

Jornada
“Condicionamento da Energia Elétrica e Núcleos Magnéticos”
18 de junho de 2002
São Paulo – SP

Electro-Radio, Magnetics, Richardson, APT

Qualidade da Energia Elétrica e Eletrônica de Potência

José Antenor Pomilio
Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas

Agradecimentos ao Prof. Sigmar M. Deckmann, co-autor da apresentação “Power Electronics & Power Quality” no On Line Symposium on Electrictronic Engineering

Definições:

A Eletricidade é um BEM COMUM

Todos estamos conectados a um mesmo sistema elétrico

**A “poluição” eletromagnética é perigosa para todos os
equipamentos eletroeletrônicos**

**Todos temos direito a dispor de uma fonte de energia elétrica
“limpa”.**

Todos somos responsáveis por manter o sistema elétrico “limpo”.

Qualidade da Energia Elétrica

Operação ideal do sistema elétrico:

Tensões e correntes senoidais

Frequência Constante

Tensão Constante (em seu valor nominal)

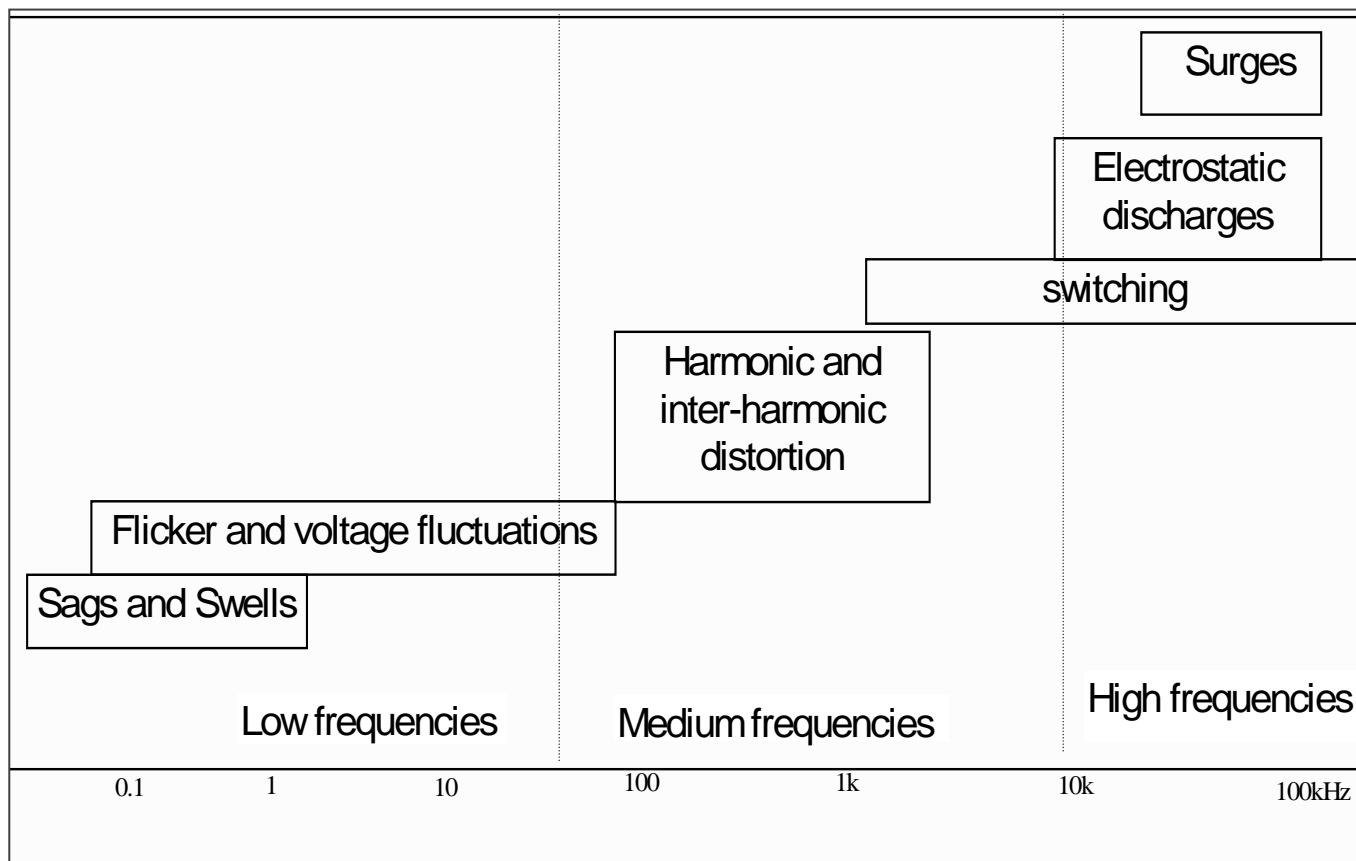
Tensões trifásicas balanceadas

Fator de potência unitário

Qualidade da Energia Elétrica & Eletrônica de Potência

- ⇒ Conversores eletrônicos de potência são normalmente usados como estágio de entrada de energia para aparelhos eletro-eletrônicos.**
- ⇒ As correntes absorvidas da rede elétrica são as principais responsáveis pelos problemas de qualidade de energia, nas faixas de média e de baixa frequência.**
- ⇒ Não obstante, alterações nos conversores de potência podem eliminar a maioria destes problemas.**
- ⇒ Este tutorial apresentará alguns dos problemas e mostrará como mitiga-los utilizando soluções adequadas da própria eletrônica de potência.**

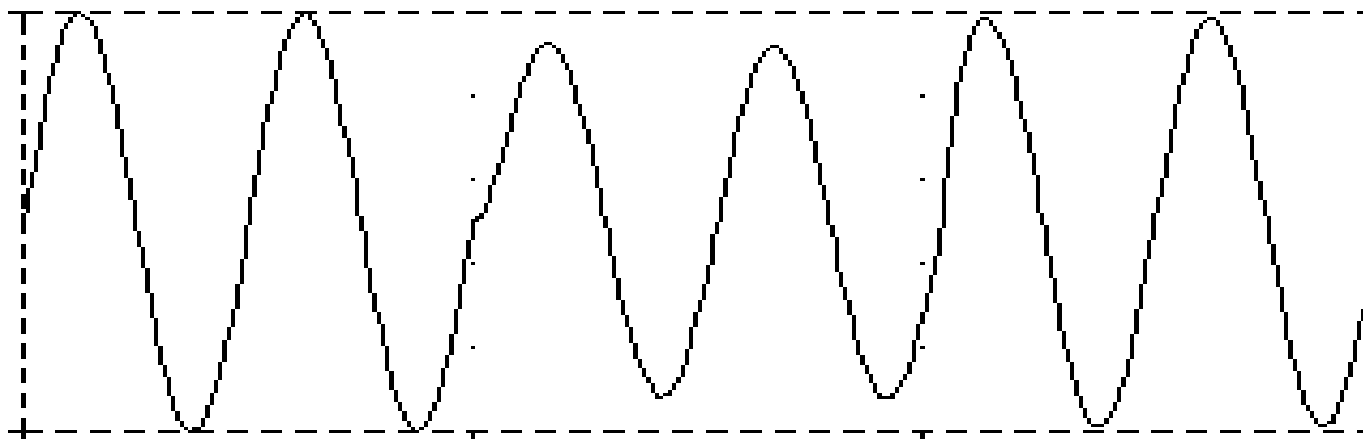
Definições das perturbações



Afundamento de tensão - Voltage sag

Redução no valor eficaz da tensão entre $\frac{1}{2}$ ciclo e 1 minuto.

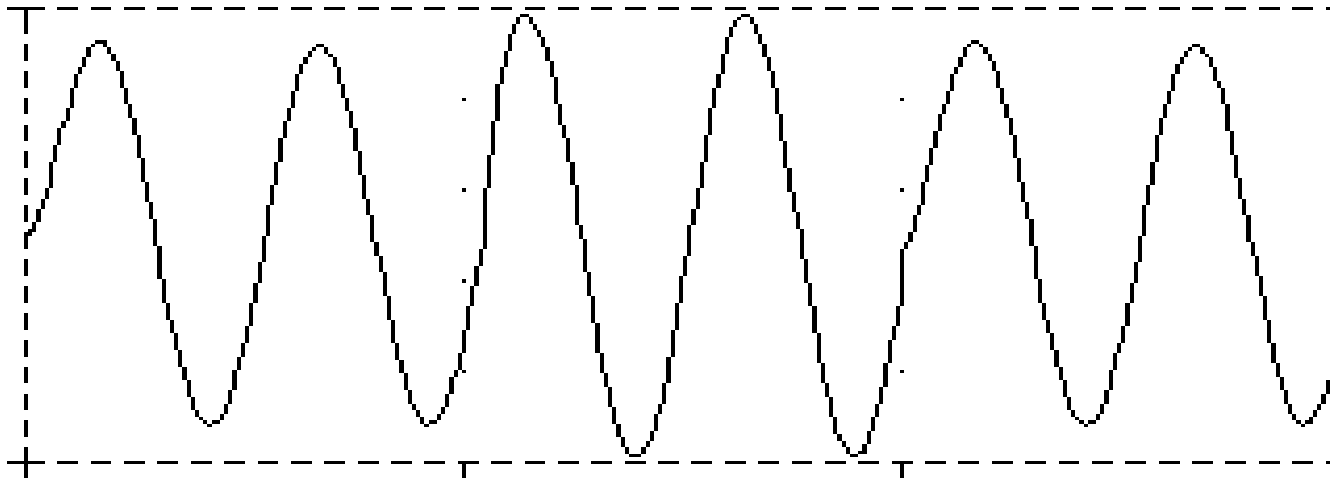
É tipicamente produzida por partida de motores de indução.



Elevação de tensão - Voltage swell

Sobretensão temporária, entre $\frac{1}{2}$ ciclo e 1 minuto.

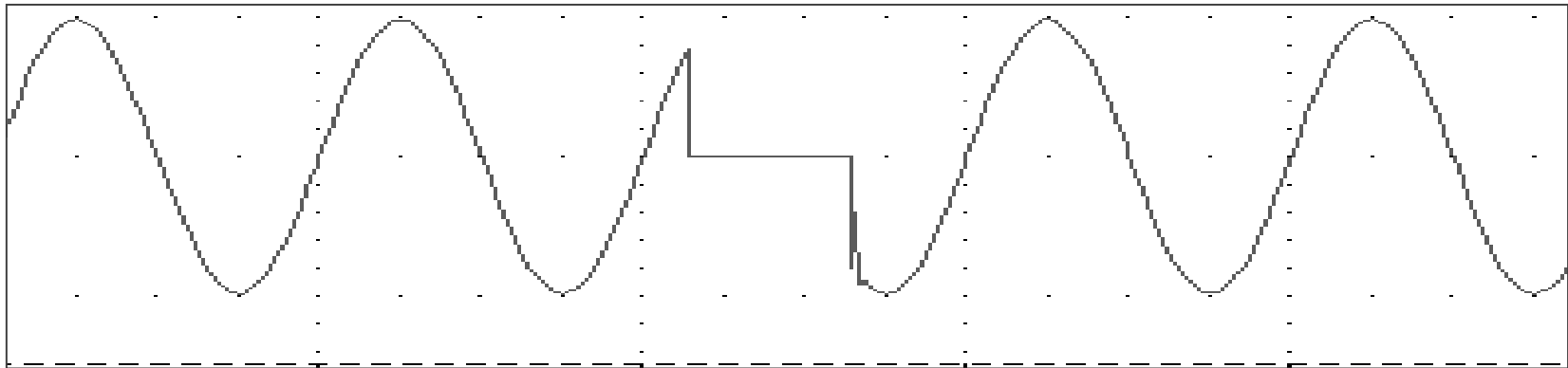
Causado tipicamente pela desconexão de cargas de grande porte ou pela conexão de bancos capacitivos.



Micro-interrupção

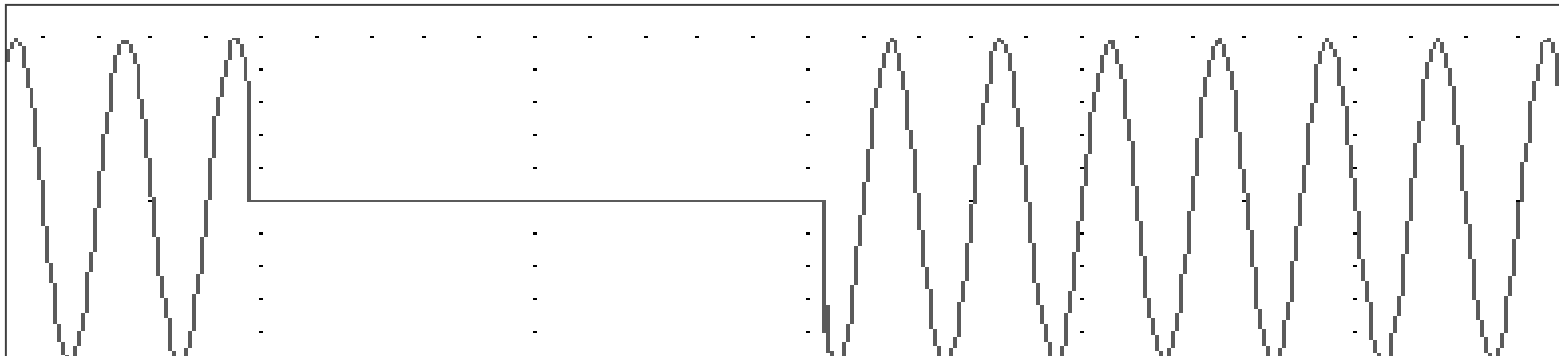
Desconexão da fonte por até $\frac{1}{2}$ ciclo, usualmente devido a evento rápido de curto-circuito no sistema.

As fontes de alimentação normalmente são projetadas para suportar estas interrupções.



Interrupção rápida

Interrupção por até 3s. Se as proteções do sistema operam adequadamente, a expectativa é o retorno imediato da tensão.



Interrupção temporária

Interrupção entre 3 s. e 1 min.

