



**Universidade Federal de Santa Catarina  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Instituto de Eletrônica de Potência**

# **Projeto de Fontes Chaveadas**

**Prof. Alexandre Ferrari de Souza, Dr.**

# Programa

## 1ª Semana:

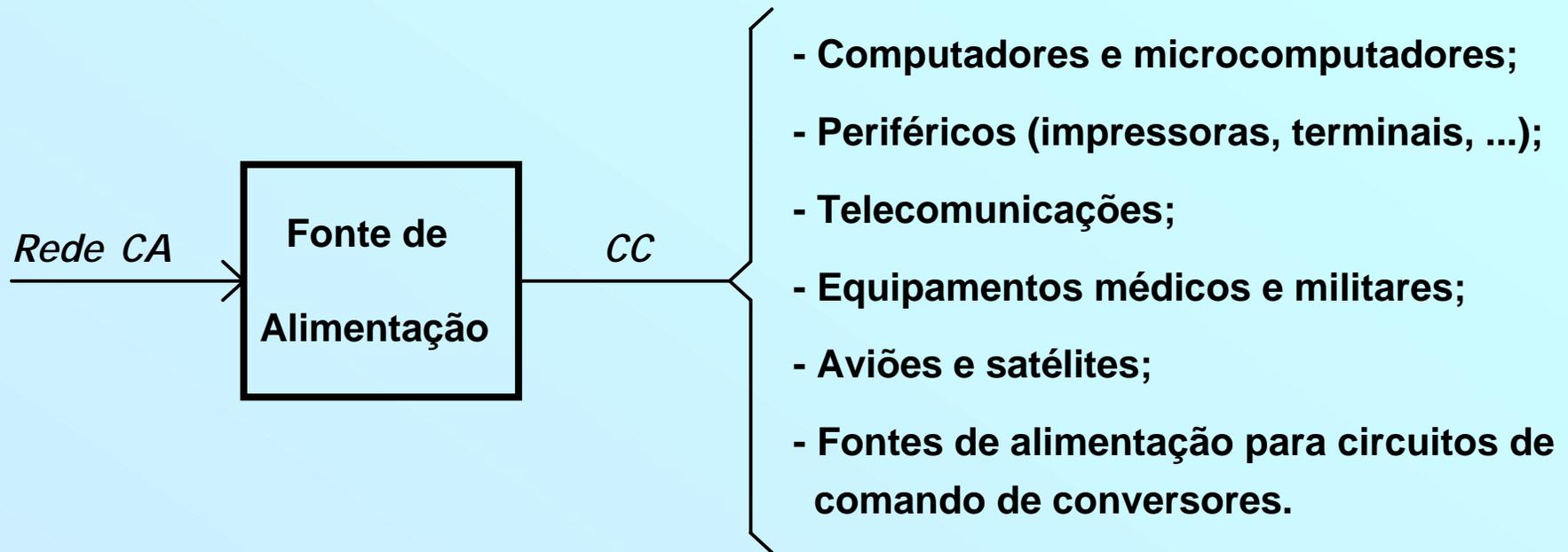
- **Introdução**
- **Capítulo I – Retificador e Filtro de Entrada**
- **Capítulo II – Fontes Chaveadas do Tipo Flyback**
- **Capítulo III – Fontes Chaveadas do Tipo Forward**
- **Capítulo IV – Fontes Chaveadas do Tipo Half-Bridge, Full Bridge e Push-Pull**
- **Capítulo V – Transistores de Potência**

# Programa

## **2ª Semana:**

- **Capítulo VI – Circuitos de Comando para Transistores de Potência**
- **Capítulo VII – Circuitos de Comando para Fontes Chaveadas**
- **Capítulo VIII – Resposta Transitória e Estabilidade**
- **Capítulo IX – Interferência Eletromagnética em Fontes Chaveadas**
- **Capítulo X – Considerações de Projeto**

# Introdução a Fontes Chaveadas



**Fonte de Alimentação:** - Linear  
- Chaveada

# Introdução a Fontes Chaveadas

**Fonte Linear:** Transformador de baixa frequência, ponte retificadora, filtro capacitivo e regulador linear série.

- Elevada robustez e confiabilidade.
- Baixo custo.
- Simplicidade de projeto e operação.
- Elevado peso e volume.
- Baixo rendimento (reguladores lineares).
- Limitação na regulação.
- Geração de componentes harmônicas na corrente de entrada, resultando um baixo fator de potência.
- Atualmente limitam-se à aplicações de baixa potência (simplicidade e baixo custo).

# Introdução a Fontes Chaveadas

**Fontes Chaveadas : Utilizam interruptores de potência na região de saturação  
(chave com estados aberto e fechado).**

- **Início do desenvolvimento: década de 60 em programas espaciais.**
- **Avanço da microeletrônica e a necessidade de compactação dos equipamentos aliado a baixo consumo difundiu o uso das fontes chaveadas.**
- **Substituiu as Fontes Lineares.**

# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Características das Fontes Chaveadas:**

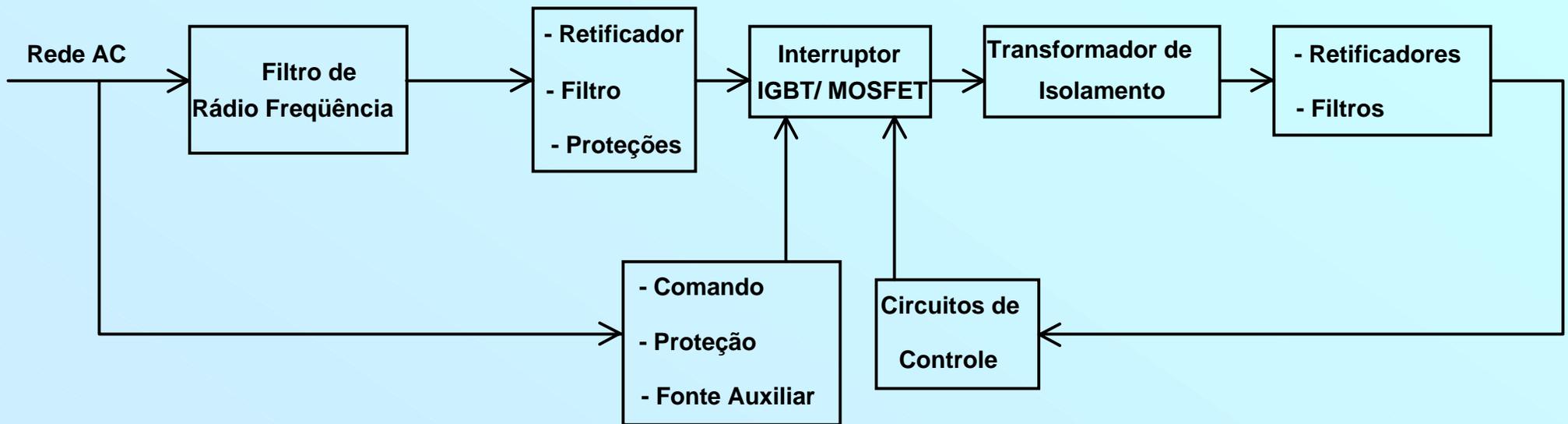
- **Maior rendimento;** 
- **Elevada densidade de potência: menor volume e peso;** 
- **Grande capacidade de regulação;** 
- **Possibilidade de operar com fator de potência unitário;** 
- **Menos robusta e resposta transitória lenta;** 
- **Ondulação na tensão de saída;** 
- **Interferência radioelétrica e eletromagnética;** 
- **Maior número de componentes;** 
- **Componentes mais sofisticados.** 

# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Esforços dos pesquisadores para diminuir as desvantagens das Fontes Chaveadas:**
  - **Nível teórico (topologias, comutação, controle, modulação, ...);**
  - **Otimização dos projetos;**
  - **Fabricantes de componentes (circuitos integrados dedicados, semicondutores, ...).**
  
- **Avanço dos semicondutores:**
  - **Década de 70: Transistor Bipolar com frequências de até 20kHz;**
  - **Década de 80: MOSFET (baixa potência) e diodo ultra-rápido com frequências de até 100kHz;**
  - **Recentemente: Fontes com comutação suave podendo operar na faixa dos MHz, rendimento próximo a 90%, e pouco ruído radioelétrico.**

# Introdução a Fontes Chaveadas

- Configuração usual de uma Fonte Chaveada:



# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Desenvolvimento de uma Fonte Chaveada:**
  - **Técnicas p/ redução da interferência eletromagnética gerada;**
  - **Métodos p/ a correção do fator de potência;**
  - **Conversores CC-CC;**
  - **Teoria de controle e modelagem de conversores estáticos;**
  - **Projeto de indutores e transformadores de alta frequência;**
  - **Semicondutores de potência e circuitos integrados dedicados;**
  - **Projeto térmico;**
  - **Circuitos de comando e proteção;**
  - **Simulação de conversores estáticos.**

# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Etapas de Projeto**

1. **Especificar:**
  - Tensão de entrada e saída;
  - Freqüência da rede;
  - Tensões nominais, máxima e mínima da rede;
  - Ondulação de 120Hz na saída;
  - Ondulação da saída na freqüência de comutação;
  - Hold-Up time;
  - Temperatura ambiente;
  - Proteções exigidas;
  - Rendimento;
  - Regulação de carga;
  - Regulação de linha;
  - Resposta transitória;
  - Tensão de isolamento;
  - Nível de interferência radioelétrica e eletromagnética;
  - Normas aplicáveis (IEC 61000-3-2, CISPR 22, IEC950).

# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Etapas de Projeto**

2. **Definir:**
  - Topologia do conversor;
  - Freqüência de comutação;
  - Interruptor principal (IGBT, MOSFET, etc.);
  - Isolamento (transformador de comando de base/gatilho, isolador ótico ou sensor hall no laço de realimentação);

3. **Cálculo de Estágio de Entrada:**
  - Retificador;
  - Capacitor de filtragem;
  - Limitação de corrente de pré-carga do capacitor de filtragem.

4. **Projeto do Conversor**

5. **Cálculo do Transformador de Isolamento de Alta Freqüência**

6. **Cálculo de Estágio de Saída**

# Introdução a Fontes Chaveadas

- **Etapas de Projeto**

**7. Circuito de comando de base ou gate**

**8. Projeto do circuito de compensação (estabilidade e resposta transitória)**

**9. Escolha do CI-PWM e cálculo dos componentes externos**

**10. Projeto dos circuitos de proteção**

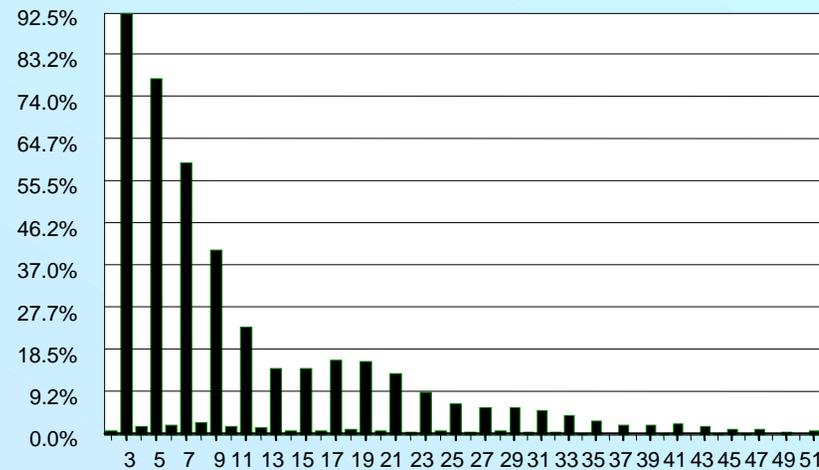
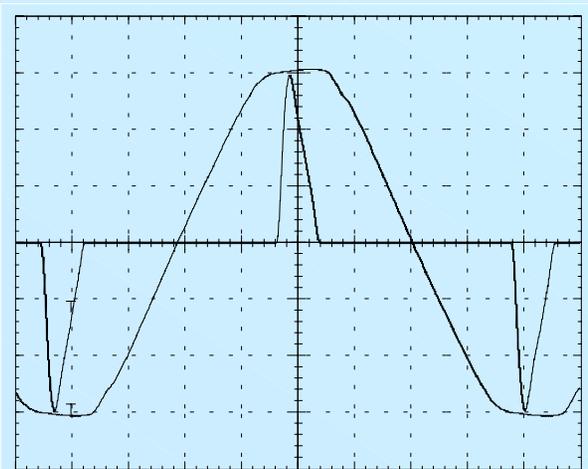
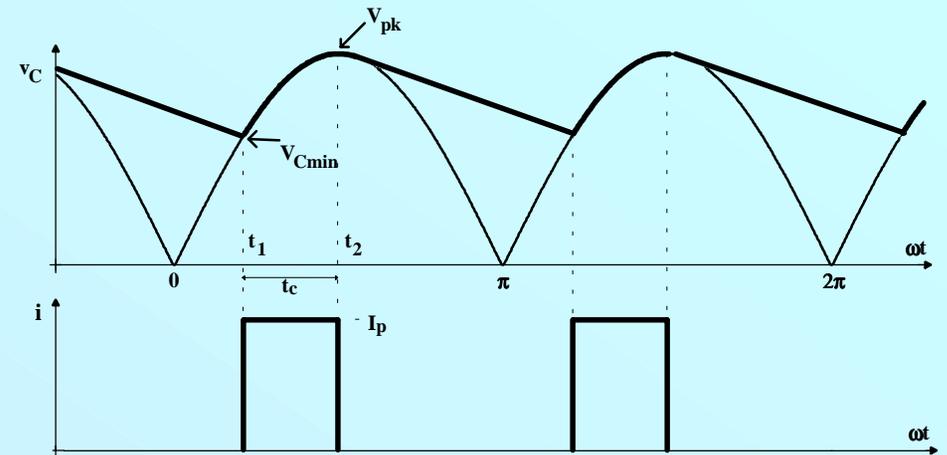
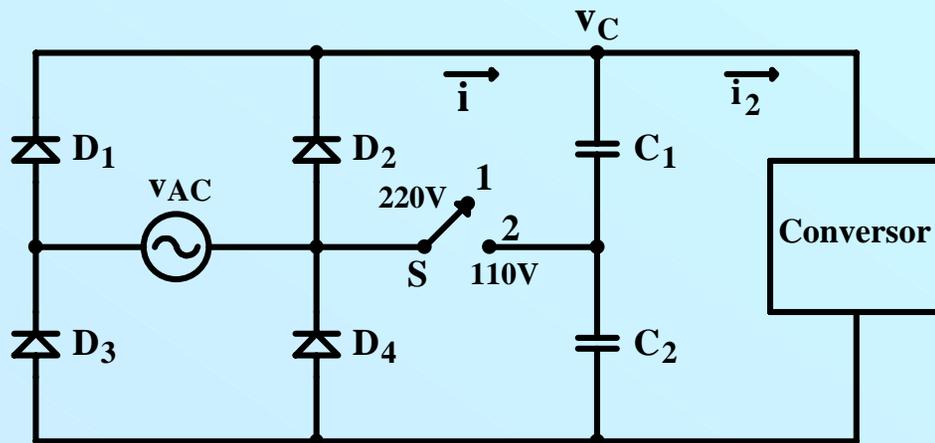
**11. Cálculo da fonte auxiliar**

**12. Cálculo do filtro de rádio frequência**

# Introdução a Fontes Chaveadas

## 1. Retificadores não Controlados (baixo FP)

### 1.1 Monofásico

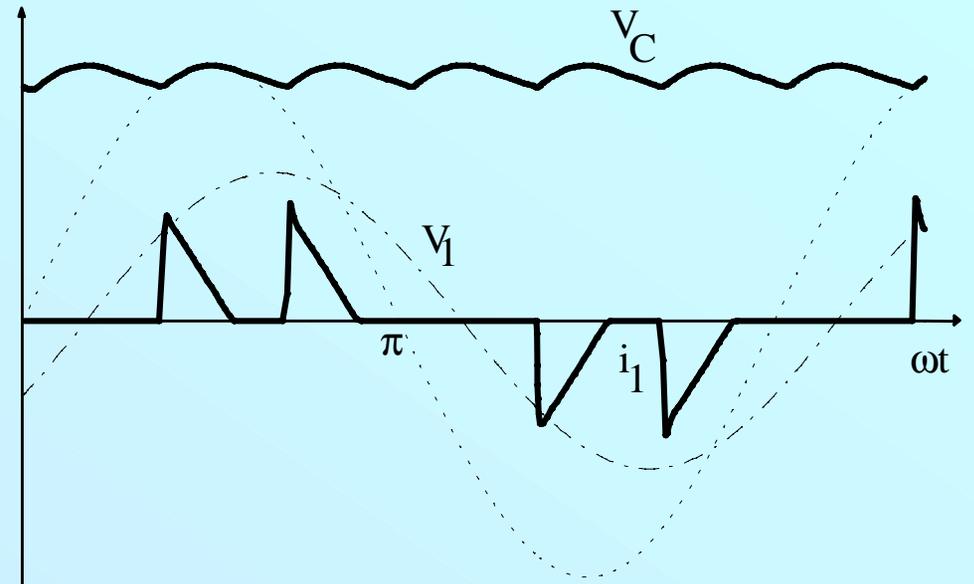
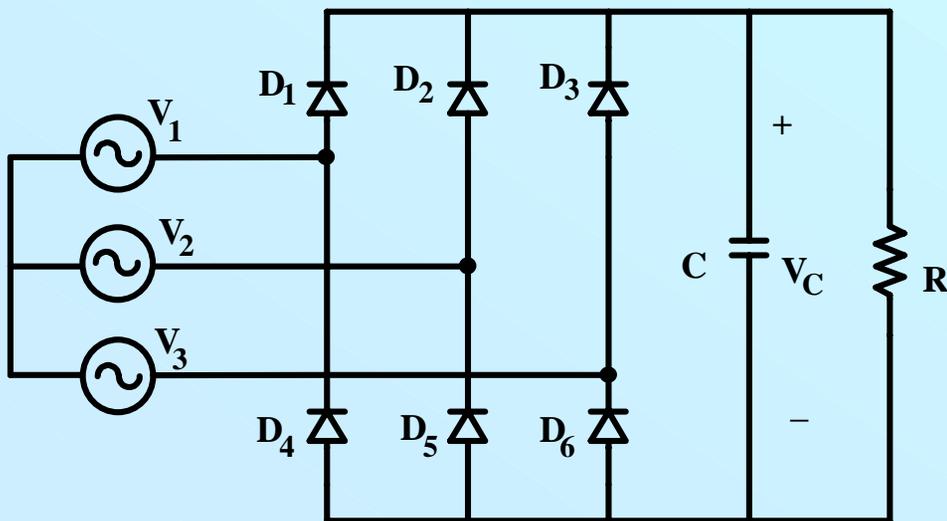


**TDH = 148%**  
**Desl. = 1,48°**  
**FP = 0,553**

# Introdução a Fontes Chaveadas

## 1. Retificadores não Controlados (baixo FP)

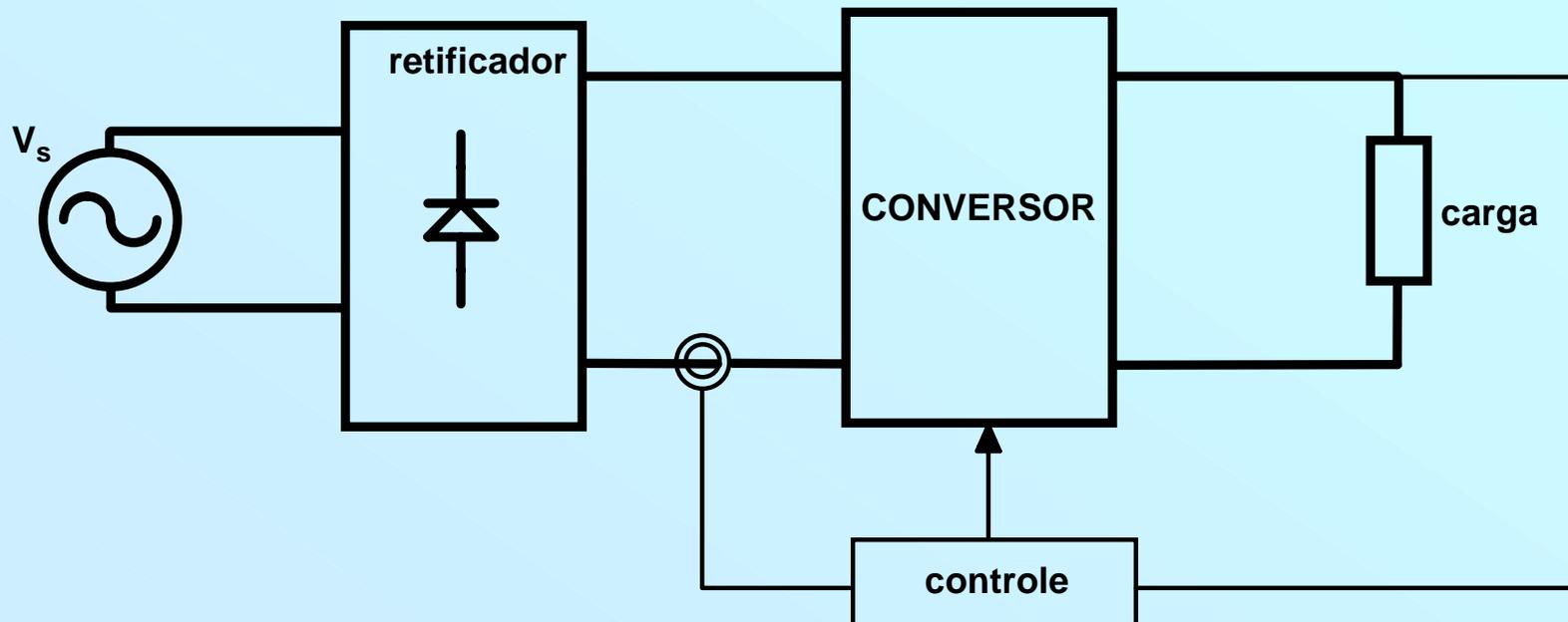
### 1.2 Trifásico



# Introdução a Fontes Chaveadas

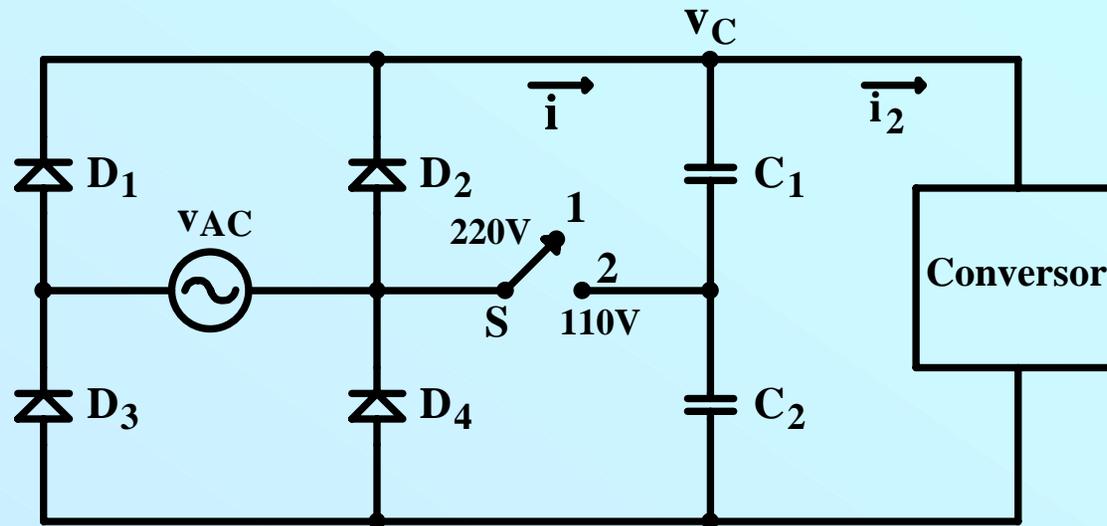
## 2. Retificadores Controlados (FP elevado)

