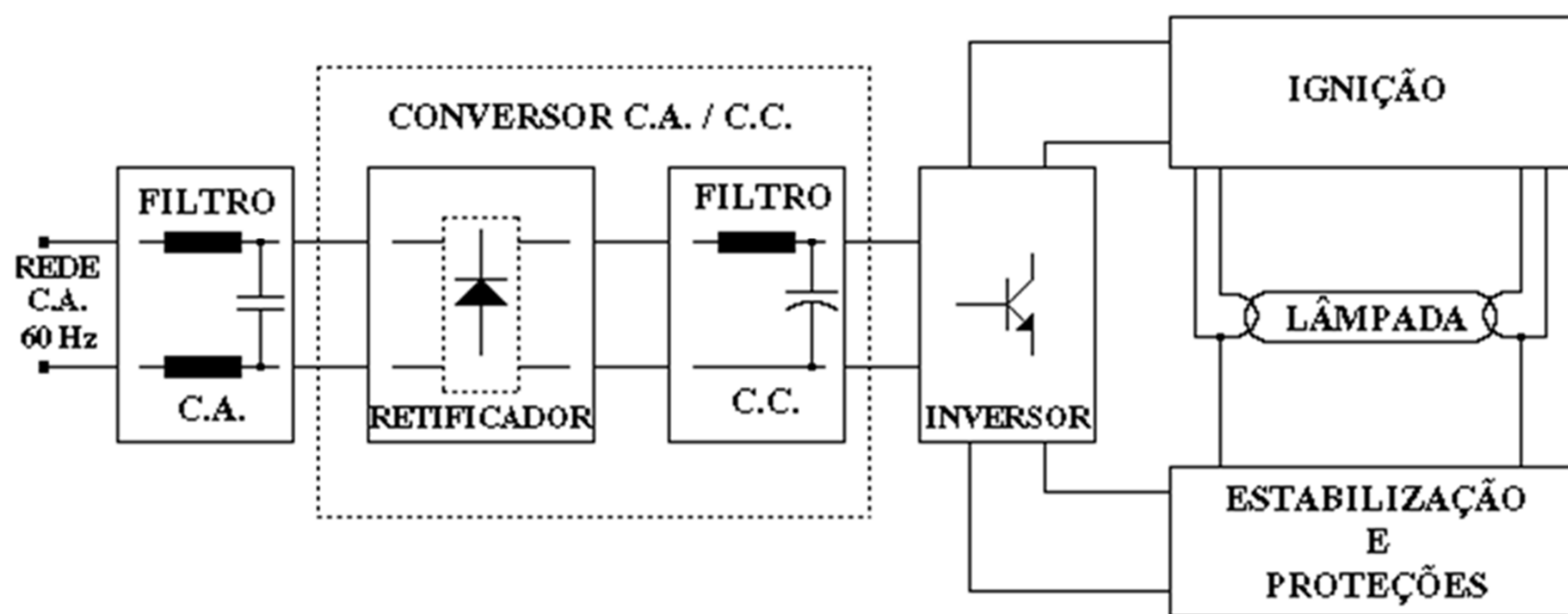


# Reator Eletrônico - Diagrama de blocos



# Blocos funcionais

## Conversor CA/CC

- Regulação tensão / corrente CC
- Filtragem lado CA – comp. harmônicos síncronos c/ a rede
  - comp. de radio frequência
- Filtragem lado CC – nível de ondulação compatível

## Inversor

- Geração de tensão/corrente em A.F.
  - Ignição de lâmpada (aquecimento de filamentos + alta tensão)
  - Estabilização da corrente na lâmpada
  - Proteção da lâmpada e da rede
- Tipos:
- não ressonante
  - ressonante

# Conv. CA/CC - Filtragem

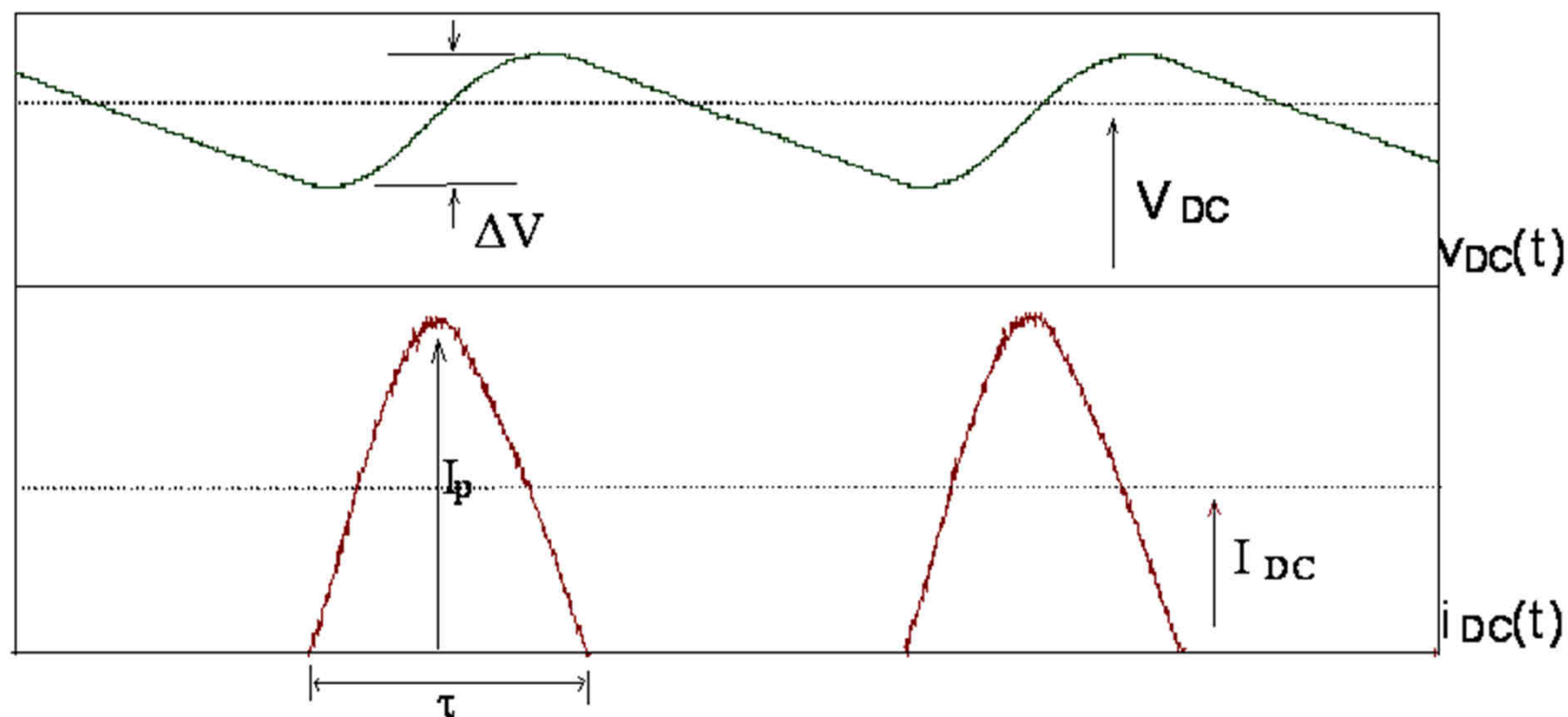
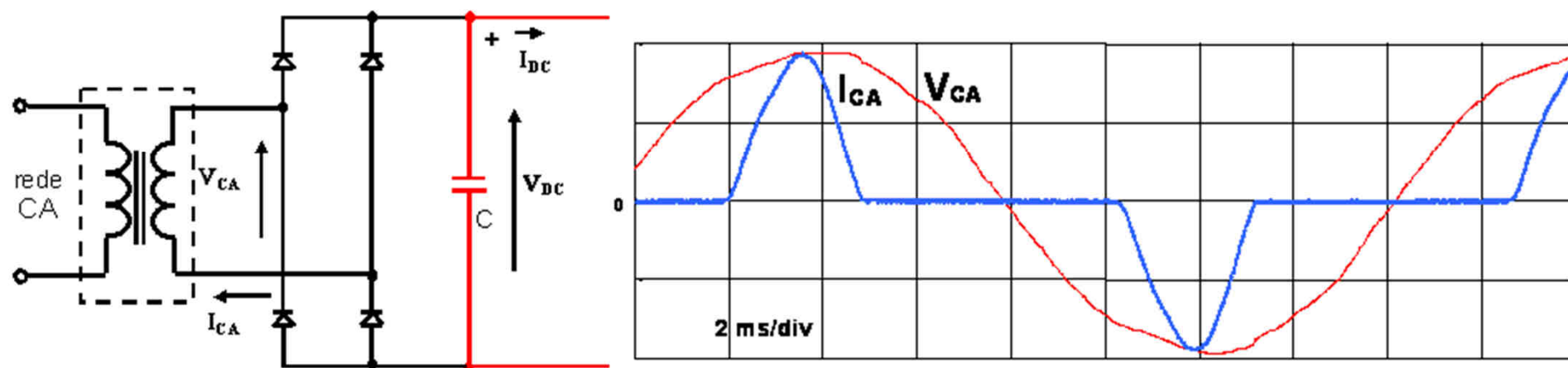
## – PASSIVA

- Filtro C
- Filtro LC
- Filtro LCC
- Filtro LC paralelo lado CA
- Valley-fill
- Filtro C realimentado pelo inversor

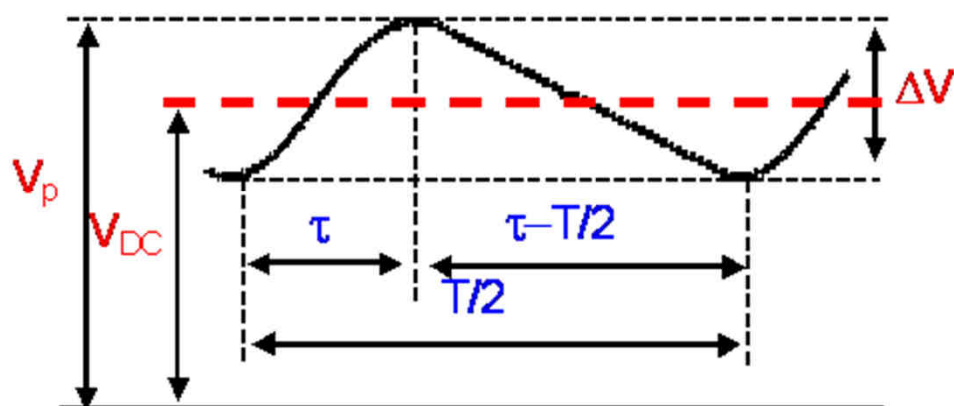
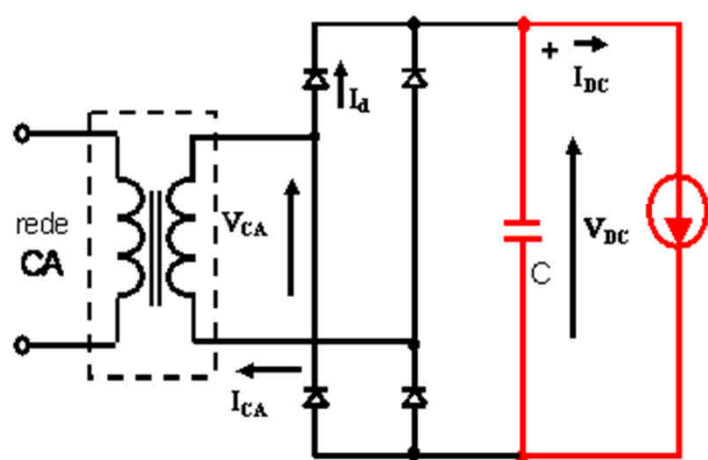
## – ATIVA

- Conversor PFC tipo “boost”

# Conv. CA/CC - Filtro capacitivo



# Filtro capacitivo



## Hipóteses:

- Carga modelada como  $I_{DCmax} = \text{constante}$
- Corrente no diodo aproximada por pulso senoidal

$$V_{DC} = V_p - \frac{\Delta V}{2} - 2V_{\text{diodo}}$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi} \cdot \cos^{-1} \frac{V_{DC} - \frac{\Delta V}{2}}{V_{DC} + \frac{\Delta V}{2}}$$

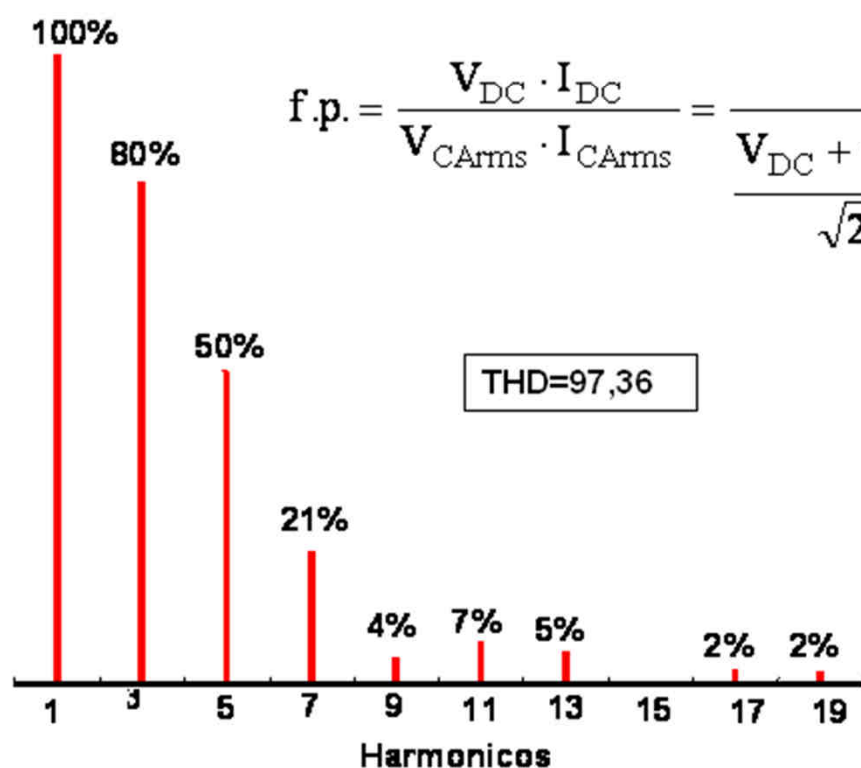
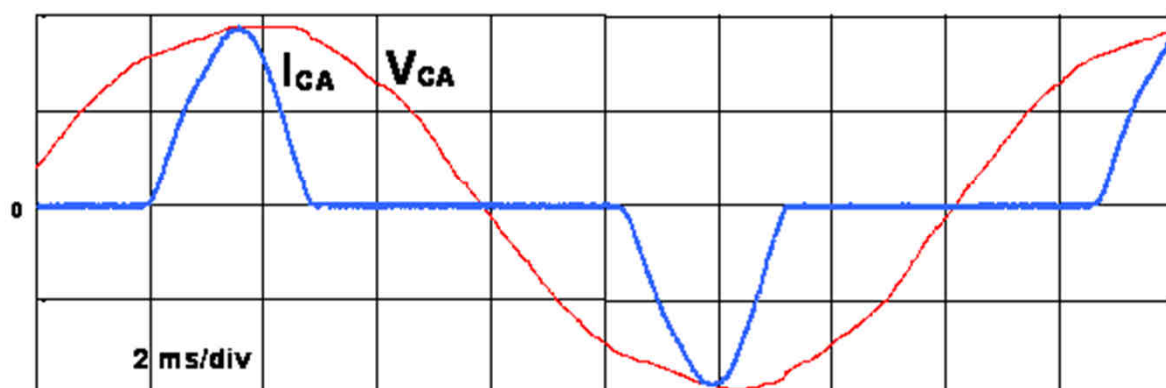
$$I_p = \frac{\pi \cdot T}{2\tau} I_{DC}$$

$$\Delta V = \frac{(T - 2\tau)}{2C} \cdot I_{DC}$$

$$I_{d_{RMS}} = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{T}{2\tau}} \cdot I_{DC}$$