Interrupção permanente

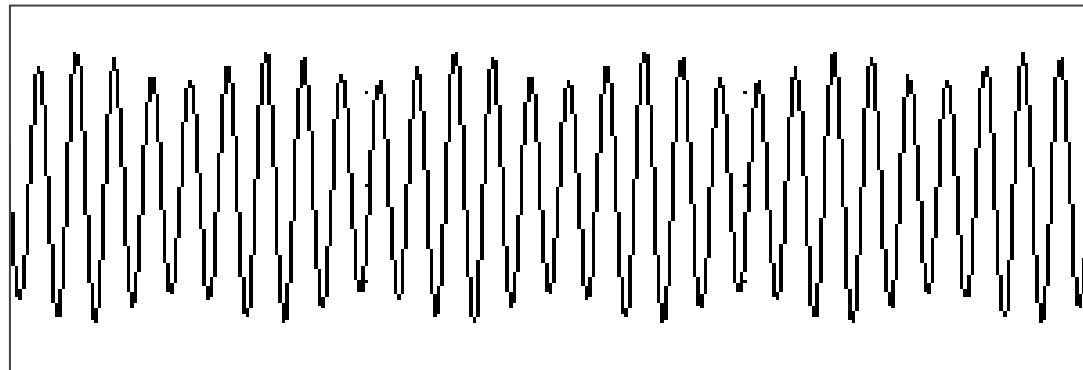
Interrupção com duração superior a 1 min. Há índices de qualidade que indicam a duração e a frequência de tais eventos.



Flutuação de tensão

É a variação sustentada de amplitude da tensão.

Normalmente associada com o efeito “flicker”, podendo ser causa ou efeito de oscilações no sistema de transmissão de energia.



Flutuação de tensão

Flicker é o efeito visual causado em lâmpadas incandescentes pela flutuação de tensão.

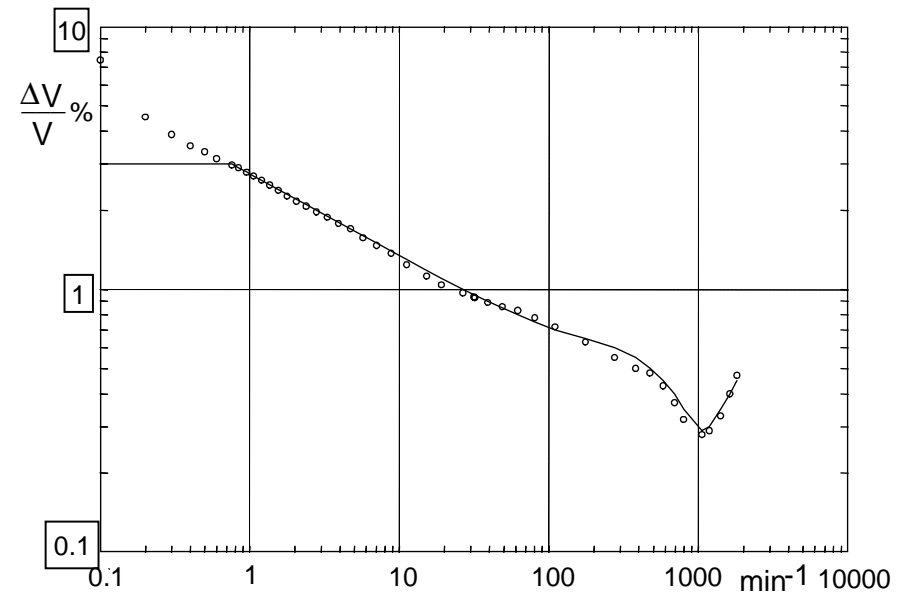
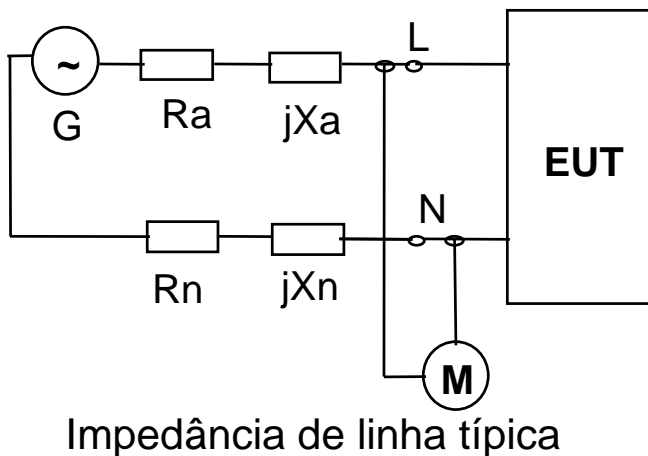
Na frequência de 8,8 Hz o olho humano apresenta sua máxima sensibilidade, sendo capaz de identificar variações na tensão de 0,1%.



Flutuação de tensão

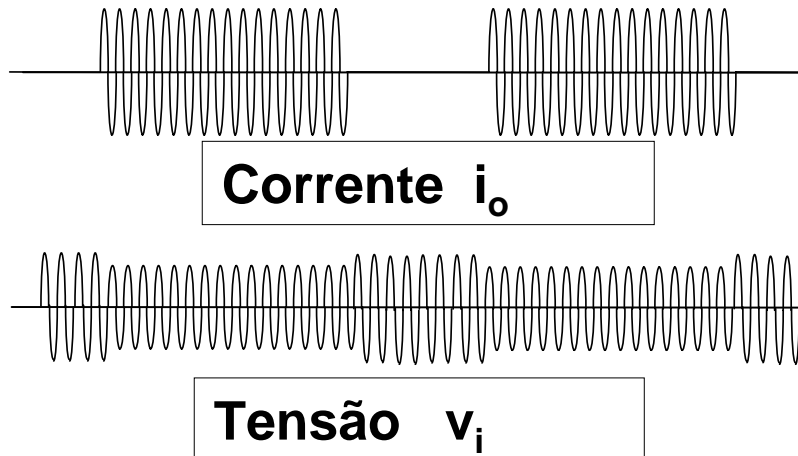
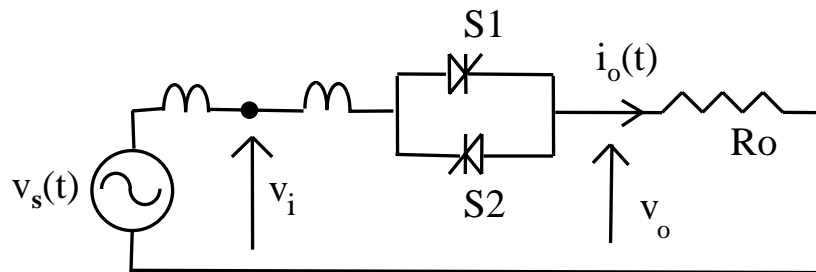
Flutuações de tensão são limitadas por normas como a IEC 61000-3-3.

Procedimentos para medição de Cintilação luminosa (flicker) são estabelecidas pela IEC 61000-4-15.



Alterações por minuto que produzem desconforto

Controlador liga-desliga



Aplicação típica:

aquecimento (carga resistiva),
fornos de microndas (controle
de potência)

Características:

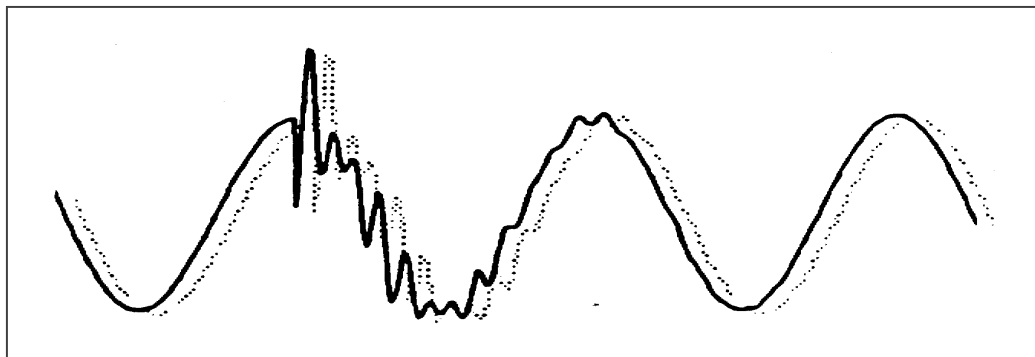
Baixa interferência
eletromagnética (IEM), baixa
frequência de comutação
(0,1~1Hz).

Oscilação transitória

Oscilação amortecida de média freqüência superposta à tensão da rede.

Normalmente produzida pela conexão de capacitores para correção de fator de potência, que excitam ressonâncias do sistema.

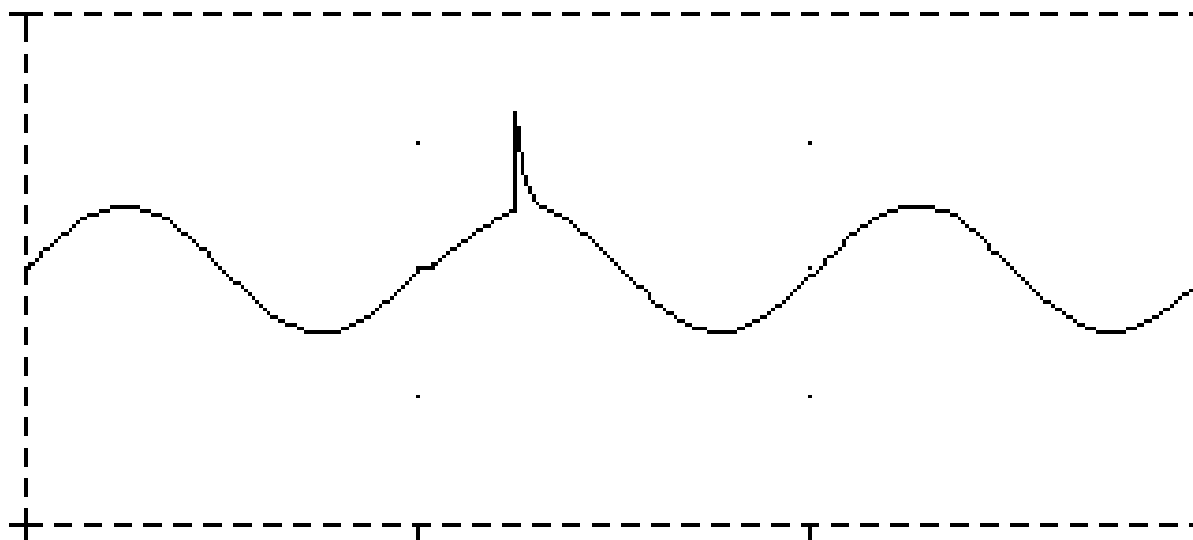
As proteções do sistema podem ser ativadas por tais sobretensões.



Surto de tensão

Variação rápida no valor instantâneo da tensão, normalmente associado a descargas atmosféricas ou conexões de circuitos indutivos.

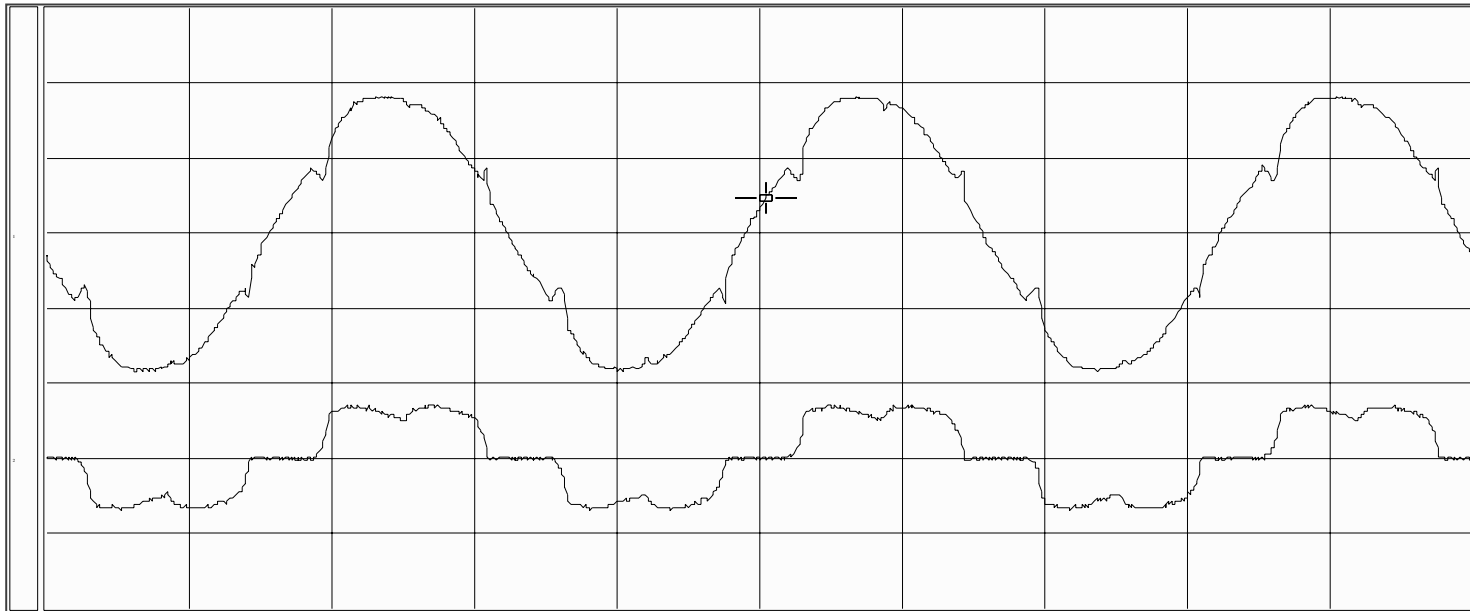
Devido ao elevado dv/dt , sua proteção não é simples, sendo normalmente realizada por componentes passivos como varistores e capacitores.



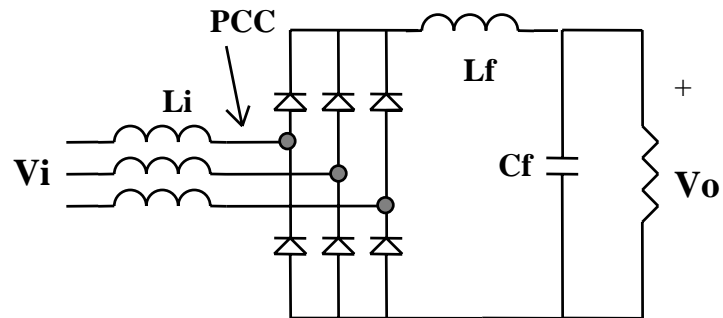
“Notch”

Transições rápidas e sucessivas de tensão.