### 2.1 Monofásicos: BOOST, BUCK, ...



# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada de Entrada

## Retificador Monofásico com Filtro Capacitivo

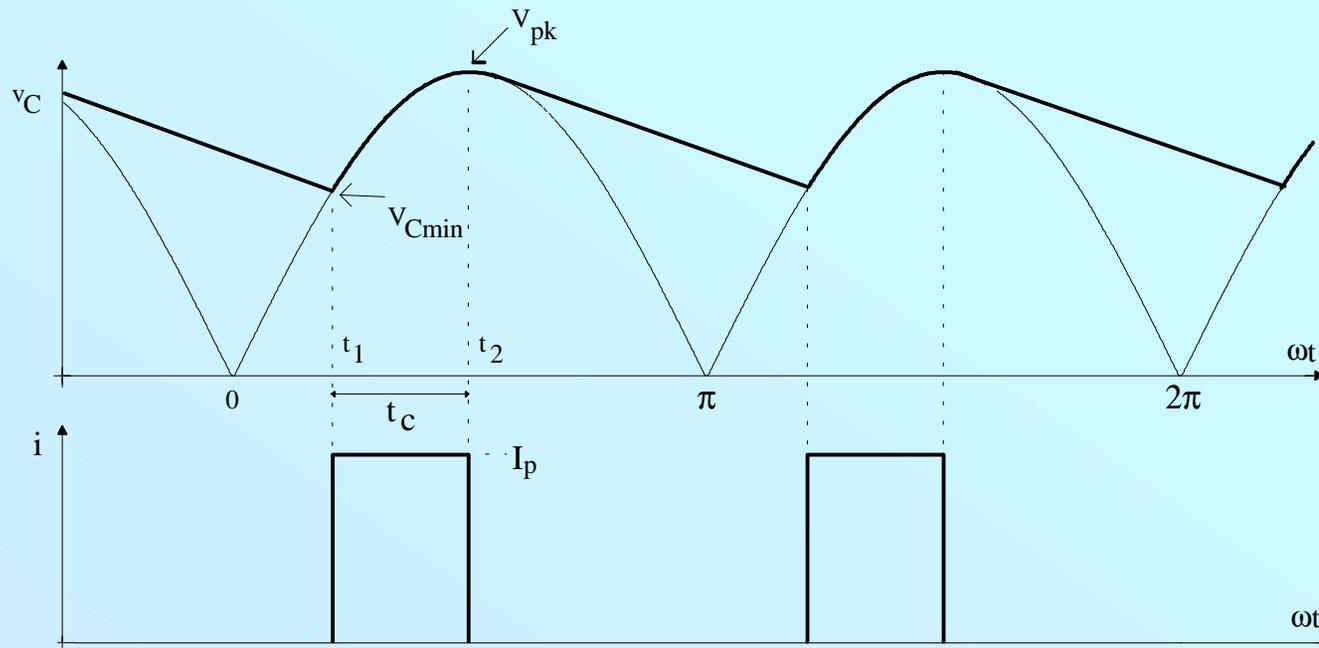


- Operação em 220 V e 110 V (dobrador de tensão)

• 220 V

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \frac{W_{in}}{2} = \frac{1}{2} C (V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2) \quad W_{in} = \frac{P_{in}}{f}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada



$$V_{Cmin} = V_{pk} \cos(2\pi f t_c)$$

$$t_c = \frac{\arccos(V_{Cmin} / V_{pk})}{2\pi f}$$

$t_c$  = intervalo de condução dos diodos ou tempo de recarga de C (equivalente)

- Carga transferida para C

$$\Delta Q = I_p t_c = C \Delta V$$

$$I_p = \frac{C \Delta V}{t_c} = \frac{C(V_{pk} - V_{Cmin})}{t_c}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

$$C(V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2) = \frac{P_{in}}{f} \quad C = \frac{P_{in}}{f(V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2)}$$

Seja

$I_{C1ef}$  - valor eficaz da componente alternada da corrente  $i$

$I_{med}$  - valor médio da corrente  $i$

$I_{ef}$  - valor eficaz da corrente  $i$

$$I_{ef}^2 = I_{med}^2 + I_{C1ef}^2$$

$$I_{C1ef} = \sqrt{I_{ef}^2 - I_{med}^2}$$

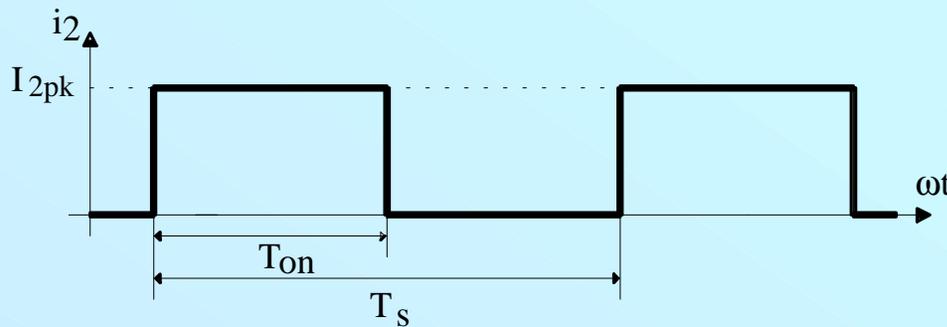
$$I_{med} = I_p \frac{2t_c}{T}$$

$$I_{ef} = I_p \sqrt{\frac{2t_c}{T}} \quad I_{C1ef} = \sqrt{I_p^2 \frac{2t_c}{T} - I_p^2 \left(\frac{2t_c}{T}\right)^2}$$

$$I_{C1ef} = I_p \sqrt{2t_c f - (2t_c f)^2}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

- Estágio de entrada é ligado ao conversor CC-CC operando em alta frequência



$$P_{in} = I_{2pk} V_{Cmin} D$$

Onde:

$$D = \frac{T_{on}}{T}$$

$$I_{2pk} = \frac{P_{in}}{V_{Cmin} D}$$

Para  $D_{max}=0,5 \rightarrow I_{2pk} = \frac{2P_{in}}{V_{Cmin}}$

$$I_{2ef} = \frac{I_{2pk}}{2} = \frac{P_{in}}{V_{Cmin}}$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

Logo:

$$I_{Cef} = \sqrt{I_{2ef}^2 + I_{C1ef}^2}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

- Grandezas Elétricas nos Diodos das Pontes Retificadoras

$$I_{Dmed} = \frac{P_{in}}{2V_{Cmin}}$$

$$I_{Def} = I_p \sqrt{\frac{t_c}{T}}$$

$$V_{Dmax} = V_{pk}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## •Exemplo Numérico

$$V_{AC} = 117V ; V_{ACmin} = 99V ; V_{ACmax} = 135V$$

$$f = 60Hz ; V_{Cmin} = 100V ; \eta = 0,7 ; P_{out} = 70W$$

$$a) P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{70}{0,7} = 100W$$

$$b) C = \frac{P_{in}}{f (V_{pk}^2 - V_{Cmin}^2)}$$

$$C = \frac{100}{60 \cdot (135^2 - 100^2)} \cong 203\mu F$$

$$V_{pk} = \sqrt{2} V_{ACmin} = \sqrt{2} \cdot 99 = 140V$$

$$V_{pk} = 135V$$

$$C_1 = C_2 = 406\mu F$$

$$\Delta V = V_{pk} - V_{Cmin} = 135 - 100 = 35V$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

$$\text{c) } t_c = \frac{\arccos(V_{C\min}/V_{pk})}{2\pi f} = \frac{\arccos(100/135)}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 1,954\text{ms}$$

$$\text{d) } I_p = \frac{C\Delta V}{t_c} = \frac{203 \cdot 10^{-6} \cdot 35}{1,954 \cdot 10^{-3}} = 3,64\text{A}$$

$$\text{e) } 2t_c f = 2 \cdot 1,954 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 0,2345$$

$$I_{C1ef} = I_p \sqrt{2t_c f - (2t_c f)^2} = 3,64 \cdot \sqrt{0,2345 - 0,2345^2} = 1,54\text{A}$$

$$\text{f) } I_{2ef} = \frac{P_{in}}{V_{C\min}} \cong \frac{100}{100} = 1\text{A}$$

$$\text{g) } I_{Cef} = \sqrt{I_{2ef}^2 + I_{C1ef}^2} = \sqrt{1^2 + 1,54^2} = 1,84\text{A}$$

$$\text{h) } I_{Def} = I_p \sqrt{\frac{t_c}{T}} = 3,64 \cdot \sqrt{\frac{1,954 \cdot 10^{-3}}{16,666 \cdot 10^{-3}}} = 1,25\text{A}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

$$\text{i) } I_{D\text{med}} = \frac{P_{\text{in}}}{2 V_{C\text{min}}} = \frac{100}{2 \cdot 100} = 0,5\text{A}$$

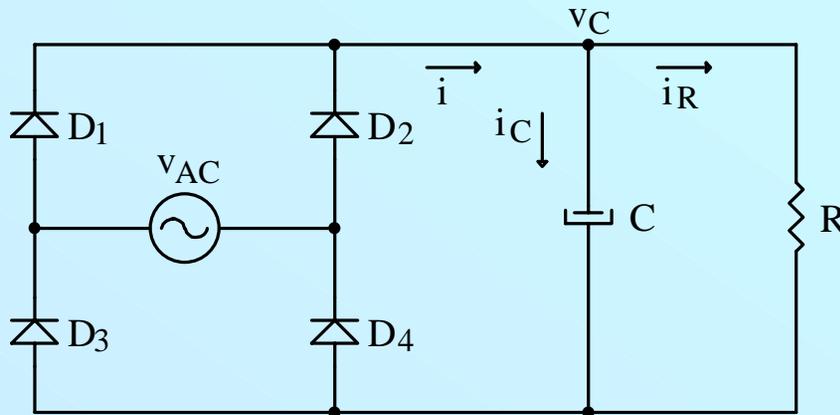
$$\text{j) } V_{D\text{max}} = V_{\text{pk max}} = \sqrt{2} V_{AC\text{max}} = \sqrt{2} \cdot 135 \cong 191\text{V}$$

$$\text{k) } I_{Dp} = I_p = 3,64\text{A}$$

**UFA !!**

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

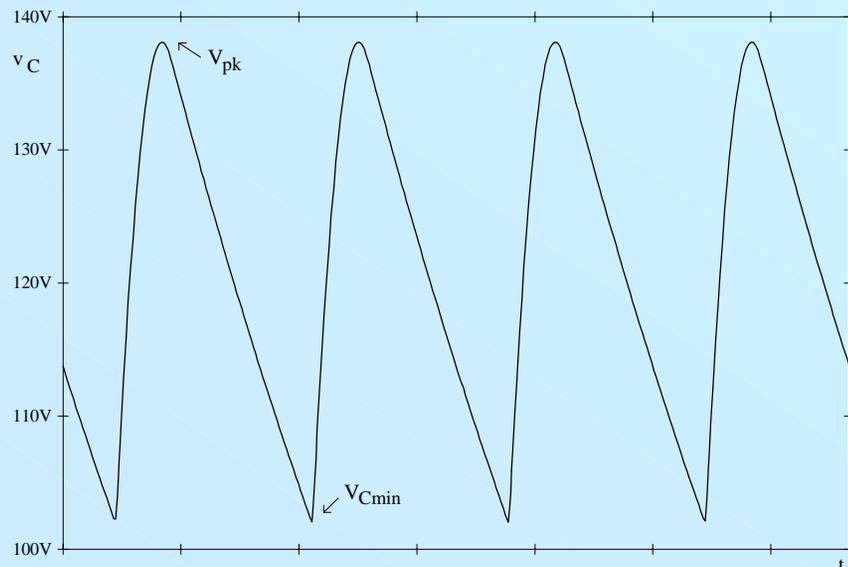
## • Simulação Numérica



$$v_{AC}(t) = \sqrt{2} \cdot 99 \text{ sen}(377t)$$

$$R = 100\Omega$$

$$C = 203\mu\text{F}$$



$$V_{pk} \cong 140\text{V}$$

$$V_{Cmin} \cong 102\text{V}$$

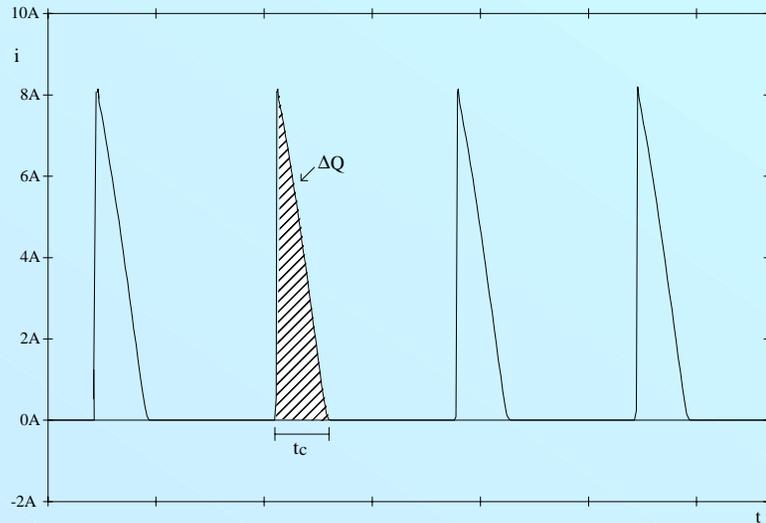
$$t_c = 2,1\text{ms}$$

$$I_{pico} \cong 8,0\text{A}$$

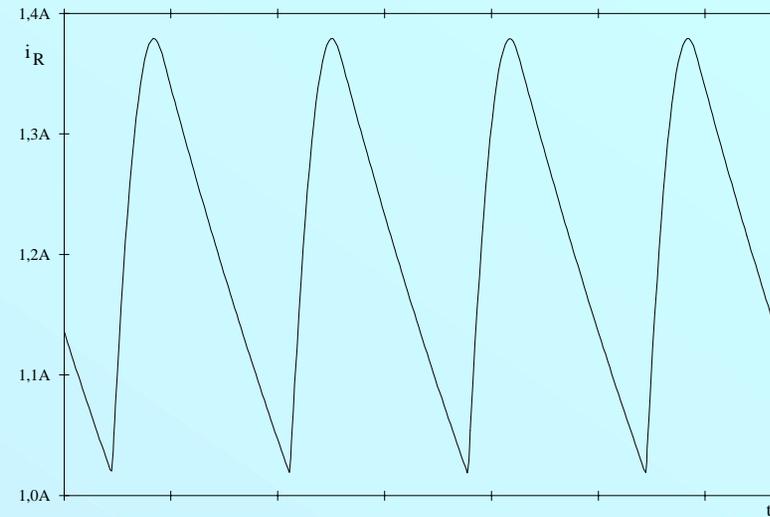
$$I_{med} \cong 1,0\text{A}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

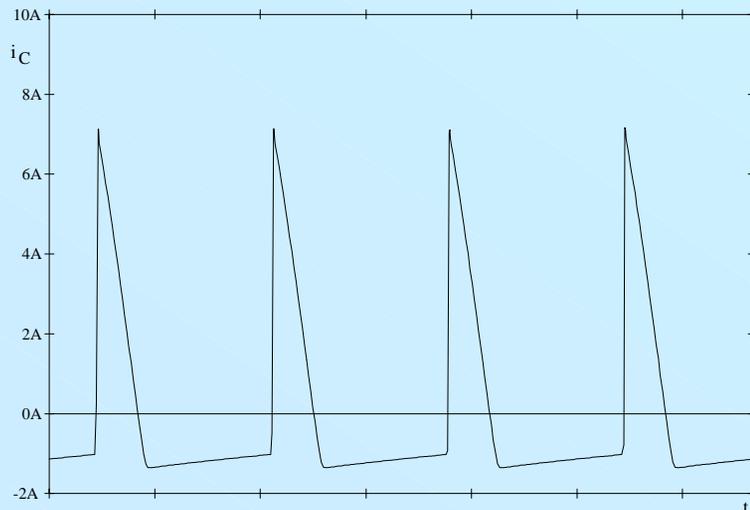
## • Corrente Capacitor + Carga



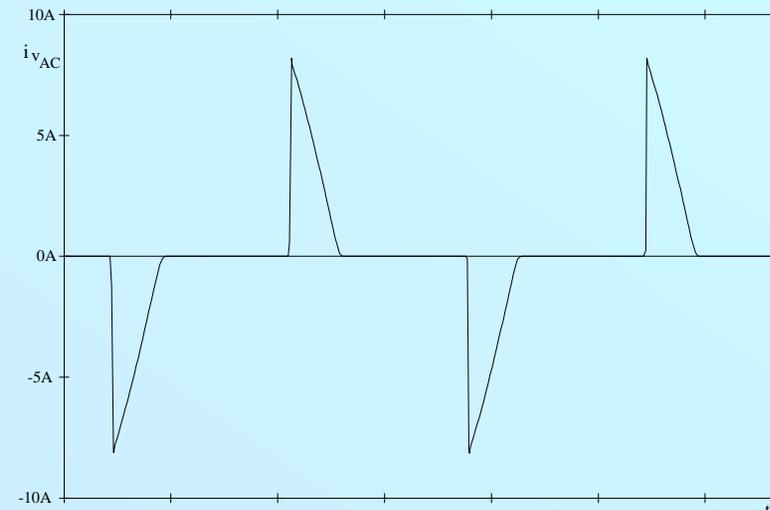
## • Corrente de Carga



## • Corrente no Capacitor



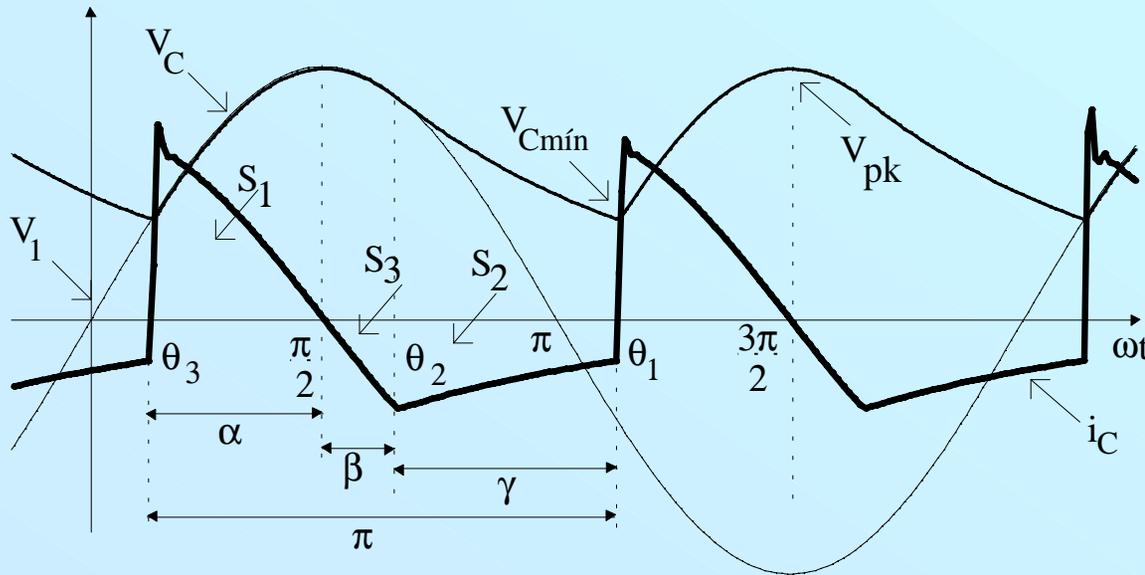
## • Corrente de Entrada



# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

- $V_{Cmin}$ ,  $V_{pk}$ ,  $t_c$ ,  $\Delta Q$  e  $I_{med}$  possuem praticamente os mesmos valores;
- $I_{pico} \cong 2I_p$

## • Análise Detalhada



$$V_C(\theta) = V_{pk} \cdot \text{sen}\theta$$

$$i_C(\theta) = \omega C \cdot \frac{dV_C(\theta)}{d\theta}$$

$$i_C(\theta) = \omega C V_{pk} \cos \theta$$

$$i_C(\theta_2) = i_R(\theta_2)$$

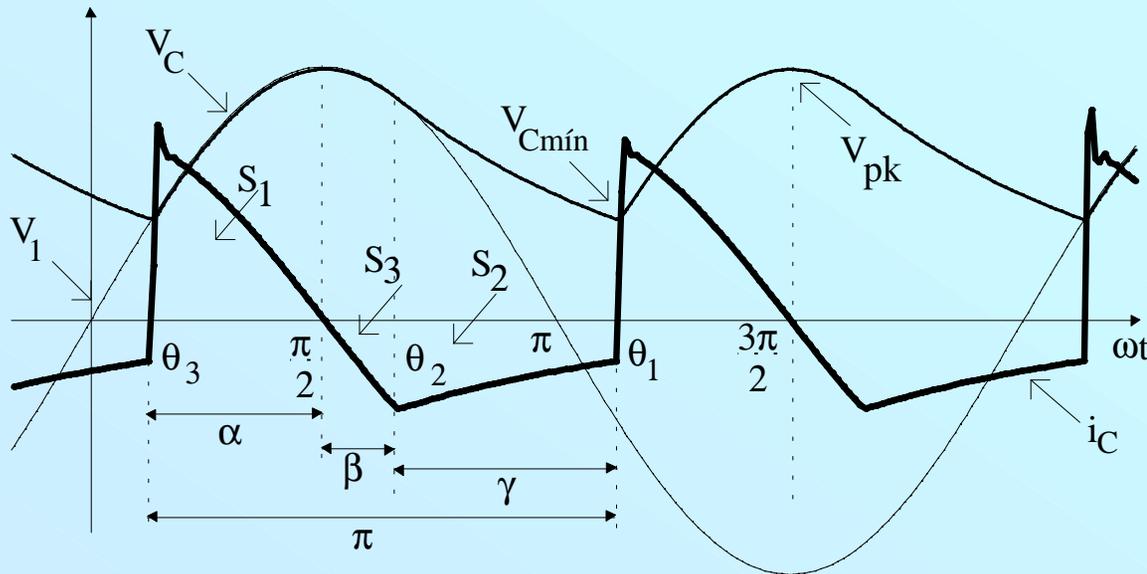
$$i_R(\theta_2) = -\frac{V_{pk}}{R} \text{sen}\theta_2$$

$$\omega C V_{pk} \cdot \cos \theta_2 = -\frac{V_{pk}}{R} \text{sen}\theta_2 \quad \text{tg}\theta_2 = -\omega RC$$

$$\theta_2 = \pi - \text{tg}^{-1}(\omega RC)$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Análise Detalhada



$$S_1 = |S_2| + |S_3|$$

$$S_1 = \int_{\frac{\pi}{2}-\alpha}^{\frac{\pi}{2}} i_C(\theta) \cdot d\theta$$

$$S_1 = \omega C V_{pk} (1 - \cos \alpha)$$

$$S_2 = \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{V_C(\theta)}{R} \cdot d\theta$$

$$V_C(\theta) = V_{pk} (\cos \beta) e^{-\frac{\theta}{\omega RC}}$$

$$S_2 = \frac{\omega RC \cdot V_{pk} \cdot \cos \beta}{R} \left[ 1 - e^{-\frac{\theta_1 - \theta_2}{\omega RC}} \right]$$

$$S_3 = \frac{i_C(\theta_2) \cdot \beta}{2}$$

$$S_3 = \frac{\beta \cdot V_{pk} \cdot \cos \beta}{2R}$$

$$V_{Cmin} = V_{pk} \sin(\theta_1 - \pi)$$

$$\sin(\theta_1 - \pi) = \frac{V_{Cmin}}{V_{pk}}$$

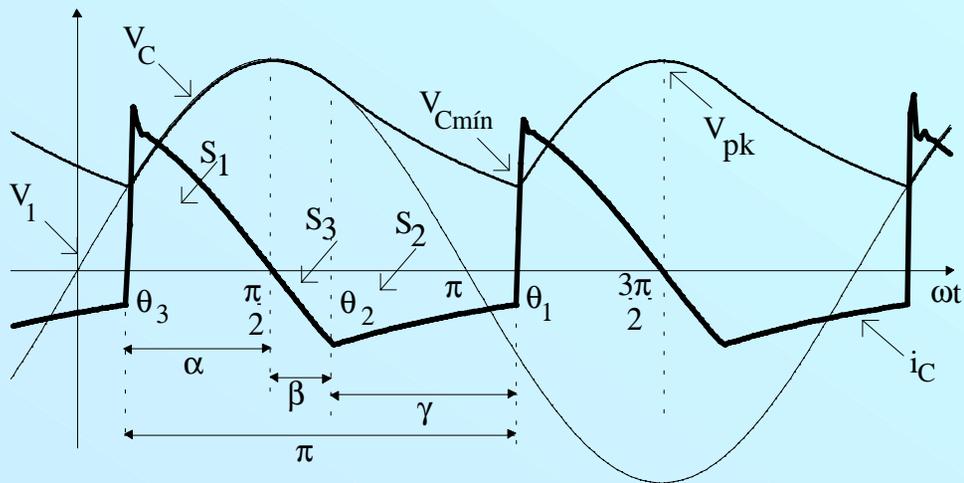
$$\theta_1 = \pi + \sin^{-1} \left( \frac{V_{Cmin}}{V_{pk}} \right)$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{2} - \theta_1 \quad \beta = \theta_2 - \frac{\pi}{2}$$