- T - Período da tensão da rede CA (ms).
- $\tau$  - Intervalo de condução (ms)
- $V_p$  - Valor de pico da tensão no 2º trafo (V)
- $V_{\text{diodo}}$  - Queda de tensão direta de um diodo (V)
- $I_p$  - Valor de pico da corrente no diodo (A)
- $d_{RMS}$  - Valor eficaz da corrente no diodo (A)
- $I_{DC}$  - Corrente média na carga (A)
- $V_{DC}$  - Tensão média na carga (V)
- $\Delta V$  - Ondulação de tensão pico a pico (V)

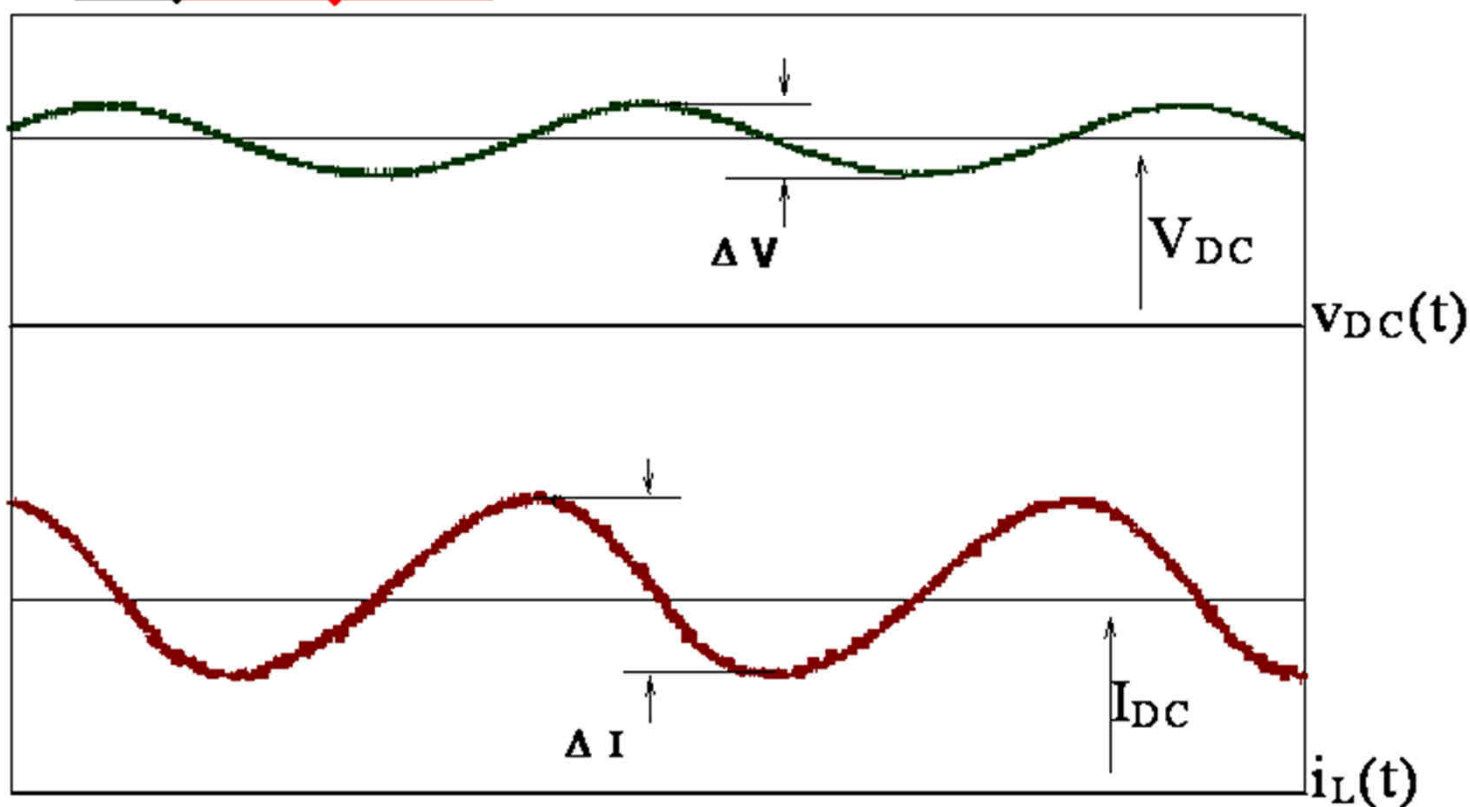
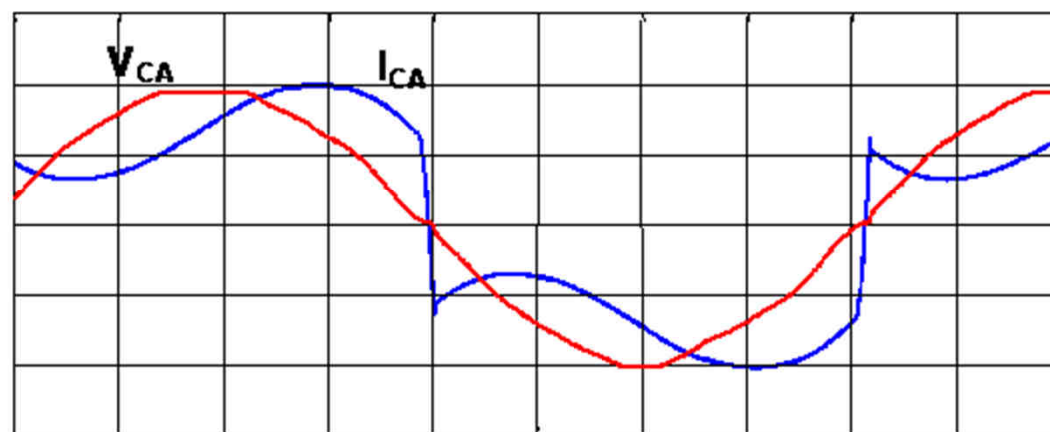
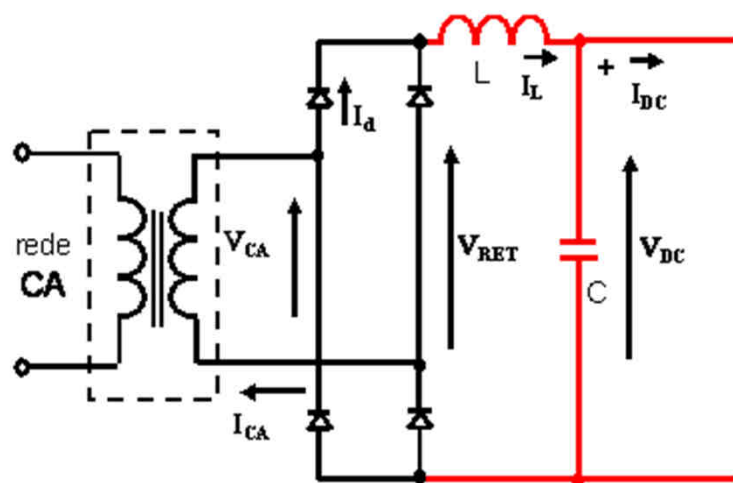
# Filtro capacitivo – lado CA



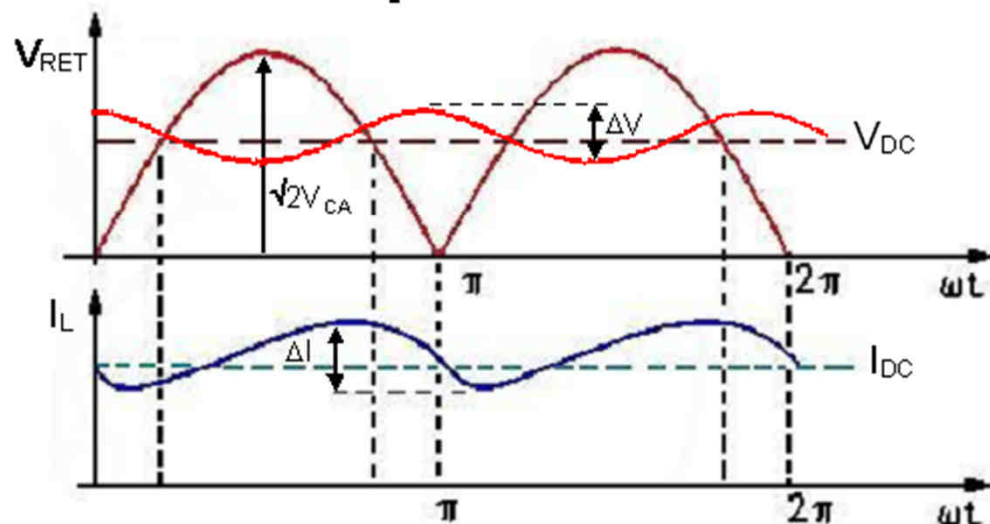
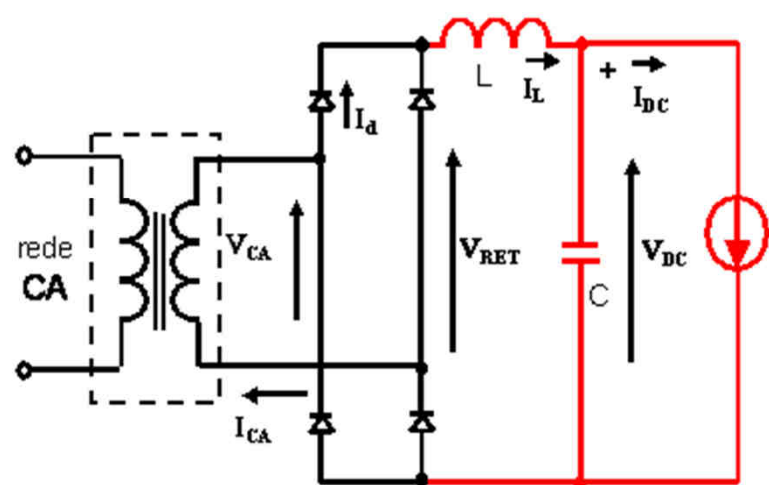
$$f.p. = \frac{V_{DC} \cdot I_{DC}}{V_{CArms} \cdot I_{CArms}} = \frac{V_{DC} \cdot I_{DC}}{\frac{V_{DC} + \Delta V/2}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{T}{2\tau}} I_{DC}} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{T}} \cdot \frac{V_{DC}}{V_{DC} + \Delta V/2}$$

$$P_{TRAFO} = \sqrt{2} \cdot I_{d_{rms}} \cdot V_{CArms}$$

# Conv. CA/CC - Filtro indutivo-capacitivo



# Filtro indutivo-capacitivo



**Hipóteses:** Tensão média na carga constante  
 Ondulação de tensão na carga senoidal  
 Continuidade de corrente no indutor

$$\Delta I = \frac{0.596 \cdot V_{CA}}{\omega_{rede} \cdot L}$$

$$\Delta V = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{CA}}{4 \cdot \omega_{rede}^2 \cdot L \cdot C}$$

$$I_{Lrms} = \sqrt{I_{DC}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}}$$