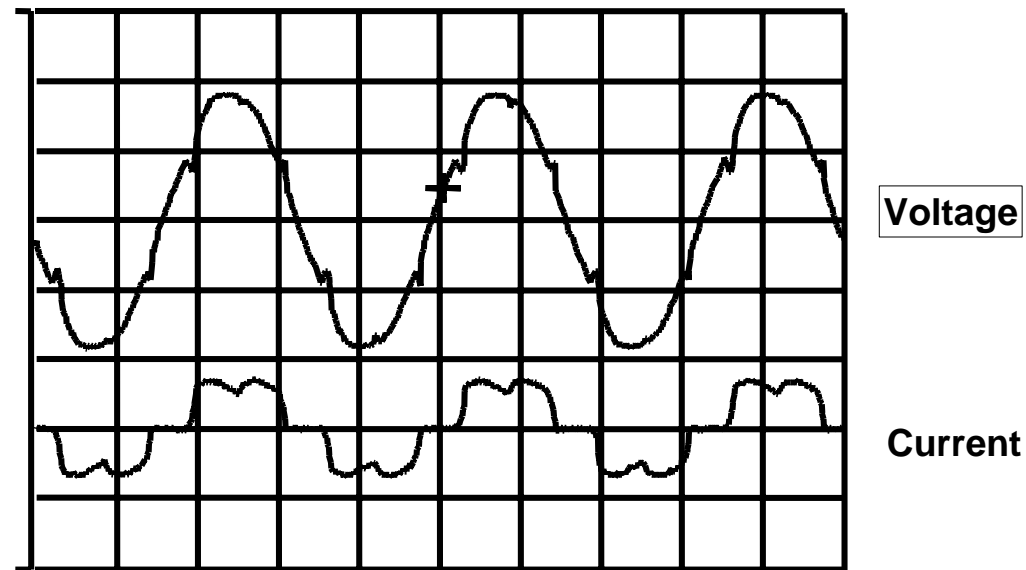
Normalmente associadas com curtos-circuitos transitórios devido à comutação de semicondutores.



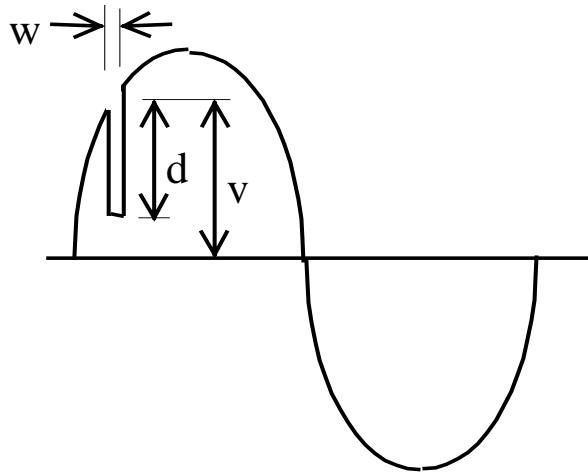
Comutação



Elevado di/dt na corrente da rede, associado às indutâncias da linha, L_i , produzem distorções na tensão no ponto de acoplamento comum.



Limites de “Notch” e de distorção associada



Notch	Special Aplic.	General Systems	Dedicated Systems
Depth (d/v)	10%	20%	50%
Area (d.w)*	16400V.us	22800V.us	36500V.us
THD**	3%	5%	10%

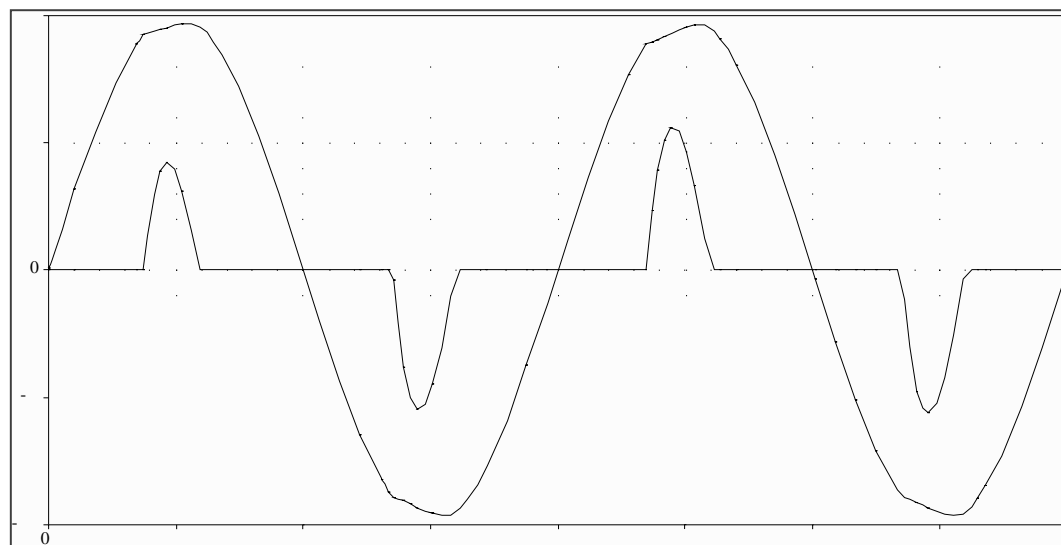
* for nominal voltage and currents,

** THD = Total Harmonic Distortion.

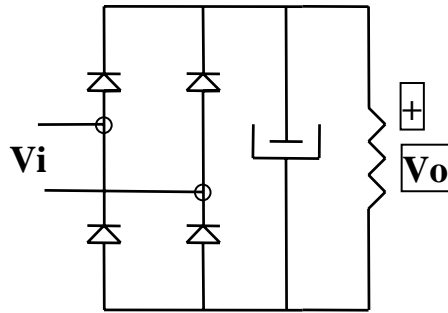
Distorção Harmônica

É a presença de componentes na tensão ou na corrente com frequência múltipla da frequência nominal do sistema.

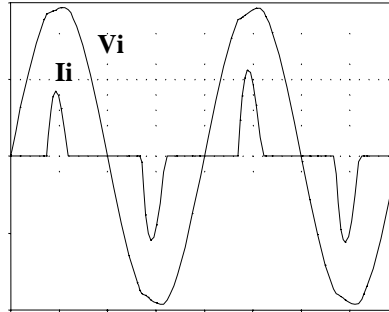
Usualmente as componentes das correntes provêm de cargas não lineares, enquanto a distorção da tensão é devida à interação entre estas correntes e a impedância da linha.



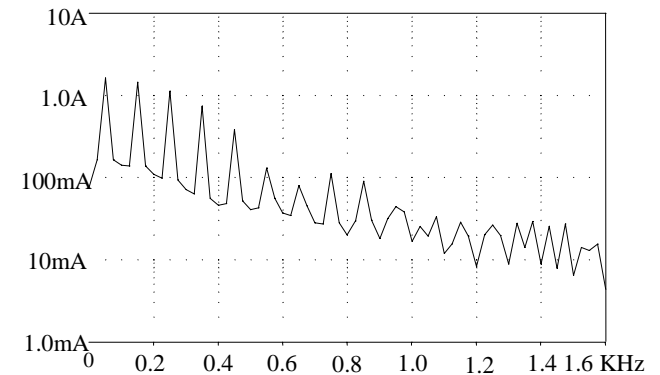
Retificador a diodo com filtro capacitivo



Circuito



Tensão e corrente de entrada



Espectro da corrente

Aplicações típicas:

Estágio de entrada de fontes de alimentação

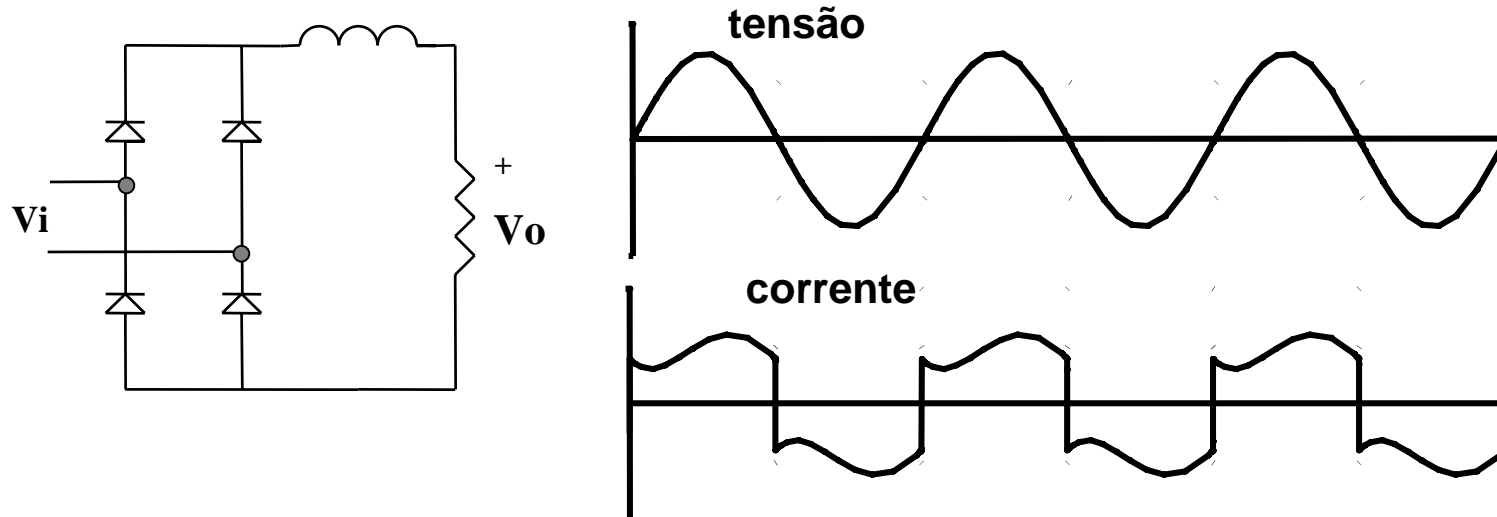
Características:

larga faixa de potência (até 3 kVA, monofásico),
Baixa IEM

Problemas de qualidade:

Distorção da corrente
Distorção na tensão
Baixo fator de potência (~0.6),
Notch de tensão,
Corrente de neutro.

Retificador a diodo com filtro indutivo



Características:

Maior fator de potência (~ 0.9).

Menor densidade de potência devido ao volume do indutor.

Problemas associados à distorção da corrente

Baixo fator de potência:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}}$$

Para tensão e corrente senoidais:

$$PF_{sin} = \frac{kW}{kVA} = \cos \left(\arctg \left(\frac{kVAr}{kW} \right) \right) = \cos \phi$$

Para tensão senoidal:

$$PF_{V_{sin}} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \cdot \cos \phi_1$$

$$PF = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Problemas associados à distorção da corrente

- Sobredimensionamento dos condutores
- Elevada componente de 3ª harmônica no condutor neutro

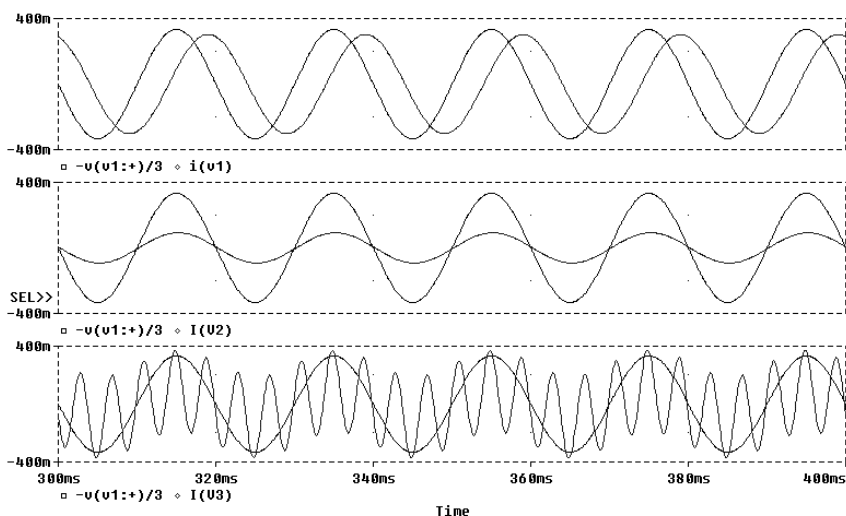
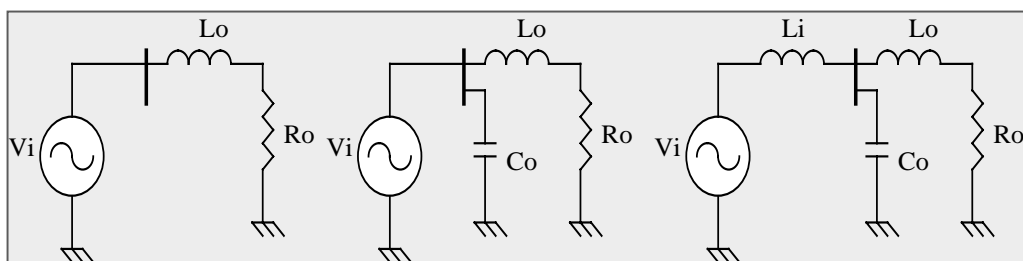
	Caso 1	Caso 2
Fator de potência	0.78	0.92
Perdas (%)	5	3.59
Perdas (MWh/ano)	10	7.18
Redução das perdas	28.1%	

Problemas associados à distorção da corrente

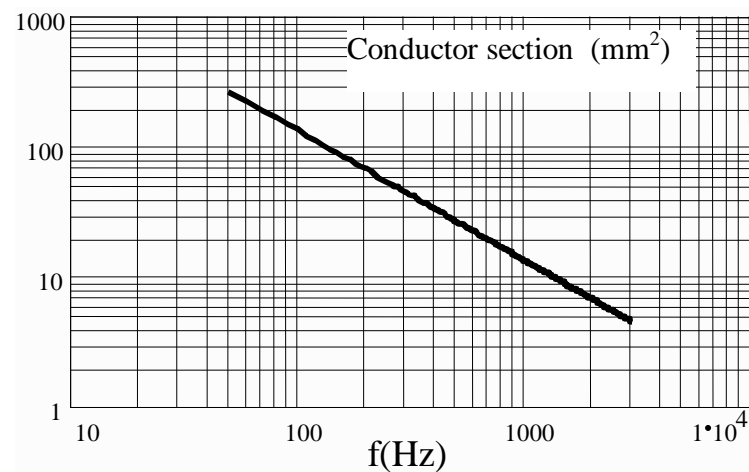
- Distorção da tensão;

- Sobreaquecimento de transformadores e capacitores;

5ª harmônica, 3%



Efeito pelicular



Norma IEC 61000-3-2

Define limites para a distorção da corrente

Classe A: Equipamentos trifásicos balanceados, e todos os demais, exceto os classificados em uma das seguintes classes:

Classe B: Ferramentas portáteis,

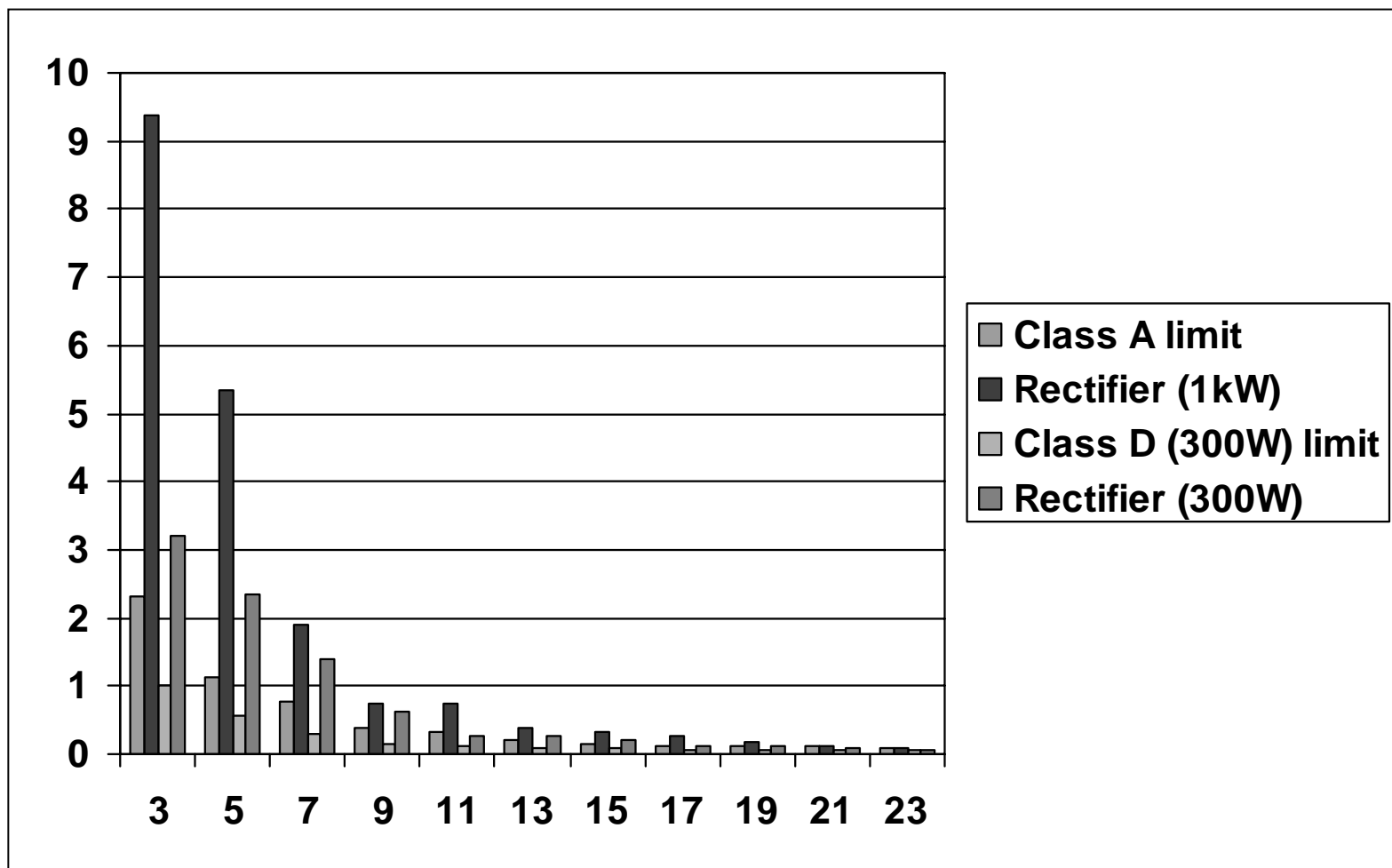
Classe C: Equipamentos de iluminação (exceto “dimmers” para lâmpadas incandescentes)

Classe D: TV, monitores e computadores com potência de entrada $P \leq 600W$

IEC 61000-3-2: Limites

Harmonic Order n	Class A Maximum current [A]	Class B Maximum current[A]	Class C % of fundamental	Class D (<600W) [mA/W]	
Odd Harmonics					
3	2.30	3.45	30.PF	3.4	
5	1.14	1.71	10	1.9	
7	0.77	1.155	7	1.0	
9	0.40	0.60	5	0.5	
11	0.33	0.495	3	0.35	
13	0.21	0.315	3	0.296	
15≤n≤39	2.25/n	3.375/n	3	3.85/n	
Even Harmonics					
2	1.08	1.62	2		
4	0.43	0.645			
6	0.3	0.45			
8≤n≤40	1.83/n	2.76/n			
PF: Power factor					

Distorção harmônica de retificador a diodo com filtro capacitivo



IEEE 519

Aplica-se a cargas conectadas no Ponto de Acoplamento Comum

Current Distortion Limits for General Distribution Systems (120V - 69kV)						
Maximum Harmonic Current Distortion in % of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonics limits above,
DC currents components are not allowed (e.g. due to half bridge rectifiers),
 I_{sc} = short circuit current, I_L = nominal load current, TDD = total demand distortion.

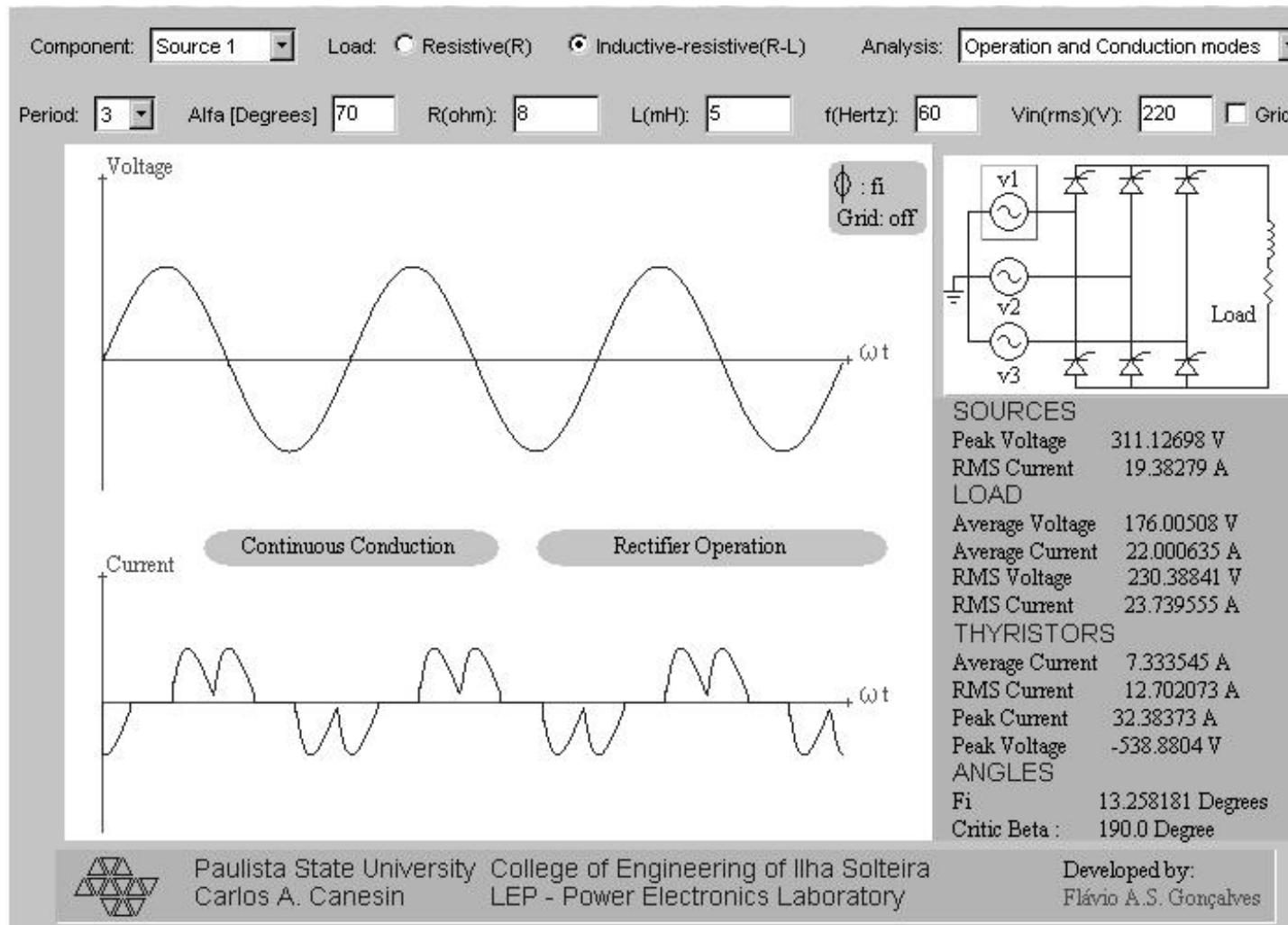
IEC 61000-3-4

“Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A per phase”.

Estágio 1: valores de emissão de correntes para conexão simplificada
 $(S_{\text{equ}} \leq S_{\text{sc}} / 33)$

Harmonic number n	Admissible harmonic current I_n/I_1^* %	Harmonic number n	Admissible harmonic current I_n/I_1^* %
3	21.6	21	≤ 0.6
5	10.7	23	0.9
7	7.2	25	0.8
9	3.8	27	≤ 0.6
11	3.1	29	0.7
13	2	31	0.7
15	0.7	≥ 33	≤ 0.6
17	1.2		
19	1.1	Even	$\leq 8/n$ or ≤ 0.6

Retificadores trifásicos



THD = 48.7%
FP = 0,35

Componentes harmônicos:

5^a = 44.2%
7^a = 15.4%
11^a = 10.5%
13^a = 4.9%

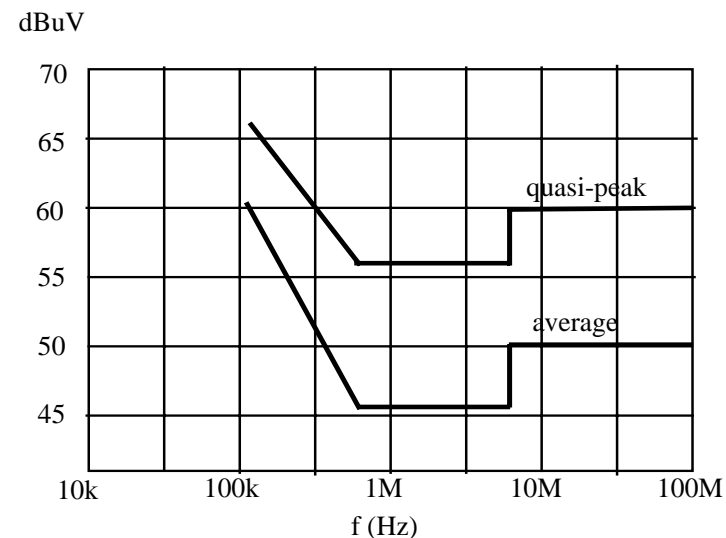
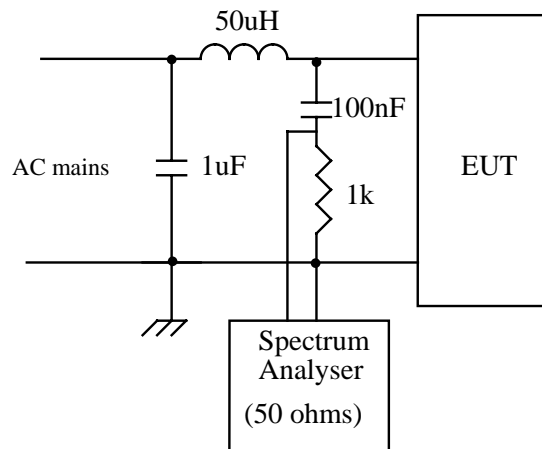
<http://www.dee.feis.unesp.br/gradua/elepot/ajuda/applets.html>

Interferência Electromagnética - IEM

São sinais de alta frequência sobrepostos à tensão ou à corrente de um sistema eletro-eletrônico.

A interferência pode se dar por cor condução ou por irradiação. Sua propagação para a rede elétrica pode prejudicar outros aparelhos conectados.

Sua origem principal é a comutação em alta frequência tipicamente presente nos conversores eletrônicos de potência.



Interferência Electromagnética - IEM

- Por exemplo, a norma IEC – CISPR 14 determina limites e métodos de medição de rádio-interferência características de aparelhos domésticos (ou similares) para aquecimento ou que utilizam motores, e ferramentas elétricas.
- Os limites referem-se à interferência conduzida, medida na rede, usando a “Line Impedance Stabilization Network” (LISN).
- A faixa de frequência é entre 148.5 kHz e 30 MHz.

Soluções da Eletrônica de Potência

A forma de onda da corrente pode ser melhorada (reduzindo a distorção harmônica e elevando o fator de potência) basicamente por dois tipos de conversores:

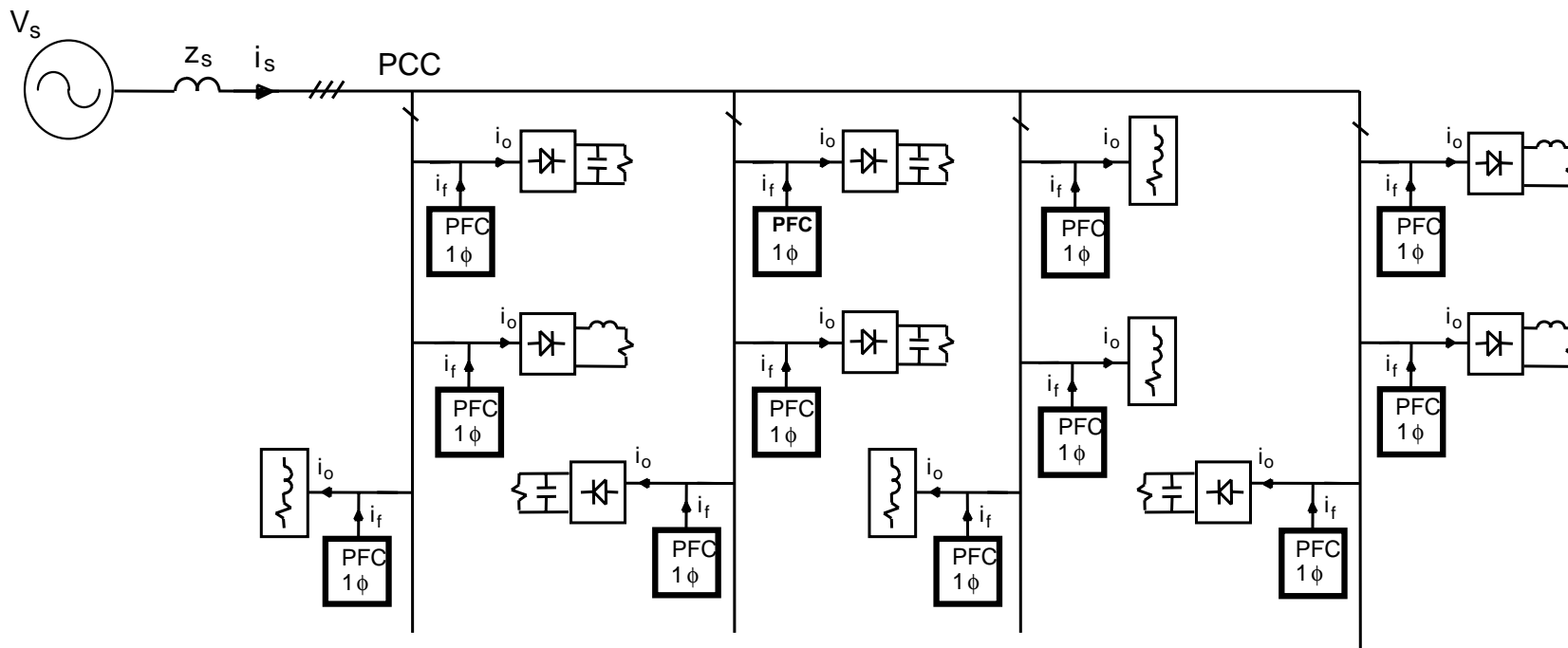
- **Retificadores com alto fator de potência (PFC)**
 - **Filtros Ativos de Potência (APF)**

O PFC é tipicamente aplicado em cargas individuais de baixa/média potência.

