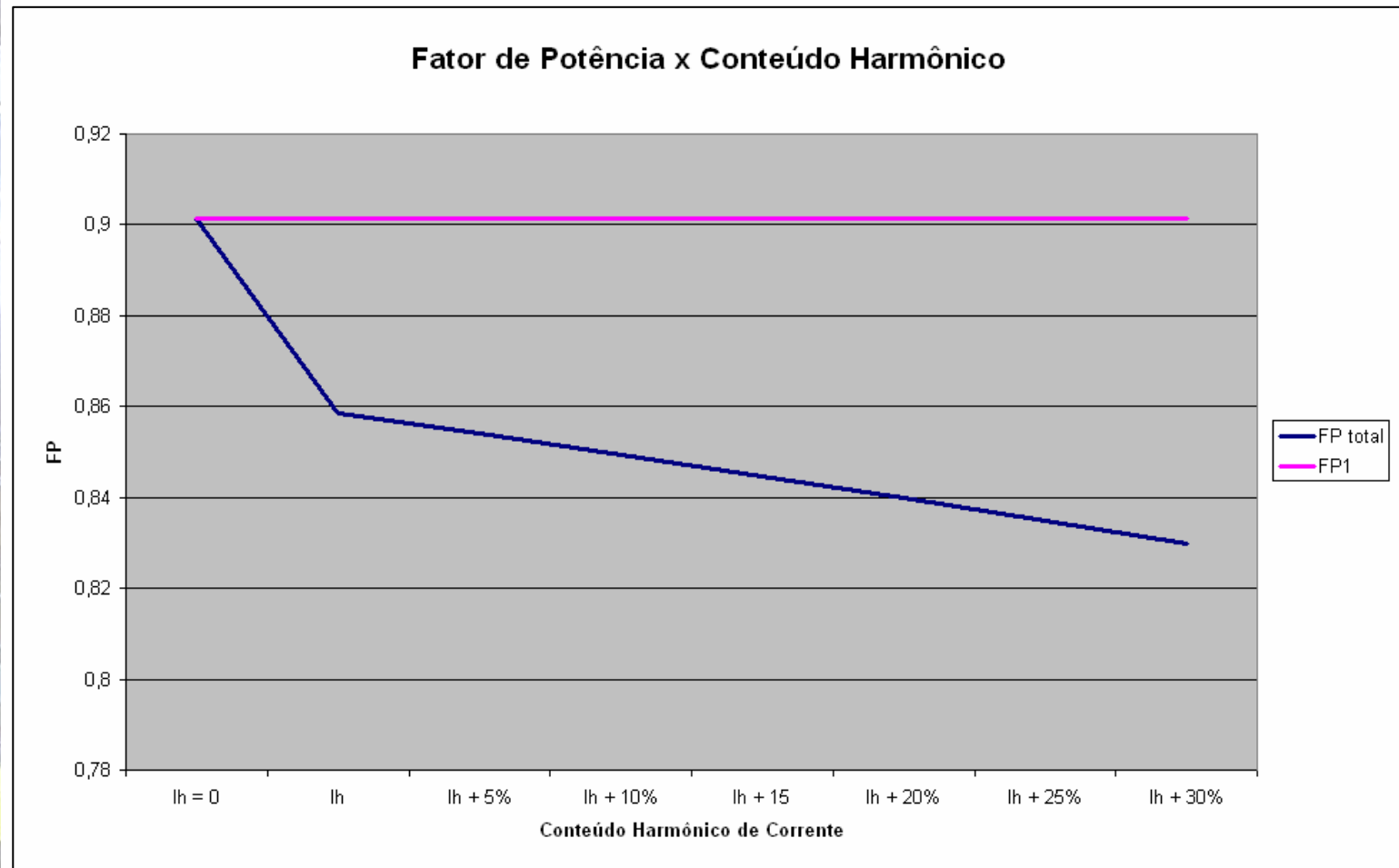


Fator de Potência em Condições **Não-Senoidais**:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_1^h V_n \cdot I_h \cdot \cos(\theta_h)}{\sqrt{\sum_1^h V_h^2 \cdot \sum_1^h I_h^2}}$$



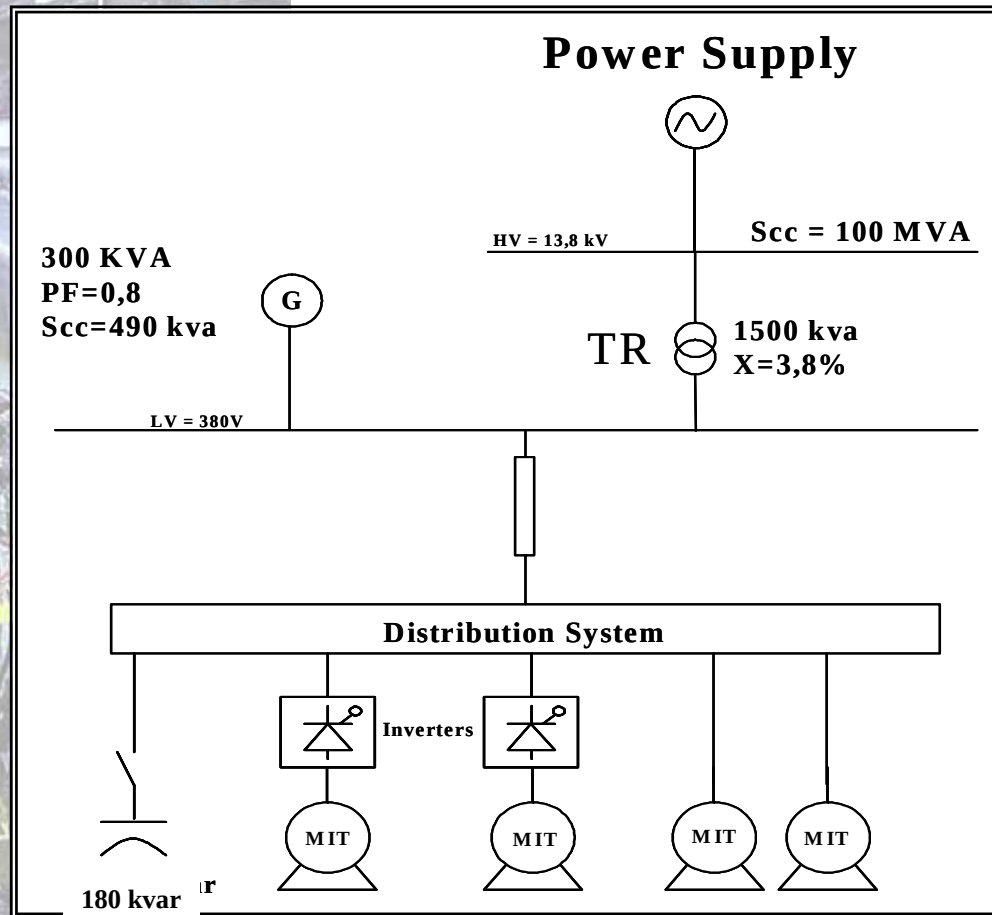
3.4.5 - Efeitos dos Harmônicos no FP das Instalações (continuação):