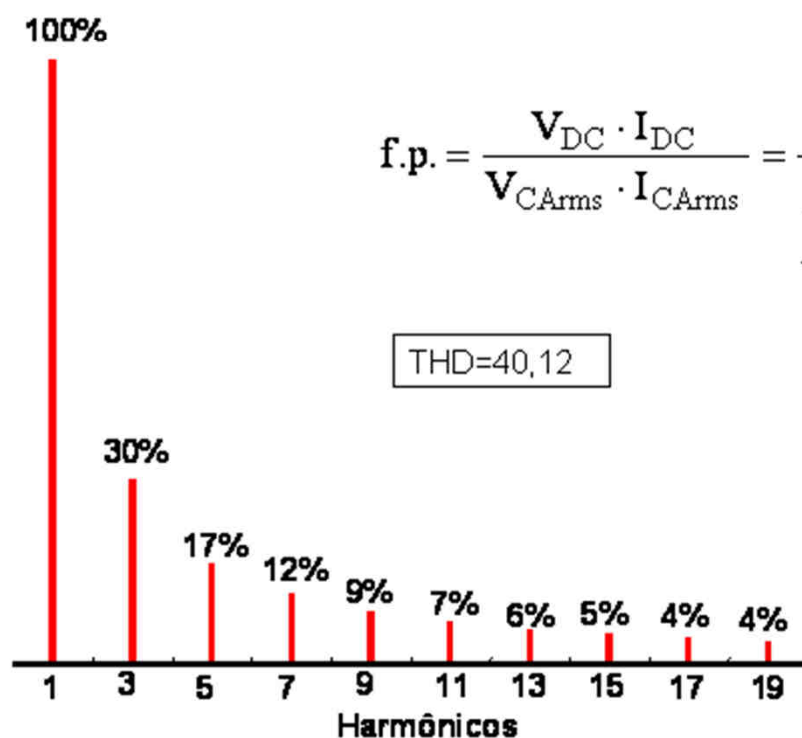
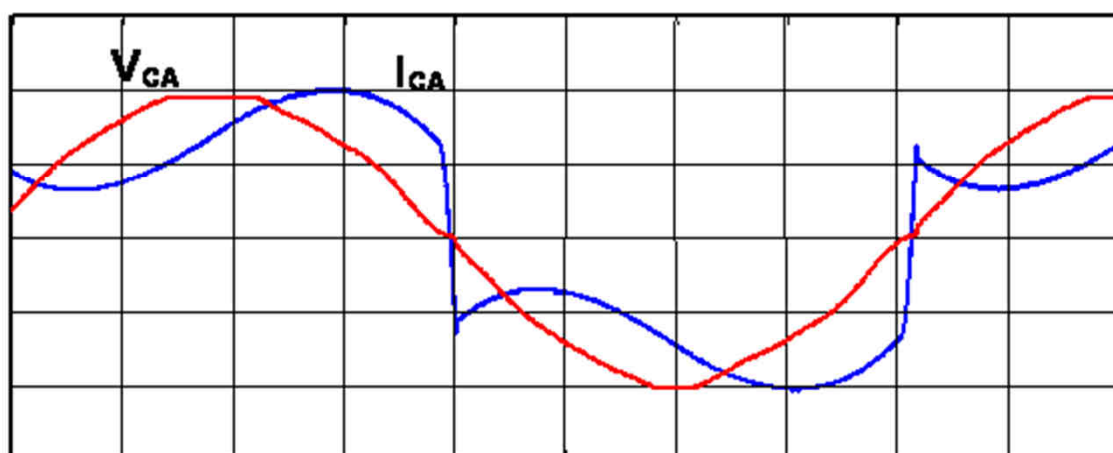
$$I_{d_p} = I_{DC} + \frac{\Delta I}{2} \quad I_{d_{rms}} = \frac{I_{Lrms}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{CA} - 2 \cdot V_{diodo}$$

- $V_{CA}$  - Valor eficaz da tensão CA (V)
- $V_{diodo}$  - Queda de tensão direta de um diodo (V)
- $I_{d_p}$  - Valor de pico da corrente no diodo (A)
- $I_{d_{RMS}}$  - Valor eficaz da corrente no diodo (A)
- $I_{DC}$  - Corrente média na carga (A)
- $V_{DC}$  - Tensão média na carga (V)
- $\Delta V$  - Ondulação de tensão pico a pico (V)
- $\Delta I$  - Ondulação de corrente pico a pico (A)
- $\omega_{rede}$  - Freqüência angular da rede (rad/s)



# Filtro indutivo-capacitivo – lado CA

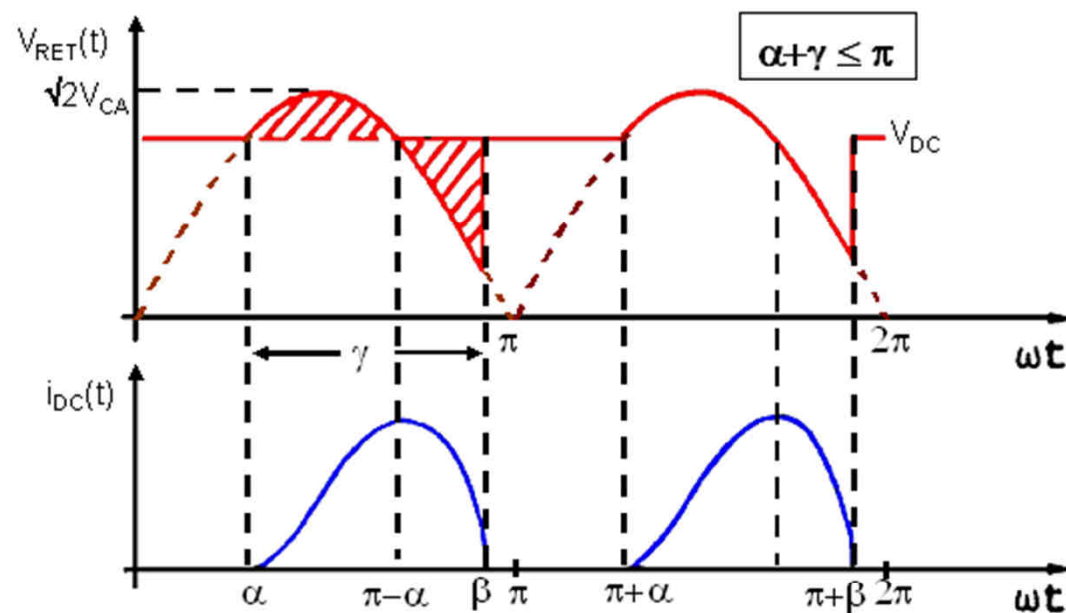


## Continuidade de corrente no indutor

$$f.p. = \frac{V_{DC} \cdot I_{DC}}{V_{CArms} \cdot I_{CArms}} = \frac{V_{DC} \cdot I_{DC}}{\frac{\pi}{2} \cdot V_{DC} + 2 \cdot V_{diodo} \cdot \sqrt{I_{DC}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{DC}}{\pi \cdot \sqrt{I_{DC}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}}}$$

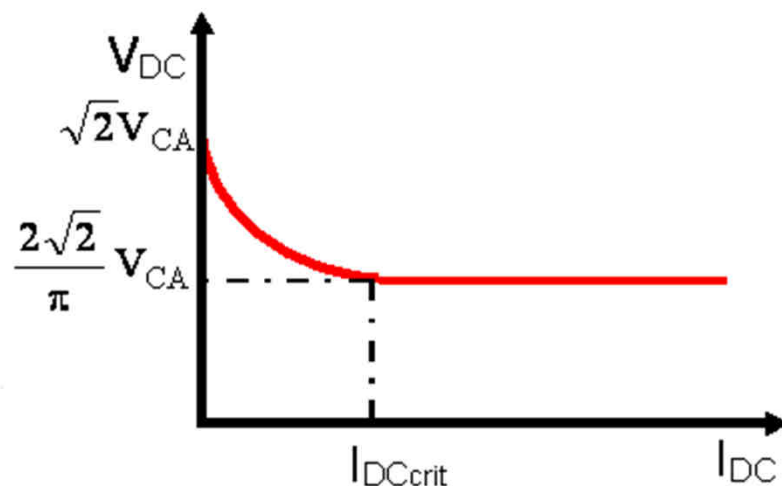
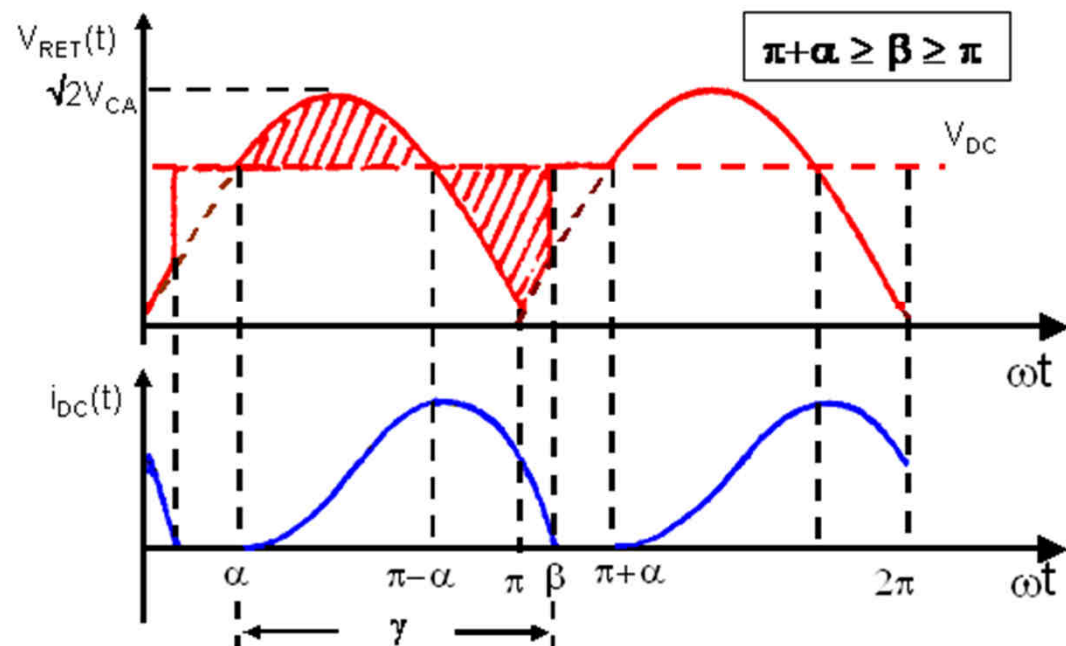
$$P_{TRAFO} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot V_{DC} + 2 \cdot V_{diodo} \cdot \sqrt{I_{DC}^2 + \frac{\Delta I^2}{12}}}{\sqrt{2}}$$

# Filtro indutivo-capacitivo – cor. descontínua

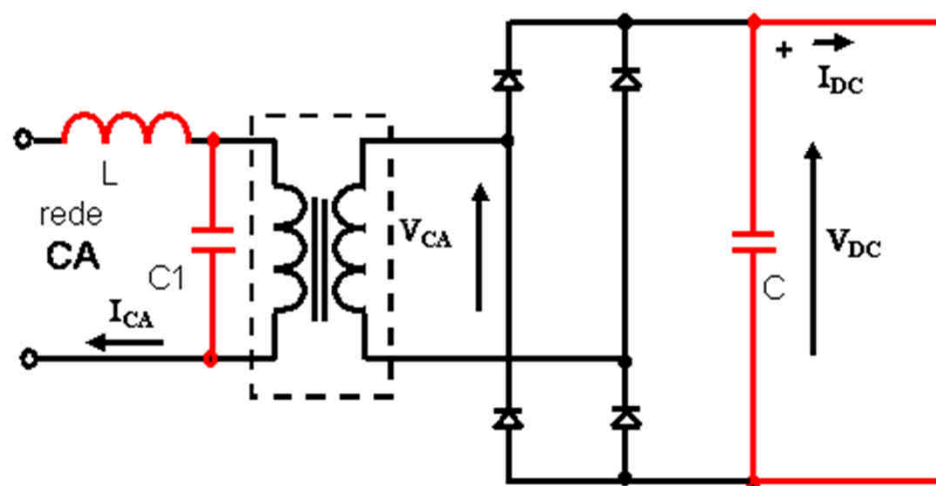


Condição crítica  $\Delta I = 2I_{DCcrit}$

$$L_{crit} = \frac{R_{eq}}{3 \cdot \omega_{rede}} = \frac{1}{3 \cdot \omega_{rede}} \cdot \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{CA}}{I_{DCcrit}}$$

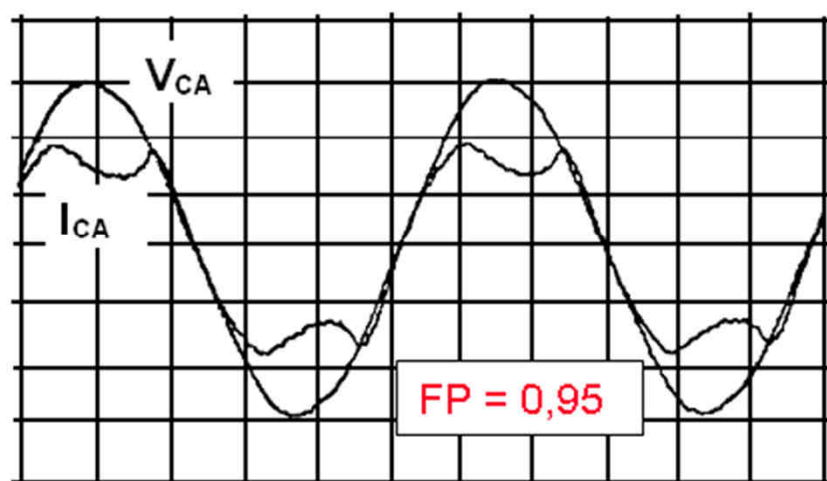


# Conv. CA/CC - Filtro LCC



L e C1 formam circuito ressonante  
Possibilidade de  $V_{DC} > V_{CApico}$

Dimensionamento a partir de curvas em função de



Carga - inversor ressonante

$$\frac{I_{DC}}{I_{curto}}$$

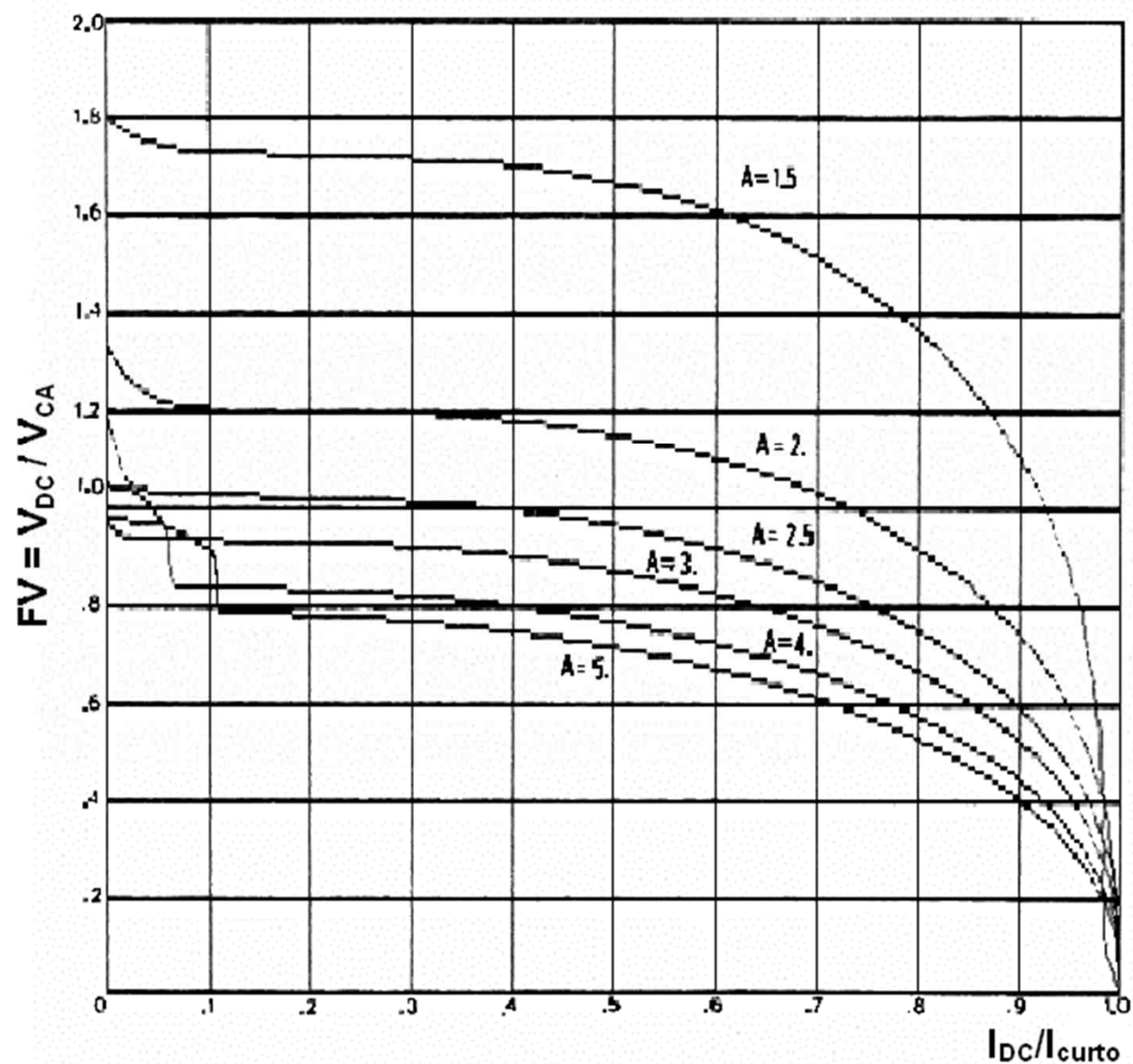
sendo

$$I_{curto} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{CA}}{\omega_{rede} \cdot \pi \cdot L}$$