O APF é tipicamente usado para um grupo de cargas.

Soluções da Eletrônica de Potência

Se as normas IEC são consideradas, uma solução deve ser encontrada para cada carga, individualmente

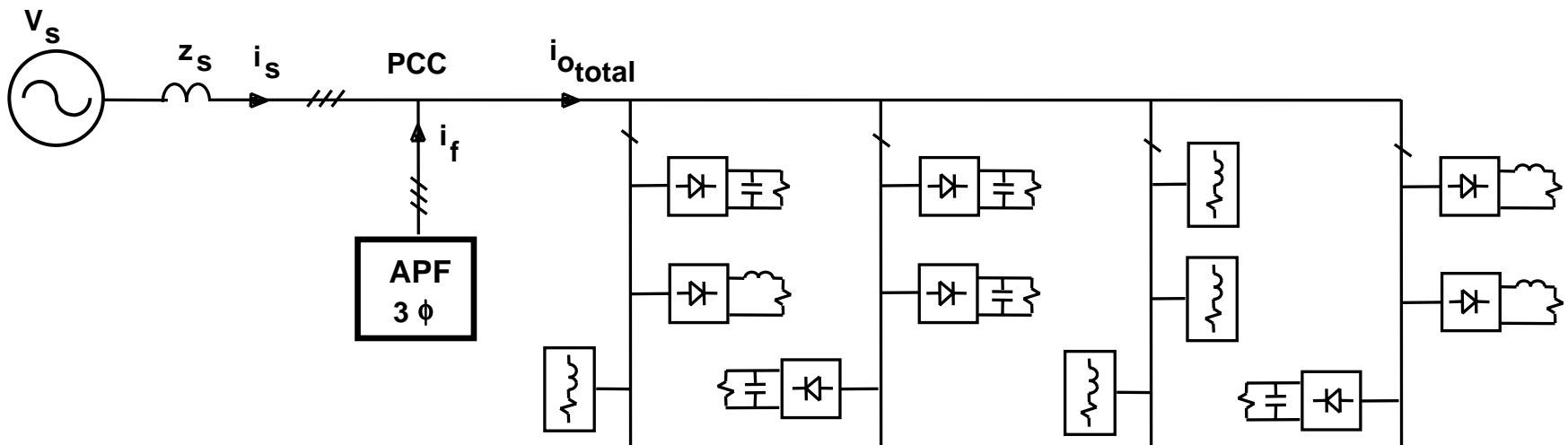


Neste caso é possível ter correntes senoidais e fator de potência unitário ao longo de todo o sistema.

Figuras cedidas por Fabiana Pötter de Souza

Soluções da Eletrônica de Potência

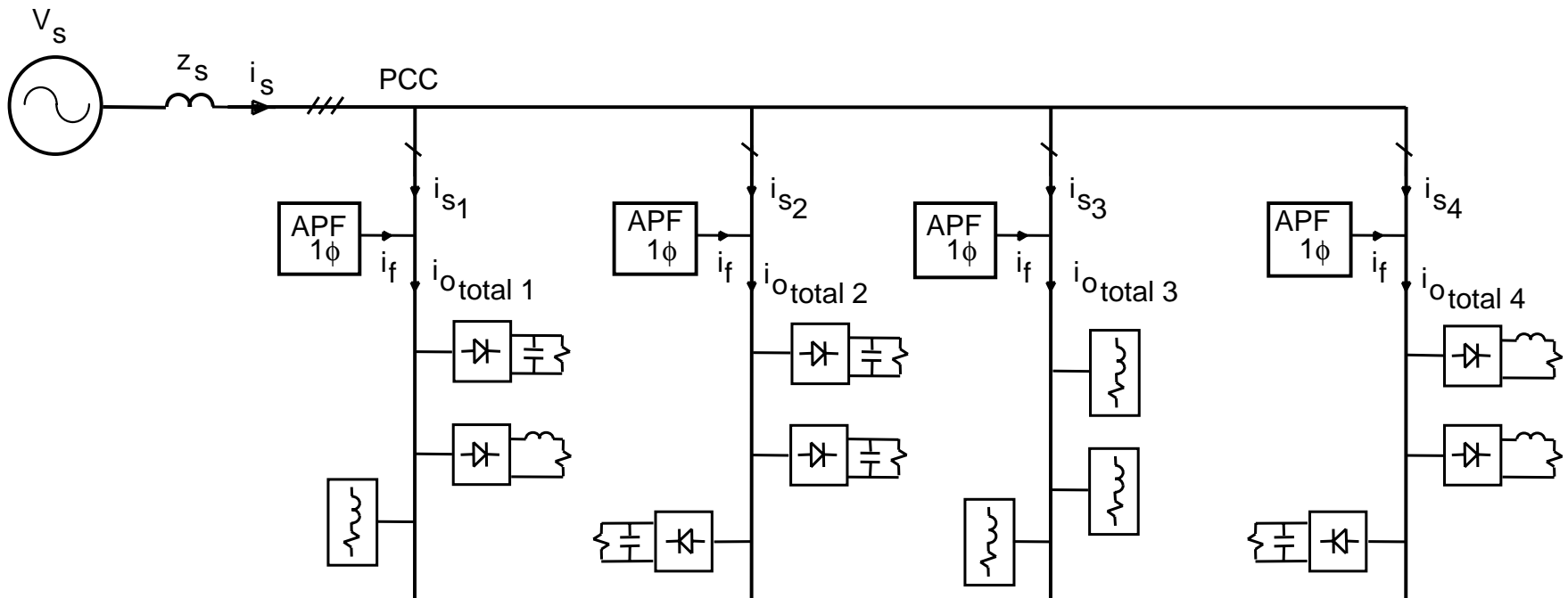
Com o enfoque IEEE, é possível compensar as distorções do conjunto de cargas.



A corrente será senoidal apenas a partir do PCC, permanecendo distorcida nos alimentadores internos.

Soluções da Eletrônica de Potência

Solução intermediária: Um filtro ativo por alimentador

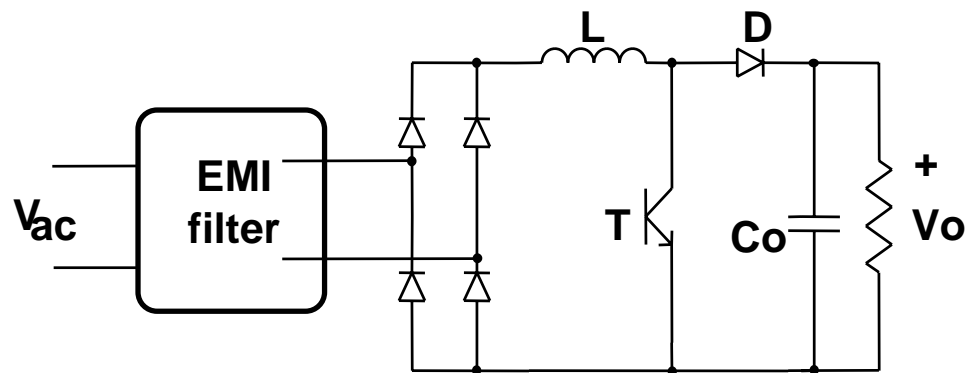


Fatores de decisão: Normas a serem consideradas, sensibilidade das cargas, custo.

Onde instalar?

Compensation place	Transformer Input	Transformer output	Load center	Equipment
Total losses without compensation (W)	8148	8148	8148	8148
Total losses with compensation(W)	8125	5378	4666	3346
% Losses after compensation	13.54	8.96	7.78	5.58
Losses reduction to 60kVA load (W)	23	2770	3482	4802
% losses reduction / 60kVA	0.04	4.62	5.8	8.0
Savings (US\$/year)	10	1213	1523	2101

Retificador com alto fator de potência

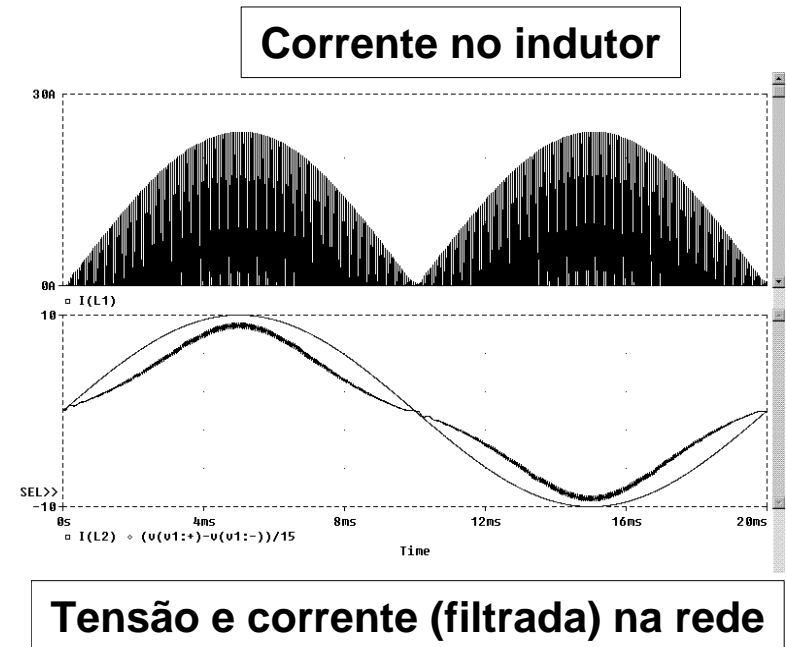


Boost PFC

No modo de condução descontínua, o conversor pode operar em malha aberta, e a corrente (filtrada) de entrada apresenta baixa distorção, com fator de potência ~ 0.98 .

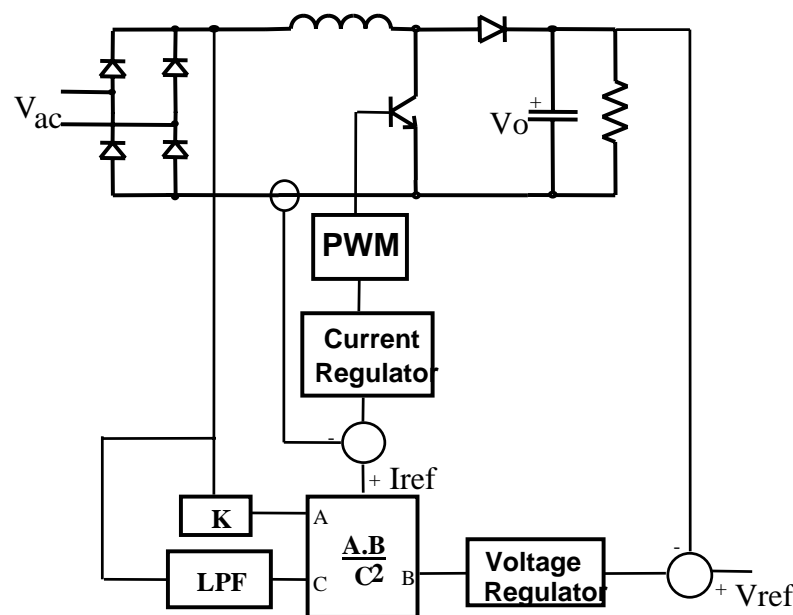
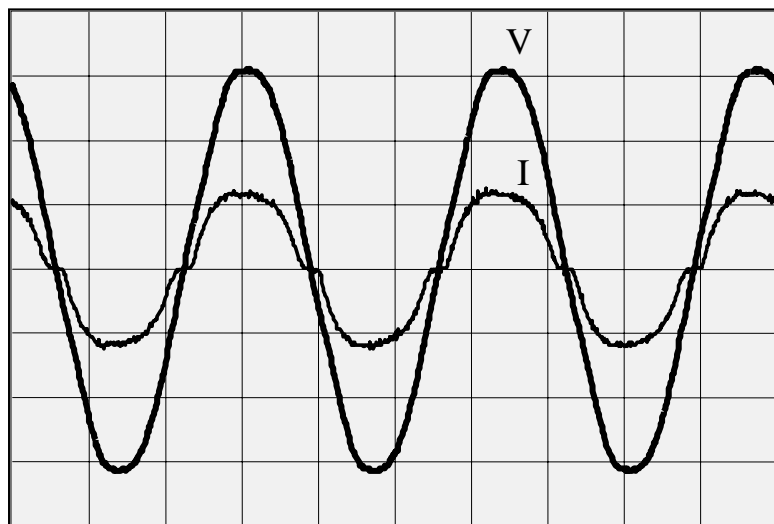
A razão cíclica do transistor é mantida constante, podendo ser ajustada para regular a tensão de saída.

Várias topologias de fontes chaveadas podem operar como PFC. A mais popular é a “boost”.