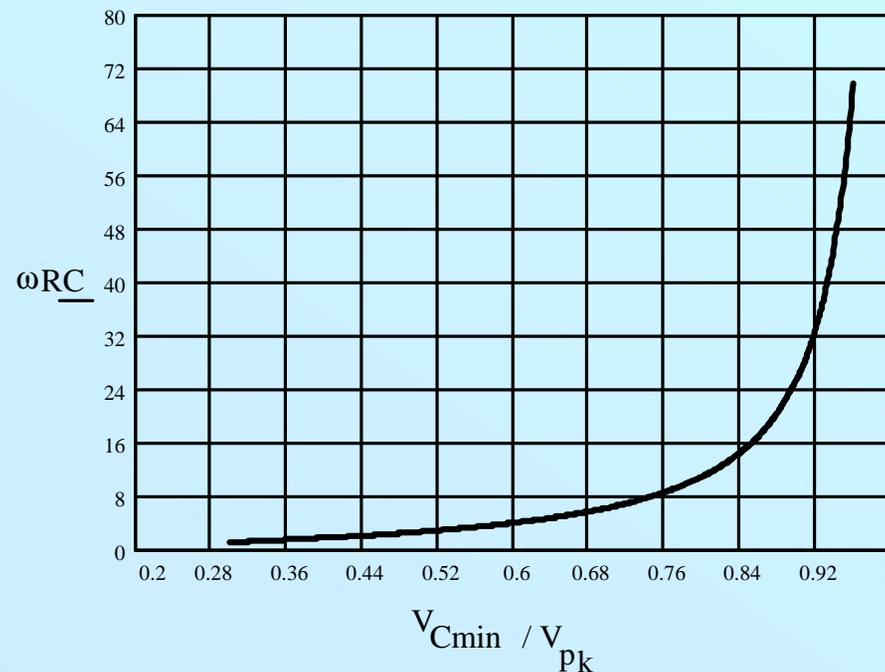
$$\alpha + \beta + \gamma = \pi$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Análise Detalhada

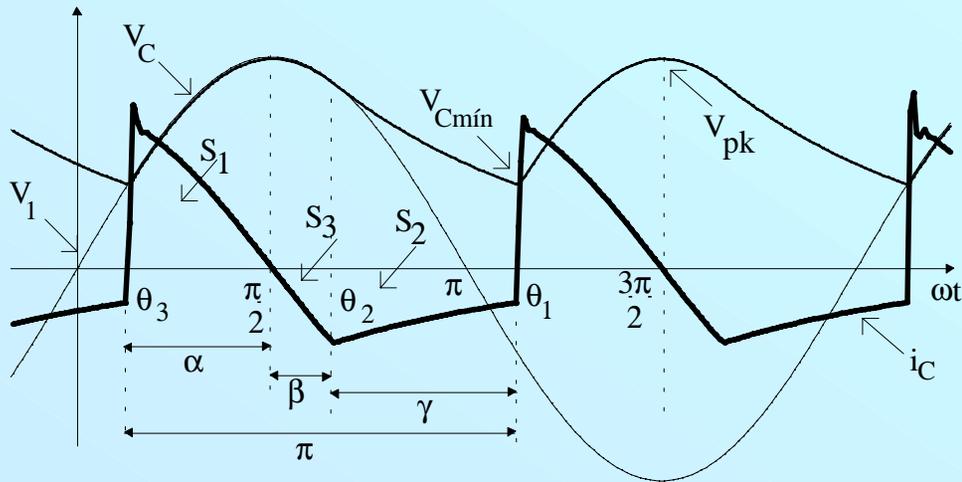


$$S_1 = |S_2| + |S_3|$$



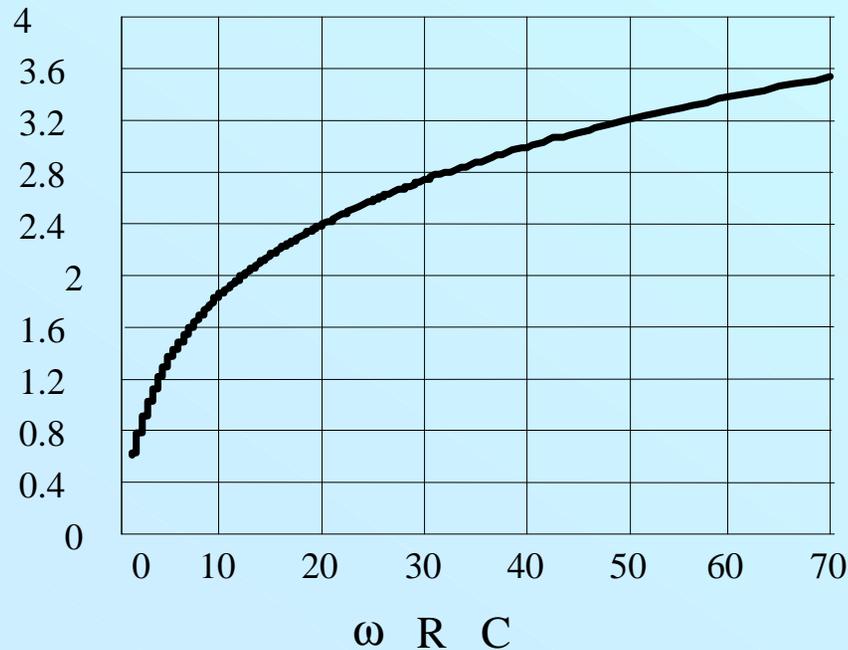
# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Análise Detalhada



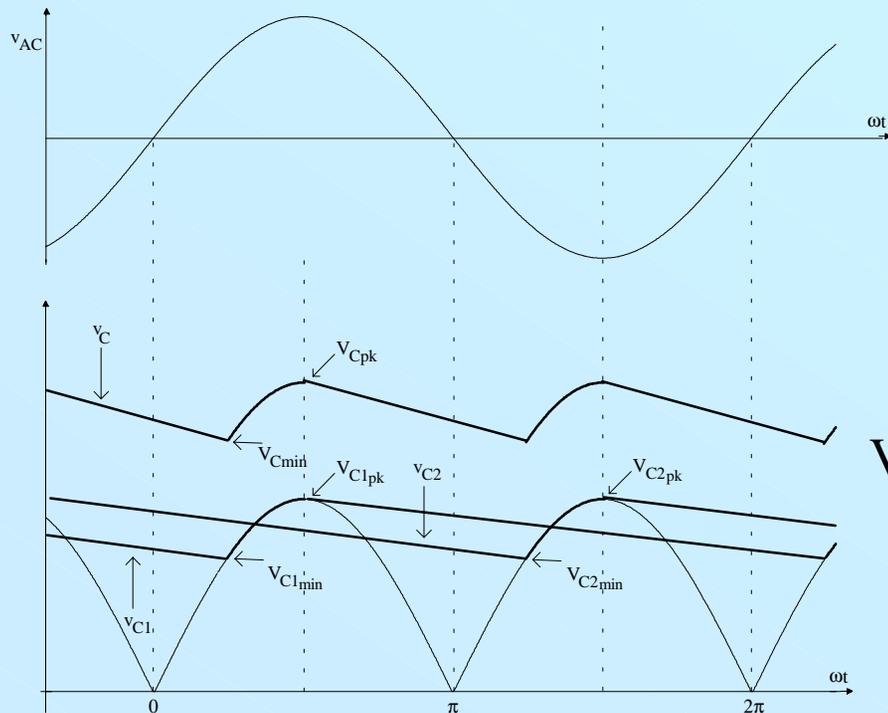
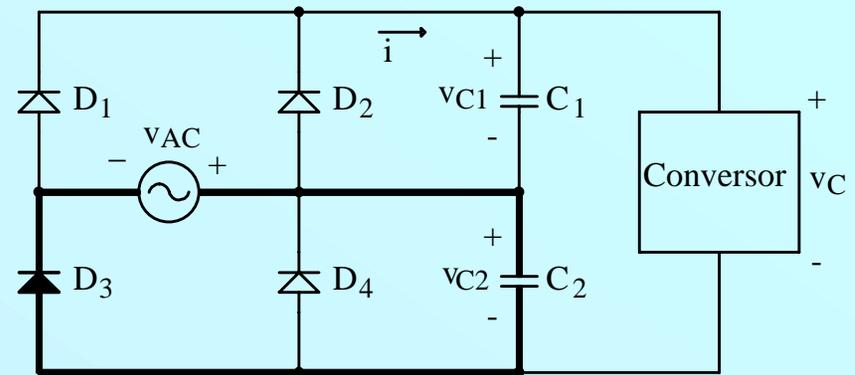
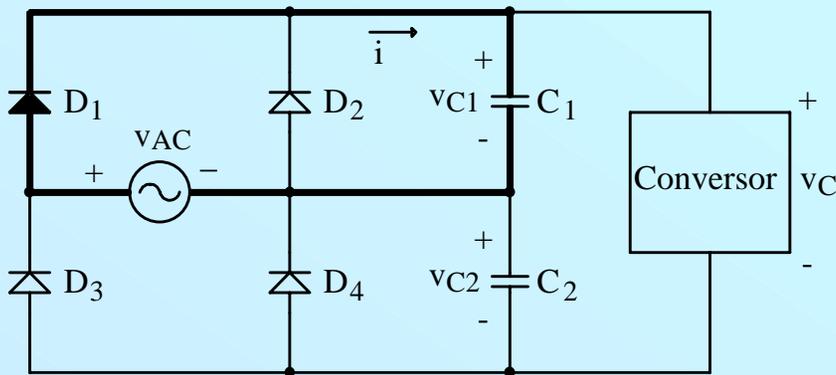
$$S_1 = |S_2| + |S_3|$$

$$\frac{R \cdot I_{Cef}}{V_{pk}}$$



# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Dobrador de Tensão (110 V)



$$V_{C_{\min}} = V_{C1_{\min}} + \frac{V_{C2_{\min}} + V_{C2_{pk}}}{2}$$

$$V_{C1_{\min}} = V_{C2_{\min}} \quad V_{C1_{pk}} = V_{C2_{pk}}$$

$$V_{C1_{\min}} = \frac{2V_{C_{\min}} - V_{C1_{pk}}}{3} \quad C_1 = C_2 = \frac{P_{in}}{f(V_{C1_{pk}}^2 - V_{C1_{\min}}^2)}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

- Dobrador de Tensão (110 V)

$$V_{C1_{\min}} = V_{C1_{\text{pk}}} \cos(2\pi f t_c)$$

$$t_c = \frac{\arccos(V_{C1_{\min}} / V_{C1_{\text{pk}}})}{2\pi f}$$

$$I_{p1} = \frac{C_1 \Delta V_1}{t_c} = \frac{C_1 (V_{C1_{\text{pk}}} - V_{C1_{\min}})}{t_c}$$

$$I_{\text{med}1} = I_{p1} t_c f$$

$I_{\text{ef}1}$  = valor eficaz da corrente  $i$

$$I_{\text{ef}1}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{t_c} I_{p1}^2 dt = I_{p1}^2 \frac{t_c}{T}$$

$$I_{\text{ef}1} = I_{p1} \sqrt{t_c f}$$

$I_{C_{\text{ef}1}}$  = valor eficaz da corrente (alternada) em um capacitor

$$I_{C_{1\text{ef}}} = \sqrt{I_{\text{ef}1}^2 - I_{\text{med}1}^2}$$

$$I_{C_{1\text{ef}}} = I_{p1} \sqrt{t_c f - (t_c f)^2}$$

$$I_{C_{\text{ef}}} = \sqrt{I_{C_{1\text{ef}}}^2 + I_{2\text{ef}}^2}$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Dobrador de Tensão (110 V) - Projeto

$$V_{AC} = 117V ; V_{ACmin} = 99V ; V_{ACmax} = 135V$$

$$f = 60Hz ; V_{Cmin} = 100V ; \eta = 0,7 ; P_{out} = 70W$$

$$a) V_{C1_{pk\ min}} = \sqrt{2} \cdot 99 = 140V$$

$$V_{C1_{pk\ min}} = 135V \quad V_{C1_{min}} = \frac{2V_{Cmin} - V_{C1_{pk}}}{3} = \frac{2 \cdot 200 - 135}{3} = 88,33V$$

$$b) W_{in} = \frac{P_{in}}{f} = \frac{100}{60} = 1,667J \quad C_1 = C_2 = \frac{P_{in}}{f(V_{C1_{pk}}^2 - V_{C1_{min}}^2)} = \frac{1,667}{135^2 - 88,33^2} \cong 160\mu F$$

$$C \cong 80\mu F$$

$$c) t_c = \frac{\arccos(V_{C1_{min}}/V_{C1_{pk}})}{2\pi f} = \frac{\arccos(88,33/135)}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 2,275ms$$

$$d) I_{pl} = \frac{C_1(V_{C1_{pk}} - V_{C1_{min}})}{t_c} = \frac{160 \cdot 10^{-6}(135 - 88,33)}{2,275 \cdot 10^{-3}} = 3,28A$$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## • Dobrador de Tensão (110 V) - Projeto

e)  $t_c f = 2,275 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 0,1365$

$$I_{C_{1ef}} = I_{p1} \sqrt{t_c f - (t_c f)^2} = 3,28 \cdot \sqrt{0,1365 - (0,1365)^2} = 1,126A$$

f)  $I_{2ef} = \frac{P_{in}}{V_{C_{min}}} = \frac{100}{200} = 0,5A$

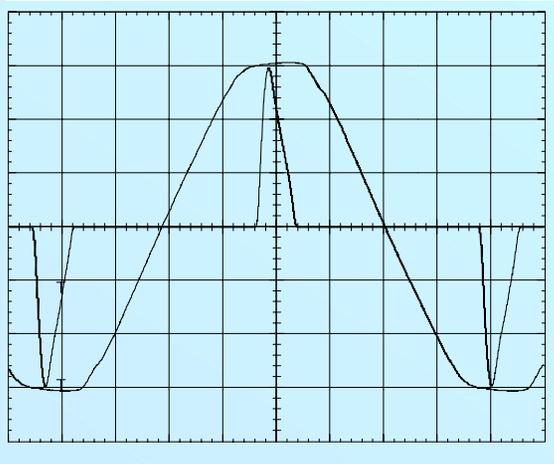
g)  $I_{C_{ef}} = \sqrt{I_{C_{1ef}}^2 + I_{2ef}^2} = \sqrt{1,126^2 + 0,5^2} = 1,23A$

h)  $V_{Dp_{max}} = 2\sqrt{2} V_{CA_{max}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 135 \cong 382V$

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

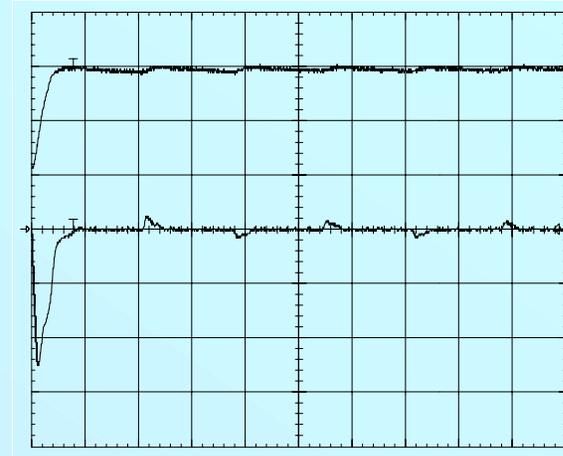
- Resultados Experimentais

Tensão e Corrente de Entrada

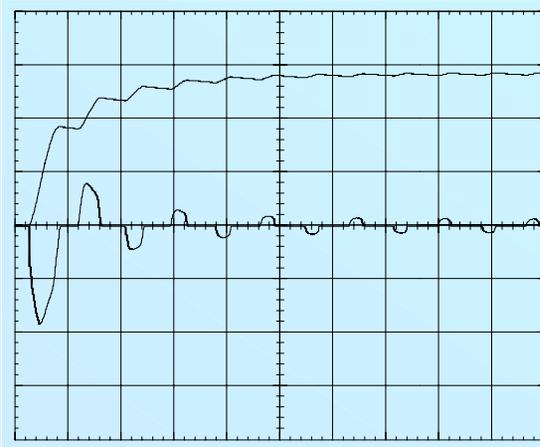


100V/div e 500mA/div

Transitório de Partida



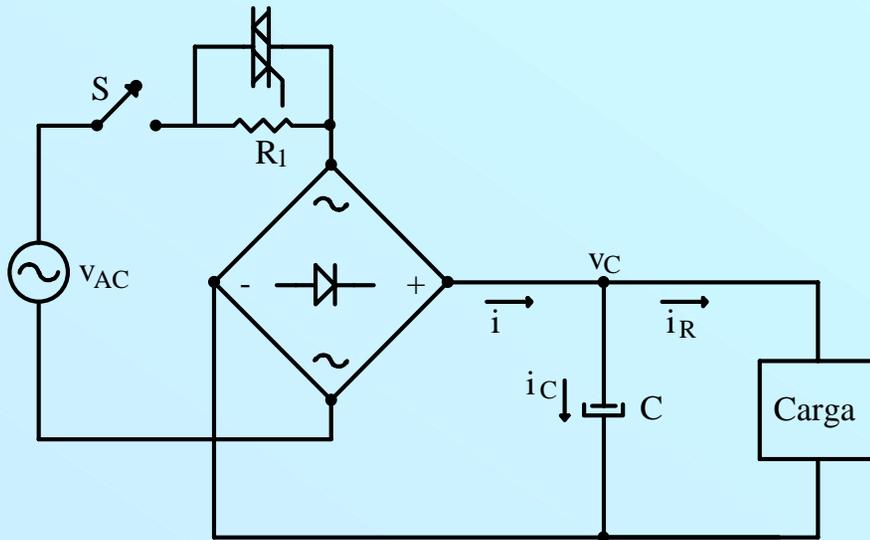
100V/div e 10 A/div



100V/div e 5 A/div - com resistor de 22  $\Omega$  em série.

# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

## •Proteção de In-rush



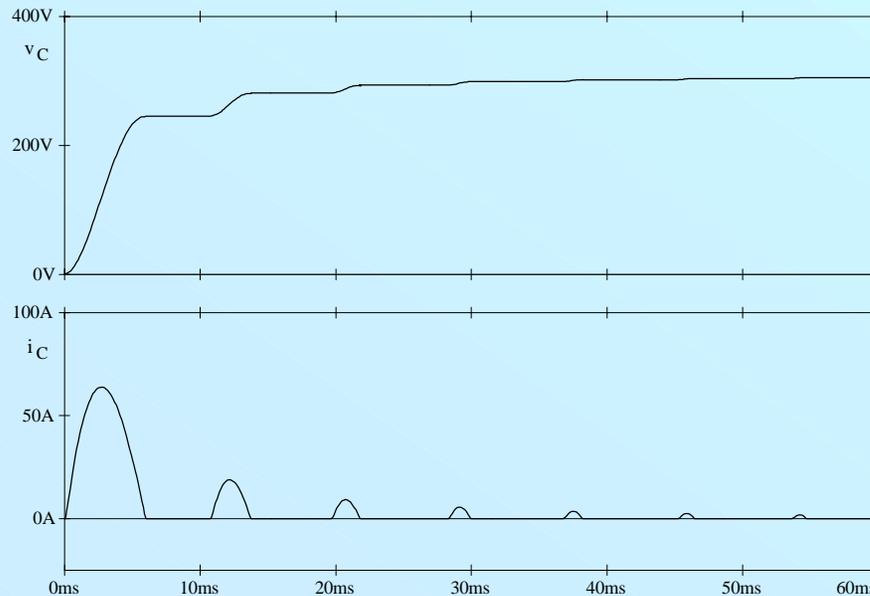
$$I_p < \frac{V_{pk}}{R_1}$$

$$\tau = 25\text{ms}$$

$$\tau_1 = R_1 C = 10 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 10\text{ms}$$

$$\tau = 3\tau_1 = 3R_1 C$$

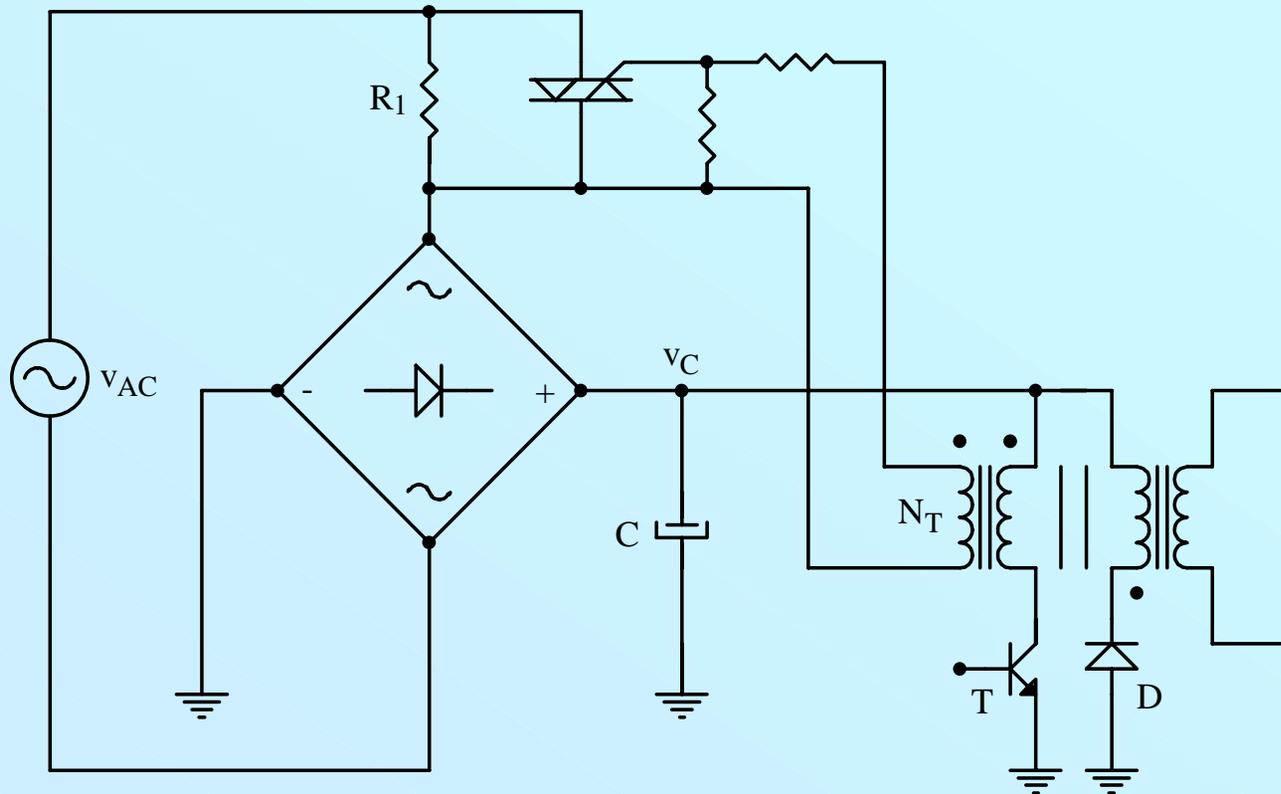
$$A = 5 \cdot \tau \cong 15 \cdot R_1 \cdot C$$



$$R = 2\Omega$$

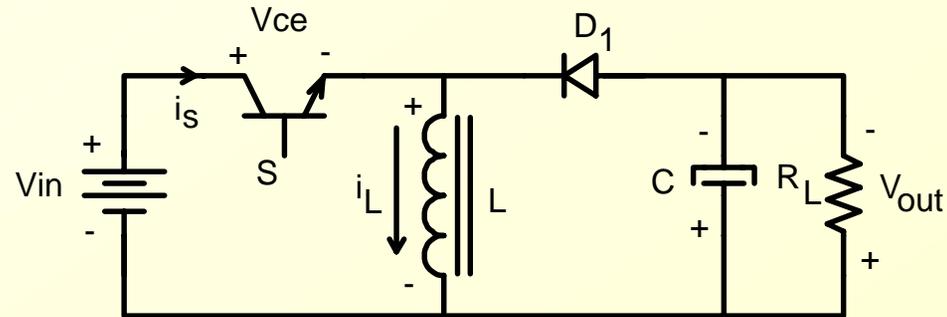
# Capítulo I – Estágio Retificador com Filtro de Entrada