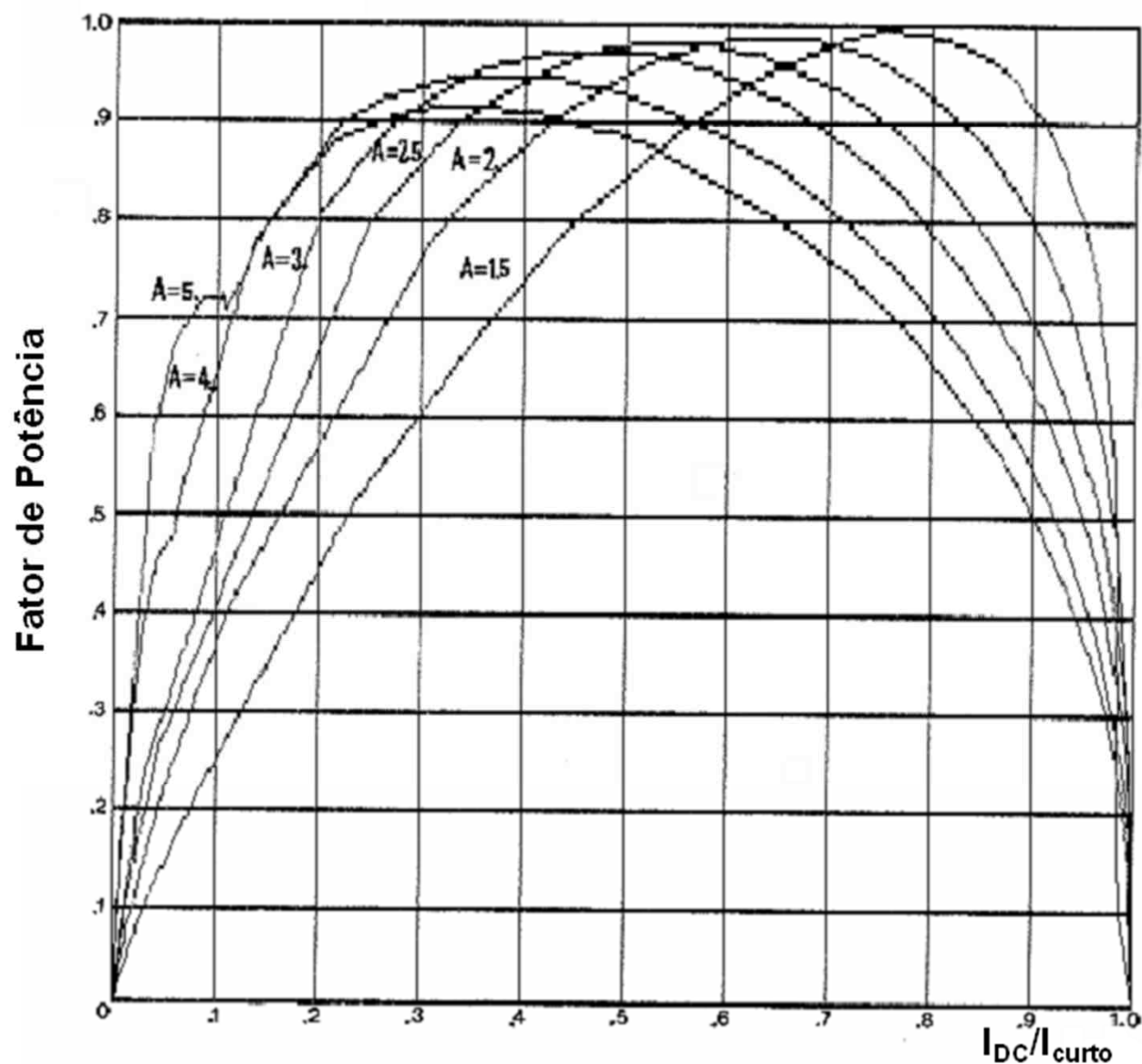
e parametrizadas em

$$A = \frac{\omega_{filtro}}{\omega_{rede}} = \frac{1}{\omega_{rede} \cdot \sqrt{L \cdot C1}}$$

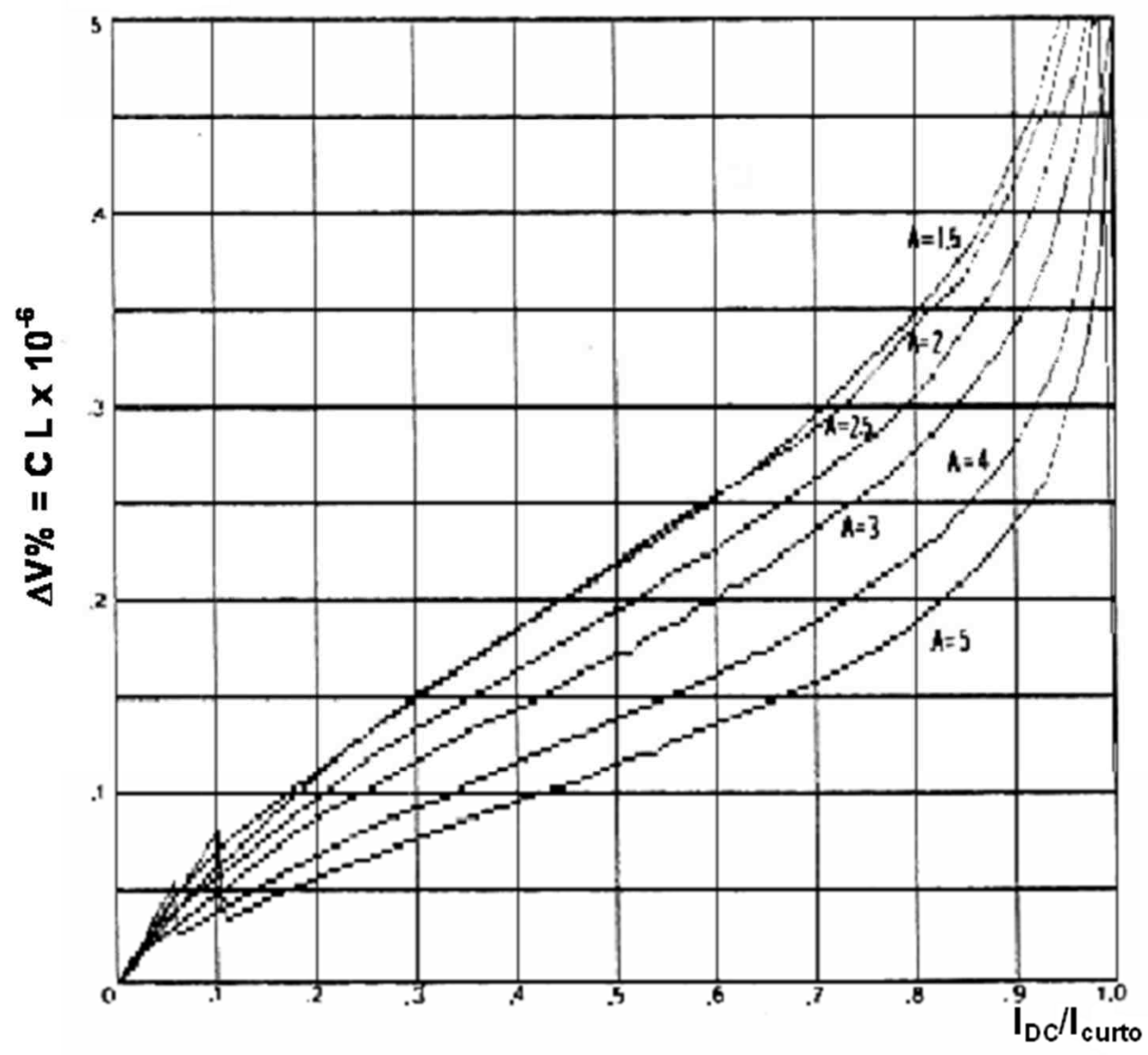
# Filtro LCC – Curva FV ( $I_{DC}/I_{curto}$ )



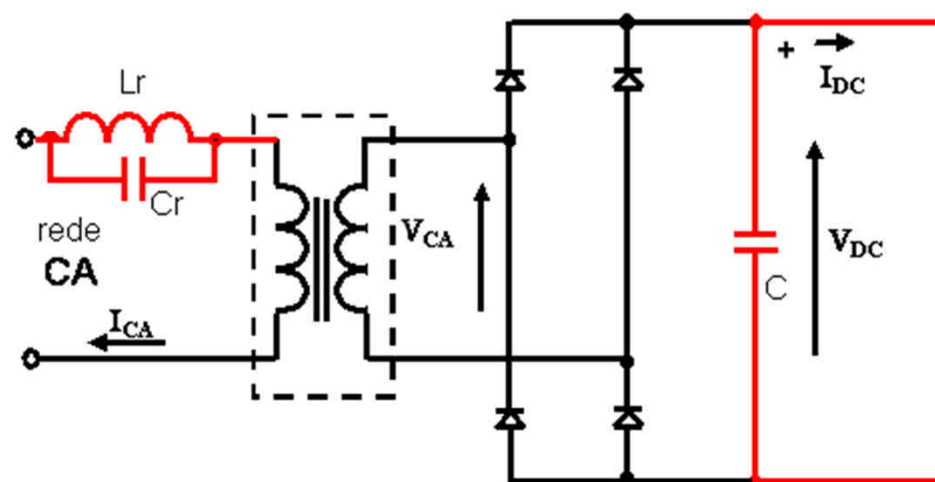
# Filtro LCC– Curva FP ( $I_{DC}/I_{curto}$ )



# Filtro LCC– Curva $\Delta V$ ( $I_{DC}/I_{curto}$ )

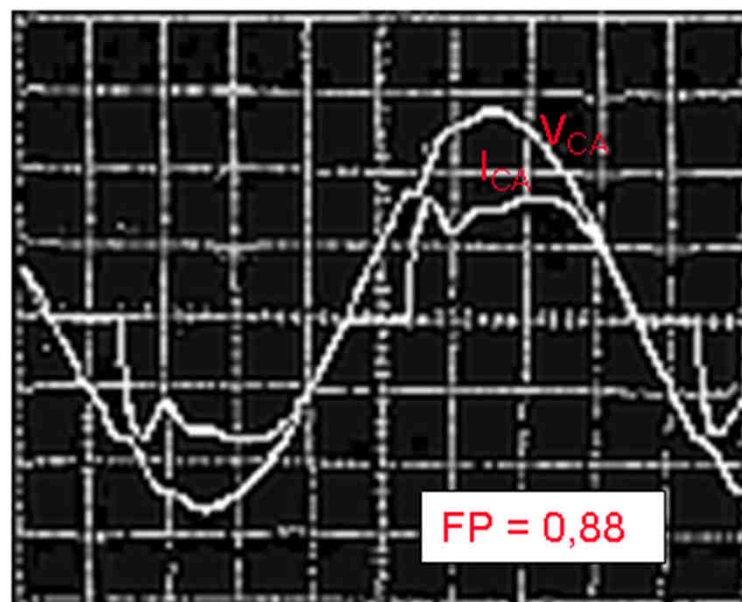


# Conv. CA/CC - Filtro LC Paralelo



Lr e Cr formam circuito ressonante paralelo sintonizado no terceiro harmônico da rede

$$Lr = \frac{1}{9 \cdot \omega_{rede}^2 \cdot Cr}$$



Carga - resistiva

Regras de projeto para o filtro dados:

- potência de saída **P**
- tensão de entrada **V<sub>CArms</sub>**
- ondulação de tensão  **$\Delta V_{CC}$**

# Projeto do Filtro LC Paralelo

## Indutor de filtro CA

$$\text{Indutância (H)} \quad L_r = 0,31 \cdot \frac{V_{CArms}^2}{P \cdot \omega_{rede}}$$

$$\text{Corrente RMS (A)} \quad I_{LrRMS} = 1,23 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Corrente de pico (A)} \quad I_{LrPICO} = 1,735 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

## Capacitor de filtro CA

$$\text{Capacitância (F)} \quad C_r = 0,3584 \cdot \frac{P}{V_{CArms}^2 \cdot \omega_{rede}}$$

$$\text{Corrente RMS (A)} \quad I_{CrRMS} = 0,43 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Corrente de pico (A)} \quad I_{CrPICO} = 0,603 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