Retificador com alto fator de potência

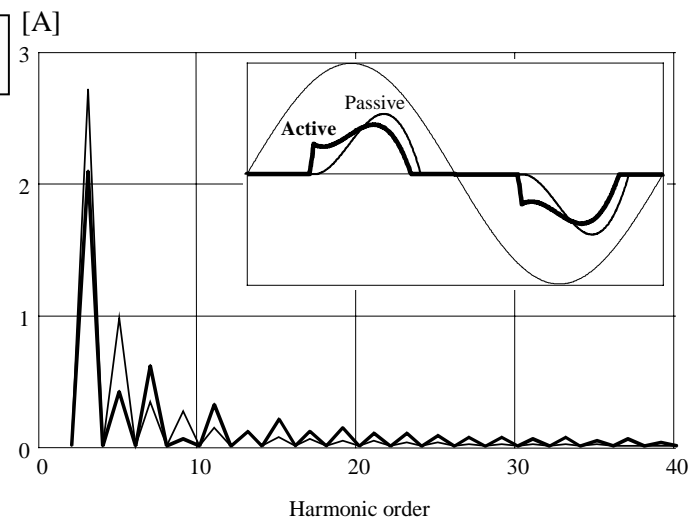
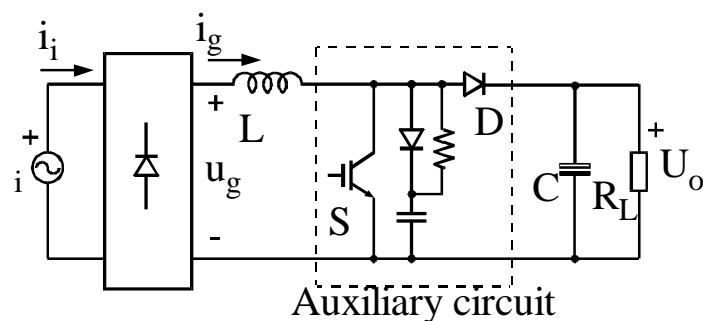
No modo de condução contínua a forma de onda da corrente é ainda menos distorcida, mas o conversor deve operar em malha fechada.



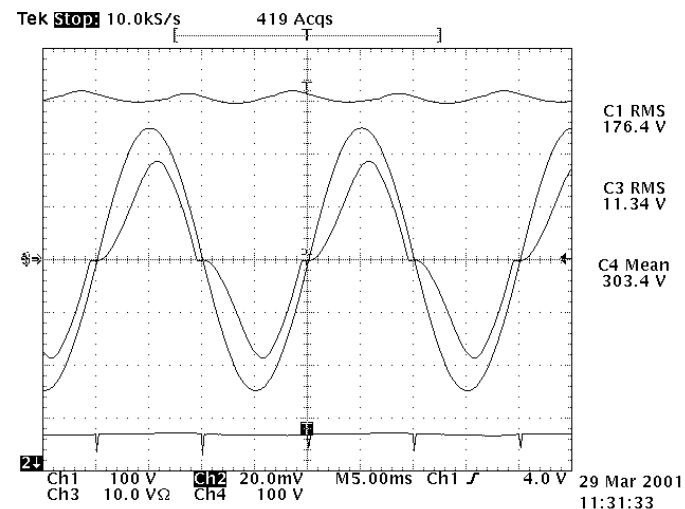
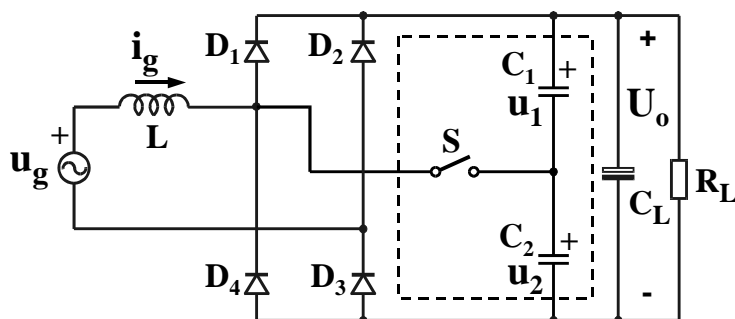
A referência de corrente segue a forma de onda da tensão. Sua amplitude é determinada pelo balanço de potência, monitorando-se a tensão de saída.

PFC com comutação em baixa frequência

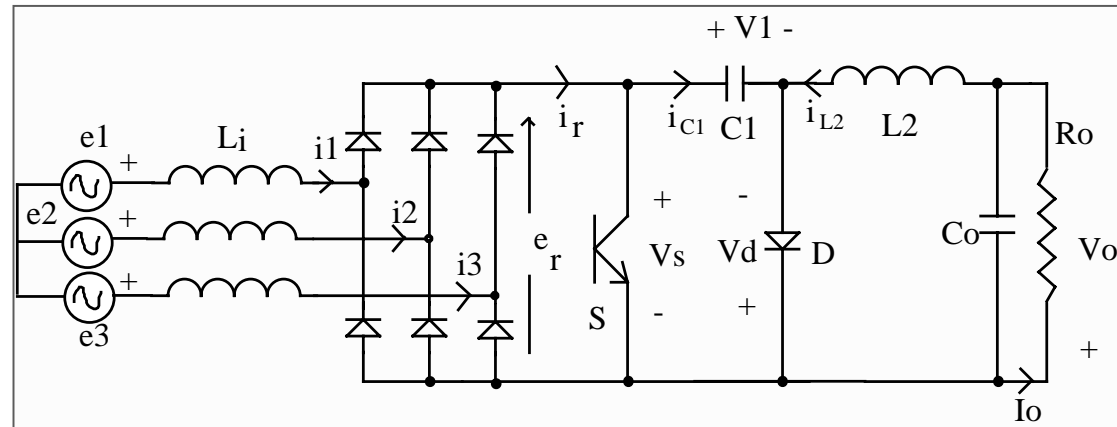
PFC boost com comutação em baixa frequência



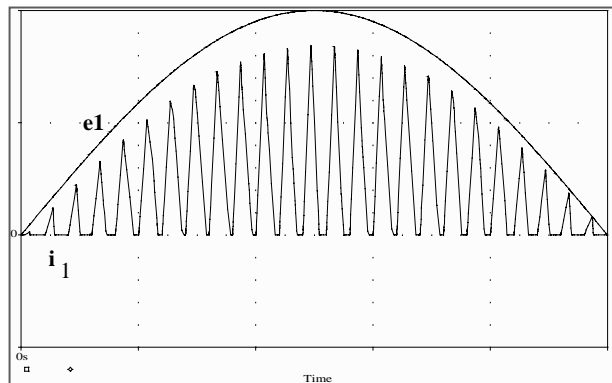
Circuito auxiliar para inclusão em retificador



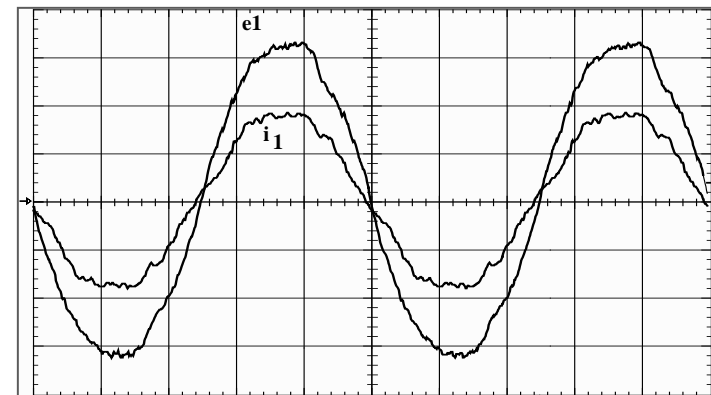
PFC trifásico



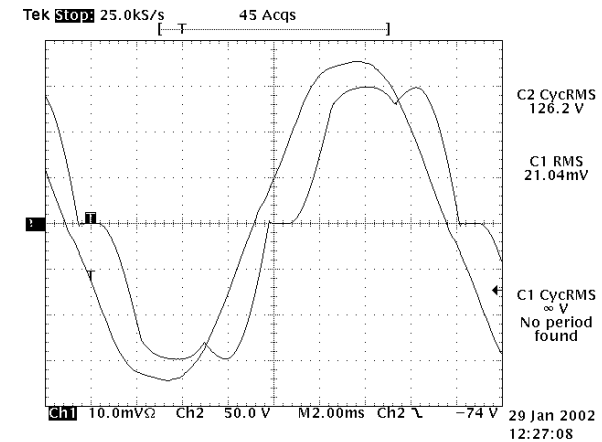
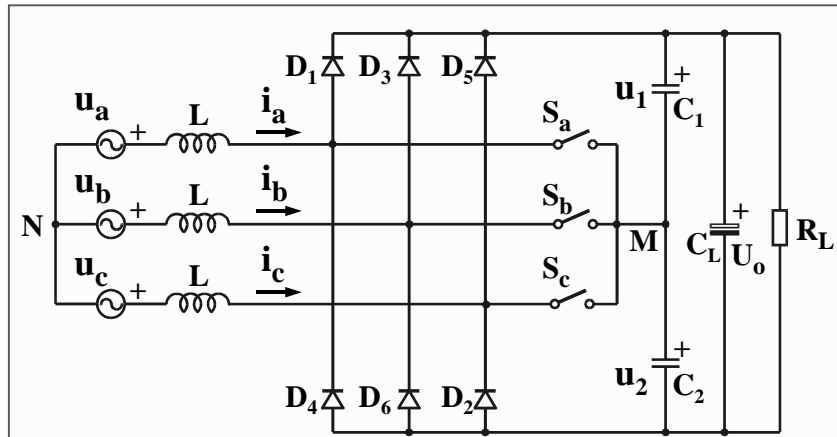
Corrente não filtrada



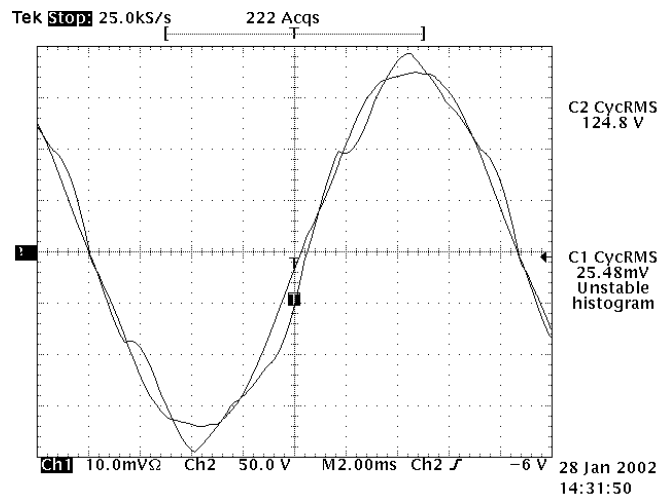
Tensão e corrente (filtrada) na rede



PFC trifásico com comutação em baixa frequência



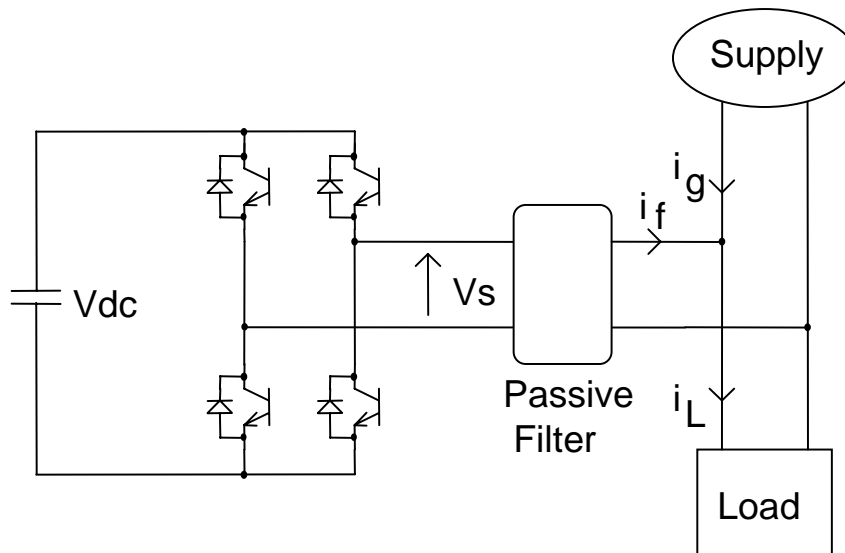
Sem o circuito auxiliar a tensão de saída é 241V, o fator de potência é 0.91, e a potência de saída é 7,1kW.



Com o circuito auxiliar a tensão de saída é regulada em 292 V, o fator de potência é 0,994 e a potência de saída é 9,6 kW. O rendimento é 96%. A corrente está em conformidade com a IEC61000-3-4 com indutâncias de entrada de 4 mH.

Filtro Ativo de Potência - APF

APF monofásico



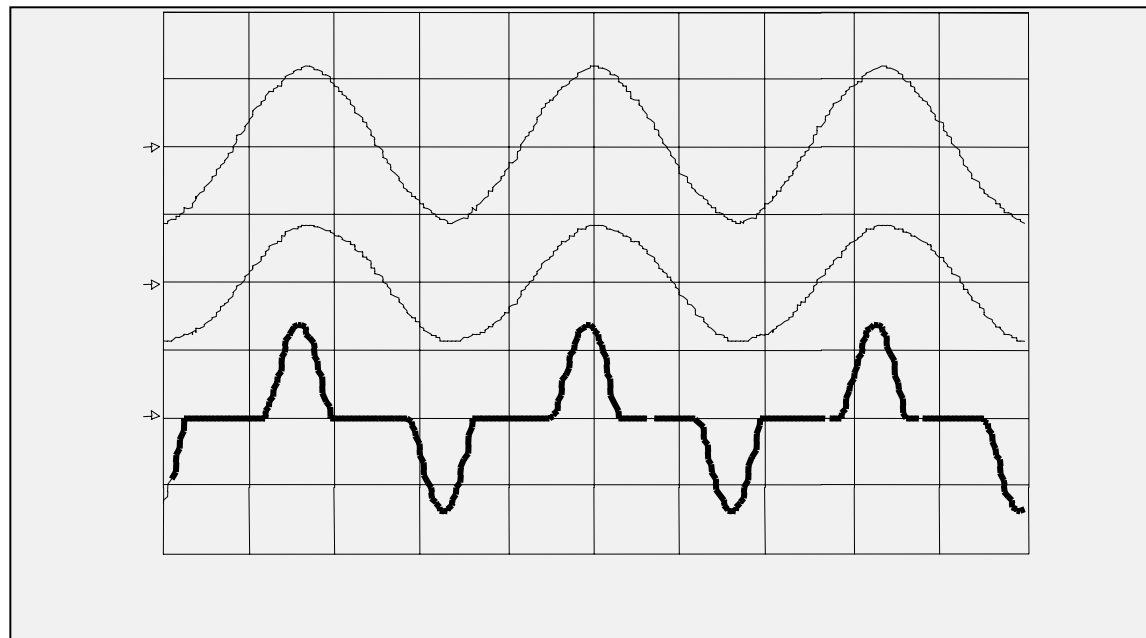
Uma vez que o APF não fornece potência ativa à carga, não é necessária uma fonte de potência.