- Circuito de disparo para um Triac

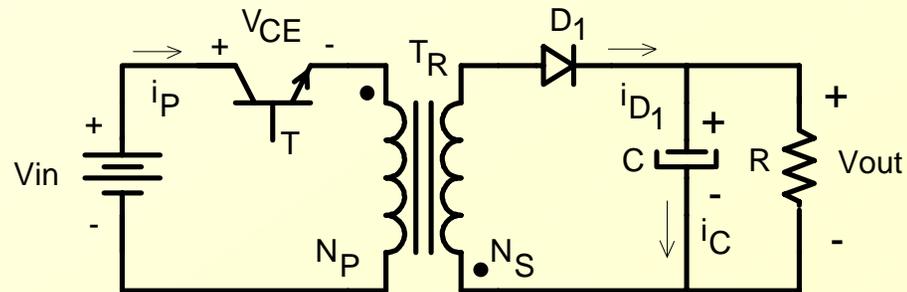


# Capítulo II - Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

BUCK-BOOST



FLYBACK

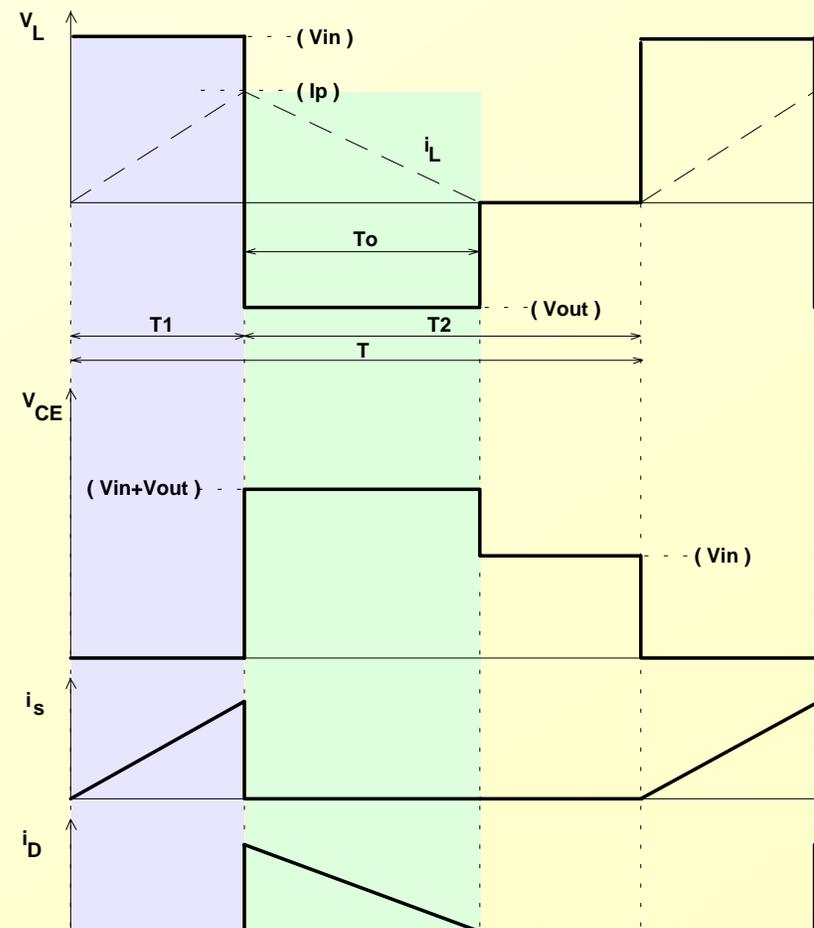
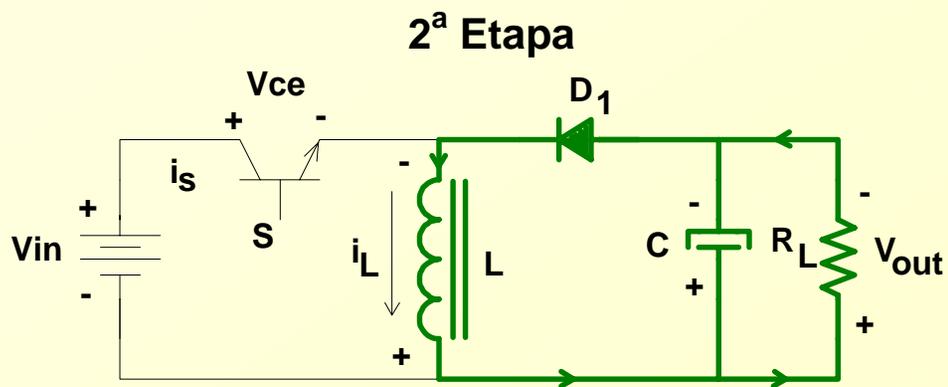
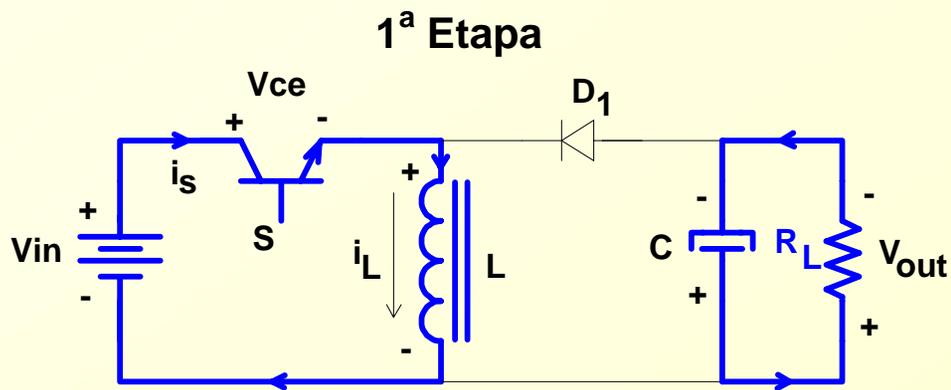


- Funções do Transformador:
- isolamento entre a fonte e a carga
  - acumulação de energia quando  $T$  está fechada
  - adaptar a tensão necessária no secundário

# Capítulo II - Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Conversor CC-CC do Tipo Buck-Boost

Etapas de Funcionamento e Formas de Onda Básicas para Condução Descontínua:



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

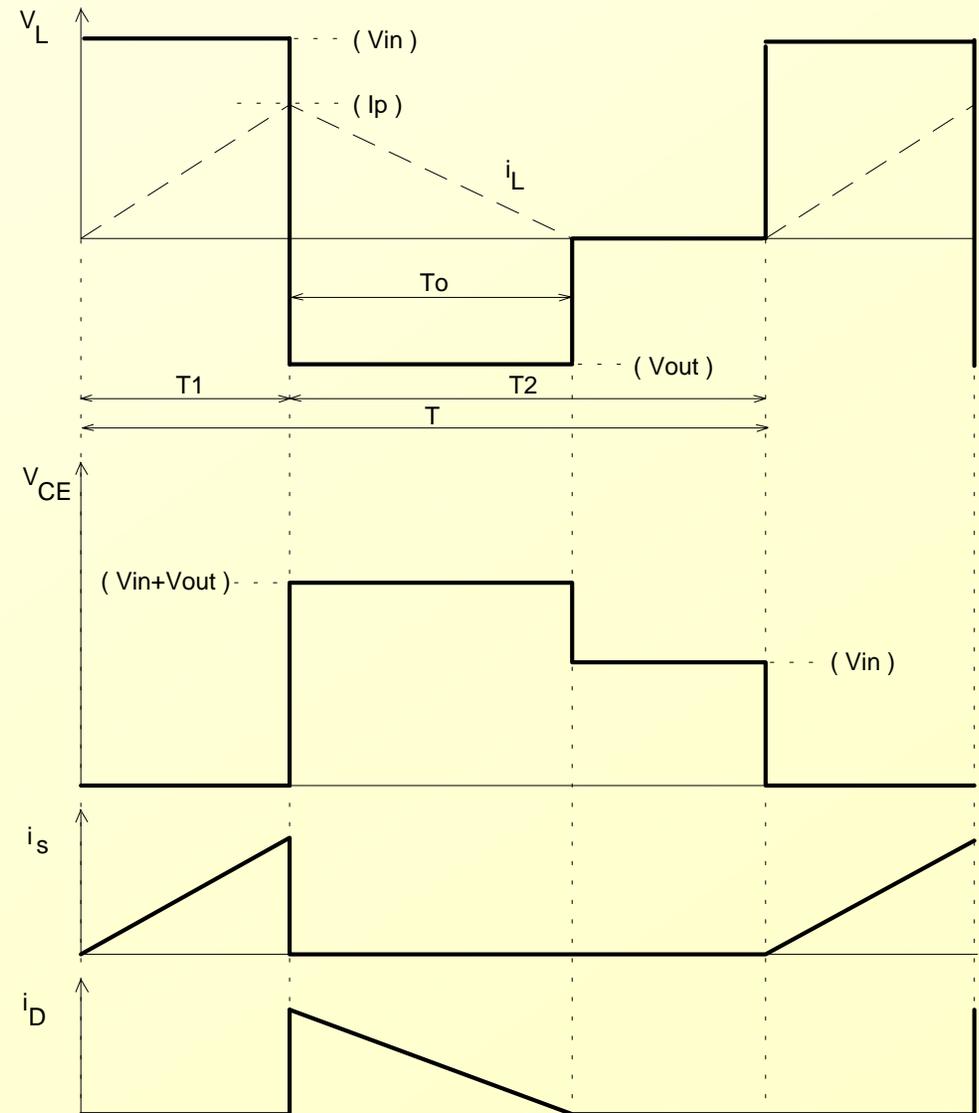
## • Equacionamento

### a) Corrente de Pico na entrada

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad D = \frac{T_1}{T}$$

$$I_p = \frac{V_{in}}{L} D T \quad I_p = \frac{V_{in}}{f.L} D$$

$$I_{p_{max}} = \frac{V_{in}}{f.L} D_{max} \quad D_{max} = 0,45$$



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

## b) Tensão de Carga

$$P_1 = V_{in} \cdot I_{1md} = V_{in} \cdot \frac{I_p \cdot T_1}{2T}$$

$$P_1 = \frac{V_{in}^2 \cdot T_1^2}{2 \cdot L \cdot T} = P_2 = \frac{V_{out}^2}{R_L}$$

$$V_{out} = \sqrt{\frac{R_L \cdot V_{in}^2 \cdot T_1^2}{2 \cdot L \cdot T}} = V_{in} \cdot T_1 \cdot \sqrt{\frac{R_L \cdot f}{2 \cdot L}}$$

$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot D}{f} \cdot \sqrt{\frac{R_L \cdot f}{2 \cdot L}} = V_{in} \cdot D \cdot \sqrt{\frac{R_L \cdot f}{2 \cdot L}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

c) Indutor

$$P_{in} = P_L = \frac{P_{out}}{\eta} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I_p^2 \cdot f$$

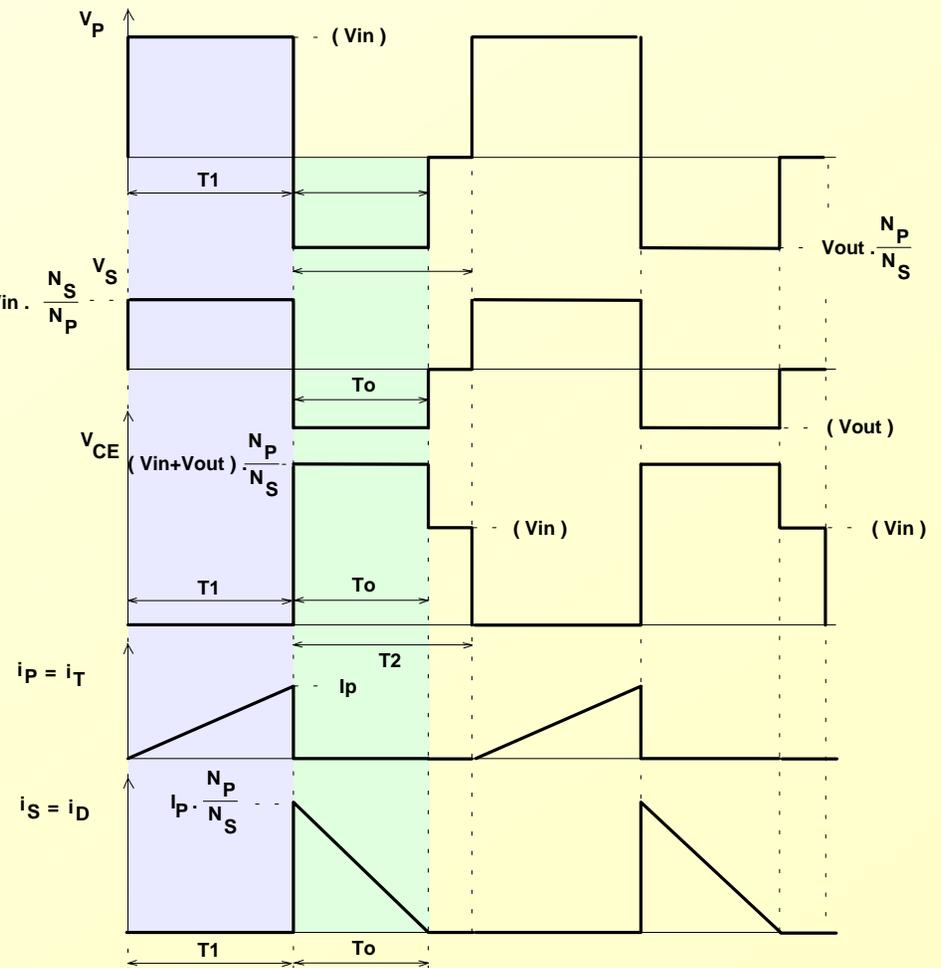
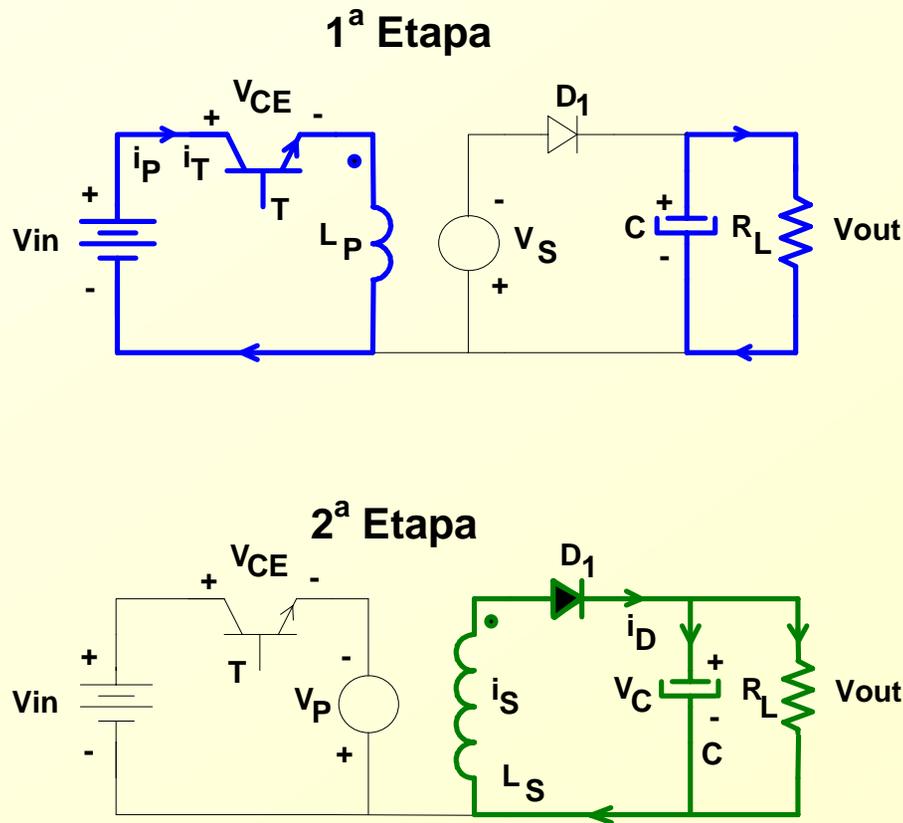
$$\frac{P_{out}}{\eta} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot f \cdot \frac{V_{in}^2 \cdot D_{max}^2}{f^2 \cdot L^2}$$

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{in}^2 \cdot D_{max}^2 \cdot \eta}{P_{out} \cdot f}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Conversor CC-CC do Tipo Flyback

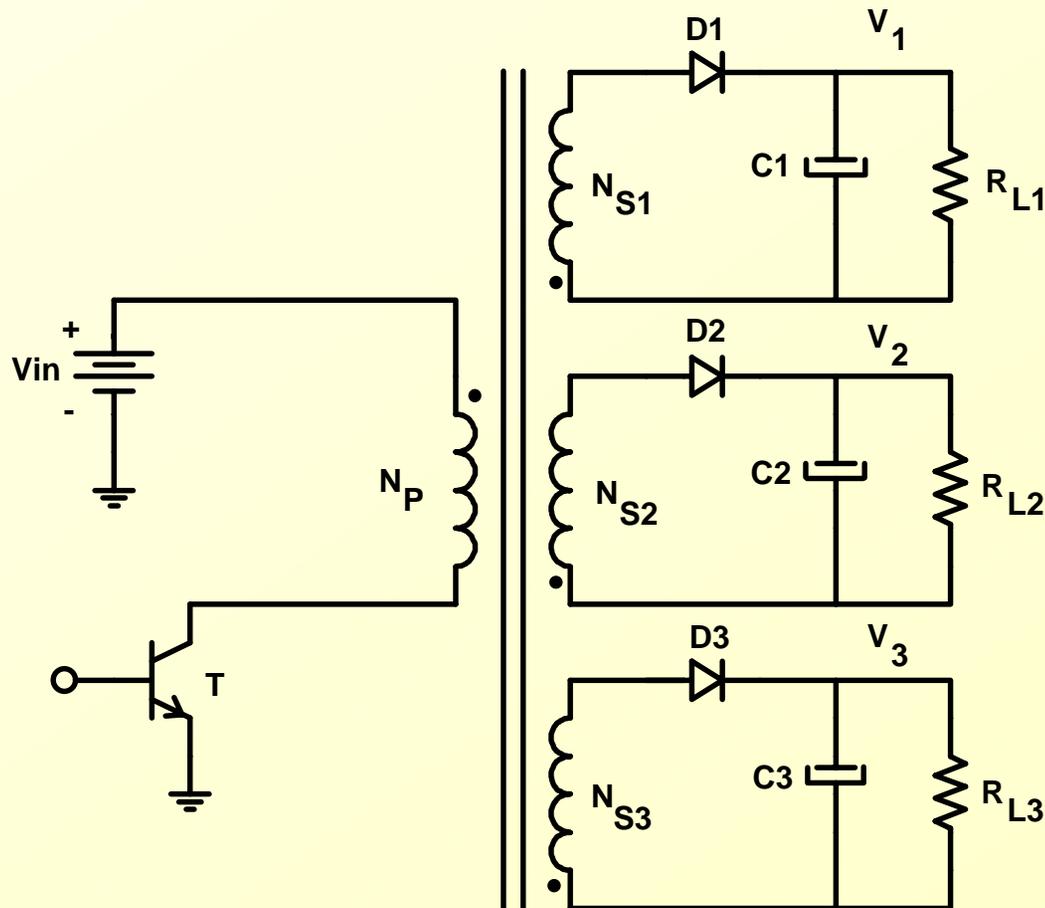
## Etapas de Funcionamento e Formas de Onda Básicas para Condução Descontínua:



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Conversor CC-CC do Tipo Flyback

Flyback com Múltiplas Saídas



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- **Conversor CC-CC do Tipo Flyback**

**Características gerais:** - baixo custo

- saídas múltiplas
- aceita grande variação da resistência de carga
- isolamento entre a entrada e a saída
- boa regulação cruzada
- dispensa indutor de filtragem
- permite uso de diodos lentos na saída (cond. desc.)
- resposta rápida
- fácil de ser estabilizada