3.4.5 - Efeitos dos Harmônicos no FP das Instalações (continuação):

Harmônica	V (Volts)	I (A)	V x I	θ (graus)	V x I x cos(θ)	V ²	I ²
1	127,000	68,500	8.699,50	25,67	7.840,944	16.129,00	4.692,25
2	1,016	0,685	0,70	277,52	0,091	1,03	0,47
3	1,905	13,700	26,10	27,61	23,126	3,63	187,69
4	0,254	0,206	0,05	169,16	0,051	0,06	0,04
5	3,810	9,590	36,54	4,84	36,408	14,52	91,97
6	0,381	4,110	1,57	87,17	0,077	0,15	16,89
7	1,524	0,000	0,00	54,72	0,000	2,32	0,00
8	0,127	0,069	0,01	21,49	0,008	0,02	0,00
9	0,254	2,055	0,52	193,48	0,508	0,06	4,22
10	0,127	0,069	0,01	199,50	0,008	0,02	0,00
11	0,025	0,062	0,00	208,19	0,001	0,00	0,00
12	0,038	0,021	0,00	181,36	0,001	0,00	0,00
13	0,013	0,027	0,00	334,03	0,000	0,00	0,00
14	0,038	0,034	0,00	243,45	0,001	0,00	0,00
15	0,038	0,021	0,00	274,87	0,000	0,00	0,00
				Σ	7.901,22	16.150,81	4.993,55
FP (convencional) = 0,90							
FP (Budenau) = 0,88							

3.4.6 - Efeitos dos Harmônicos sobre a Geração Própria:



Geração Própria instalada para o fornecimento de energia no horário de ponta. Sistema Elétrico de uma impressora de jornal.

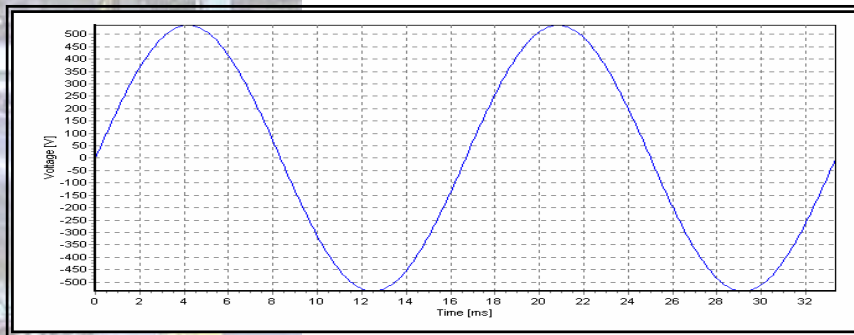


Explosão do banco de capacitores instalado para correção do FP.

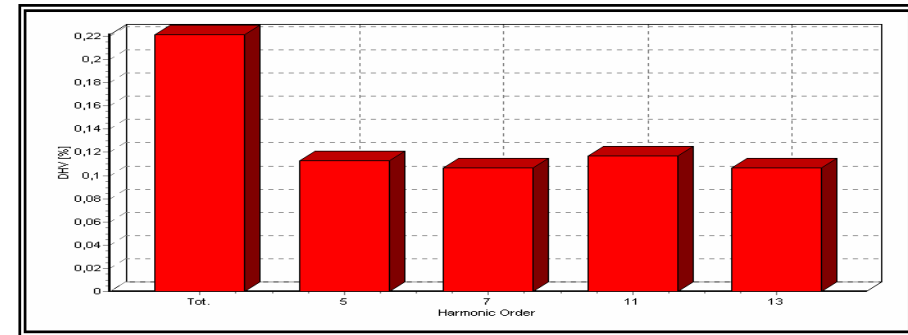


3.4.6 - Efeitos dos Harmônicos sobre a Geração Própria (continuação):

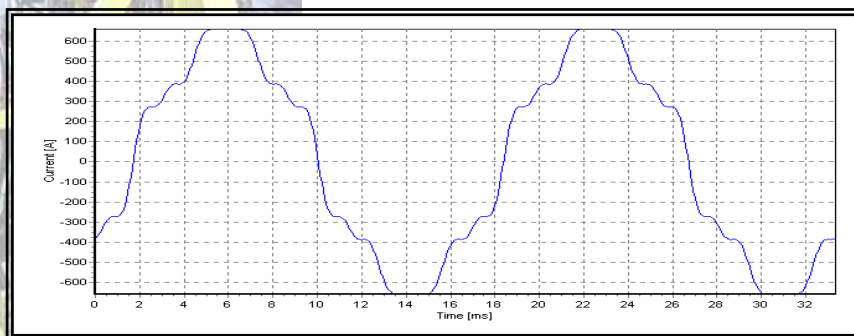
A) Resultado – Concessionária Alimentando a Instalação:



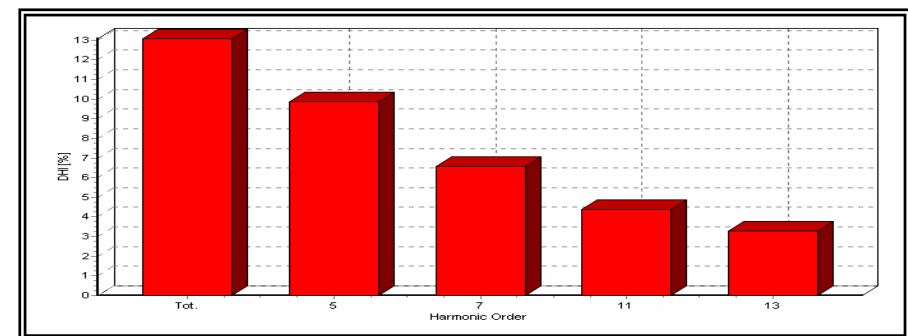
Forma de Onda da Tensão no 380 V



Espectro Harmônico da Tensão no 380 V

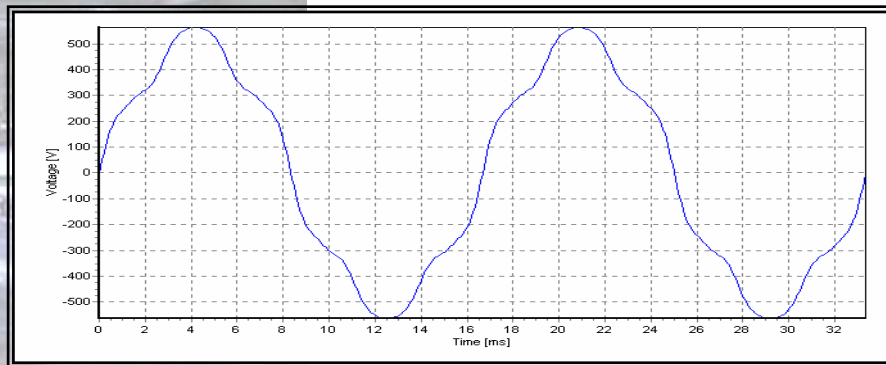


Forma de Onda da Corrente no Banco de Capacitores



Forma de Onda da Corrente no Banco de Capacitores

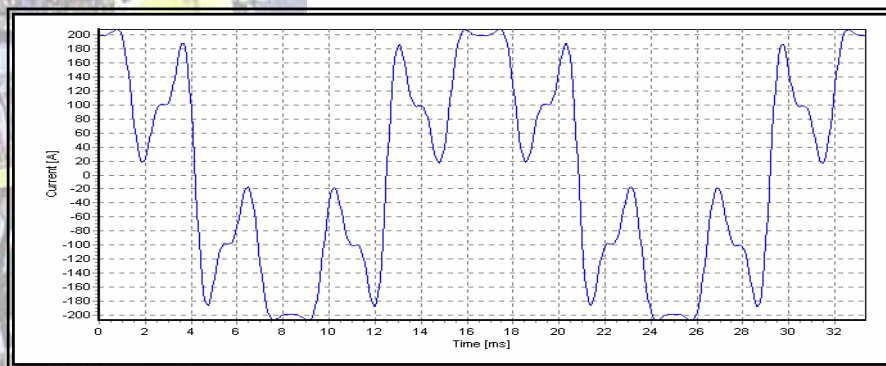
B) Resultado – Geração Própria Alimentando a Instalação (Entrando no Horário de Ponta) :



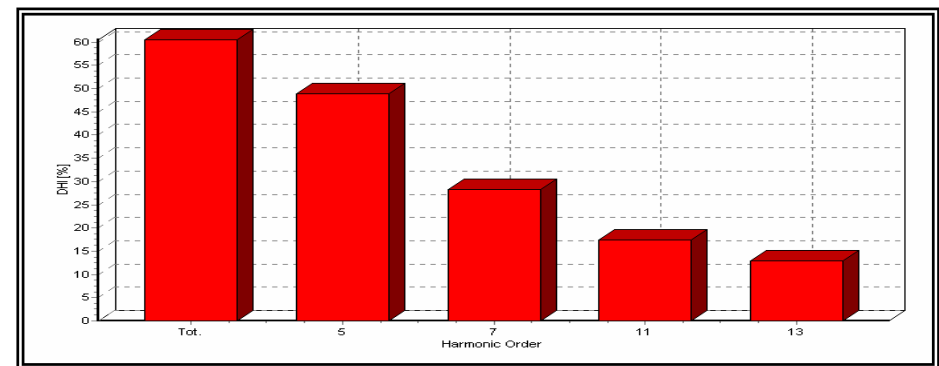
Forma de Onda da Tensão no 380 V



Espectro Harmônico da Tensão no 380 V



Forma de Onda da Corrente no Banco de Capacitores



Espectro Harmônico da Corrente no Banco de Capacitores

4 - Solução para os Problemas de Harmônicos:

4.1 – Dimensionamento de capacitores - harmônicos:

Dimensionamento Recomendado:

a) Tensão: Subtensionar o Banco de Capacitores => $Q \sim V^2$

b) Corrente: Corrente nominal = Soma Quadrática => **Efeito Joule**

Obs: Exceto quando da ocorrência de ressonâncias harmônicas em frequências existentes no sistema elétrico em estudo.

4.2 – Evitar a ocorrência de ressonâncias harmônicas:

- Mudança da Frequência de Ressonância;
- Instalação de um Indutor em Série com o Capacitor;
- Porém não elimina os harmônicos existentes.

**Filtros de
Dessintonia**

4.3 – Necessidade de filtragem das harmônicas para redução dos níveis de distorção existentes:

- Instalação de filtros de harmônicos, sintonizados e/ou amortecidos, de preferência próximos às principais cargas geradoras de harmônicos.
- Elimina os principais harmônicos existentes.

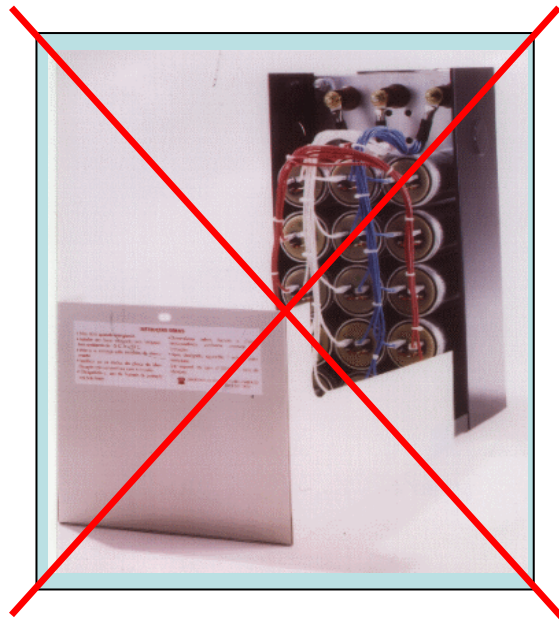
Tipos: Filtros Sintonizados (uma frequência)

Filtros Amortecidos:

- 2a Ordem
- 3a Ordem
- Modificado
- Tipo “C”

5 - Soluções Comerciais para Correção do FP em Sistemas com a Presença de Harmônicos:

5.1 - Capacitores Reforçados para Suportabilidade dos Componentes Harmônicos de Tensão e Corrente:



Substituir
por:



Tecnologia PPM
DHV máx = 3%
DHI máx = 12%

Tecnologia All Film
(Impregnado á Oleo)
DHV máx = 6 %
DHI máx = 31 %

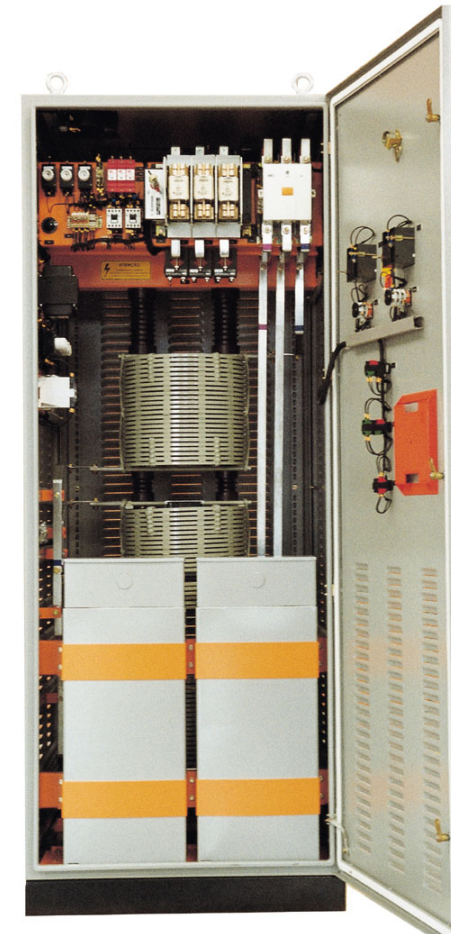
5.2 – Filtros de Dessintonia:

- Capacitores tipo PPM
- Reatores a núcleo de ferro

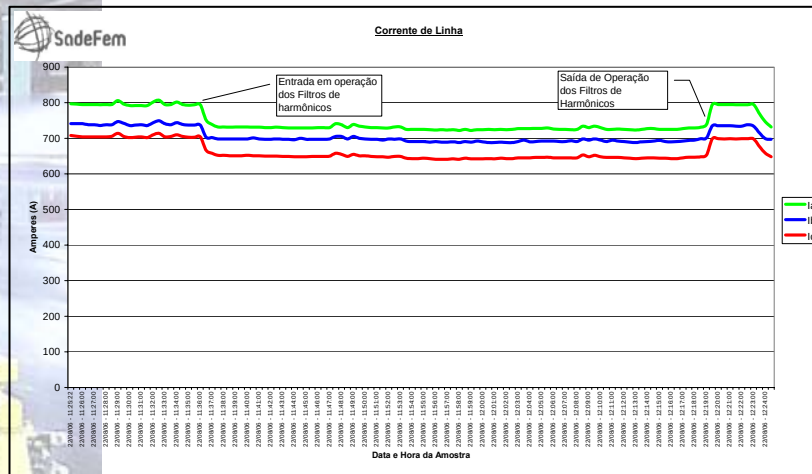


5.3 – Filtros Passivos Sintonizados:

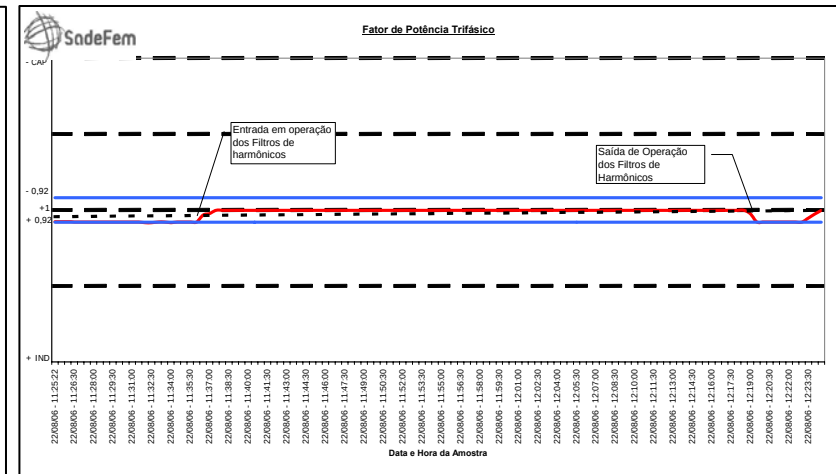
- Capacitores tipo Impregnado a Óleo;
- Reatores a núcleo de ar.



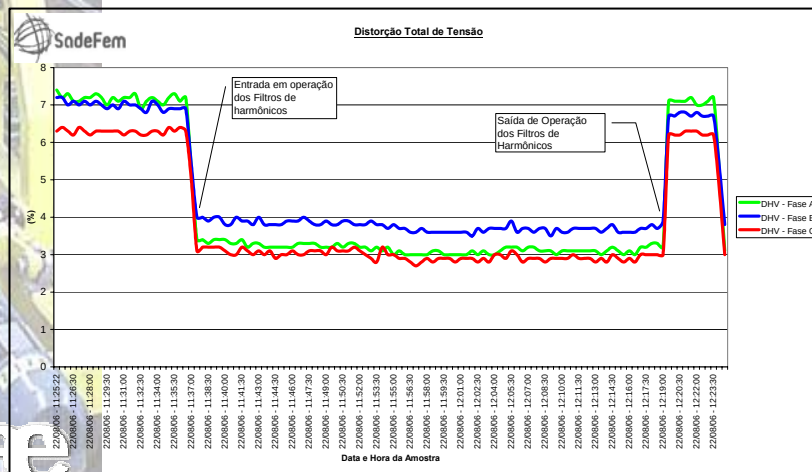
5.3 – Filtros Passivos Sintonizados (Resultados no 2ario do Transformador):