O conversor é alimentado apenas a partir de um capacitor em seu lado CC, o qual deve ter sua tensão controlada.

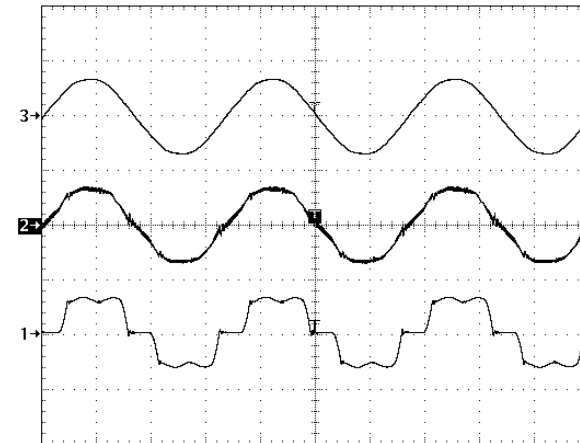
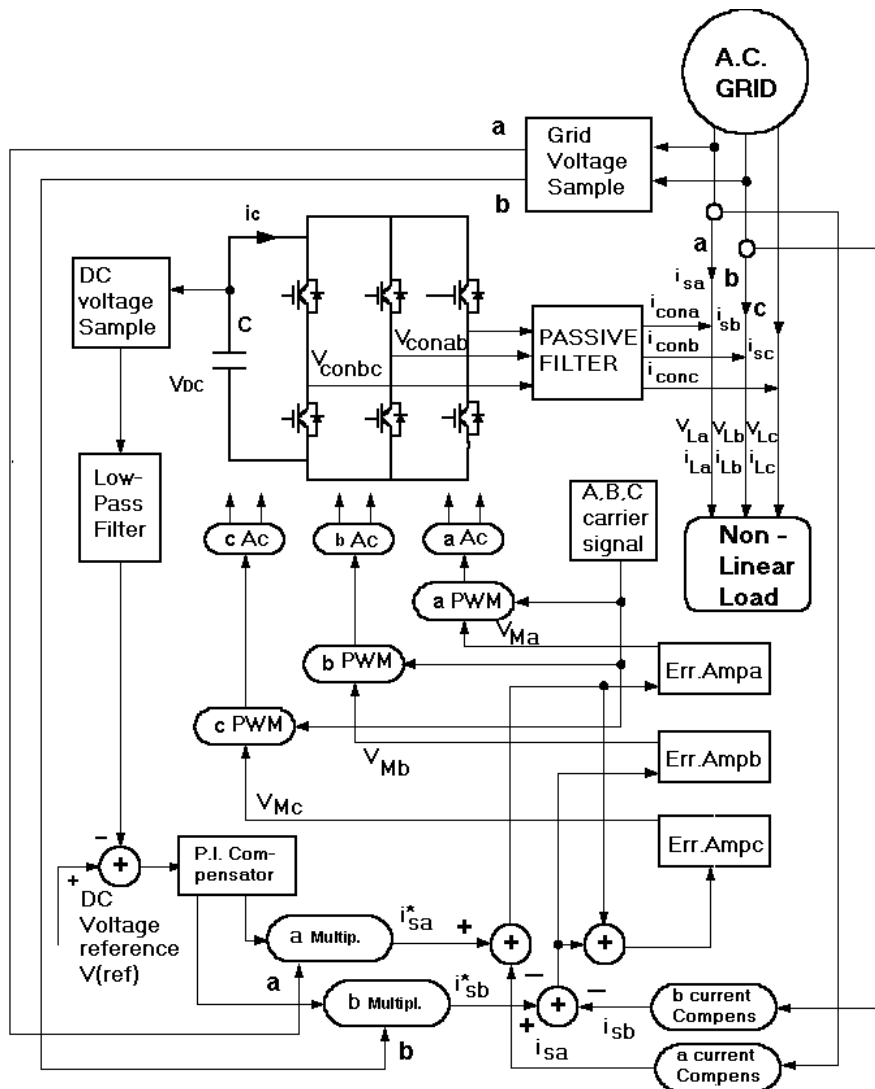
Filtro Ativo de Potência

Existem diversas maneiras de realizar o controle de um APF, de maneira a sintetizar as correntes necessárias à compensação desejada.

Uma destas é a Síntese de Cargas Resistivas, na qual a corrente da rede deve seguir a forma de onda da tensão, de modo análogo ao que se faz em um PFC.



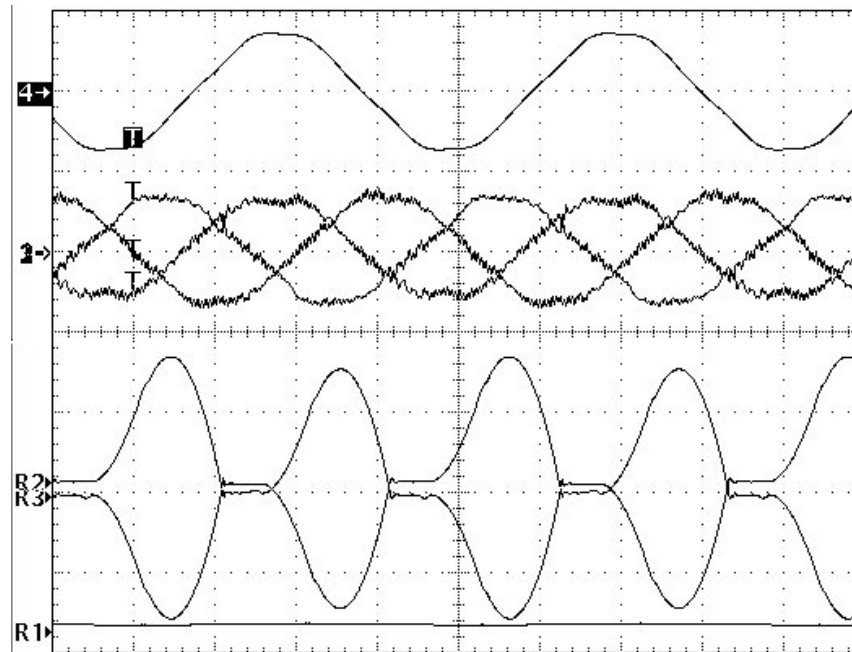
APF Trifásico



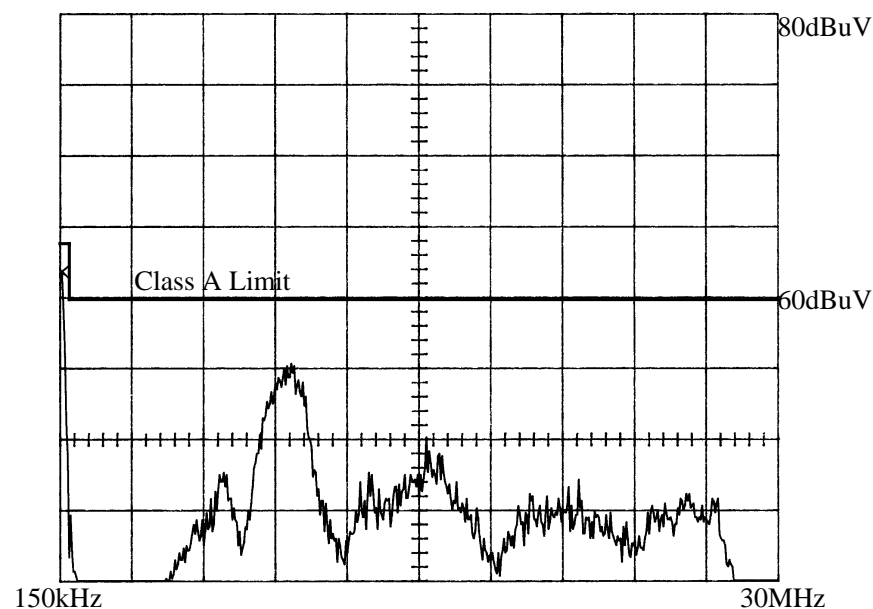
Tensão
Corrente
Carga

APF Trifásico

Apesar de alimentar uma carga monofásica, o APF trifásico reflete para a rede uma carga trifásica equilibrada que consome a mesma potência.



Interferência Eletromagnética

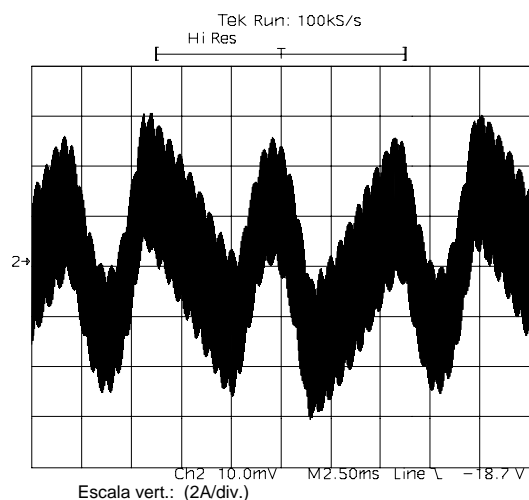


Principalmente em conversores com comutação em baixa frequência é importante considerar os limites de IEM impostos por normas tais como FCC, IEC-CISPR, VDE, etc. O problema de qualidade da energia elétrica não está limitado às baixas frequências.

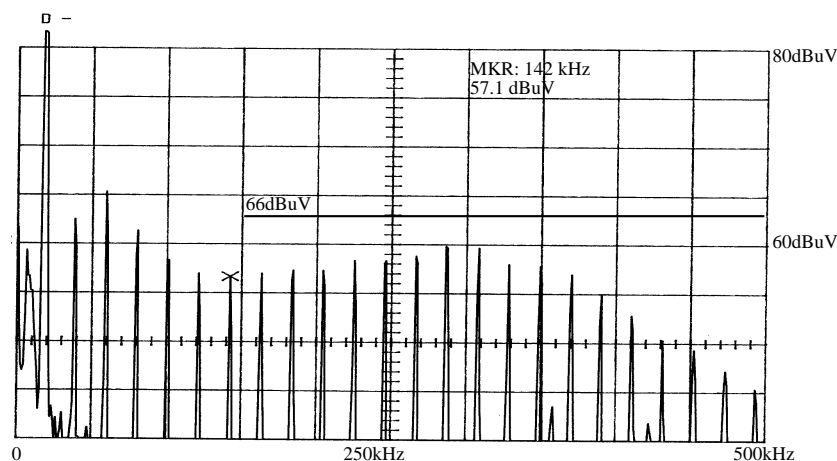
O espectro mostra o ruído conduzido pela linha devido a um APF. O nível de IEM está abaixo do limite (IEC-CISPR 11) devido a um filtro passivo passa-baixas na saída do inversor, que minimiza as componentes da comutação.

Interferência Eletromagnética

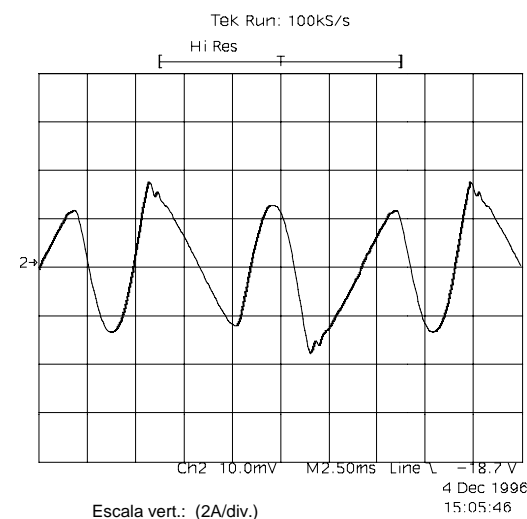
Corrente de saída do APF



Espectro da corrente filtrada, BW = 1 kHz.



Corrente após a filtragem



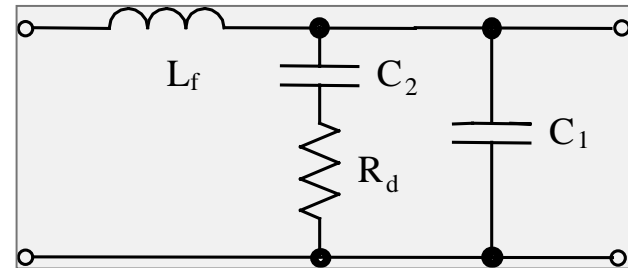
Considerações sobre o filtro de IEM

Considere-se um filtro de segunda ordem, com amortecimento. Este filtro atenua 40 dB/dec. Para uma dada atenuação desejada, a frequência de corte deve ser:

$$f_c = \frac{f_x}{10^{A_1/A_2}}$$

f_c é a freq. de corte,
 f_x é a frequência na qual se requer a atenuação A_1 .
 A_2 é a atenuação típica do filtro.

O máximo valor de $C_1 + C_2$ é $2.2 \mu\text{F}$, e para uma adequada atenuação da ressonância, $C_2 = 10C_1$.
Atenção à dissipação de potência em R_d !



$$R_d = \sqrt{\frac{L_f}{C_2}}$$

Considerações sobre o filtro de IEM

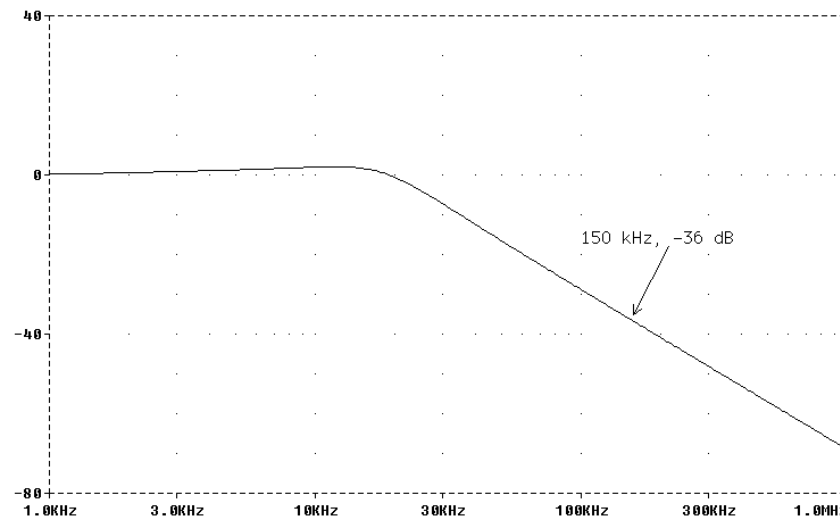
A norma IEC CISPR 11 determina limites para o ruído conduzido e se aplica a equipamentos de uso industrial, científico e médico (ISM). O limite para distúrbios na rede na faixa entre 150 kHz e 500 kHz é 66 dB/ μ V (valor médio), sendo medida de acordo com a IEC CISPR 16.