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

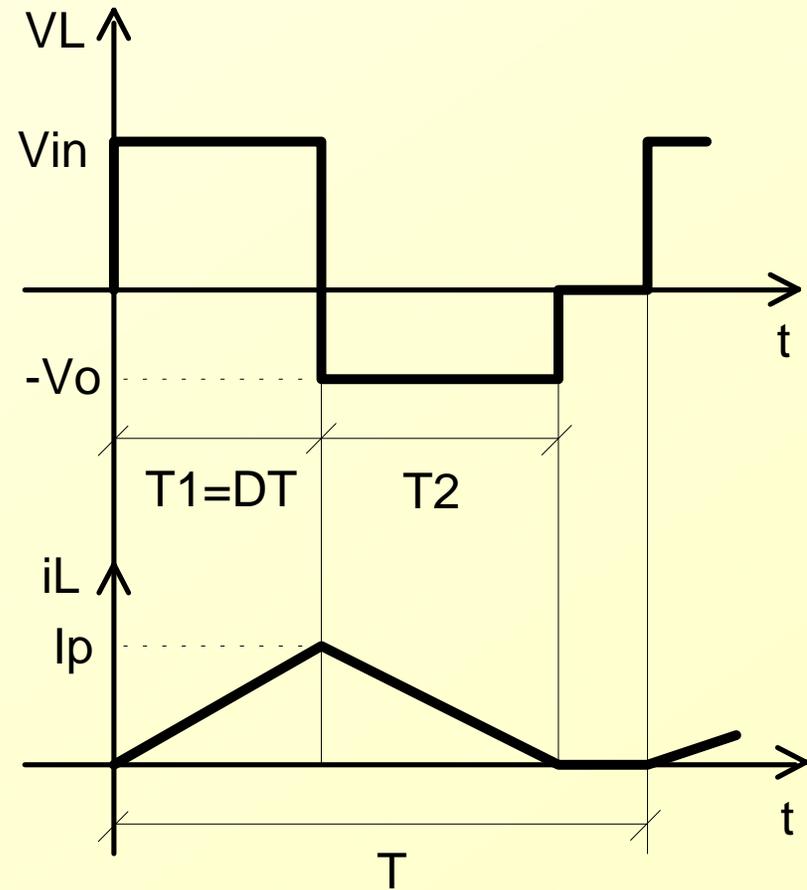
- Equacionamento

a) Corrente de Pico no Primário

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$I_p = \frac{V_{in}}{L} D T$$

$$I_p = \frac{2 P_{out}}{\eta V_{in} D_{max}}$$



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

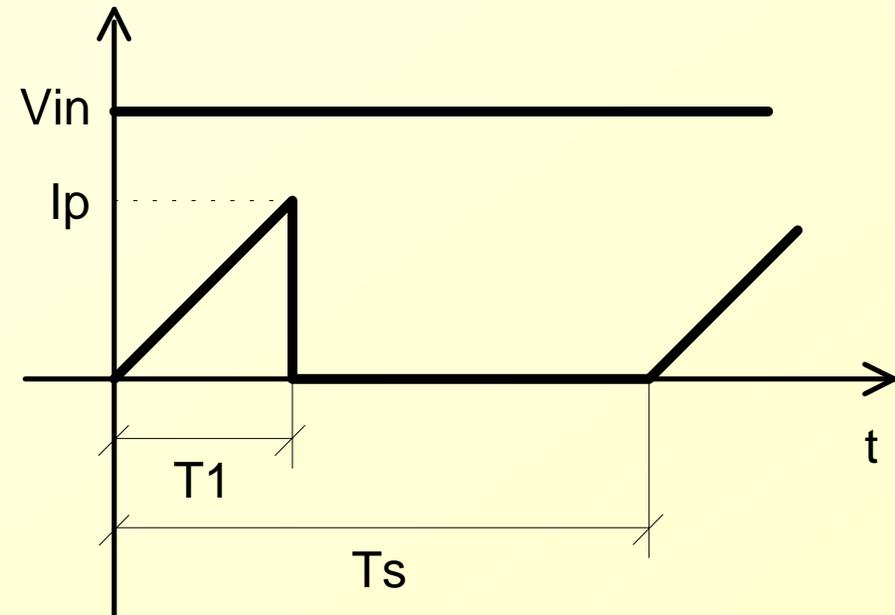
- Equacionamento

- b) Tensão na Carga

$$I_{1\text{md}} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_1} I_p \frac{t}{T_1} dt = \frac{I_p T_1}{2 T_s}$$

$$P_1 = V_{\text{in}} I_{1\text{md}} = \frac{V_{\text{in}}^2 T_1^2}{2 L T_s}$$

$$P_1 \eta = P_o = \frac{V_{\text{out}}^2}{R_L}$$



$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} D \sqrt{\frac{R_L \eta}{2 L f_s}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- **Equacionamento**

- c) **Cálculo da Indutância**

$$P_L = \frac{dw}{dt} = \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{1}{2} L I_p^2 f_s = \frac{P_{out}}{\eta}$$

$$L = \frac{1}{2} \frac{V_{in}^2 D_{max}^2 \eta}{P_{out} f_s}$$

- d) **Razão Cíclica Crítica**

$$D_{crit} = \frac{V_{out}/V_{in}}{1 + (V_{out}/V_{in})}$$

→ **para DCM  $D \leq D_{crit}$**

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- **Equacionamento**

- e) **Esforços nos Semicondutores**

$$V_{ce} = -V_D = V_{in} + V_o = V_{in} \left( 1 + \frac{D_{max}}{1 - D_{max}} \right)$$

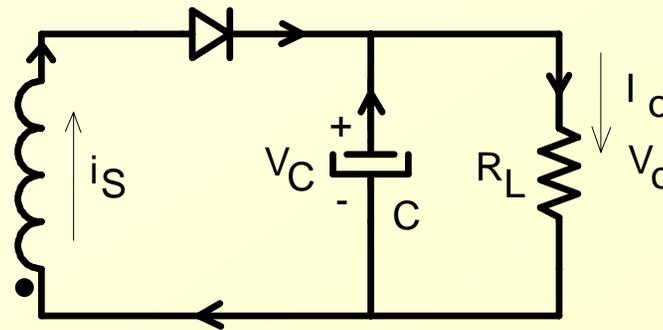
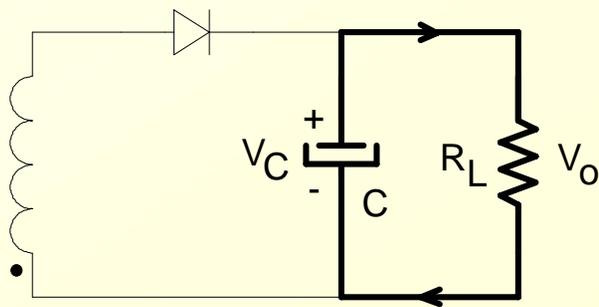
$$I_{efT} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \frac{I_p}{T_1} t \right)^2 dt} = \frac{V_{in}}{f L} \sqrt{\frac{D^3}{3}}$$

$$I_{Dmd} = \frac{V_{in}^2 D^2}{2 f L V_{out}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Equacionamento

- f) Capacitor de Saída



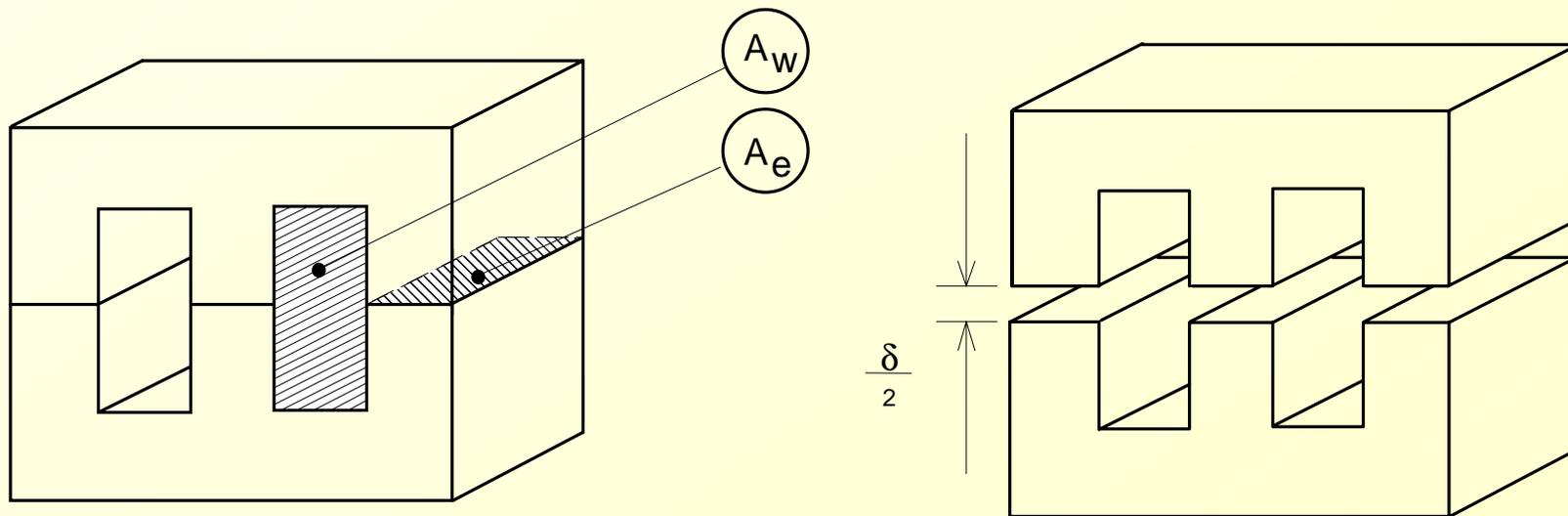
$$\Rightarrow i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad C = \frac{I_o D_{\max}}{f_s \Delta V_c}$$

$$\Rightarrow R_{SE} < \frac{\Delta V_c}{I_s} \quad \Rightarrow I_{Cef} = \sqrt{I_{sef}^2 - I_o} = \sqrt{I_s^2 \frac{T_o}{3 T_s} - \left( \frac{I_s T_o}{2 T_s} \right)^2}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Equacionamento

- g) Transformador



$$A_e A_w = \frac{1,1 P_{out} 10^4}{k_p k_w J \Delta B f_s}$$

$k_p$  - fator de utilização do primário (0,5)

$k_w$  - fator de utilização da área do enrolamento (0,4 )

$J$  - densidade de corrente ( 250 - 400A/cm<sup>2</sup>)

$\Delta B$  - variação de fluxo eletromagnético (0,2-0,3T)

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- **Equacionamento**

- g) Transformador

$$\delta = \frac{2 \mu_o \Delta W}{\Delta B^2 A_e}$$

$\delta$  - entreferro (metros)

$\mu_o$  -  $4\pi 10^{-7}$

$A_e$  - área da secção transversal do núcleo (metros<sup>2</sup>)

$\Delta W$  - energia (joule)

$\Delta B$  - variação de fluxo eletromagnético (0,2-0,3T)

$$N_p = \frac{\Delta B \delta}{0,4 \pi I_p}$$

$N_p$  - número de espiras do primário

$\delta$  - entreferro (centímetros)

$\Delta B$  - variação de fluxo eletromagnético (Gauss= $10^4$ T)

$$N_{sn} = N_p \frac{(V_{outn} + V_F)(1 - D_{nom})}{V_{in} D_{nom}}$$

$N_s$  - número de espiras do secundário

$V_F$  - queda de tensão no diodo

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

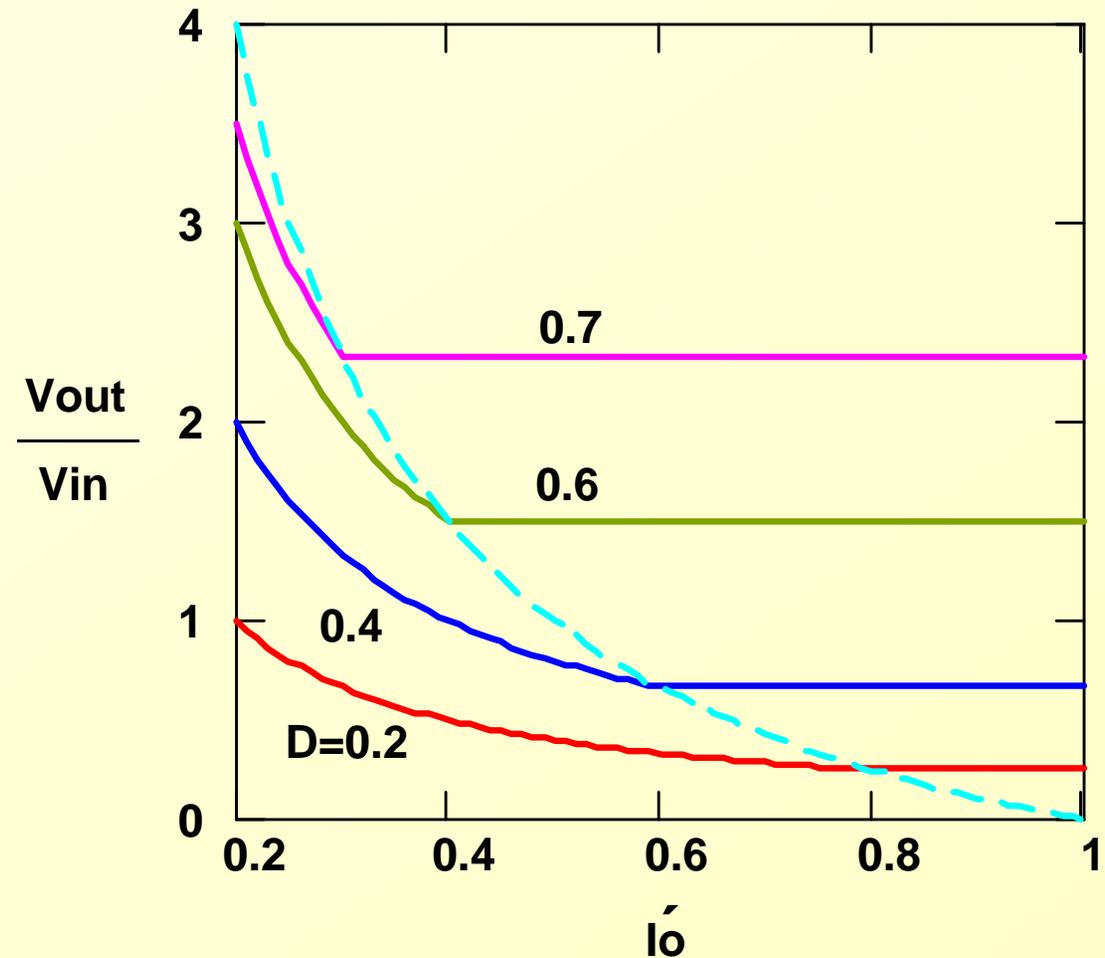
- Característica de Saída em CCM e DCM

## Condução Descontínua

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \sqrt{\frac{R_L \eta}{2 L f_s}} = \frac{D}{I'_o}$$

## Condução Contínua

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{1-D}$$



# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Procedimento de Projeto para o Buck-Boost em Cond. Desc.

1. Especificar:  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $f_s$ ,  $\Delta V_o$ ,  $\eta$ .

2. Calcular a razão cíclica crítica e definir a nominal.

$$D_{crit} = \frac{V_{out}/V_{in}}{1 + (V_{out}/V_{in})} \quad \rightarrow \text{para DCM } D_{nom} \leq D_{crit}$$

$$\rightarrow \text{tempo de condução chave} = D_{nom} T_s$$

3. Calcular a indutância.

$$L = \frac{1}{2} \frac{V_{in}^2 D_{max}^2 \eta}{P_{out} f_s}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Procedimento de Projeto para o Buck-Boost em Cond. Desc.

4. Calcular a corrente de pico máxima.

$$I_p = \frac{V_{in}}{f_s L} D_{nom}$$

5. Calcular a resistência de carga.

$$R_o = \frac{V_{out}^2}{P_{out}}$$

6. Calcular a capacitância.

$$C = \frac{I_o D_{max}}{f_s \Delta V_c}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Procedimento de Projeto para o Flyback em Cond. Desc.

1. Especificar:  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $f_s$ ,  $\Delta V_o$ ,  $\eta$ .

2. Calcular o produto  $A_e A_w$  e definir o núcleo.

$$A_e A_w = \frac{1,1 P_{out} 10^4}{k_p k_w J \Delta B f_s}$$

3. Calcular a corrente de pico no primário.

$$I_p = \frac{2 P_{out}}{\eta V_{in} D_{max}}$$

4. Calcular a energia acumulada no transformador.

$$\Delta W = \frac{P_{out}}{\eta f_s}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Procedimento de Projeto para o Flyback em Cond. Desc.

5. Calcular o entreferro.

$$\delta = \frac{2 \mu_0 \Delta W}{\Delta B^2 A_e}$$

6. Calcular o número de espiras do primário e secundário (s).

$$N_p = \frac{\Delta B \delta}{0,4 \pi I_p} \quad N_{sn} = N_p \frac{(V_{outn} + V_F)(1 - D_{nom})}{V_{in} D_{nom}}$$

7. Calcular a indutância magnetizante do primário e secundário.

$$L = \frac{1}{2} \frac{V_{in}^2 D_{max}^2 \eta}{P_{out} f_s}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FLYBACK

- Procedimento de Projeto para o Flyback em Cond. Desc.

8. Calcular a(s) corrente(s) de pico no(s) secundário(s).

$$I_{sn} = I_p a_n$$

9. Calcular a(s) resistência(s) de carga(s).

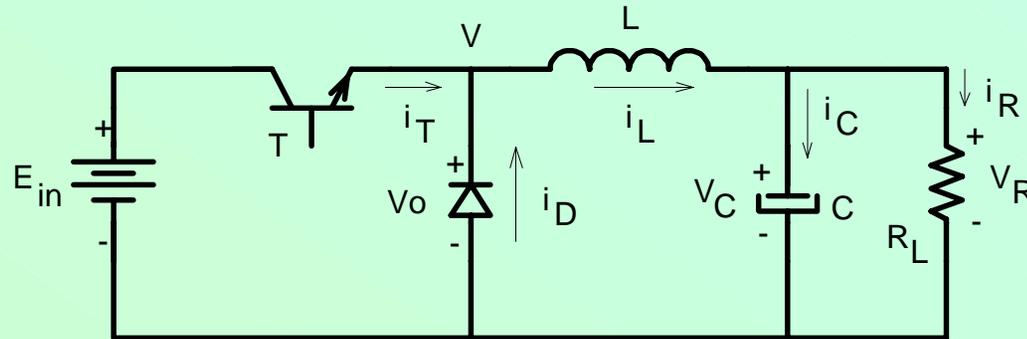
$$R_{on} = \frac{V_{outn}^2}{P_{outn}}$$

10. Calcular a(s) capacitância(s).

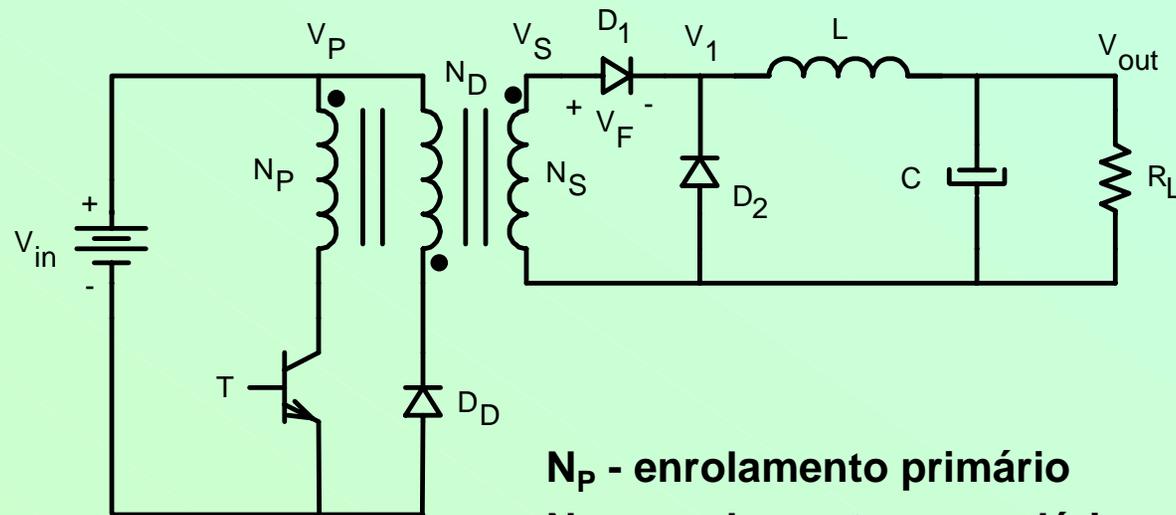
$$C_{on} = \frac{I_{outn} D_{nom}}{f_s \Delta V_{outn}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

BUCK



FORWARD



$N_P$  - enrolamento primário

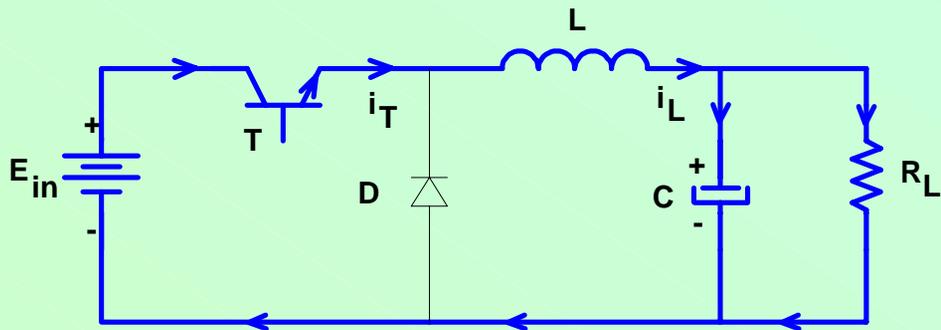
$N_S$  - enrolamento secundário

$N_D$  - enrolamento de desmagnetização

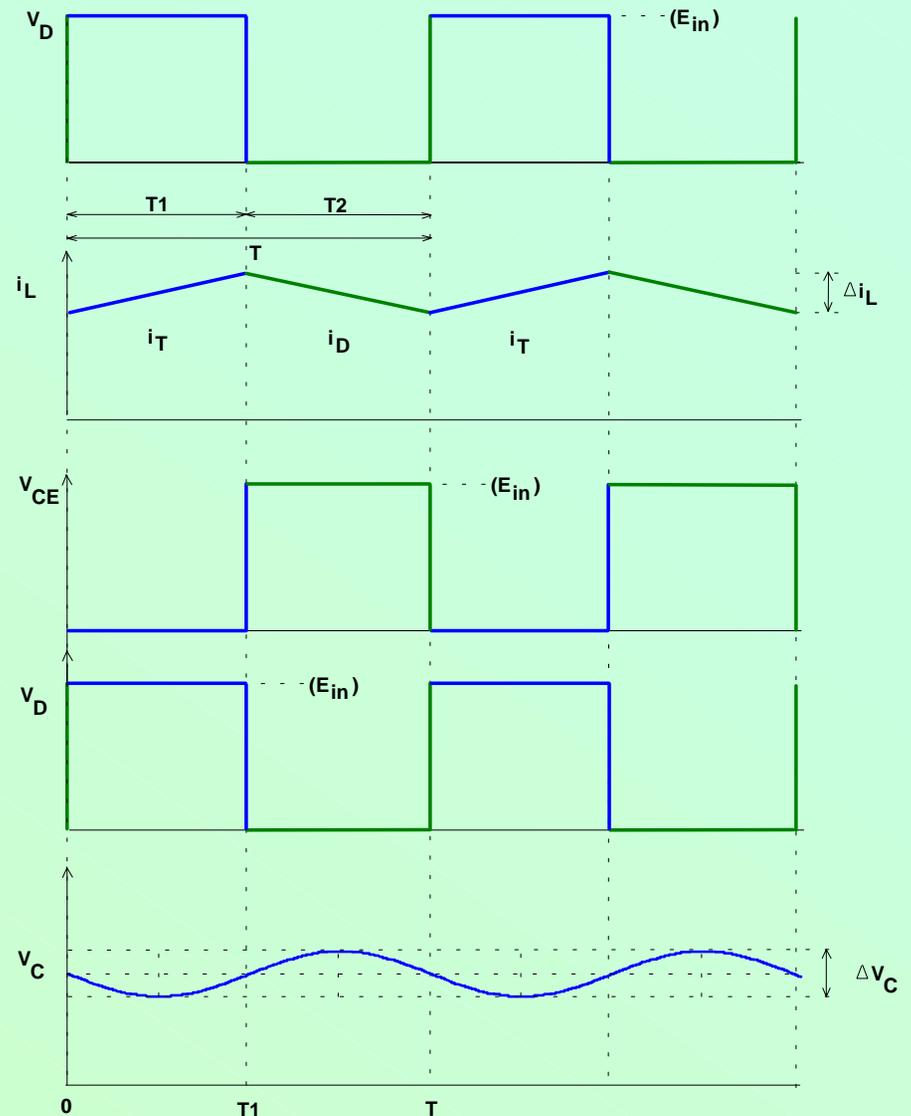
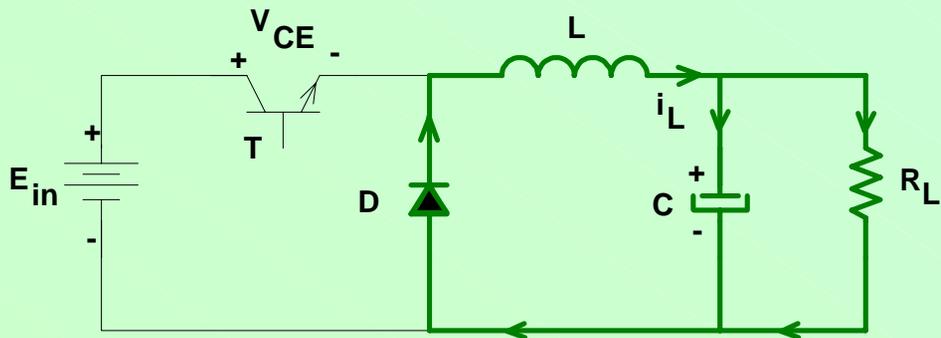
# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