## Capacitor de filtro CC

$$\text{Capacitância (F)} \quad C = 23,25 \cdot \frac{P}{V_{CArms}^2 \cdot \omega_{rede} \cdot \Delta V(\%)}$$

$$\text{Corrente de ripple (A)} \quad I_{Cripple} = 0,736 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Tensão de pico (V)} \quad V_{Cpico} = 1,12 \cdot V_{CArms}$$

## Diodo

$$\text{Corrente RMS (A)} \quad I_{diodoRMS} = 0,7686 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Corrente de pico (A)} \quad I_{diodoPICO} = 1,537 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Corrente média (A)} \quad I_{diodoMEAN} = 0,4573 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

$$\text{Corrente CA RMS (A)} \quad I_{CA}RMS = 1,087 \cdot \frac{P}{V_{CArms}}$$

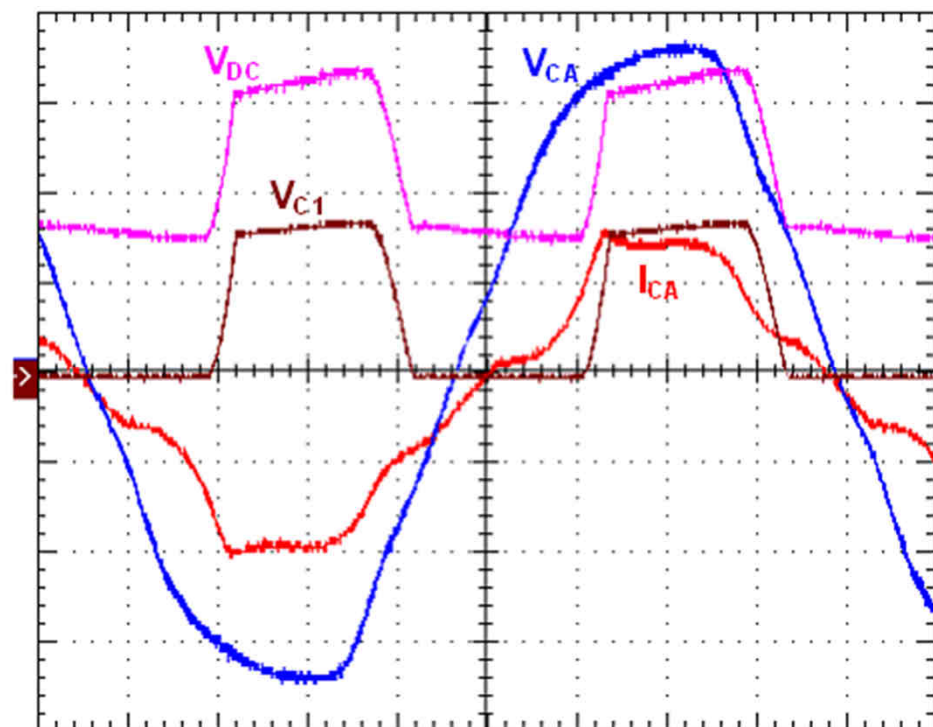
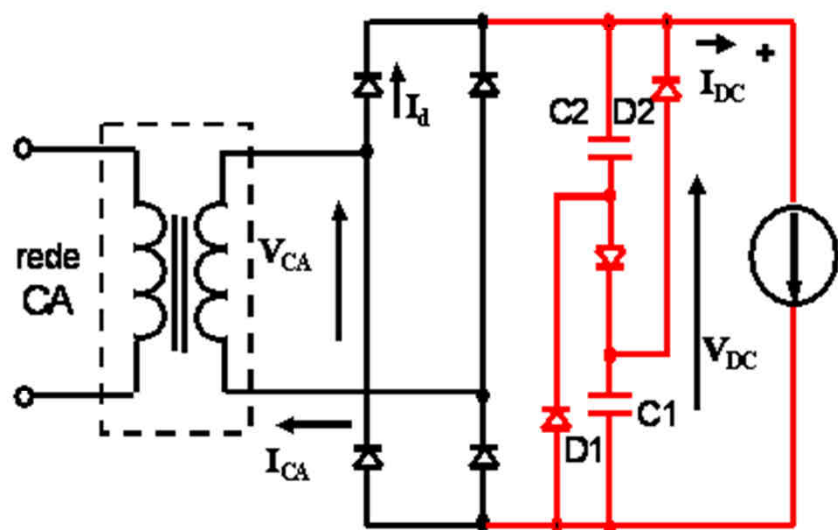
$$\text{Potência do trafo (VA)} \quad P_{TRAFO} = 1,234 \cdot P$$

$$\text{Fator de potência} \quad F.P. = 0,957$$

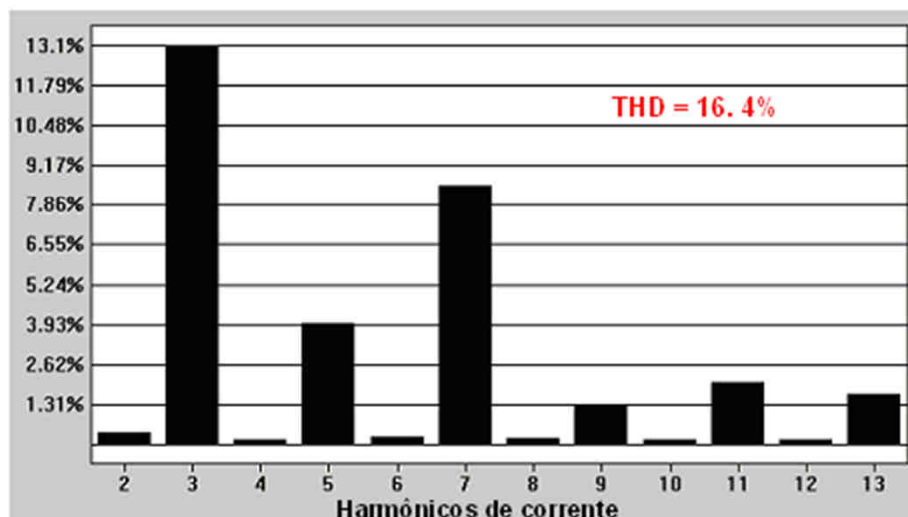


# Conv. CA/CC c/ Valley Fill

C1 e C2 são carregados em série e descarregam-se em paralelo pela carga



$I_{CA}$  0.5 A/div  $V_{CA}$  50 V/div  $V_{DC}$  50 V/div  $V_{C1}$  50 V/div  $t=2\text{ms/div}$

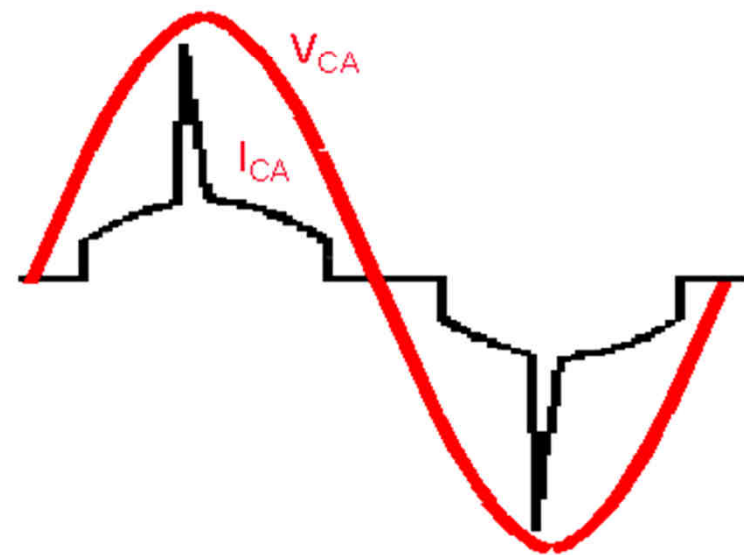
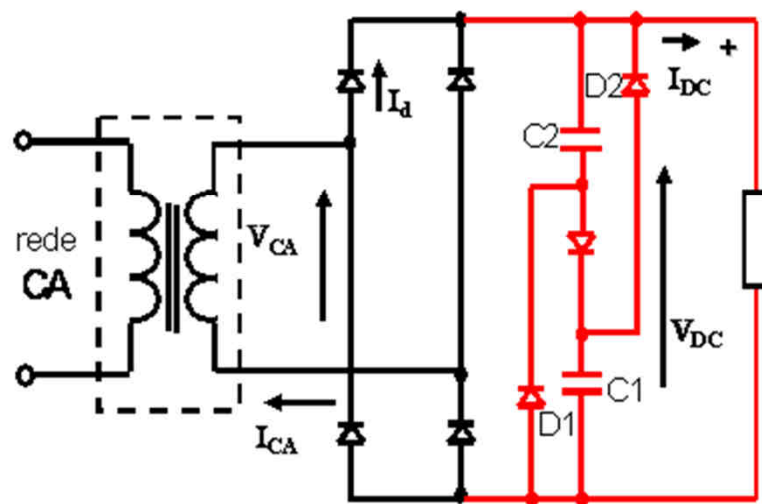


Carga – inversor fonte de corrente

F.P. = 0.95

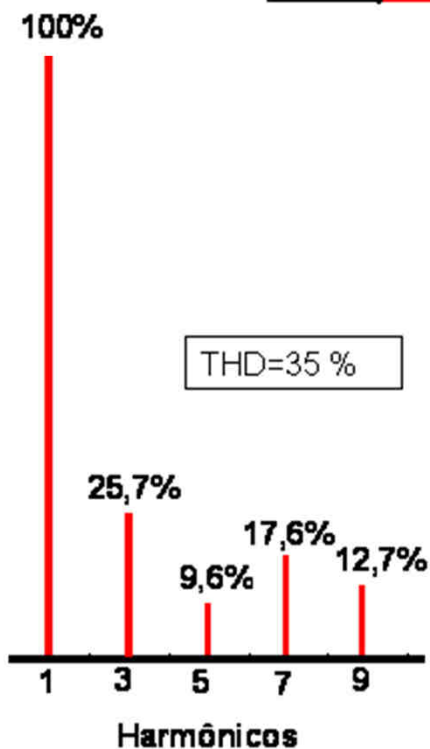
Ondulação de tensão DC elevada

# Filtro Valley Fill c/ Carga Resistiva

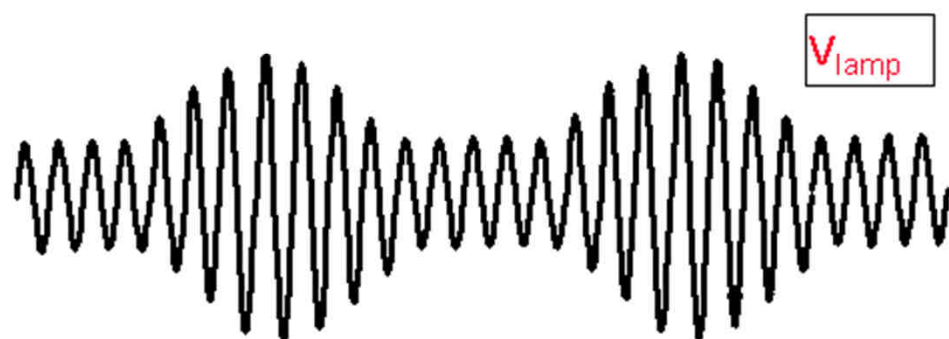
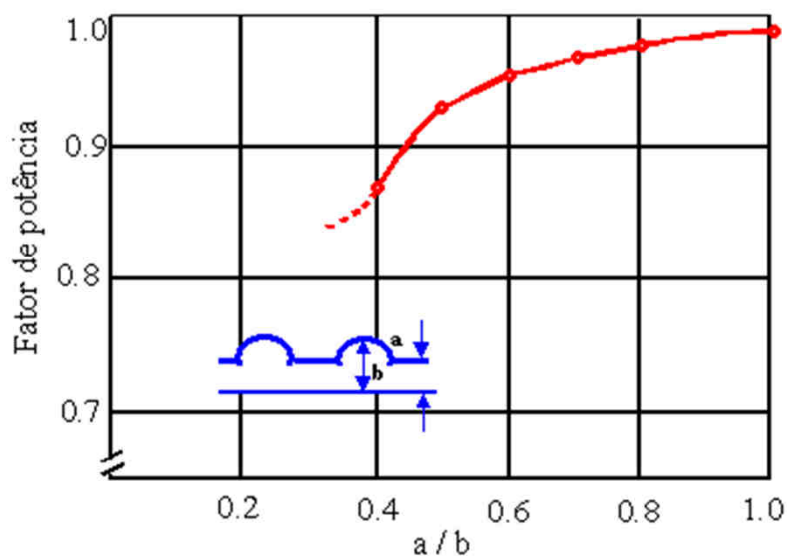
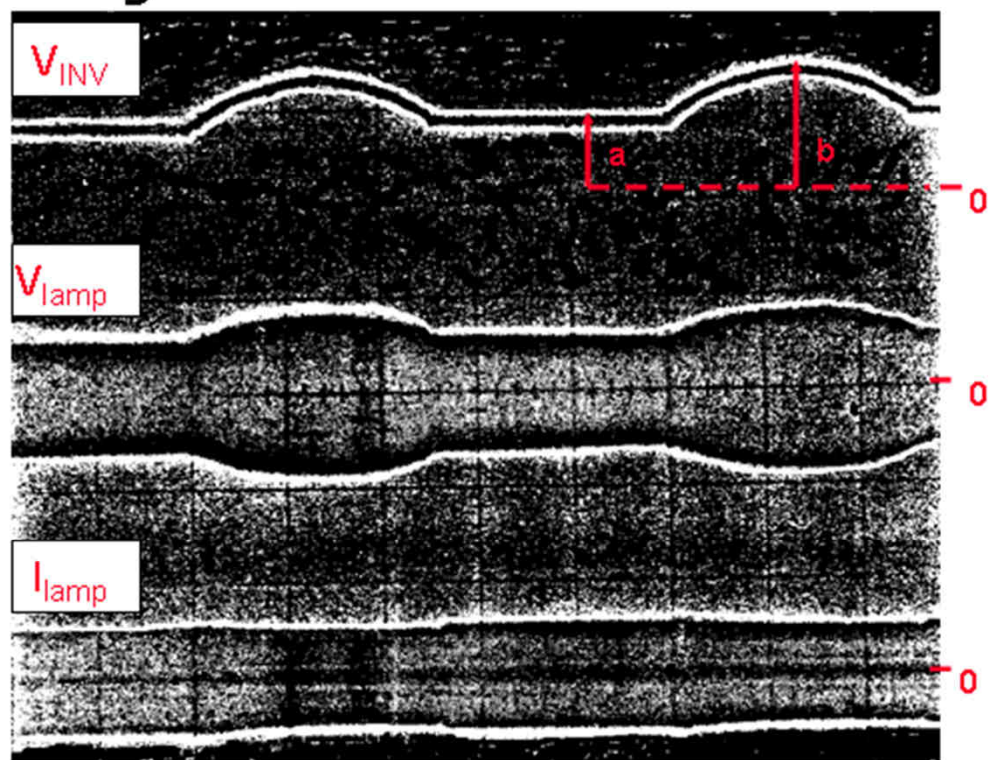
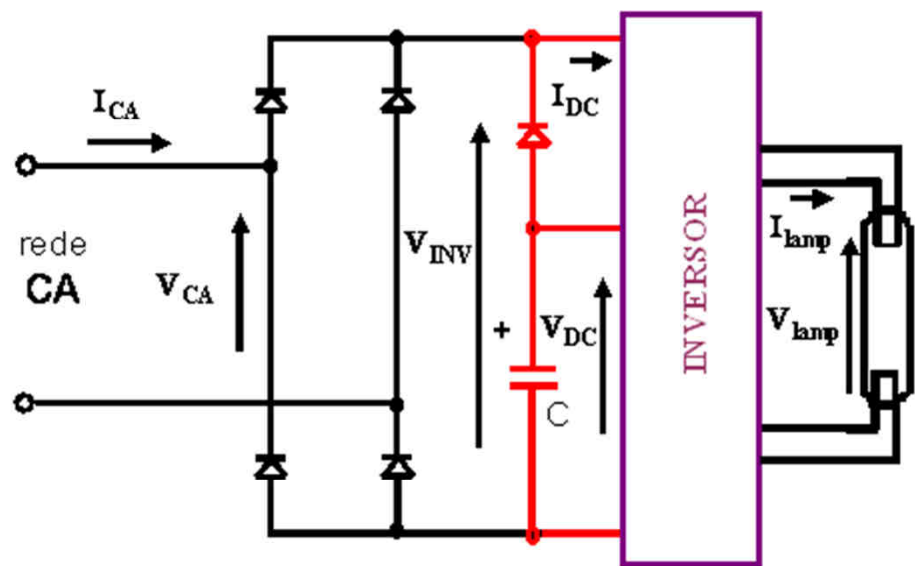