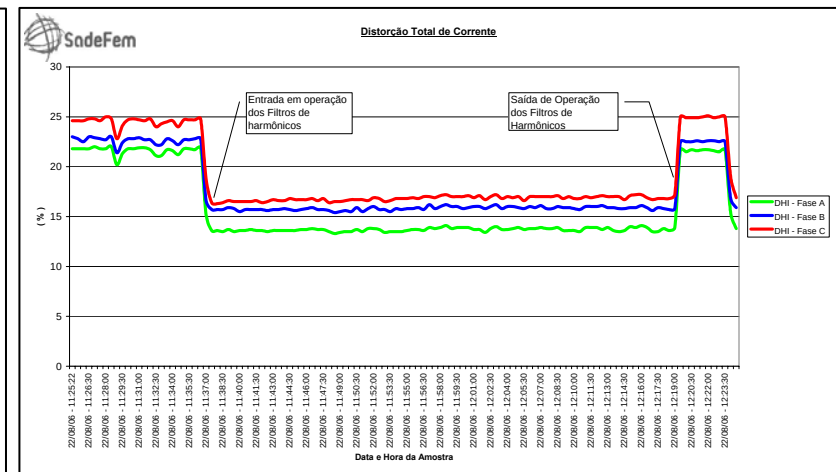
Corrente no 2ario do Trafo em Amperes



Fator de Potência no 2ario do Trafo



DHTv(%) no 2ario do Trafo

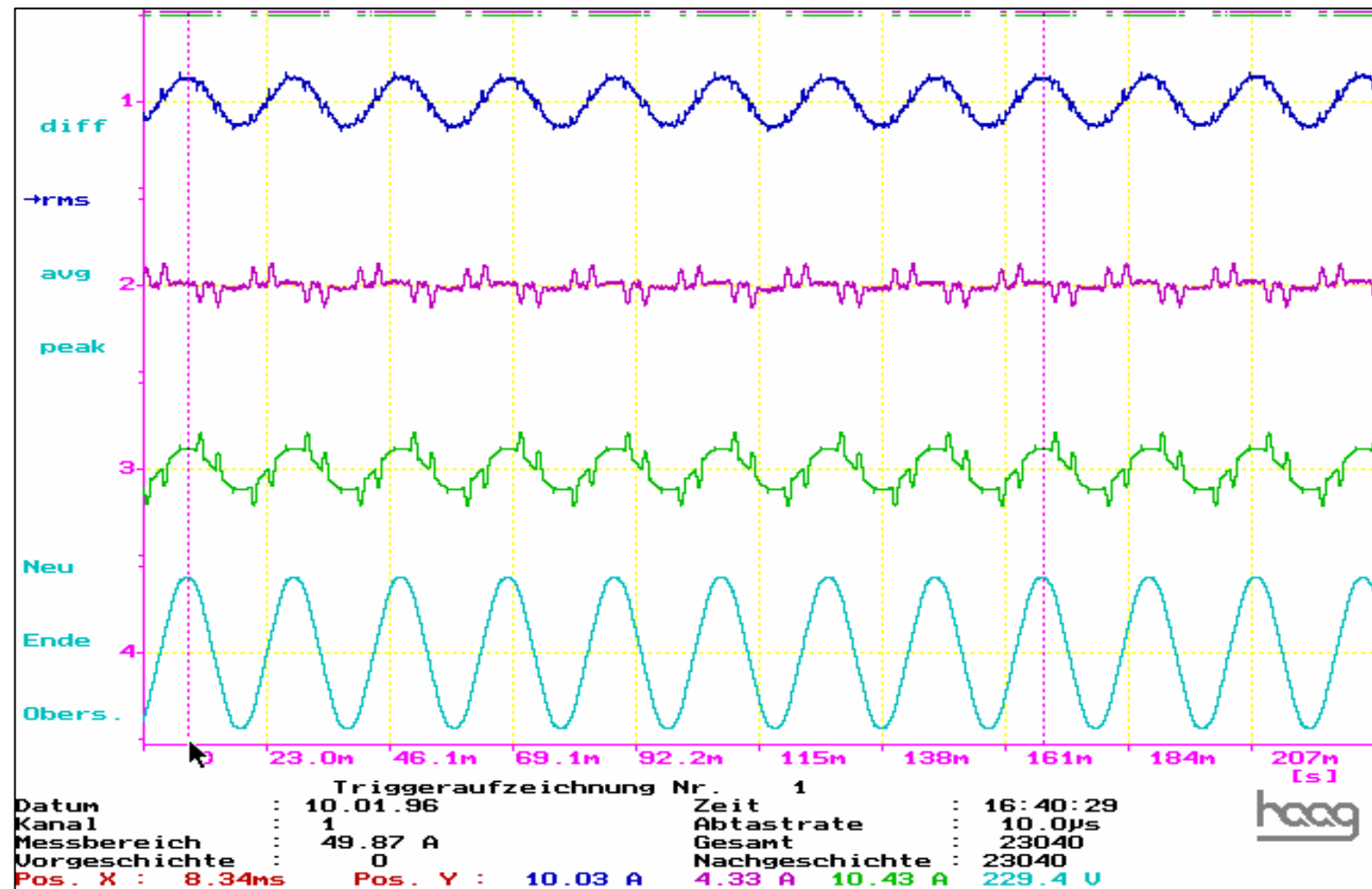


DHTi(%) no 2ario do Trafo

5.4 – Filtros Ativos:

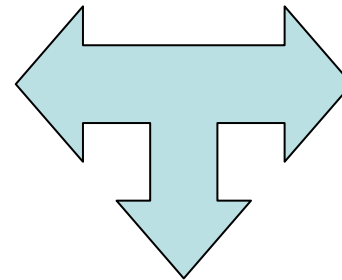
→ Sem Capacitores e sem reatores.

Princípios da
Filtragem
Ativa



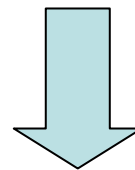
6 – Estudos de Harmônicos:

Instalação de
capacitores



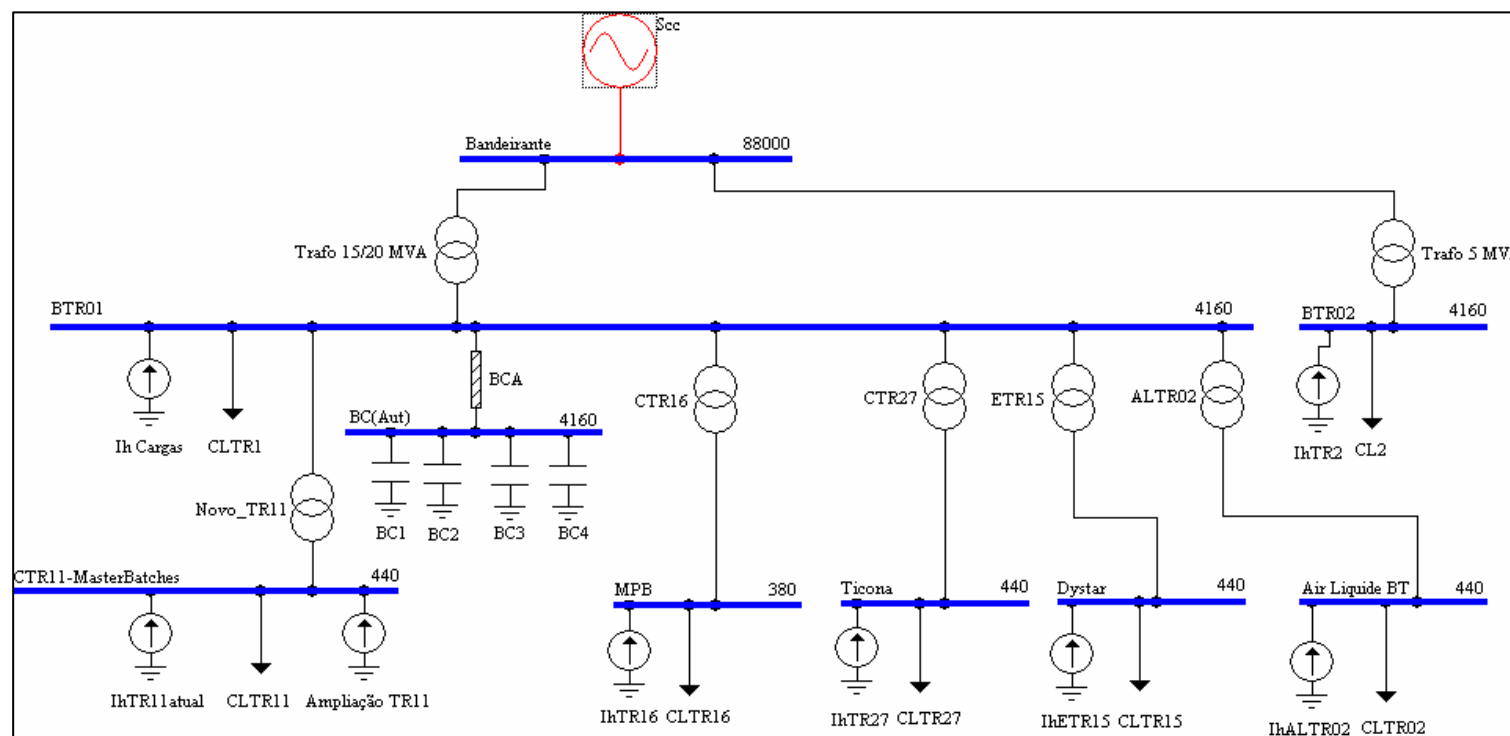
Cargas geradoras
de harmônicos

Possíveis Ressonâncias
em frequências críticas

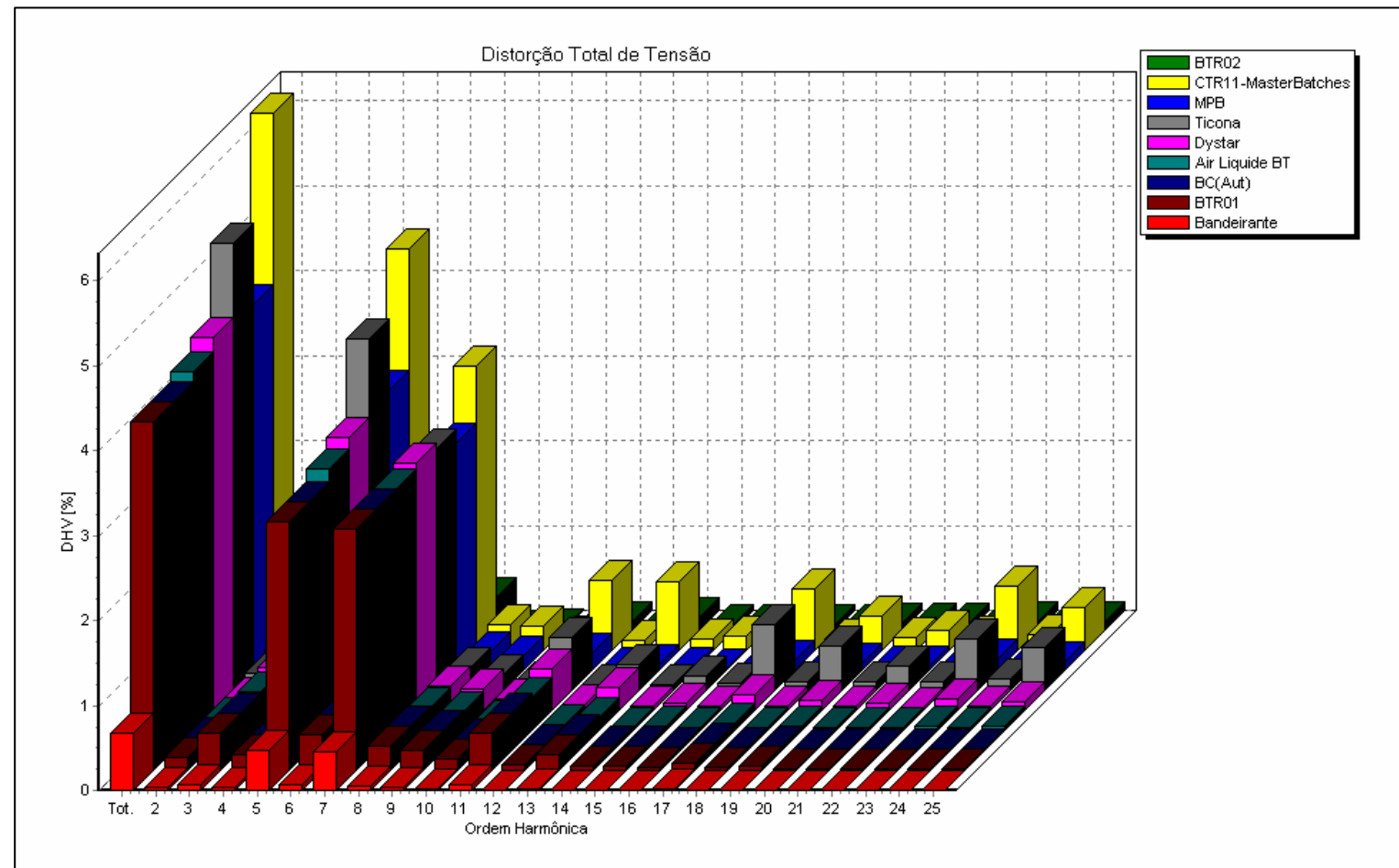


Estudos de Fluxo
Harmônico

6.1 – Estudos de Harmônicos: Caso 01 – Sem Correção do FP:

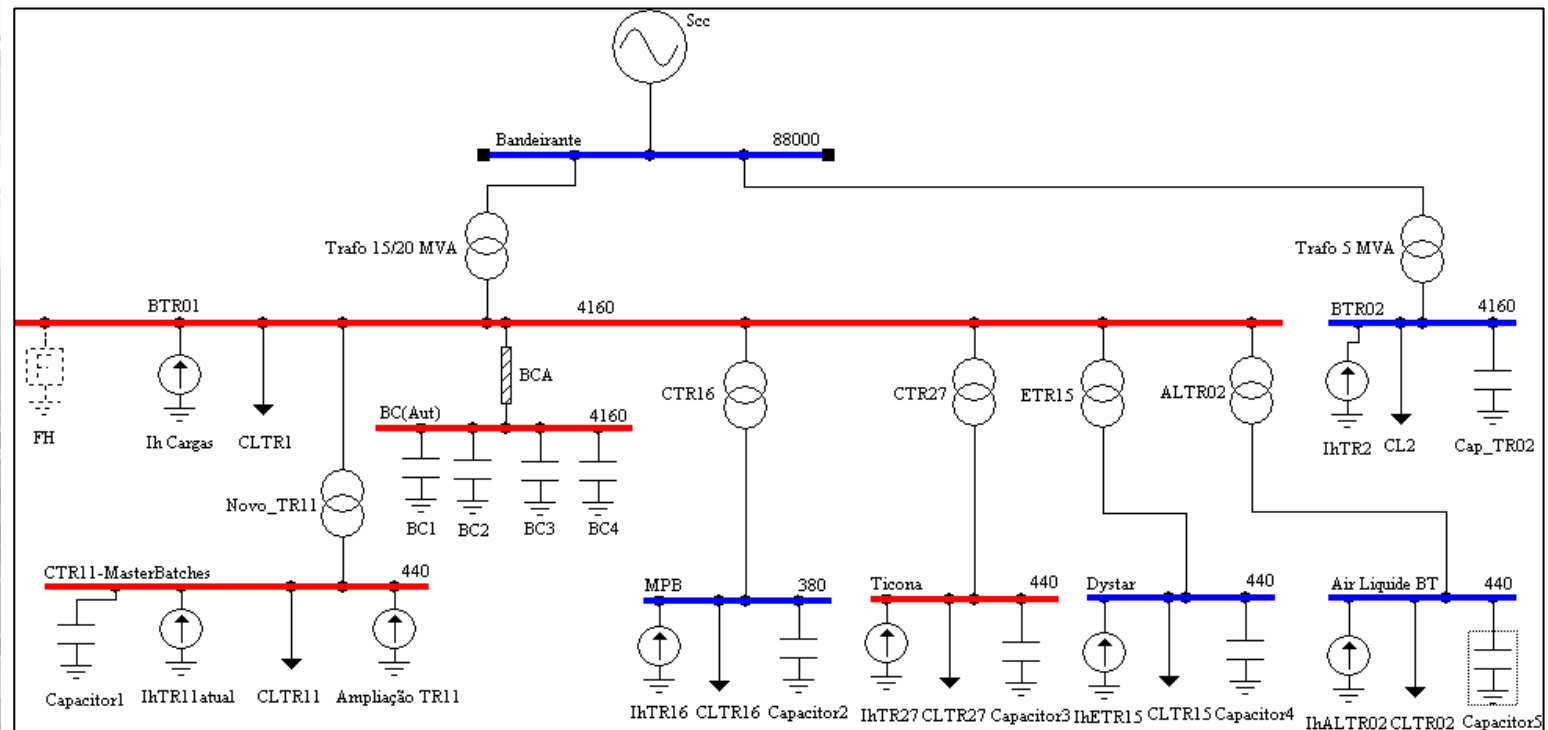


6.1 – Estudos de Harmônicos: Caso 01 – Sem Correção do FP (continuação):