1ª Etapa



2ª Etapa



# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

a) Tensão Média na Carga

$$V_{Lmd} = 0 \Rightarrow V_{out} = V_{Dmd} \quad V_{out} = V_{in} \frac{T_1}{T} = V_{in} D$$

b) Corrente no Indutor e Cálculo da Indutância

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} (1-D)D}{f_s L} \quad \Delta i_{Lmax} \rightarrow D = 0,5 \quad \Delta i_{Lmax} = \frac{V_{in}}{4 f_s L}$$

$$L = \frac{V_{in}}{4 f_s \Delta i_{Lmax}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

- c) Corrente de Pico

$$I_p = I_o + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{out}}{R_L} + \frac{V_{in} (1-D) D}{2 f_s L}$$

- d) Tensão no Capacitor

$$i_C \cong \frac{\Delta i_L}{2} \text{sen}(2\pi f_s t) \quad V_{CA} = \frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s 2 C} \cos(2 \pi f_s t)$$

$$\frac{\Delta V_C}{2} = \frac{\Delta i_L}{4 \pi f_s C} \quad C = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s \Delta V_C} \quad V_{RSE} = R_{SE} \Delta i_L$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

- e) Esforços nos Semicondutores

$$V_{CE} = V_{in} \qquad V_D = -V_{in}$$

$$I_{T_p} = I_{D_p} = \frac{V_{out}}{R_L} + \frac{V_{in}(1-D)D}{2f_s L}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

## Procedimento de Projeto p/ o Buck em Cond. Contínua:

1. Especificar:  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $f_s$ ,  $\Delta V_o$ ,  $\Delta i_L$ .

2. Calcular a razão cíclica nominal.

$$D_{nom} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

3. Calcular a indutância.

$$L = \frac{V_{in}}{4 f_s \Delta i_{Lmax}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Buck

Procedimento de Projeto p/ o Buck em Cond. Contínua:

4. Definir o capacitor.

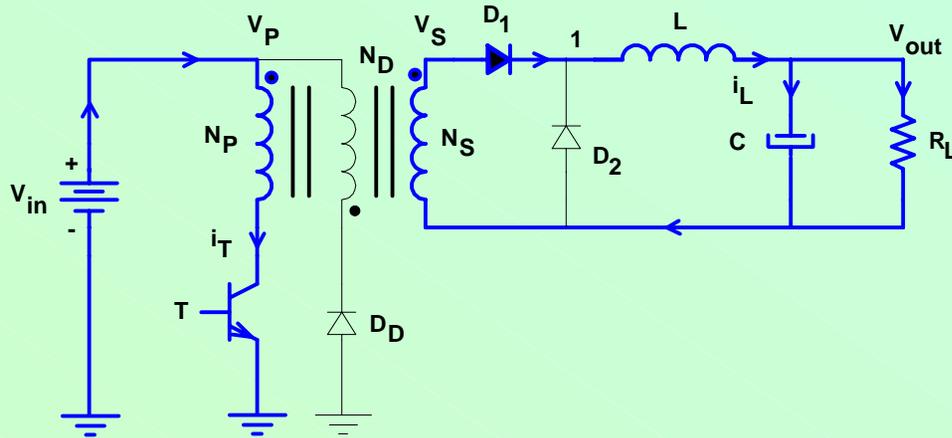
$$C = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s \Delta V_C}$$

$$R_{SE} = \frac{\Delta V}{\Delta i_L}$$

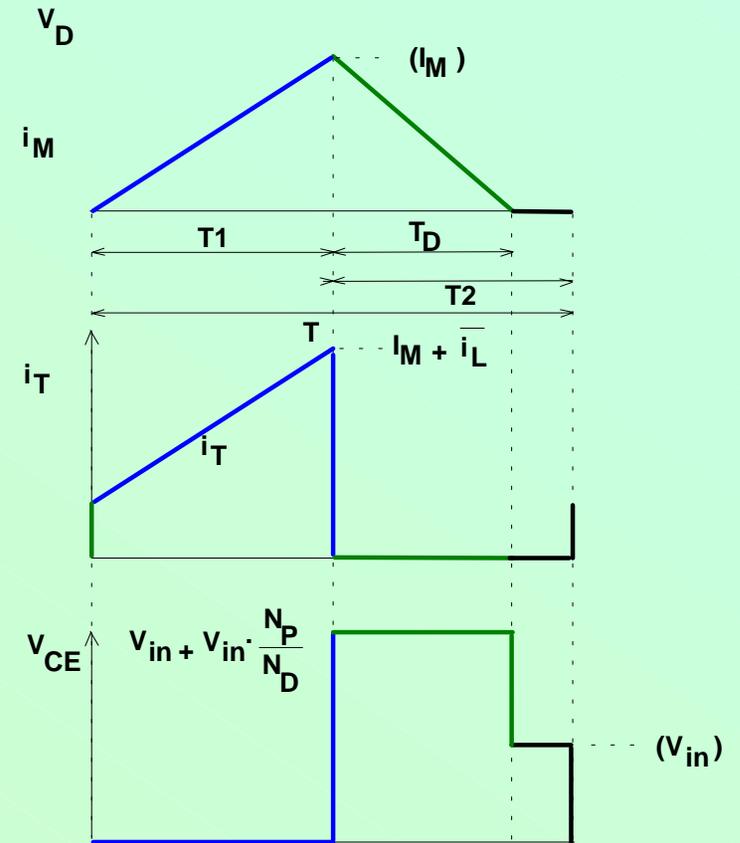
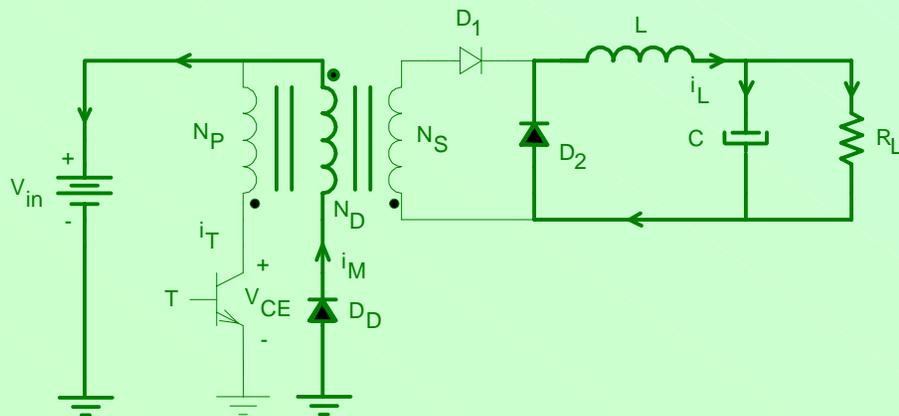
# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

1ª Etapa



2ª Etapa



# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

a) Tensão Média na Carga

$$V_{L_{md}} = 0 \Rightarrow V_{out} = V_{D_{md}} \quad V_{out} = V_{in} \frac{N_s}{N_p} \frac{T_1}{T} = V_{in} \frac{N_s}{N_p} D$$

b) Corrente no Indutor e Cálculo da Indutância

$$\Delta i_L = \frac{(V_{in}/a)(1-D)D}{f_s L} \quad \Delta i_{L_{max}} \rightarrow D = 0,5 \quad \Delta i_{L_{max}} = \frac{V_{in}/a}{4 f_s L}$$

$$L = \frac{V_{in}}{4 f_s \Delta i_{L_{max}} a} \quad a = \frac{N_p}{N_s}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

- c) Corrente de Pico no Secundário e Primário

$$I_{S_p} = I_o + \frac{\Delta i_L}{2} \quad I_{P_p} = \frac{1}{a} \left( I_o + \frac{\Delta i_L}{2} \right)$$

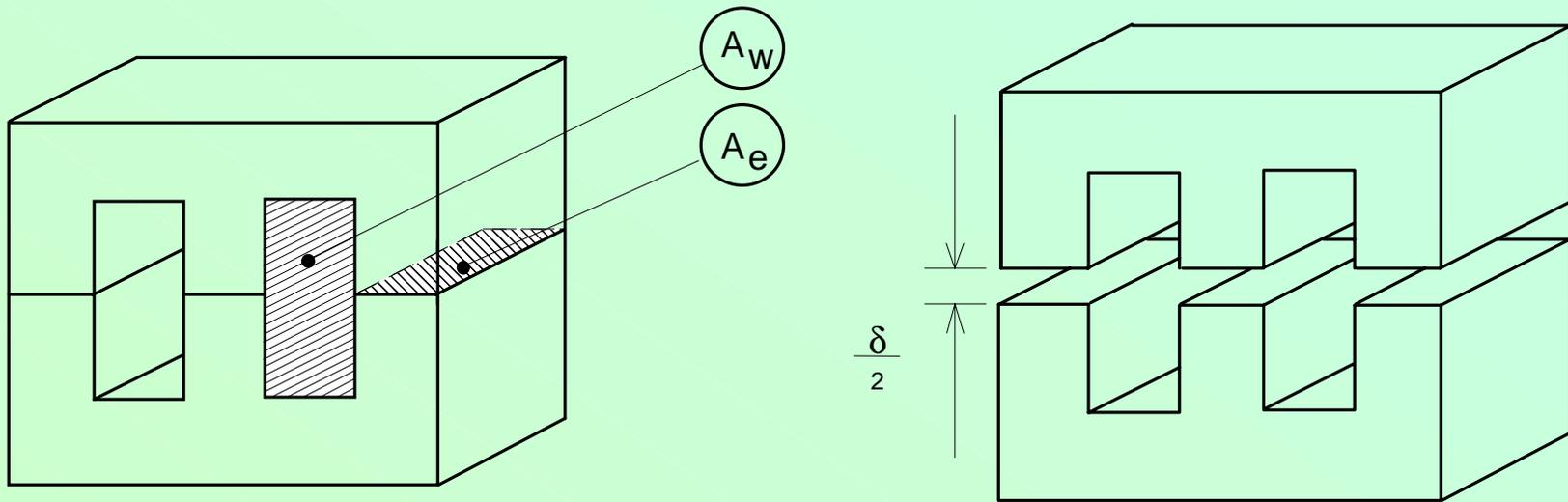
- d) Cálculo da Capacitância

$$C = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s \Delta V_C} \quad V_{RSE} = R_{SE} \Delta i_L$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

- e) Transformador



$$A_e A_w = \frac{2 P_{out} 10^4}{k_p k_w J \Delta B f_s \eta}$$

$K_p$  - fator de utilização do primário (0,5)

$k_w$  - fator de utilização da área do enrolamento (0,4 )

$J$  - densidade de corrente ( 250 - 400A/cm<sup>2</sup>)

$\Delta B$  - variação de fluxo eletromagnético (0,2-0,3T)

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

- e) Transformador

$$N_p = \frac{V_{in}}{2 A_e \Delta B f_s}$$

$N_p$  - número de espiras do primário

$A_e$  - área efetiva da perna central do núcleo (metros)

$\Delta B$  - variação de fluxo eletromagnético (Tesla)

$$N_{sn} = N_p 1,1 \frac{(V_{outn} + V_F D_{nom})}{V_{in} D_{nom}}$$

$N_s$  - número de espiras do secundário

$V_F$  - queda de tensão no diodo

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

## Procedimento de Projeto p/ o Forward em Cond. Contínua:

1. Especificar:  $V_{in}$ ,  $V_{out}$ ,  $P_{out}$ ,  $f_s$ ,  $\Delta V_o$ ,  $\Delta i_L$ ,  $\eta$ .
2. Definir a razão cíclica nominal, lembrando que  $D_{m\acute{a}x}=0,5$ .
3. Calcular a(s) corrente(s) de carga, a(s) corrente(s) de pico no(s) secundário(s) e a(s) resistência(s) de carga.

$$I_{on} = \frac{P_o}{V_{out_n}}$$

$$I_{sp_n} = I_{on} + \frac{\Delta I_{on}}{2}$$

$$R_{on} = \frac{V_{out_n}}{I_{out_n}}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

Procedimento de Projeto p/ o Forward em Cond. Contínua:

4. Calcular a(s) capacitância(s).

$$C = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s \Delta V_C} \quad R_{SE} = \frac{\Delta V}{\Delta i_L}$$

5. Calcular o produto  $A_e A_w$  e definir o núcleo do transformador.

$$A_e A_w = \frac{2 P_{out} 10^4}{k_p k_w J \Delta B f_s \eta}$$

# Fontes Chaveadas do Tipo FORWARD

- Conversor CC-CC do Tipo Forward

6. Calcular o número de espiras do primário e secundário(s).

$$N_p = \frac{V_{in}}{2 A_e \Delta B f_s} \quad N_{sn} = N_p 1,1 \frac{(V_{outn} + V_F D_{nom})}{V_{in} D_{nom}}$$

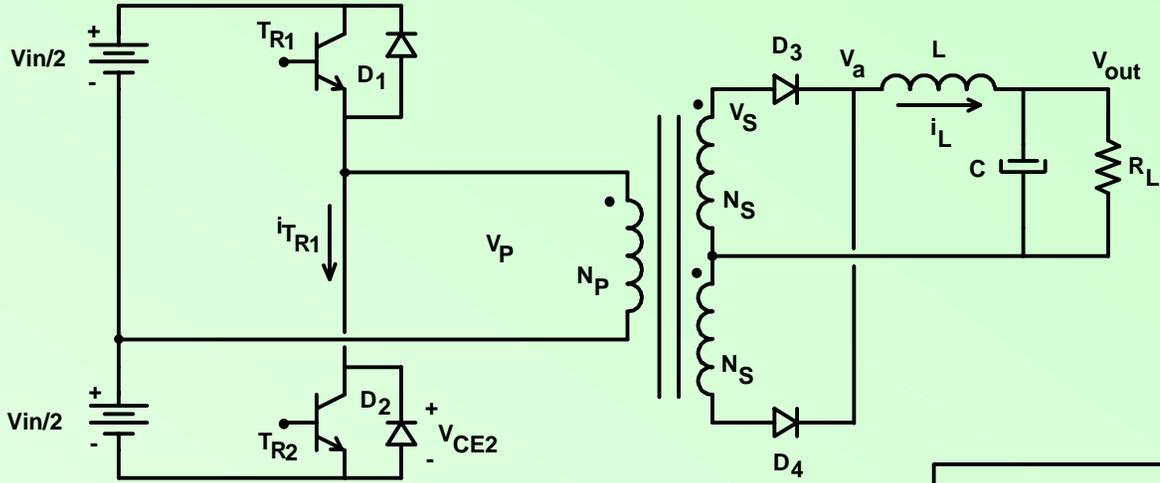
7. Calcular as relações de transformação.

$$a_n = \frac{N_p}{N_{sn}}$$

8. Calcular a(s) indutância(s).

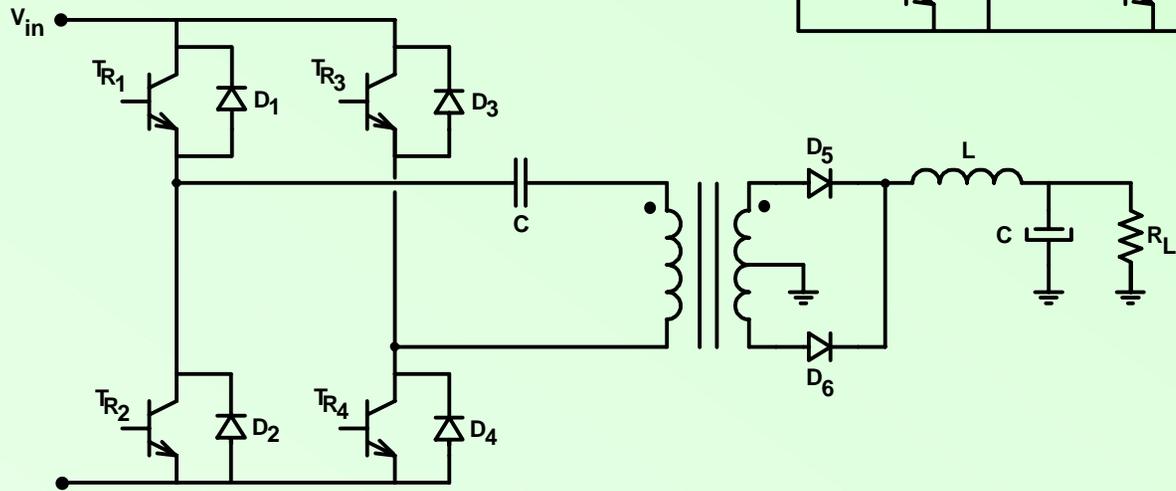
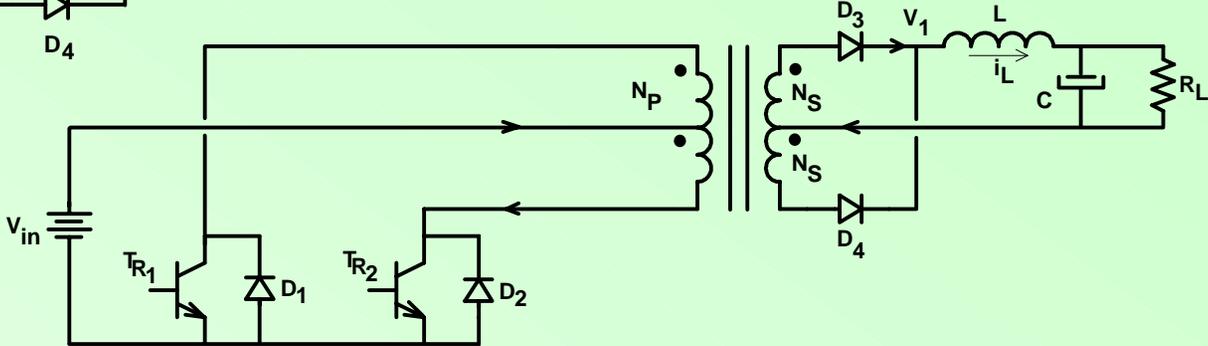
$$L_n = \frac{V_{in}}{4 f_s \Delta i_{Lmax} a_n}$$

# Conversores Half Bridge, Bridge e Push-Pull



Half Bridge (Meia Ponte)

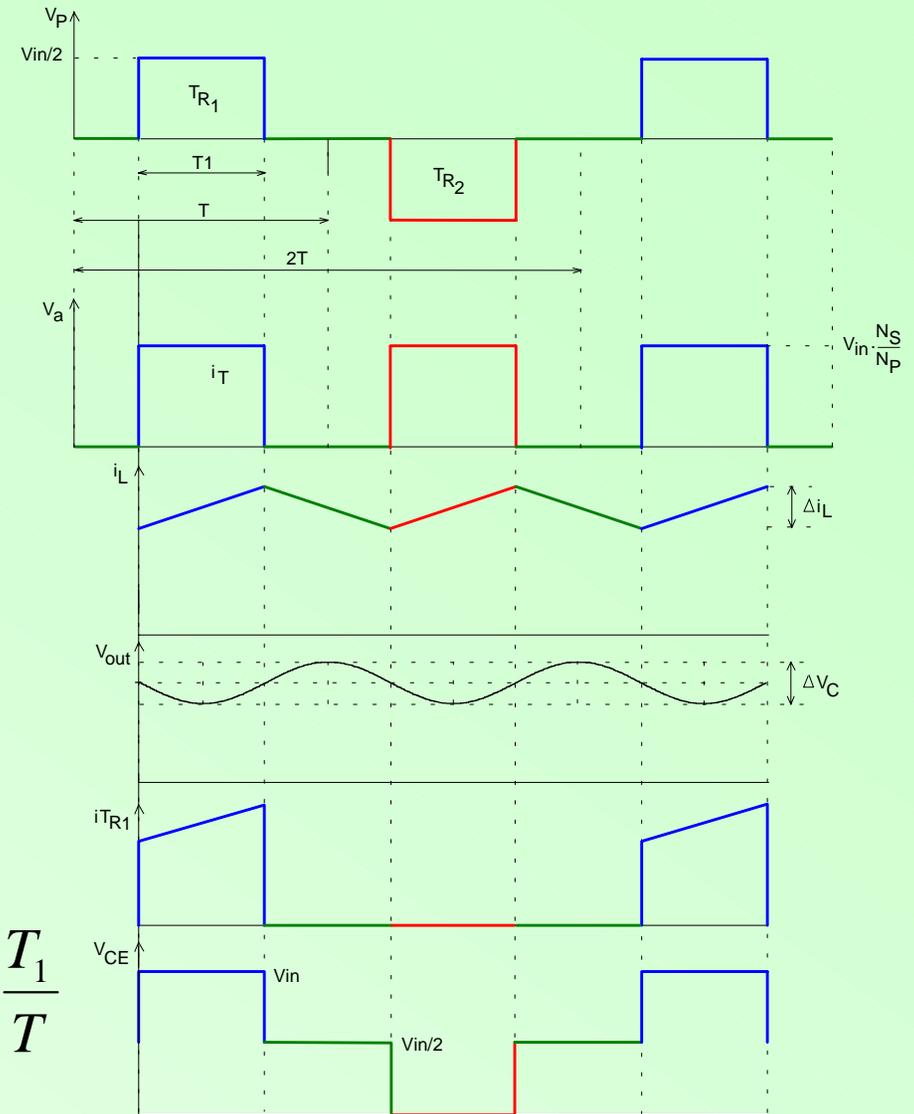
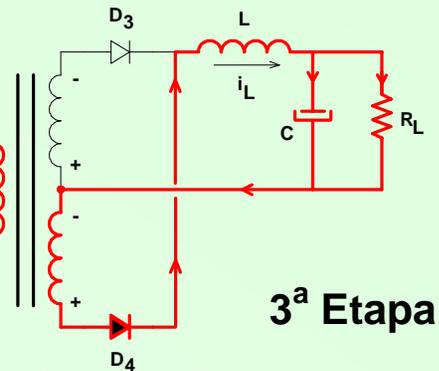
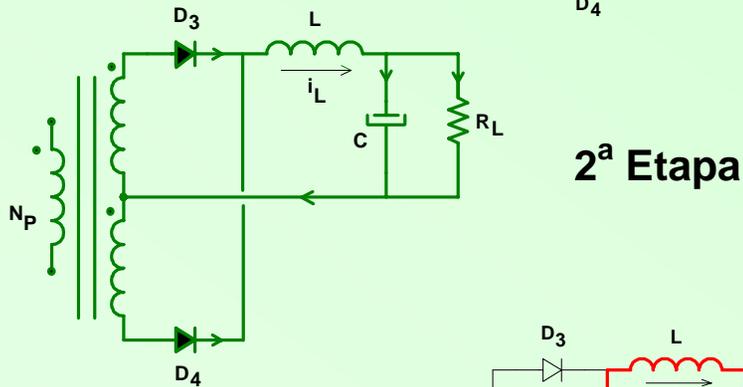
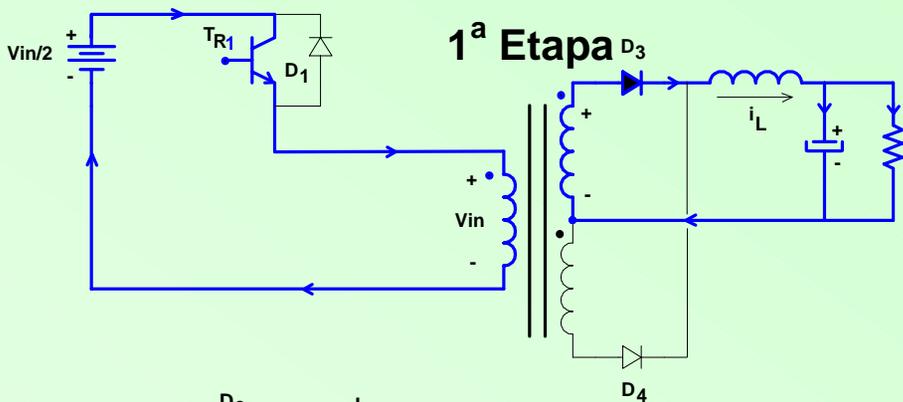
Push Pull