Carga - resistiva

Pico de corrente elevado

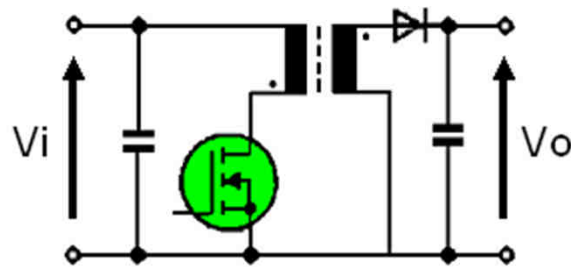


# Filtro c/ realimentação do inversor

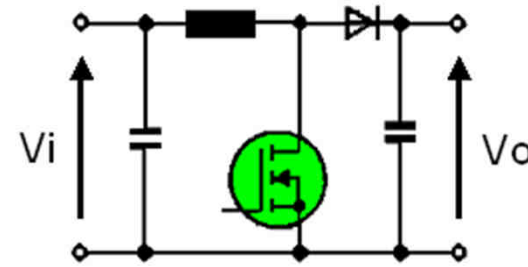


# Conv. CA/CC c/ Filtro Ativo

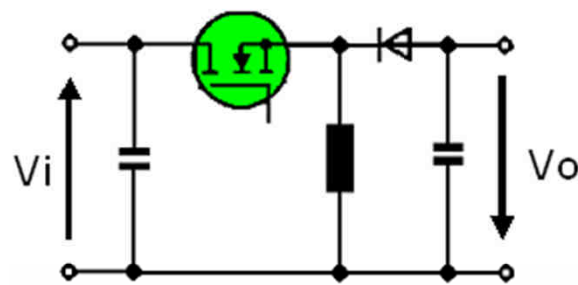
Topologias de conversores para PFC (correção ativa de fator de potência)



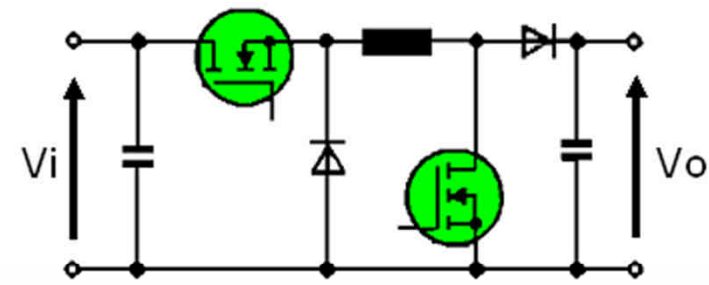
Flyback



Boost

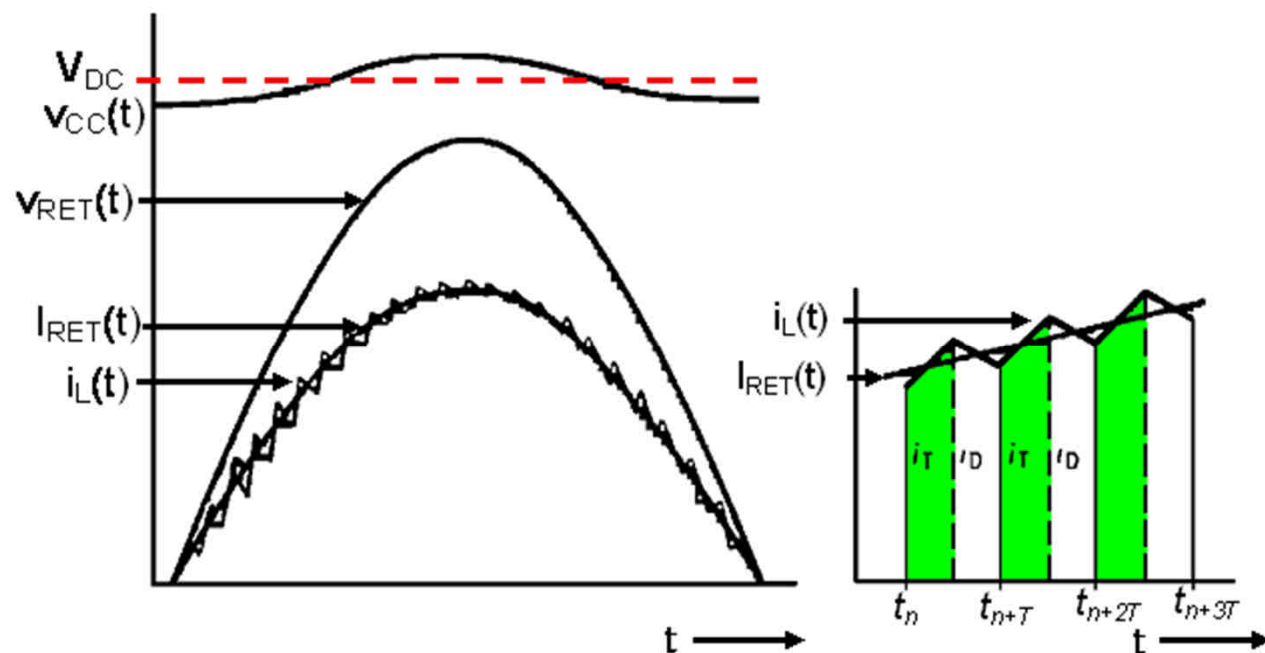
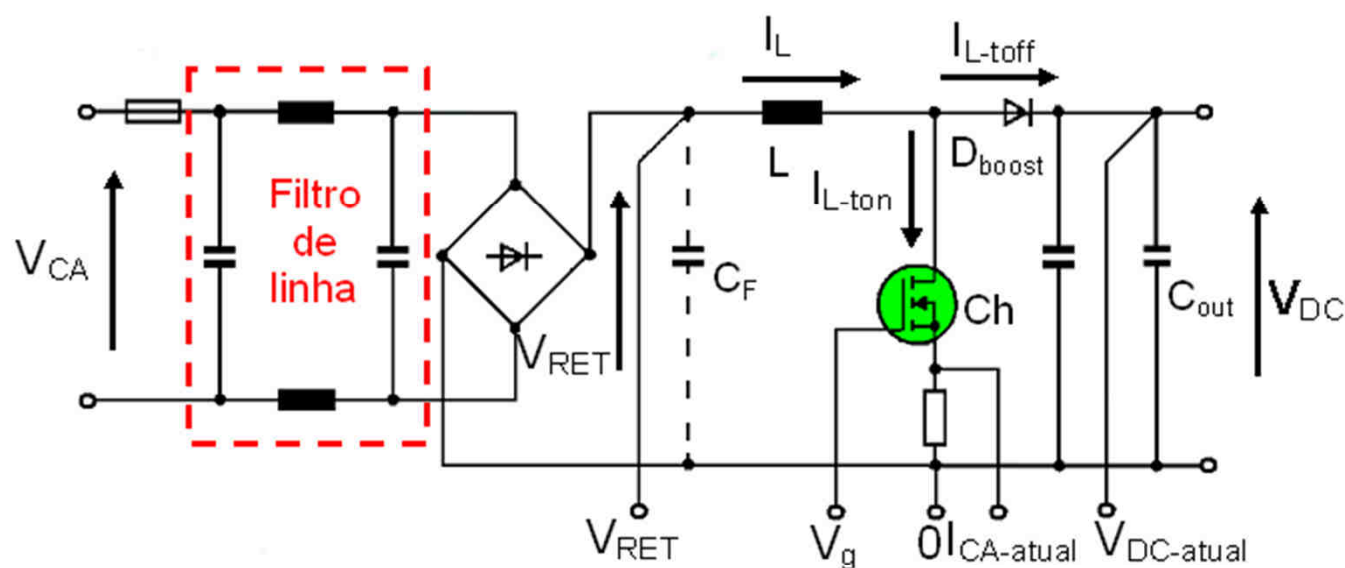


Buck-Boost  
(c/ inv. de polaridade)



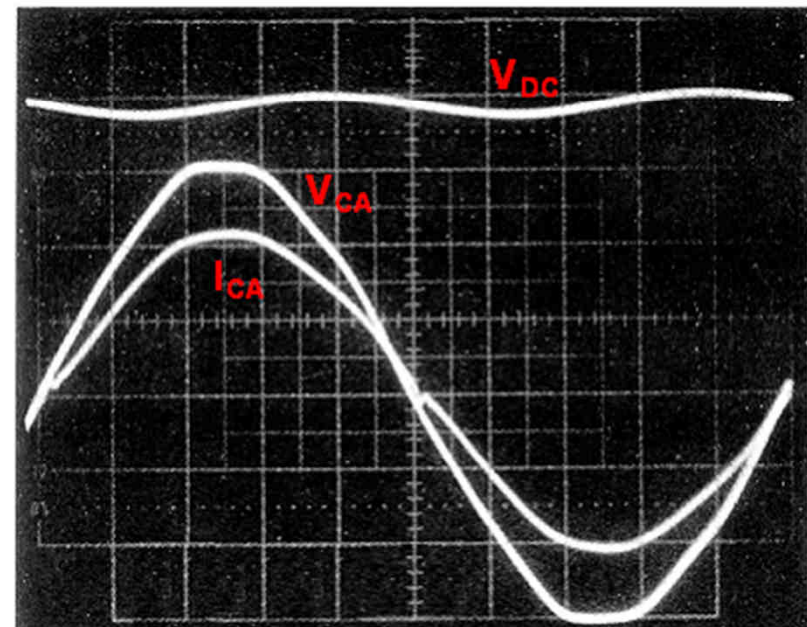
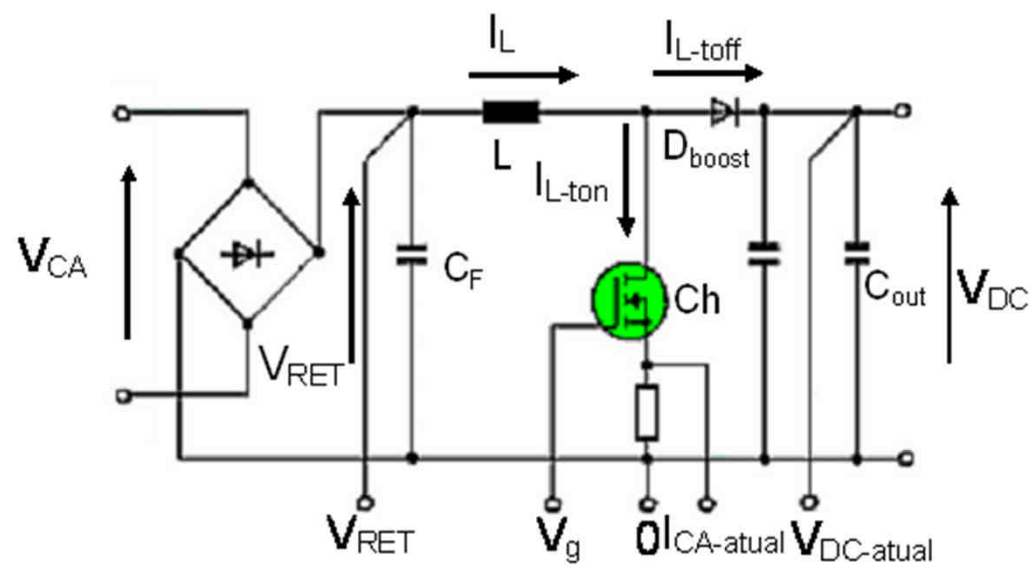
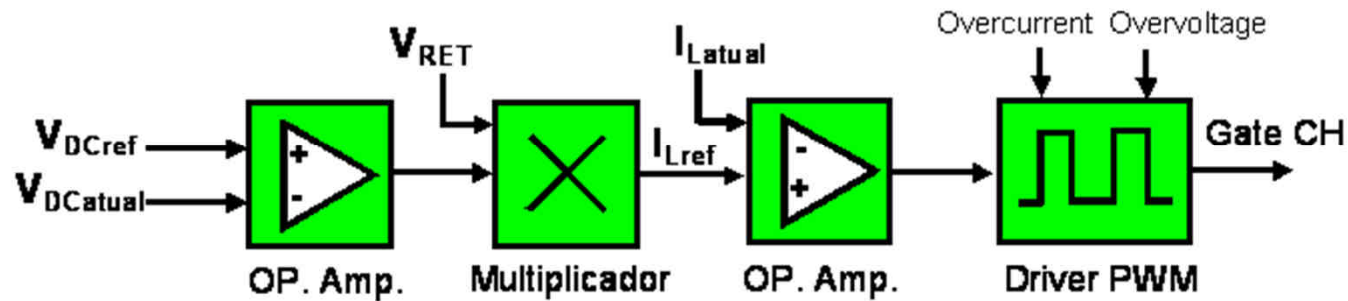
Buck-Boost  
(s/ inv. de polaridade)