Por exemplo, para um conversor PFC boost no modo de condução descontínua, é possível prever o nível de IEM, digamos que seja 102 dB/ μ V.

A atenuação requerida em 150 kHz é de 36 dB/ μ V.

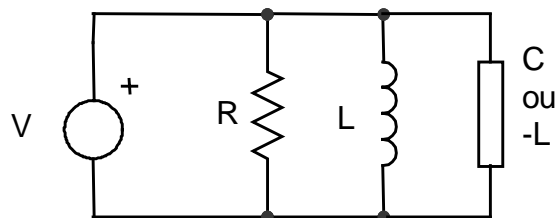
Um filtro de segunda ordem deve ter uma frequência de corte em $f_c=18.9$ kHz.

Adotando $C_1=220$ nF e $C_2=2$ μ F, a indutância e a resistência de amortecimentos são: 322 μ H e 38 Ω .

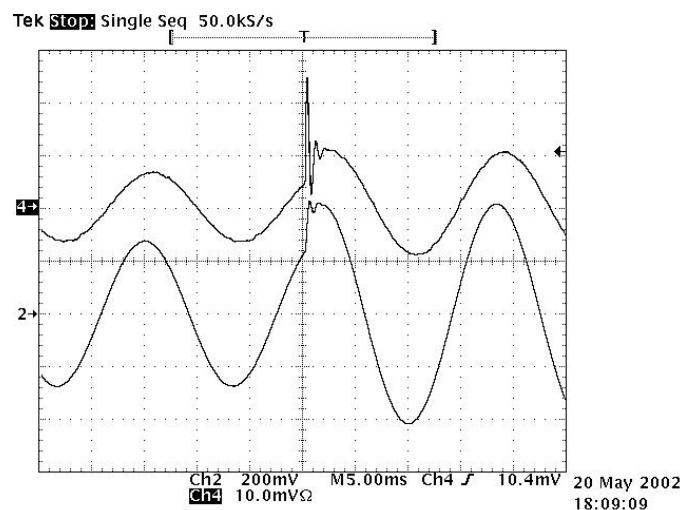


Outras aplicações de Eletrônica de Potência

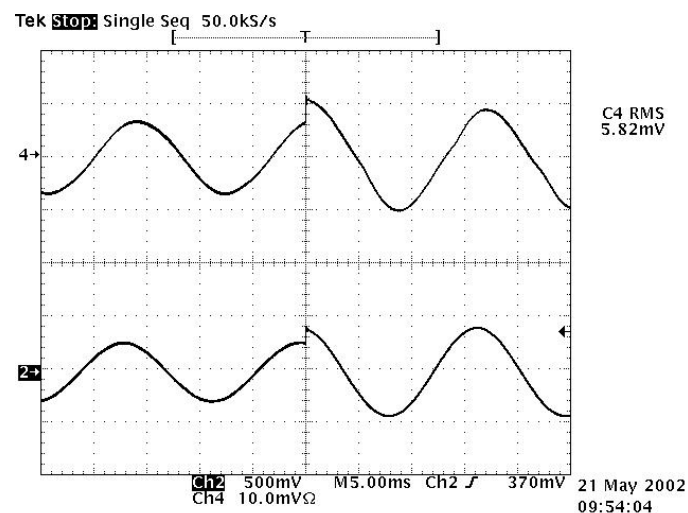
Síntese de impedâncias: reatância indutiva negativa



Resposta de circuit RLC paralelo a uma variação da tensão.

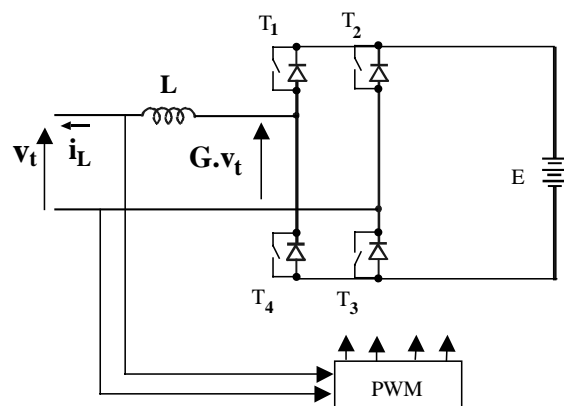


Resposta de circuit RL-L paralelo a uma variação da tensão.

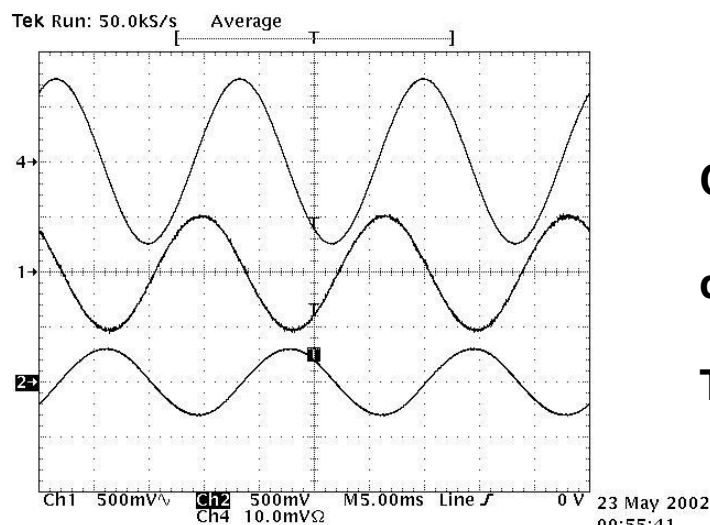
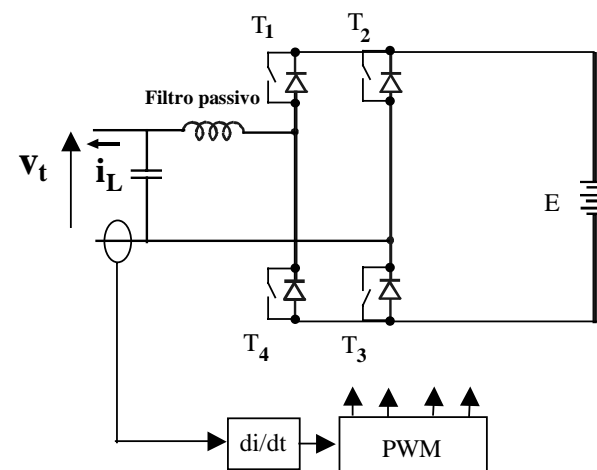


Outras aplicações de Eletrônica de Potência

Para conexão em derivação –
conversor bootstrap



Para conexão série



Corrente

di/dt

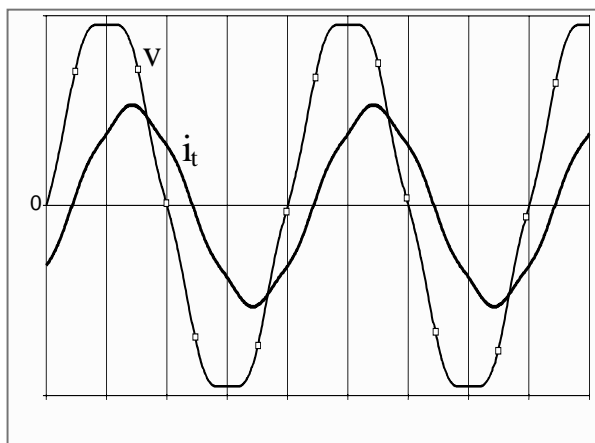
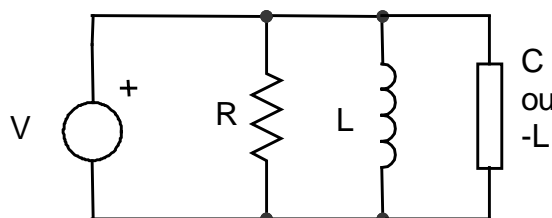
Tensão sintetizada ($-K.di/dt$)

Aplicações em derivação:

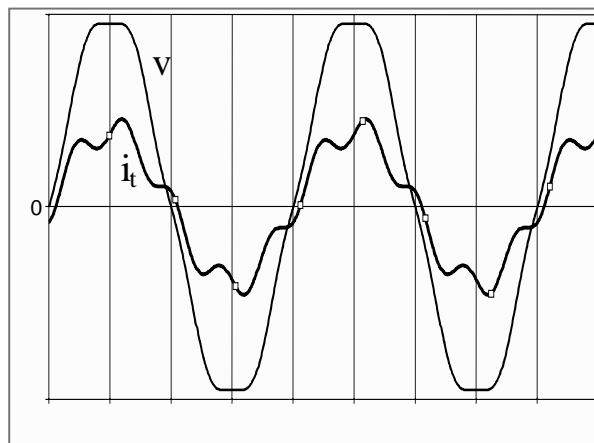
Correção de FP, regulação de tensão

Capacitância x indutância negativa

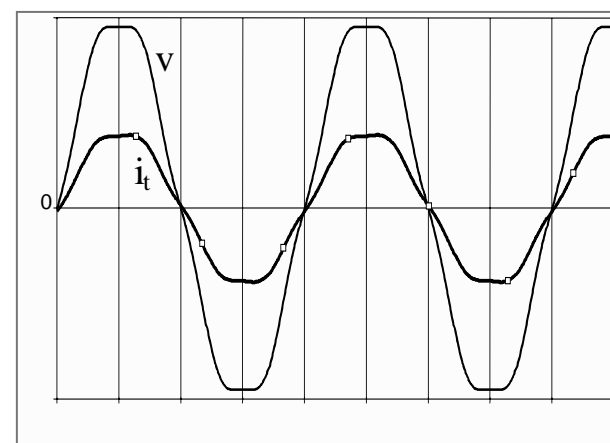
5ª harmonica
5%



Circuito sem compensação



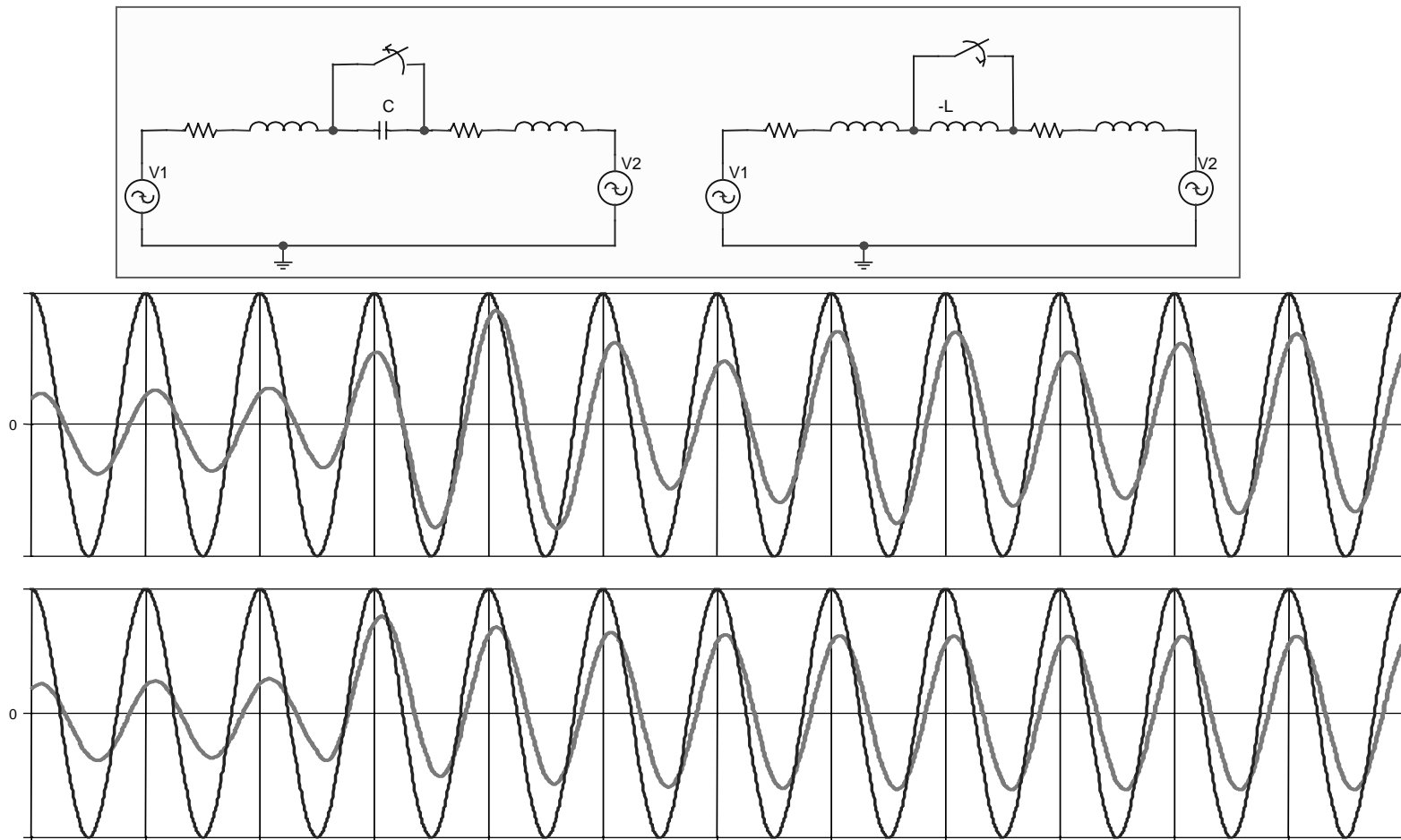
Compensação capacitiva



Compensação com Ind. negativa

Aplicações Série:

Controle de fluxo de potência, regulação de tensão, defasador



Conclusões

- Nos últimos anos muitas novas tecnologias foram incorporadas aos conversores eletrônicos de potência para eliminar ou minimizar os problemas de qualidade da energia elétrica.
- Os retificadores com alto fator de potência são uma importante tecnologia para reduzir a distorção da corrente (e da tensão).
- Outro enfoque é o de manter os retificadores tradicionais e compensar a distorção total produzida por um grupo de cargas. Neste caso, faz-se uso de filtros ativos de potência.
- Qualquer destas alternativas aumentam a complexidade e o custo das instalações.
- Além das melhorias nos componentes semicondutores, das novas soluções topológicas e das estratégias de controle que foram desenvolvidas para estas aplicações, outros importantes avanços podem ser identificados, como novas teorias de potência elétrica, novas técnicas de medição de IEM conduzida, novos materiais para realização de filtros de IEM, etc.

José Antenor Pomilio
antenor@dsce.fee.unicamp.br
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor>

Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência
SOBRAEP
<http://www.sobraep.org.br>