Full Bridge (Ponte Completa)

# Conversor Half Bridge, Bridge e Push-Pull

## • Conversor Half Bridge (Meia Ponte)



$$D = \frac{T_1}{T}$$

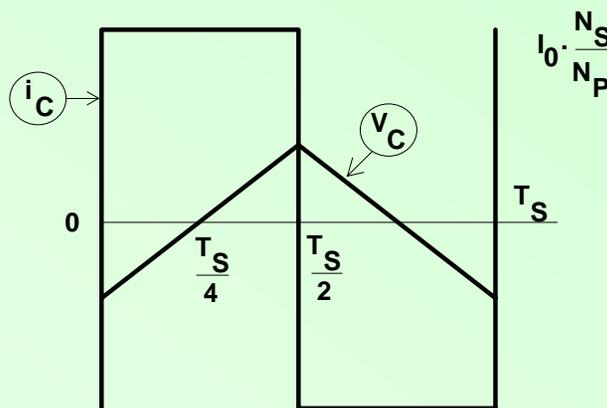
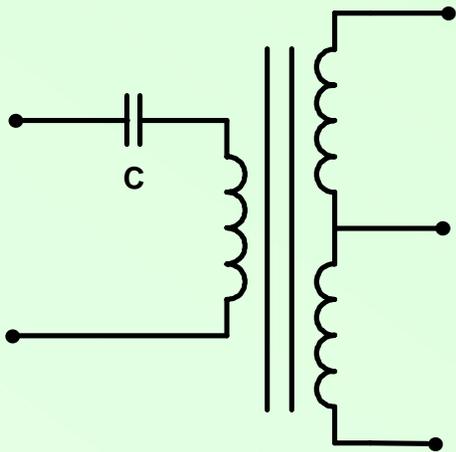
$T$  = período da tensão de entrada do filtro de saída  
 $T_S = 2T$  = período de funcionamento do conversor

# Conversor Half Bridge, Bridge e Push-Pull

- **Conversor Half Bridge (Meia Ponte)**

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{2} \frac{N_S}{N_P} D \quad P_{\text{in}} = \frac{E}{2} \cdot i_{\text{TR}} \frac{T_1}{T} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} \quad i_{\text{TR}} = \frac{P_{\text{out}}}{\eta} \cdot \frac{T}{T_1} \cdot \frac{1}{V_{\text{in}}} \quad V_{\text{CE}_{\text{máx}}} = V_{\text{in}}$$

**Capacitor série: impede a circulação de corrente contínua no trafo**

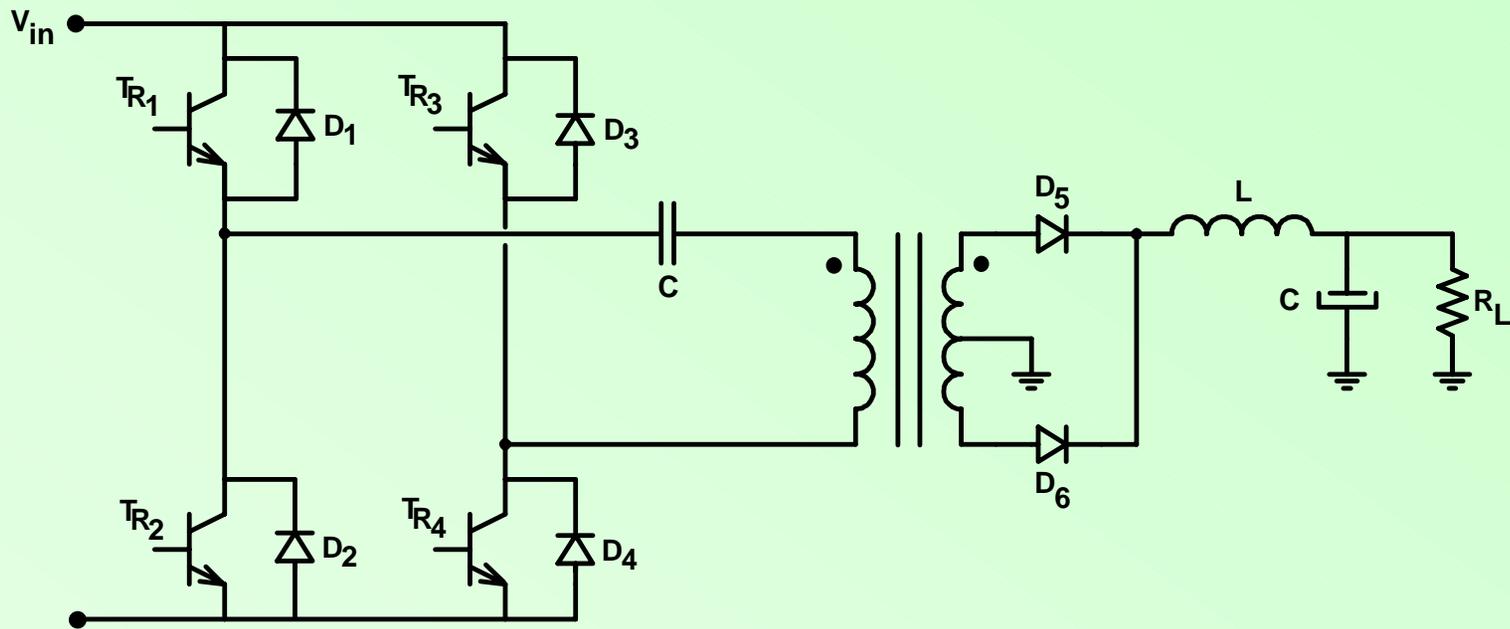


$$C \geq \frac{4}{\pi^2 f_s^2 \left( \frac{N_P}{N_S} \right)^2 L}$$

$$C \geq \frac{N_P}{N_S} \times \frac{I_0}{2 f_s \Delta V_C}$$

# Conversor Half Bridge, Bridge e Push-Pull

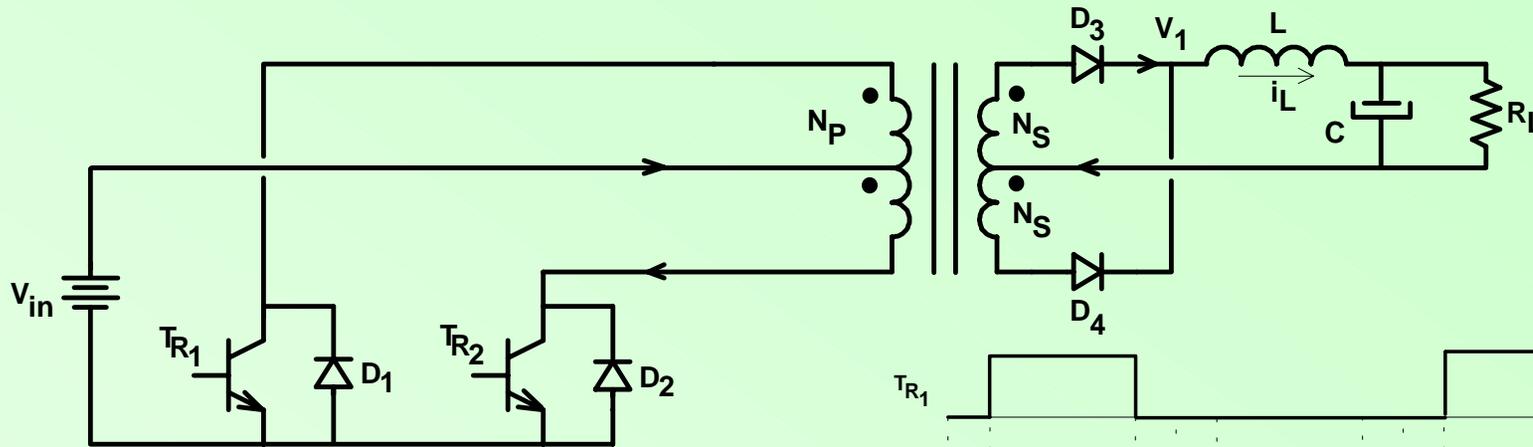
- Conversor Full Bridge (Ponte Completa)



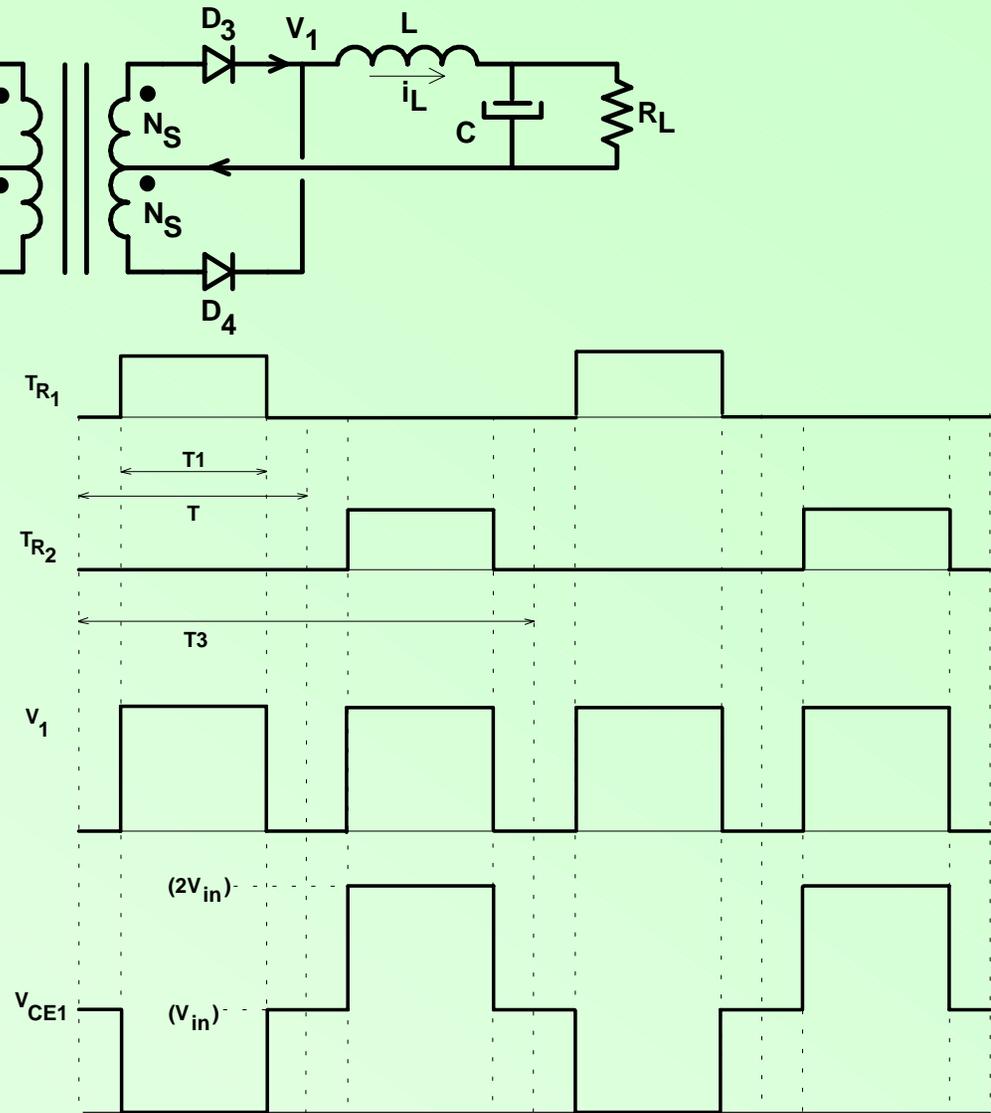
$$V_{CE_{m\acute{a}x}} = V_{in}$$

# Conversor Half Bridge, Bridge e Push-Pull

- Conversor Push-Pull



$$V_{CE_{\text{máx}}} = 2 V_{in}$$



# Conversor Half Bridge, Bridge e Push-Pull

- Transformador

$$A_e A_w = \frac{1.5 P_{out} 10^3}{k_w k_p J f_s \Delta B}$$

$$N_p = \frac{V_{in}}{2 A_e \Delta B f_s}$$

$$a_n = \frac{N_p}{N_{sn}}$$

$$N_{sn} = N_p 1,1 \frac{(V_{outn} + V_F D_{nom})}{V_{in} D_{nom}}$$

- onde:  $k_w=0.4$  e  $k_p=0.41$

- para as mesmas condições, o transformador é menor que o do conversor Forward.

- Filtro de Saída

$$L_n = \frac{V_{in}}{4 f_s \Delta i_{Lmax} a_n}$$

$$C_n = \frac{\Delta i_L}{2 \pi f_s \Delta V_c}$$

$$R_{SE_n} = \frac{\Delta V}{\Delta i_L}$$

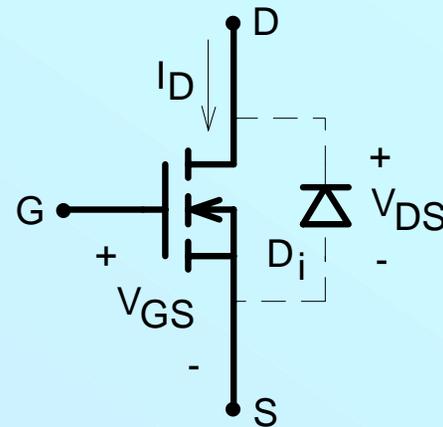
# Aspectos de Comutação

## MOSFET

- Tempos de comutação curtos,
- Alta impedância de entrada entre GS (potência de comando baixa),
- Fácil de ser associado em paralelo (coef. de temperatura positivo).

### Características em Condução:

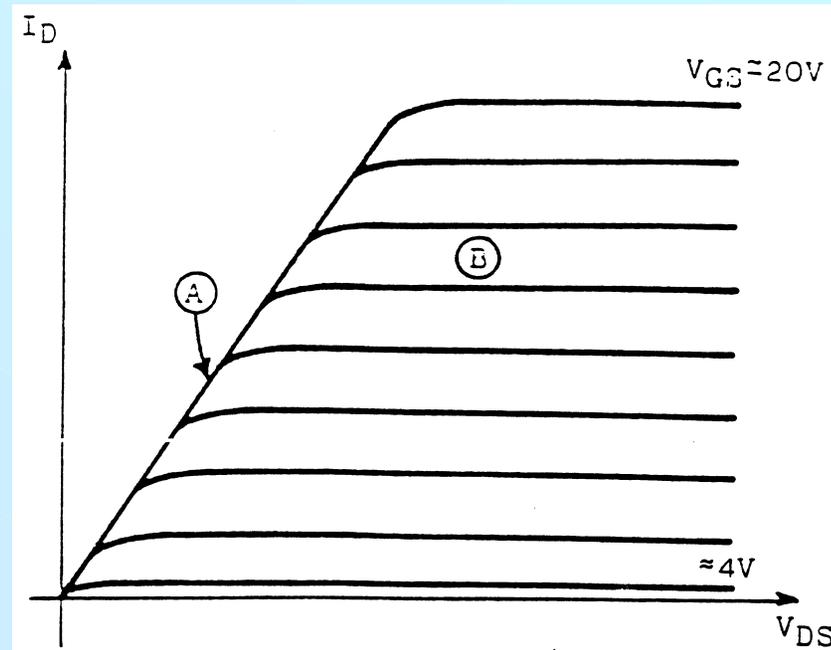
- $R_{DS(on)}$ ,
- $I_D$  e  $I_{DM}$ ,
- $V_{GS}$ ,
- $V_{GS(th)}$ ,
- $V_{DS(on)} = R_{DS(on)} \times I_D$ .



# Características Estáticas

## MOSFET

- A = Região de resistência constante
- B = Região de corrente constante



# Características Estáticas

## MOSFET

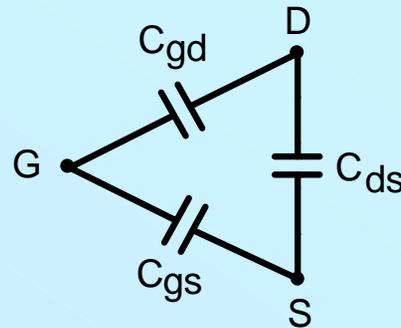
- **Parâmetros importantes**
  - a)  $R_{Dson}$  – O MOSFET “saturado” comporta-se como uma resistência;
  - b)  $I_D$  – máxima corrente contínua que o componente pode conduzir;
  - c)  $I_{DM}$  – máxima corrente pulsada de dreno que o MOSFET pode conduzir;
  - d)  $V_{GS}$  – máxima tensão entre gate e source que pode ser aplicada (positiva ou negativa);
  - e)  $V_{GS(th)}$  – a tensão de *gate* suficiente para iniciar a condução ( $\approx 4,0$  V);
  - f)  $V_{DC(on)} = R_{DS(on)} \cdot I_D$  – tensão *dreno-source* com o MOSFET conduzindo;
  - g) O MOSFET bloqueado é caracterizado pela tensão de avalanche entre *dreno* e *source* –  $V_{(BR)DS}$

# Aspectos de Comutação

## MOSFET

### Características Dinâmicas:

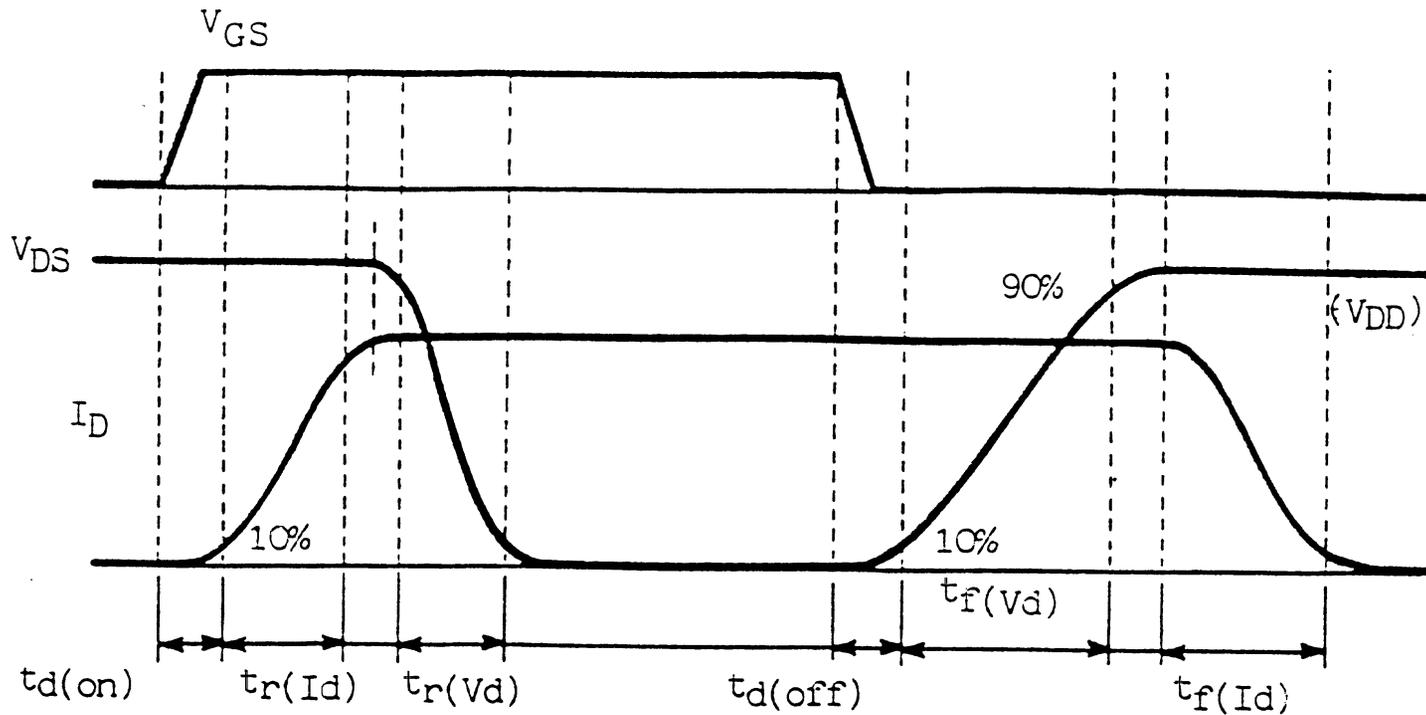
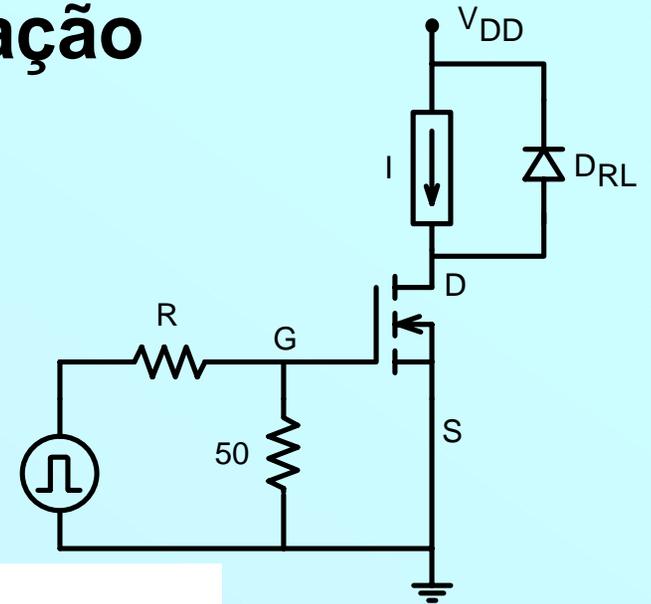
- $C_{iss} = C_{gd} + C_{gs}$  (carregado e descarregado pelo circ. gatilho),
- $C_{oss} = C_{gd} + C_{ds}$  (capacitância de saída),
- $C_{rss} = C_{gd}$  (capacitância de transferência).