# PFC com conversor Boost



Operação no modo de continuidade de corrente no indutor

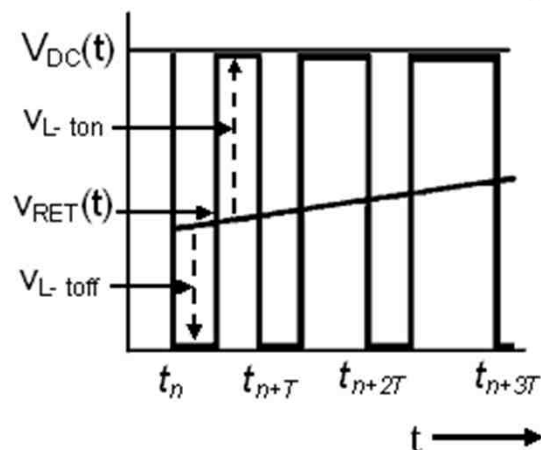
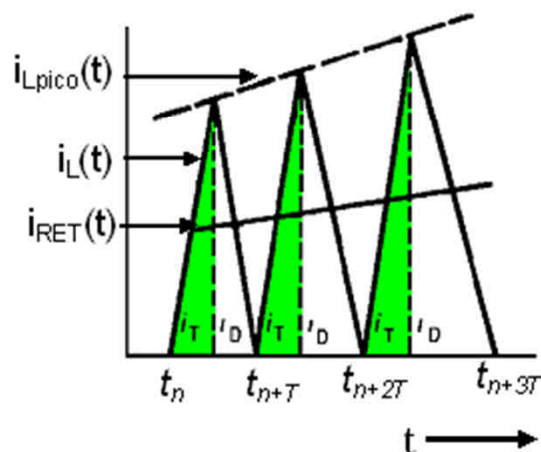
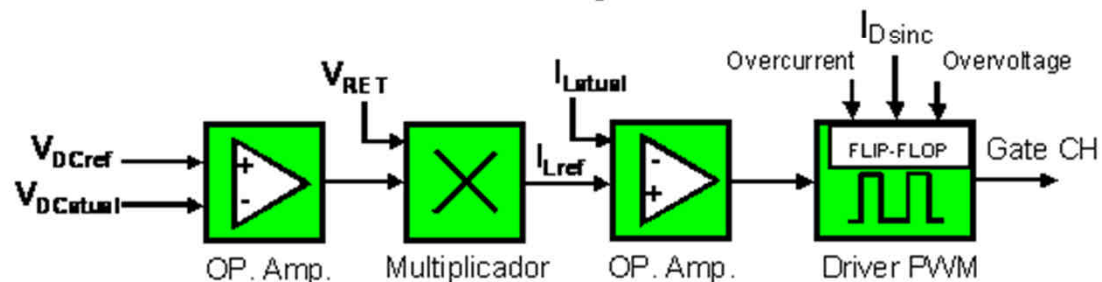
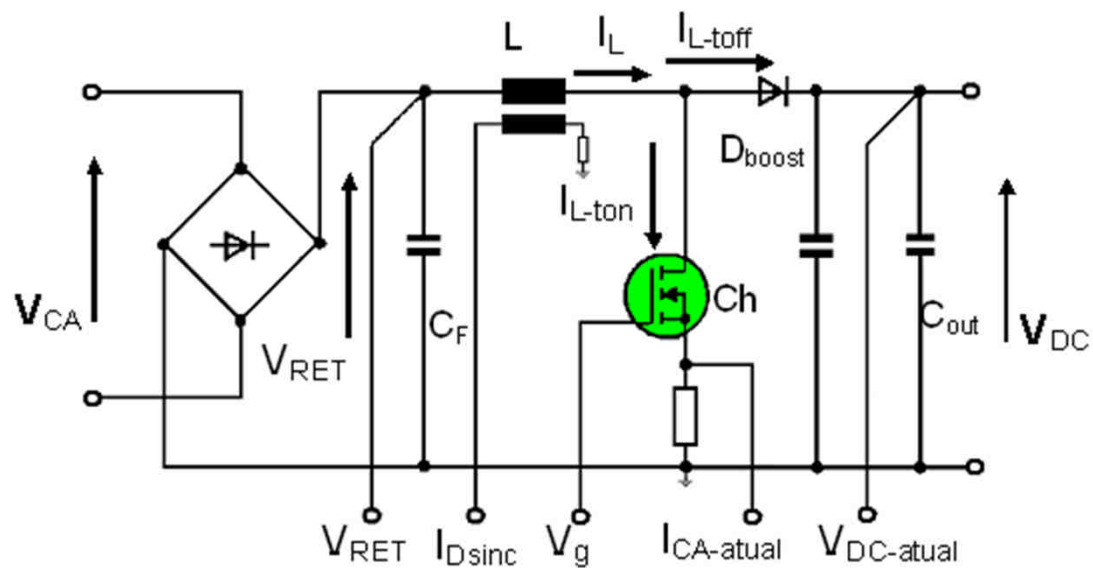
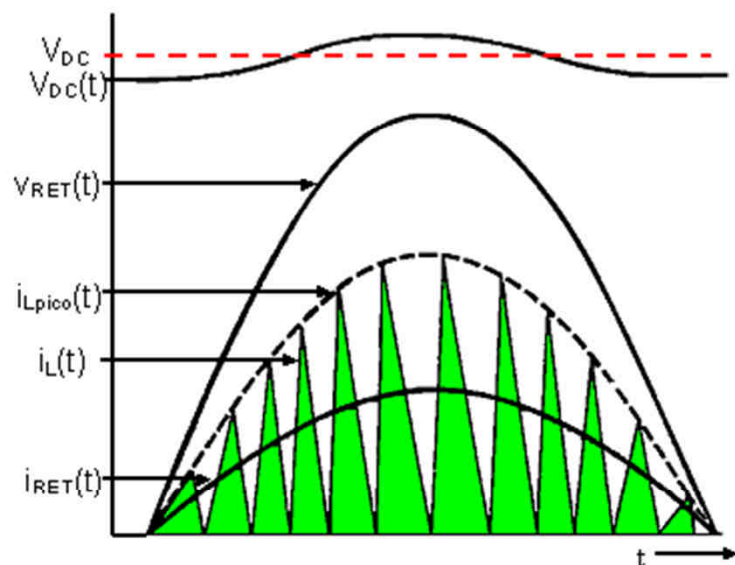
# Princípio de controle



$$V_{DC} > V_{CApico}$$

C.I. de controle UC3854

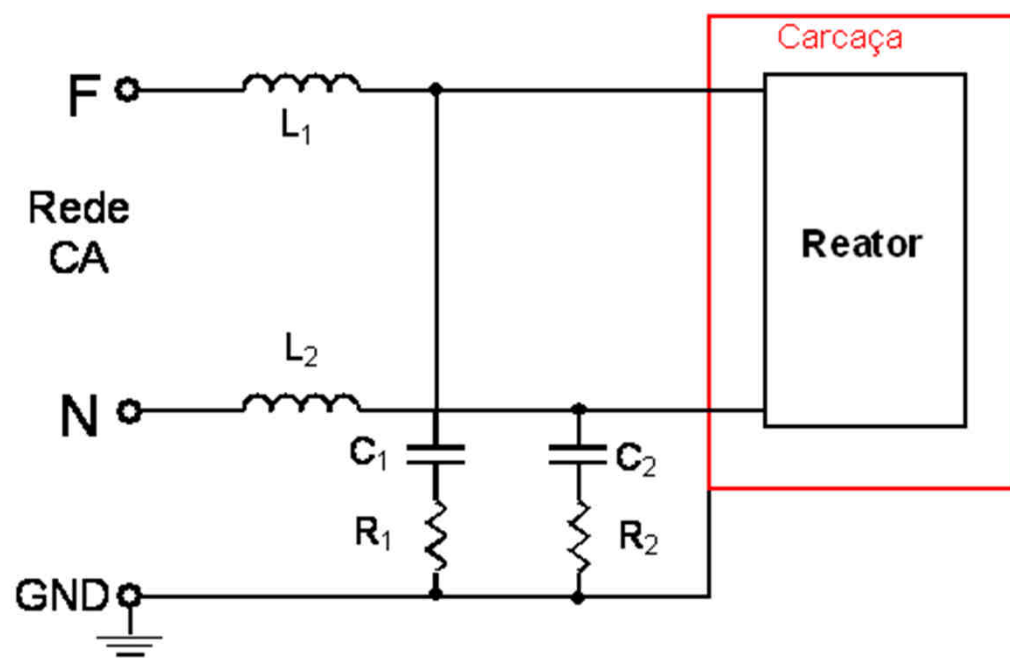
# PFC com conversor Boost



**Operação no modo limite de continuidade de corrente no indutor (operação ZCS da chave)**

# Interferência de radio – frequência (RFI)

Sinais de corrente ou campo elétrico de radio frequência ( $150 \text{ kHz} < f < 30 \text{ MHz}$ ) que circulam do reator para a rede.



## MEDIÇÃO

$R_1$   $R_2$   $C_1$   $C_2$  – rede artificial p/ medição  
 $L_1$   $L_2$  – filtros para que os sinais de RFI circulem somente pela rede de medição

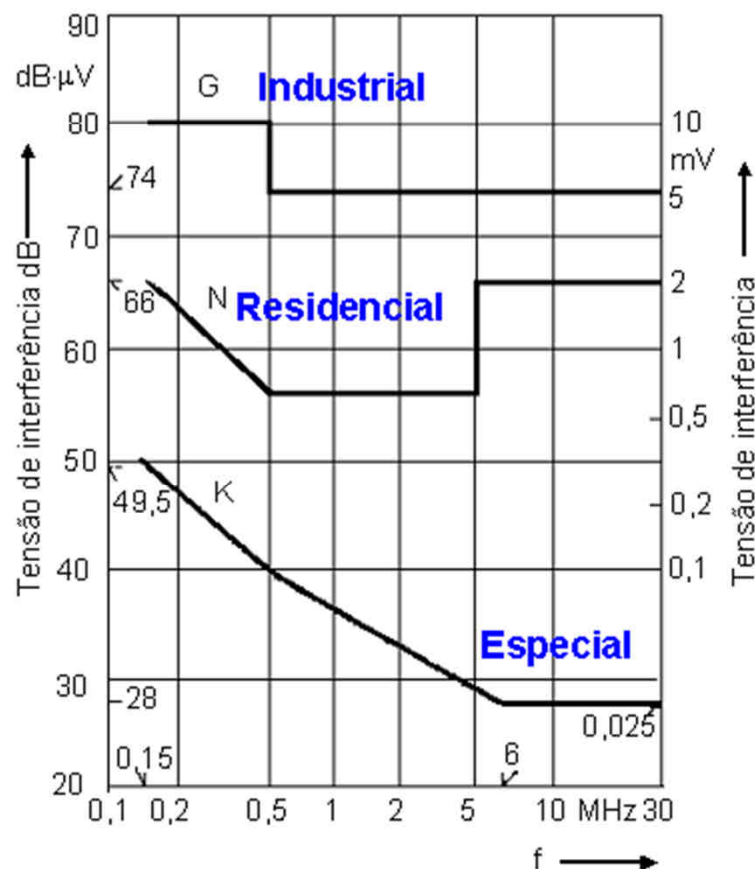
### Níveis estabelecidos em normas:

Correntes parasitas circulando em  $R_1$  e  $R_2$  devem provocar quedas de tensão inferiores a  $500 \mu\text{V}$  ( $54 \text{ dB}/\mu\text{V}$ )



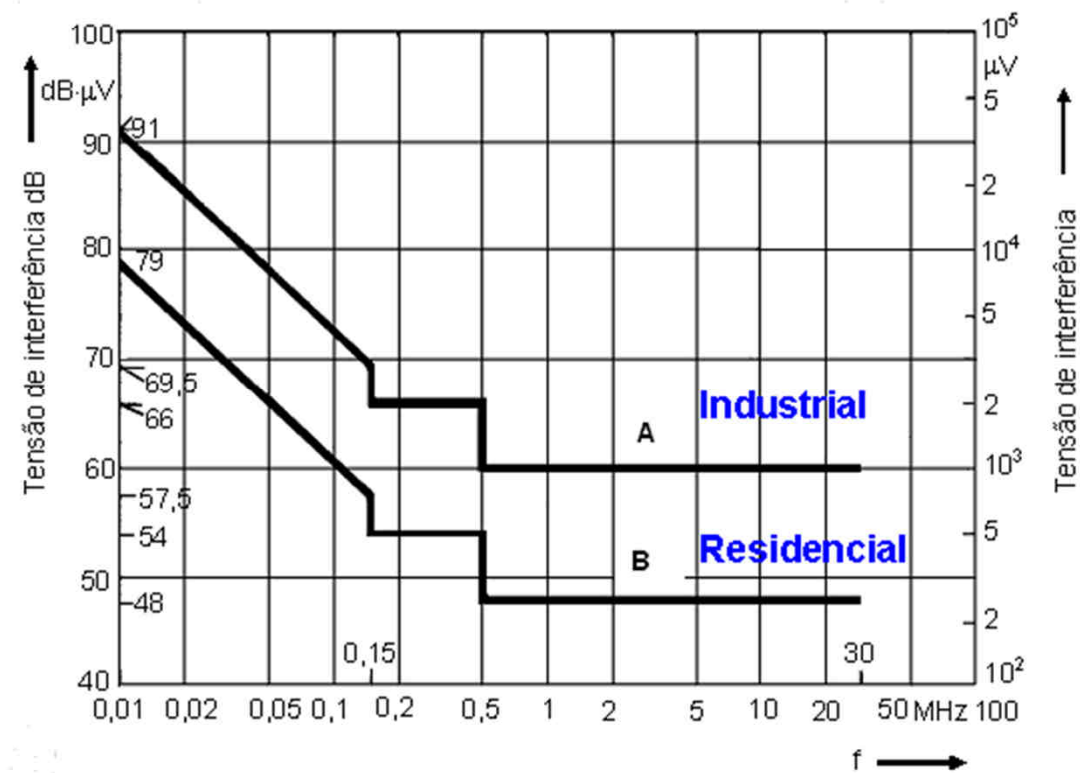
# Limites estabelecidos por normas p/ RFI