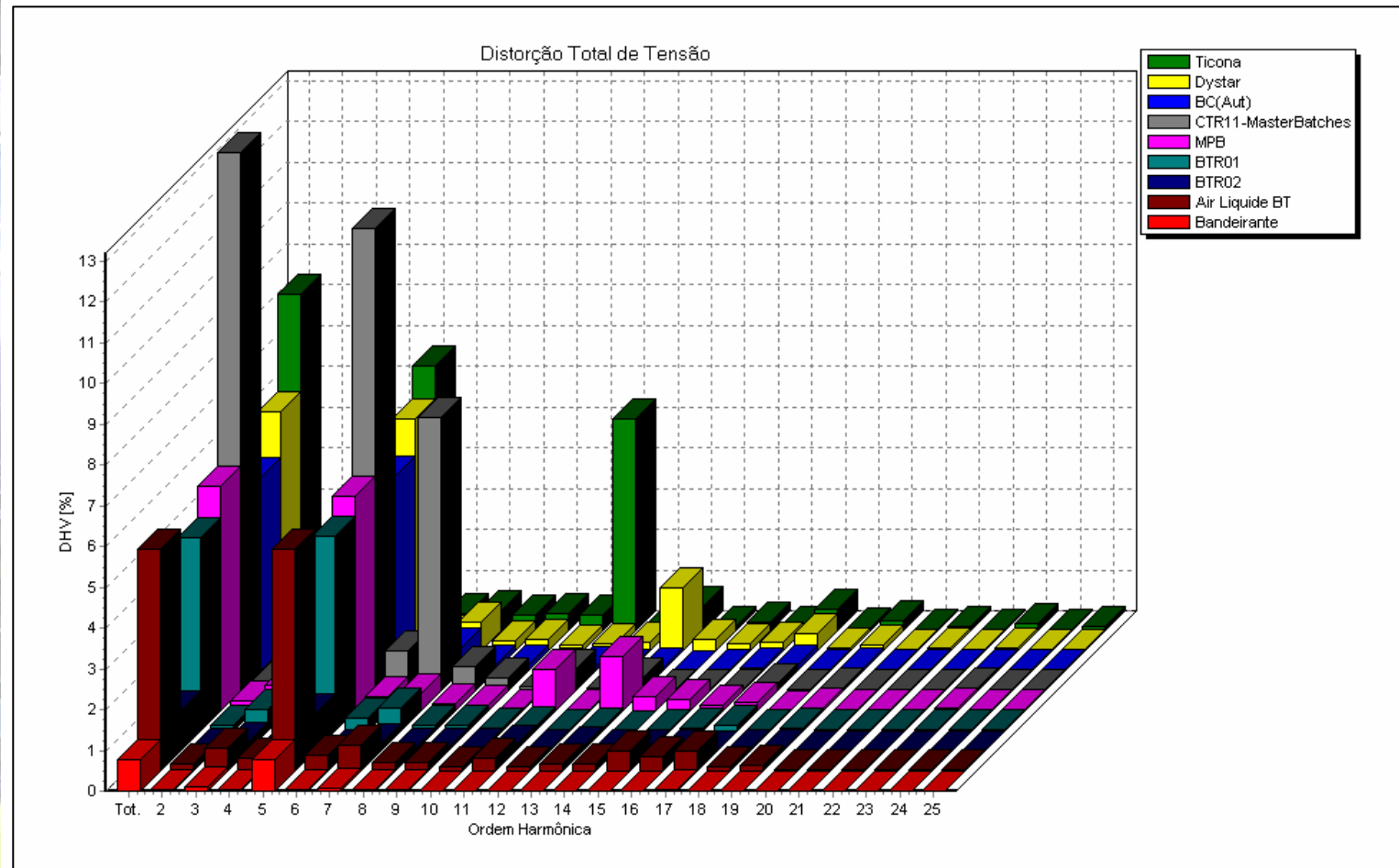


DHV(%) $\approx$ 6% (próximo ao limite IEEE-519/1992)

6.2 – Estudos de Harmônicos: Caso 02 – Com Correção do FP através de Bancos de Capacitores “Comuns”:

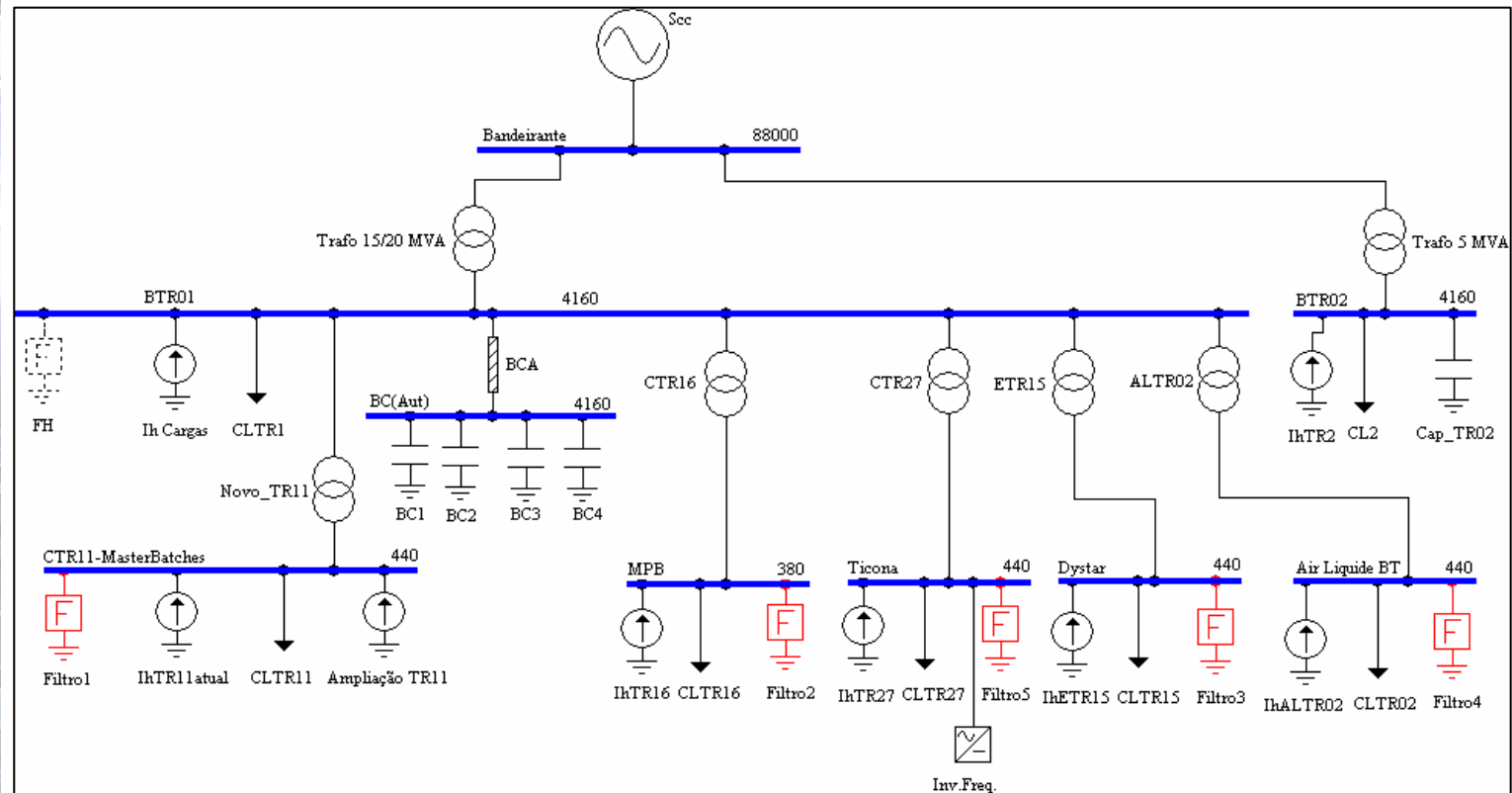


6.2 – Estudos de Harmônicos: Caso 02 – Com Correção do FP através de Bancos de Capacitores “Comuns” (continuação):

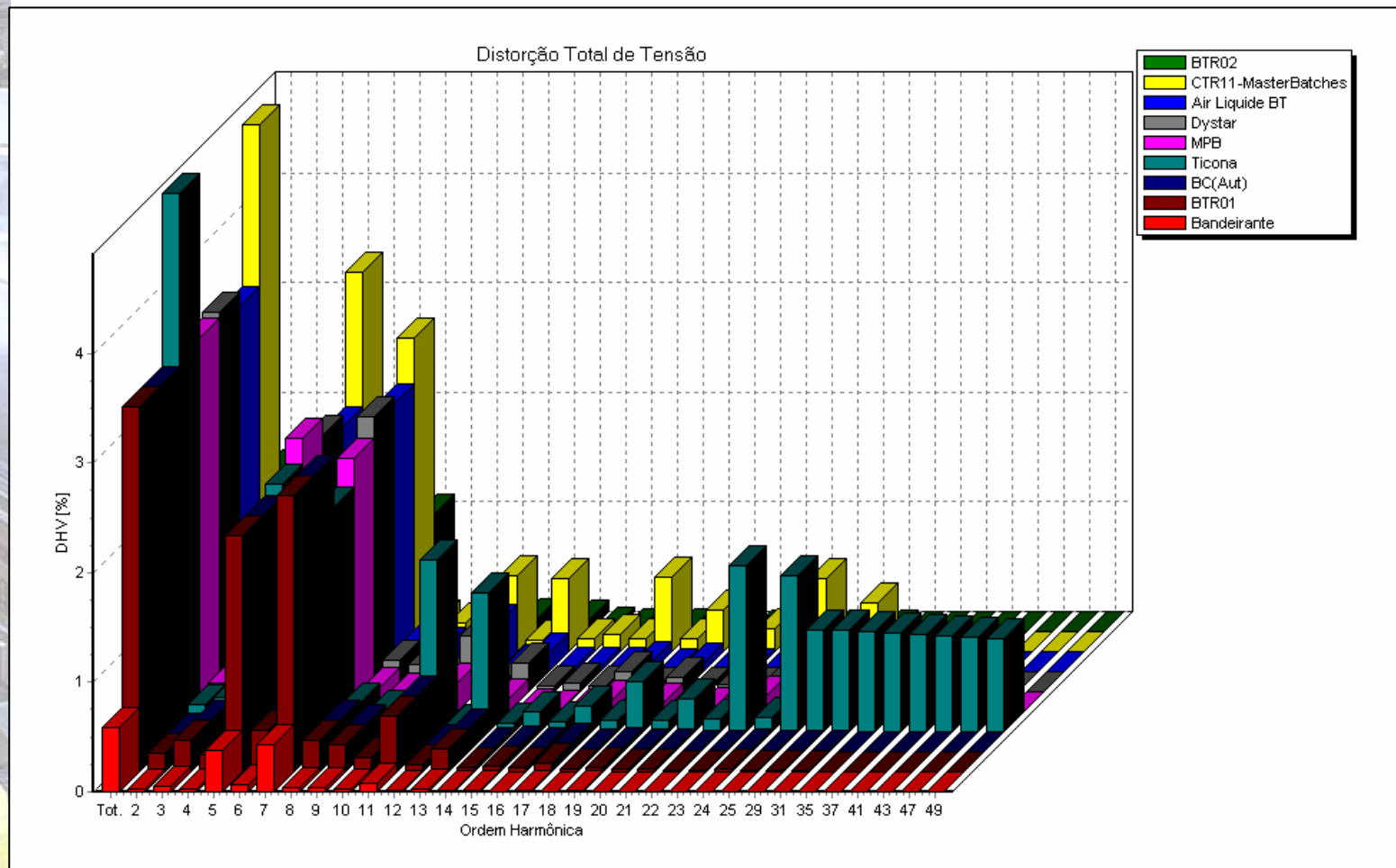


DHV(%) $\geq$ 6% (superior ao limite IEEE-519/1992)

6.3 – Estudos de Harmônicos: Caso 03 – Com Correção do FP através de Filtros de Dessintonia:



6.3 – Estudos de Harmônicos: Caso 03 – Com Correção do FP através de Filtros de Dessintonia (continuação):



$DHV(\%) \leq 6\%$ (inferior ao limite IEEE-519/1992)

7 – PRODIST (Procedimentos da Distribuição):

Módulo 8 – PRODIST - QEE



Tema: Harmônicos



Proposta de DHTv(%) $\leq$ 10% para BT (inferior a 1000 V)



Capacitores Tecnologia PPM não atende



Atualmente DHTv(%) $\leq$ 5 % (IEEE 519-1992)



Filtros de Dessintonia para Proteger os Capacitores

8 – Efeitos dos Harmônicos na Conta de Energia:

ALTO CONTEÚDO HARMÔNICO PRESENTE

EFEITO 01 – Redução do FP Real

EFEITO 02 – Perda de Vida Útil dos Capacitores Acelerada

CONSEQUÊNCIA: Aumento da “Multa” por Baixo FP

EFEITO 03 – Má Operação de Equipamentos (Ex: Inversores)

EFEITO 04 – Aumento das Perdas Elétricas em Cabos, Transformadores, Motores, etc.

CONSEQUÊNCIA - Perda de EE e Maior Consumo de kWh

SOLUÇÃO



FILTRAGEM DOS HARMÔNICOS



FIM

**Agradecemos a todos a participação !
Estamos a disposição para esclarecimentos
através do telefone e e-mail abaixo:**

Eng. Flávio Resende Garcia – Consultor Técnico
++55 16 2109-2925 – flavio.garcia@sadefem.com.br
SADEFEM EQUIPAMENTOS E MONTAGENS S/A

**GT de Capacitores Industriais da ABINEE
(ABB, EPCOS, INDELTA, LORENZETTI,
SADEFEM, SIEMENS, SCHNEIDER e WEG)**