VDE 0875



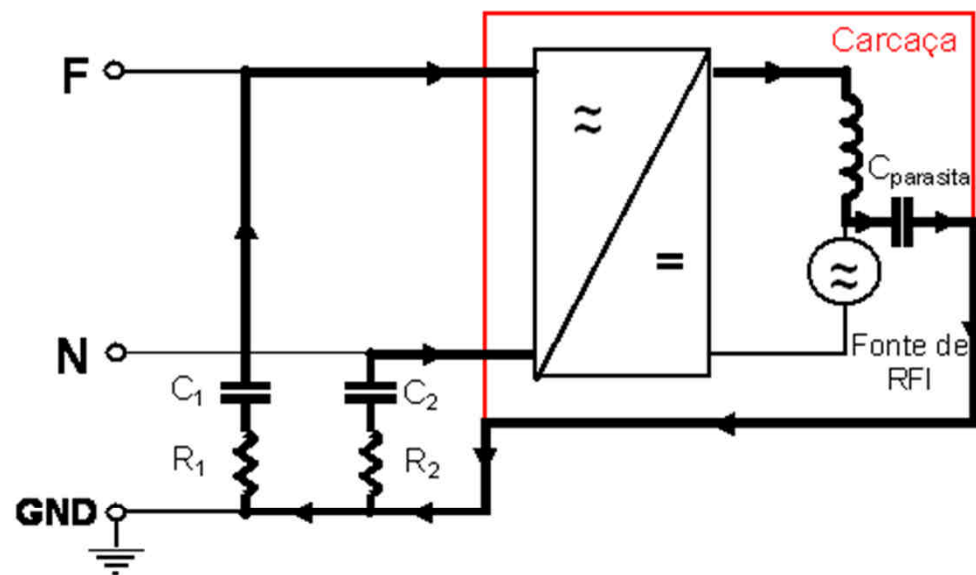
interferência de banda larga  
(lâmpadas)

VDE 0871



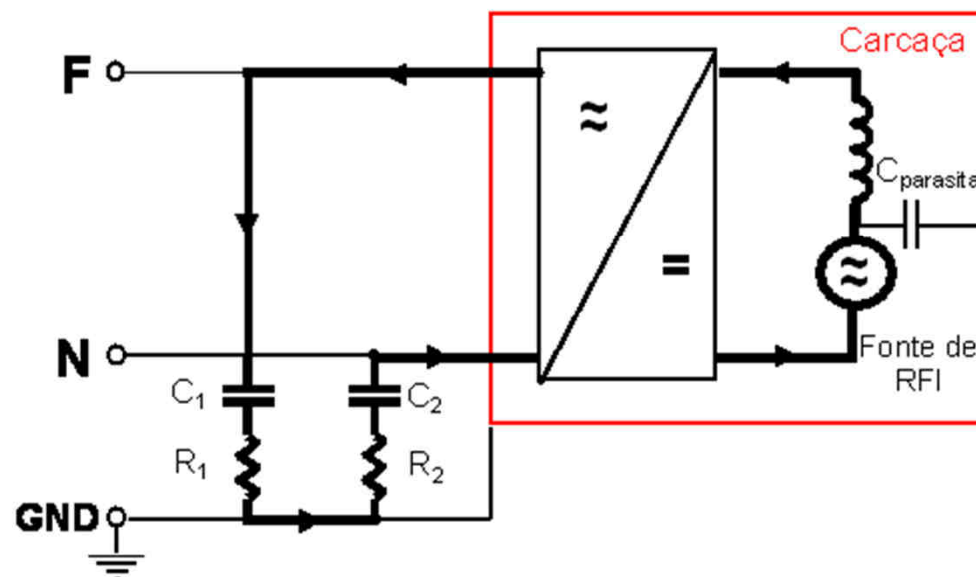
interferência de banda estreita  
(reatores eletrônicos- classe B)

# Tipos de RFI



Correntes parasitas assimétricas que produzem tensões de modo comum na rede de medição.

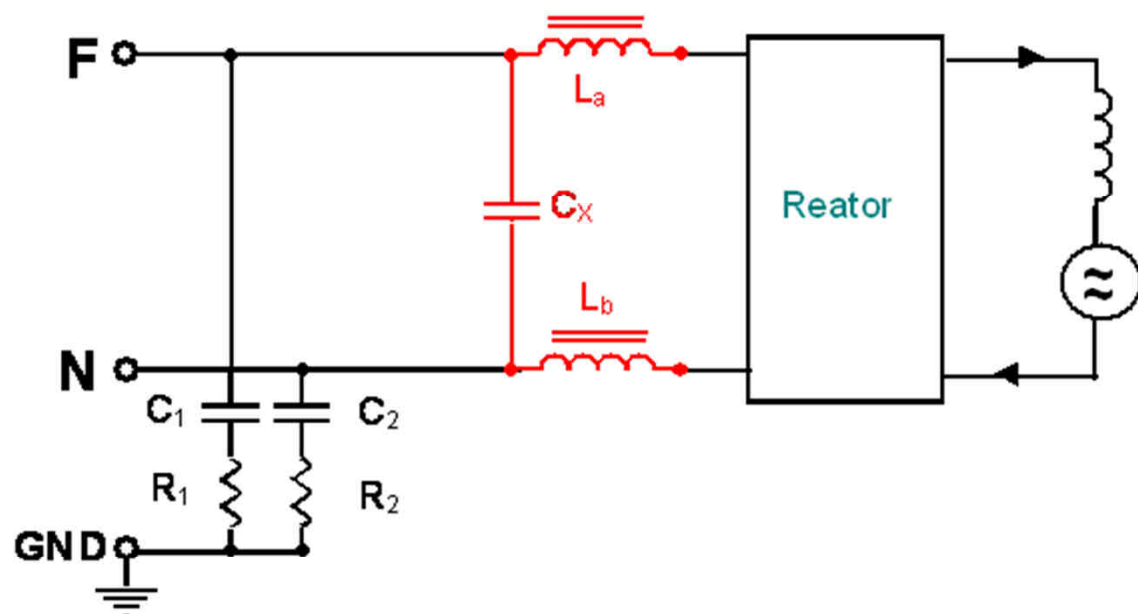
**Causa:** Acoplamento capacitivo entre a carcaça (aterrada) do reator e o encapsulamento (ou dissipador de calor) do transistor submetida a  $dV/dt$  elevado devido ao processo de chaveamento.



Correntes parasitas simétricas que produzem tensões de modo diferencial na rede de medição.

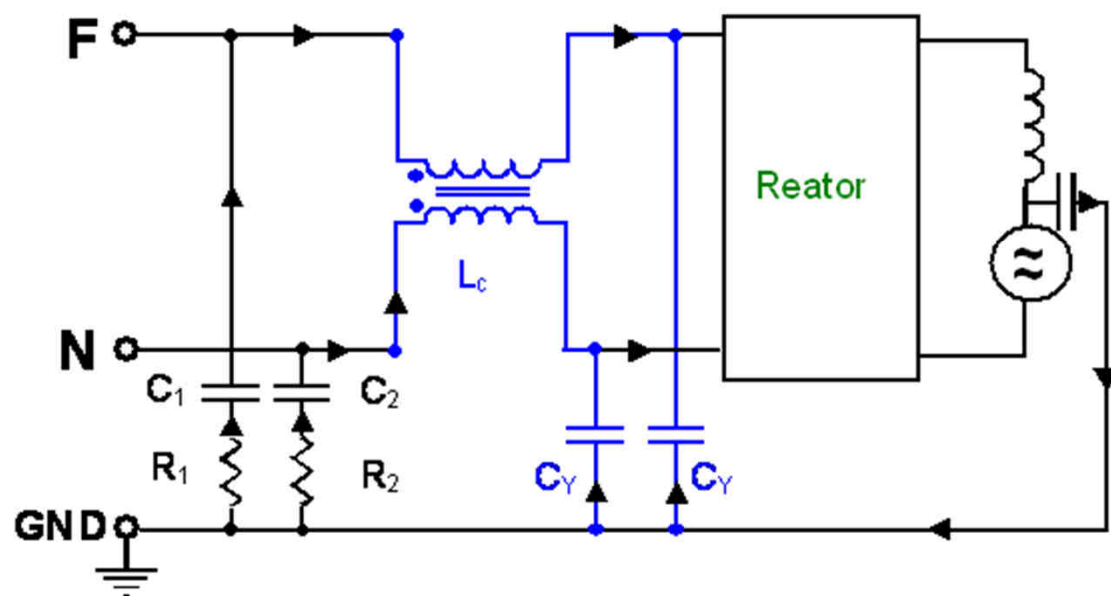
**Causa:** Componentes na frequência de operação do reator que circulam por capacitâncias parasitas de semicondutores e elementos passivos.

# Filtros para RFI



Filtro de modo diferencial para eliminar correntes parasitas simétricas.

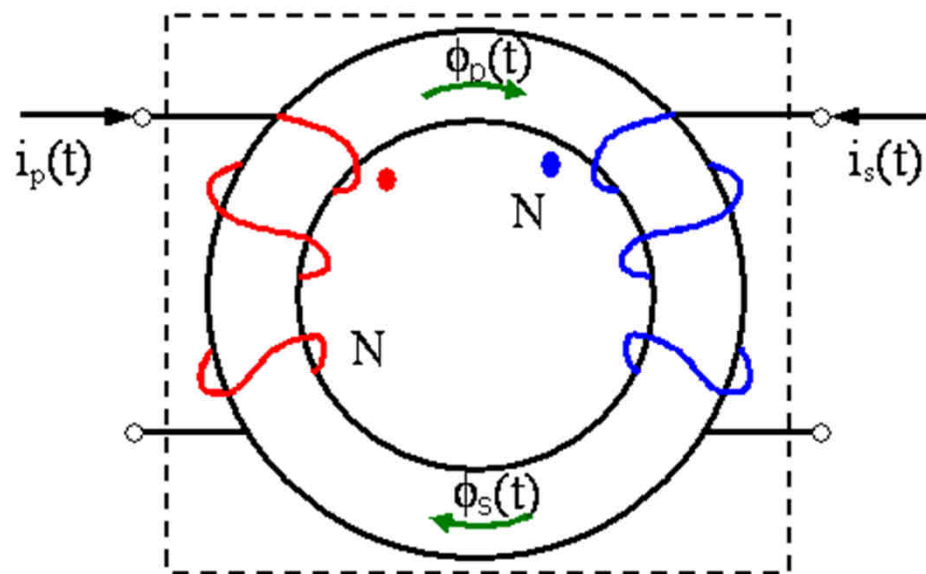
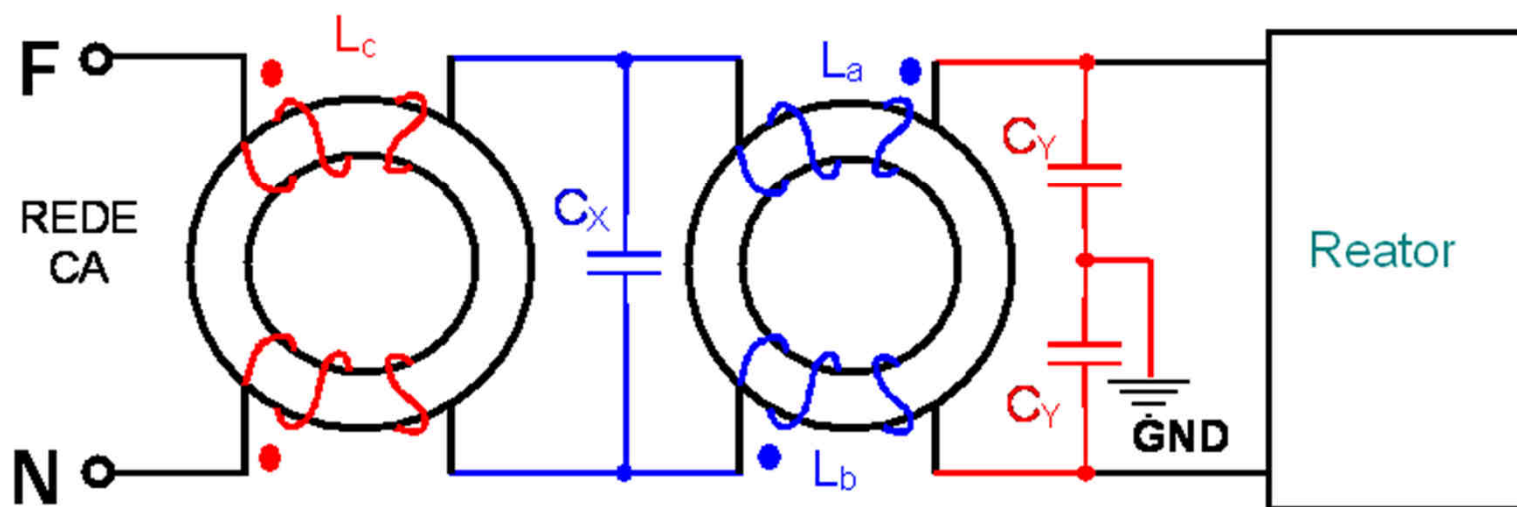
$L_a L_b$  - indutores desacoplados  
 $C_X$  - capacitor supressor c/ baixa indutância.



Filtro de modo comum para eliminar correntes parasitas assimétricas.

$L_c$  - indutores acoplados  
 $C_Y$  - capacitor supressor de alta tensão e baixa indutância.

# Filtro completo p/ RFI



Indutor do filtro de modo comum

$L_c \equiv 0$  para correntes simétricas

$L_c \neq 0$  para correntes assimétricas