# Aspectos de Comutação

## MOSFET

### Comutação com Carga Indutiva:



$$\begin{aligned}t_{d(on)} &= 30 \text{ ns} \\t_{r(on)} &= 50 \text{ ns} \\t_{d(off)} &= 10 \text{ ns} \\t_f &= 50 \text{ ns}\end{aligned}$$

## Perdas em um MOSFET

$$P = P_{\text{cond}} + P_{\text{com}}$$

$$P_{\text{cond}} = \frac{t_{\text{on}}}{T} \cdot r_{\text{ds(on)}} \cdot i_{\text{d(on)}}^2 = r_{\text{ds(on)}} \cdot i_{\text{d(on)}}^2 \cdot D = r_{\text{ds(on)}} \cdot i_{\text{d(ef)}}^2$$

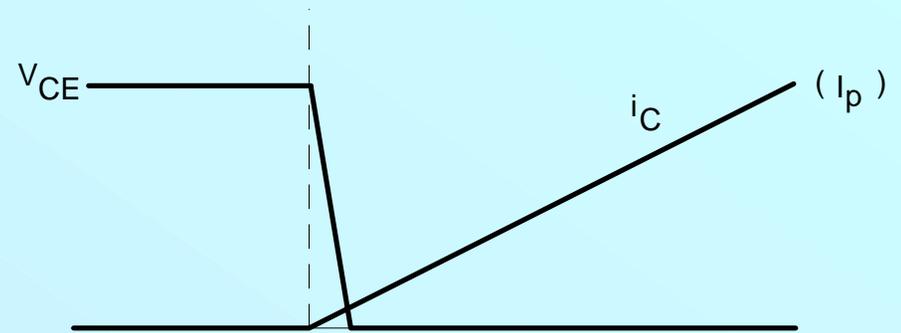
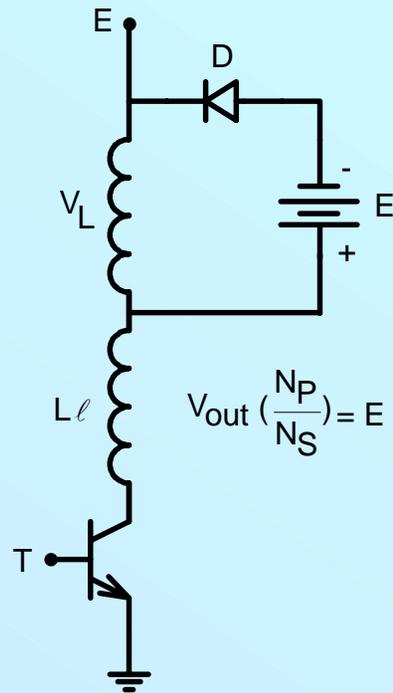
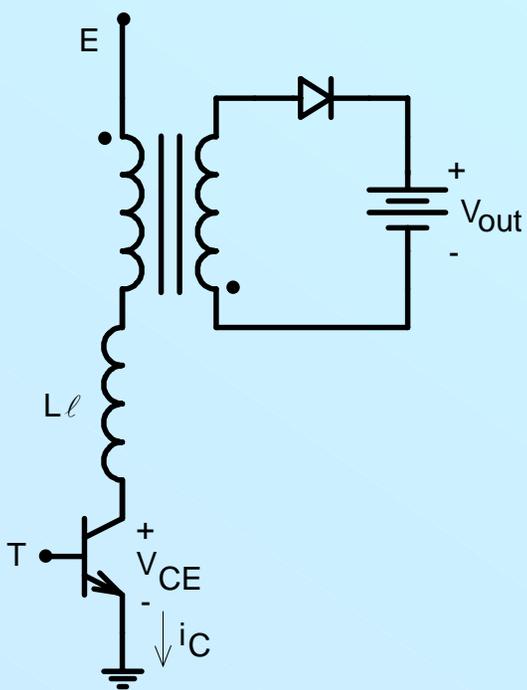
$$P_{\text{com}} = \frac{f}{2} \cdot (t_r + t_f) \cdot i_{\text{d(on)}} \cdot V_{\text{ds(off)}}$$

$$t_f \cong t_{\text{on}} \quad t_r \cong t_{\text{off}}$$

# Perdas na Comutação

## a) Conversor Flyback

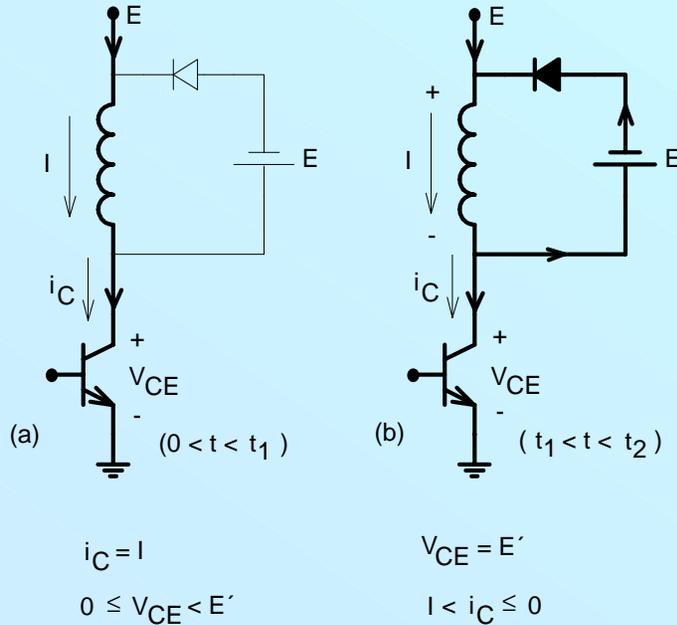
Entrada em condução



# Perdas na Comutação

## Conversor Flyback - Bloqueio

•  $L_f = 0$

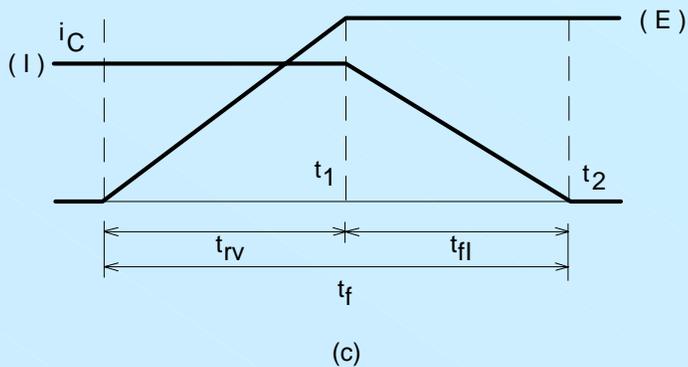


$$E_{S_1} = \frac{1}{2} I \cdot E' \cdot t_f$$

$$t_f = t_{rv} + t_{fl}$$

$$P_1 = E_{S_1} \cdot f$$

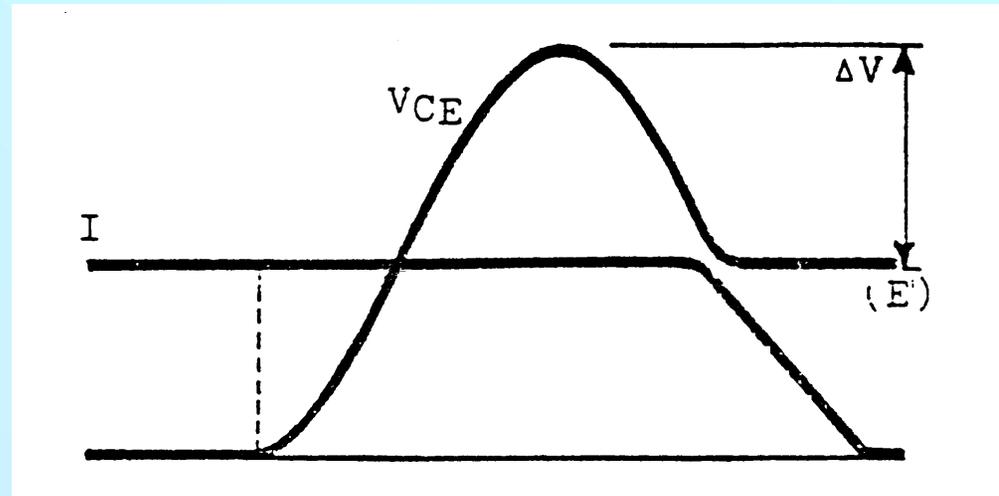
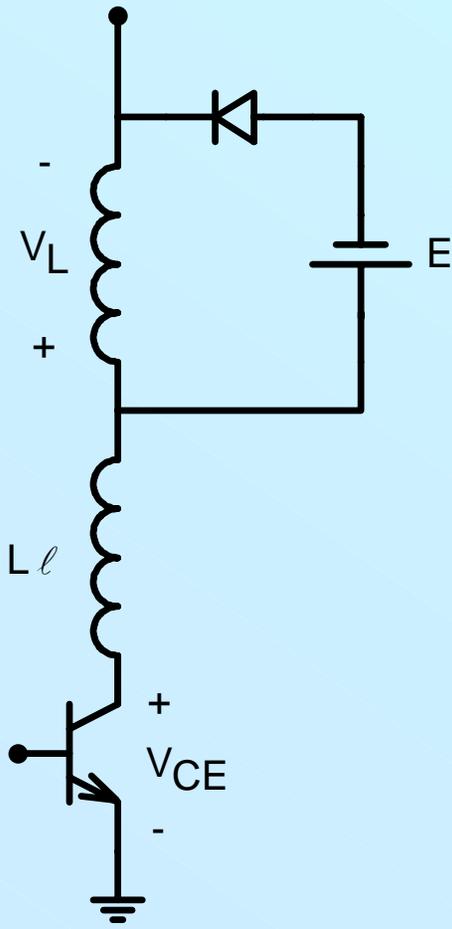
$$P_1 = 0,5 \cdot I \cdot E' \cdot t_f \cdot f$$



# Perdas na Comutação

## Conversor Flyback - Bloqueio

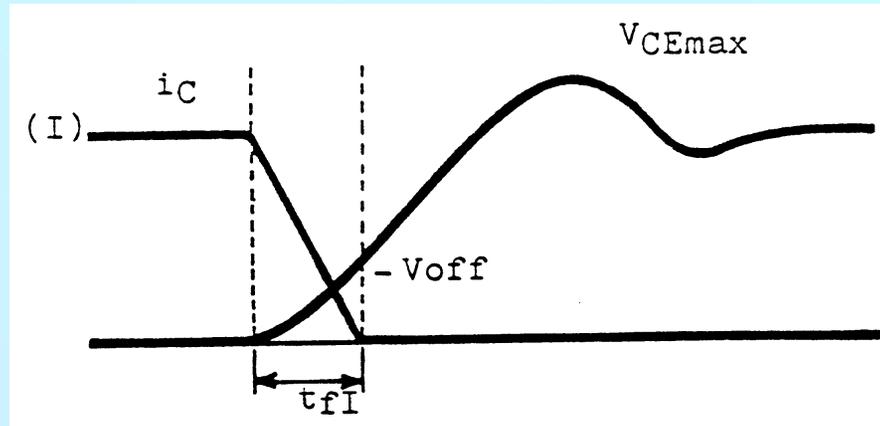
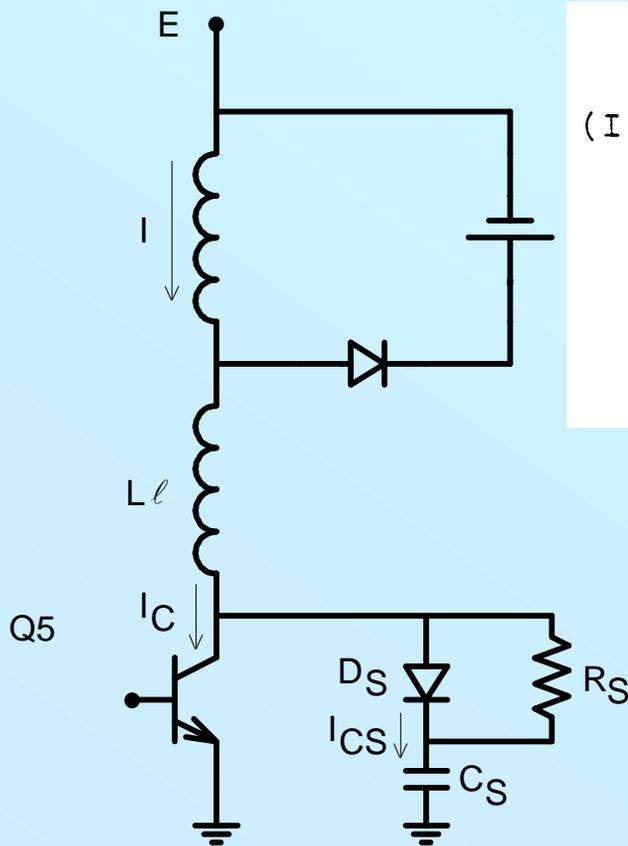
- $L_l \neq 0$



# Aspectos de Comutação

## Snubber RCD

- Comutação com carga indutiva e com Snubber.



$$V_{\text{off}}(t) = \frac{1}{C_S} \int_0^{t_{\text{fl}}} i_{\text{CS}}(t) dt$$

$$i_{\text{CS}}(t) = \frac{I \cdot t}{t_{\text{fl}}}$$

$$V_{\text{off}} = \frac{I \cdot t_{\text{fl}}}{2C_S}$$

$$i_C(t) = I \left( 1 - \frac{t}{t_{\text{fl}}} \right)$$

$$P_1 = \frac{I^2 \cdot t_{\text{fl}}^2 \cdot f}{24C}$$

$$\frac{1}{2} L_l \cdot I^2 = \frac{1}{2} C_S \cdot V_{\text{CEmáx}}^2$$

$$V_{\text{CEmáx}} = \sqrt{\frac{L_l}{C_S}} \cdot I$$

# Aspectos de Comutação

## Snubber RCD

• **Flyback (Cond. Desc.):**  $C_s = \frac{I_P t_{fi}}{2 V_{off}}$        $R_s \leq \frac{t_{on_{min}}}{3 C_s}$        $R_s \geq \frac{V_{in}}{I_{Csp}}$

$$P_R = \frac{1}{2} C_s . E^2 . f$$

$t_{fi}$  – tempo de decrescimento da corrente (fabricante),

$t_{rv}$  – tempo de crescimento da tensão (fabricante),

$V_{off}$  – arbitrado,

$t_{on_{min}}$  – tempo mínimo de condução da chave.

# Aspectos de Comutação

## Snubber RCD

- Forward (Cond. Contínua):

$$E_{S_2} = \frac{1}{2} I_E E$$

$$P_2 = \frac{1}{2} I_E E \cdot t_r \cdot f$$

$$P = 0,5 \cdot V_{in} I \cdot f \cdot (t_r + t_f)$$

$$C_s = \frac{I_P (t_{fi} + t_{rv})}{V_{1n}}$$

$$R_s \leq \frac{t_{on_{min}}}{3 C_s}$$

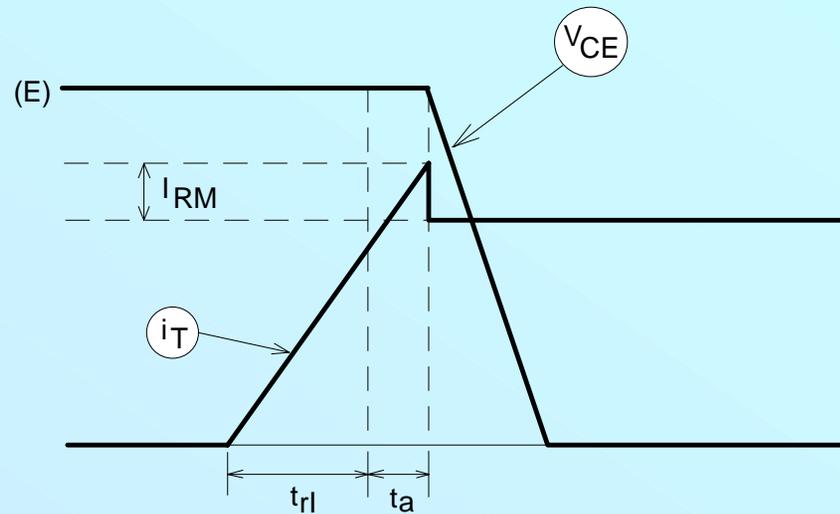
$$R_s \geq \frac{V_{in}}{I_{Csp}}$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{in}^2 \cdot f$$



# Perdas em um Diodo

- Efeito da Recuperação Reversa do Diodo no Transistor



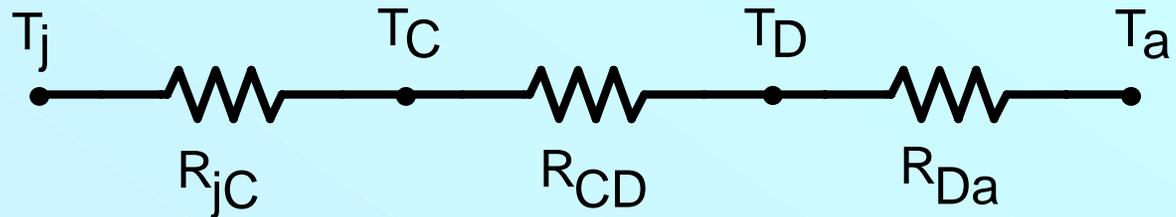
$$\Delta W = 0,5 \cdot t_a \cdot I_{RM} \cdot E$$

$$P = 0,5 \cdot t_a \cdot I_{RM} \cdot E \cdot f$$

$$t_a = \frac{2 \cdot t_{rr}}{3}$$

$$P = \frac{t_{rr} \cdot I_{RM} \cdot E \cdot f}{3}$$

# Cálculo Térmico



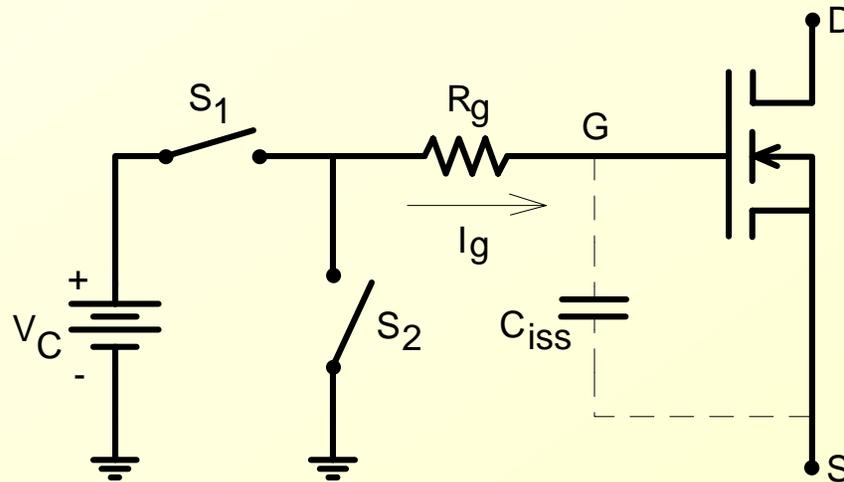
- $T_j$  – temperatura da junção ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_C$  – temperatura do encapsulamento ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_D$  – temperatura do dissipador ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $R_{jc}$  – resistência térmica junção-cápsula ( $^{\circ}\text{C/W}$ )
  - $R_{CD}$  – resistência térmica de contato entre o componente e o dissipador ( $^{\circ}\text{C/W}$ ) =  $0,2^{\circ}\text{C/W}$ .
- $R_{Da}$  – resistência térmica dissipador ambiente
- $T_a$  – temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$T_j - T_a = P \cdot (R_{jc} + R_{cd} + R_{da})$$

$$R_{Da} = \frac{T_j - T_a}{P} - R_{jc} - R_{CD}$$

# Circuitos de Comando de MOSFETs

## • Princípio Básico



•  $C_{iss} = 700 \text{ pF}$

•  $V_C = 15 \text{ V}$

•  $\Delta t = 40 \text{ ns}$

$$I_g = C_{iss} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

$$I_g = \frac{700 \times 10^{-12} \cdot 15}{40 \times 10^{-9}} = 0,26 \text{ A}$$

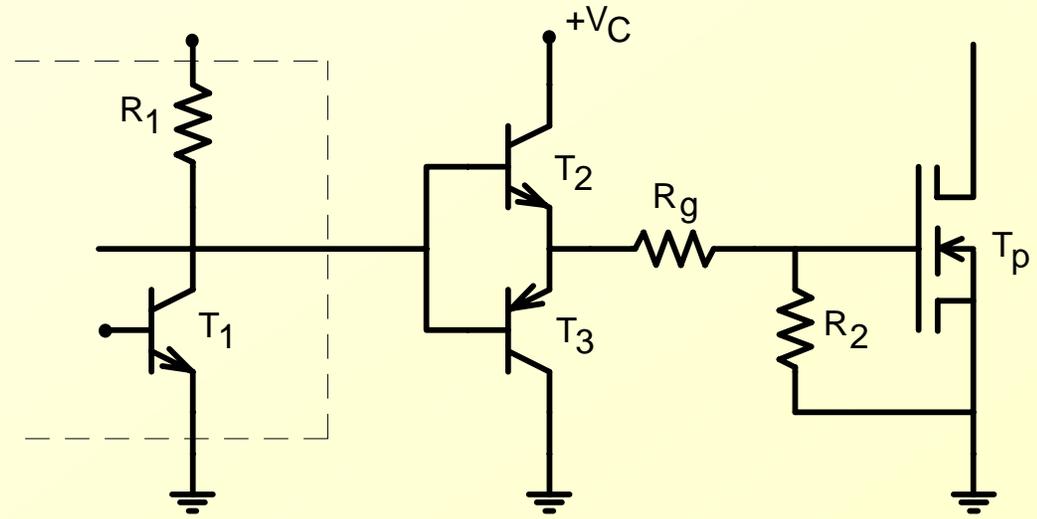
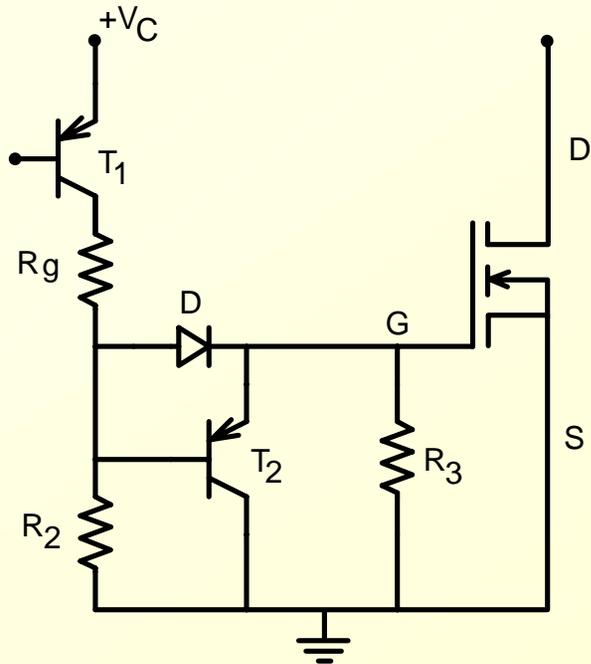
$$t_f = t_r = 2,2 R_g \cdot C_{iss}$$

$$R_g = \frac{t_f}{2,2 \cdot C_{iss}} = \frac{40 \times 10^{-9}}{2,2 \cdot 700 \times 10^{-12}}$$

$$R_g \cong 25 \Omega$$

# Circuitos de Comando de MOSFETs

- Circuitos de Comando não-isolado



$$D = 1N914$$

$$R_2 = 4,8 \text{ k}\Omega$$

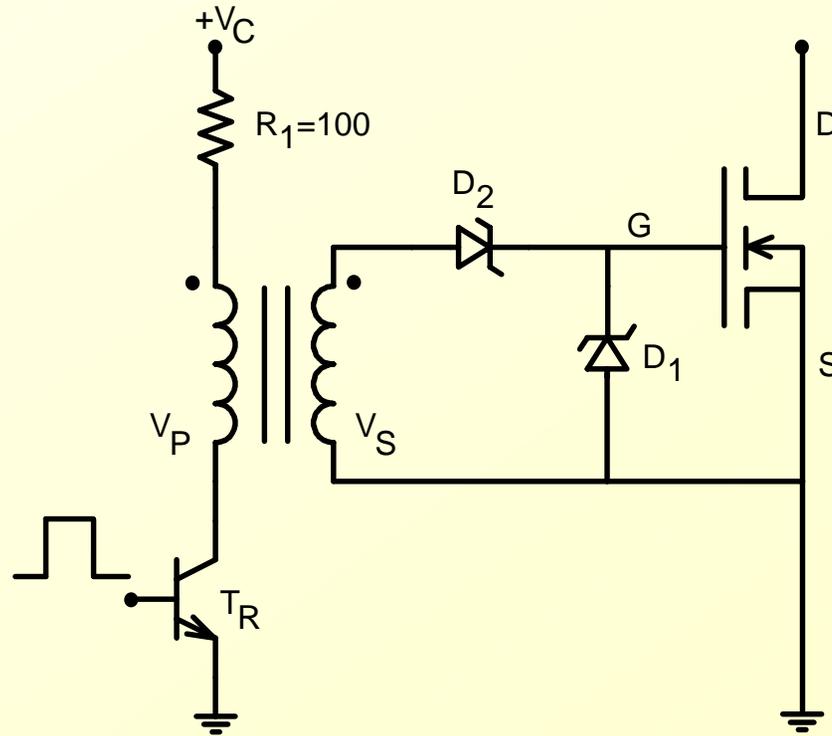
$$R_g = 50 \text{ }\Omega$$

$$T_2 = \text{MPS } 2907$$

$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

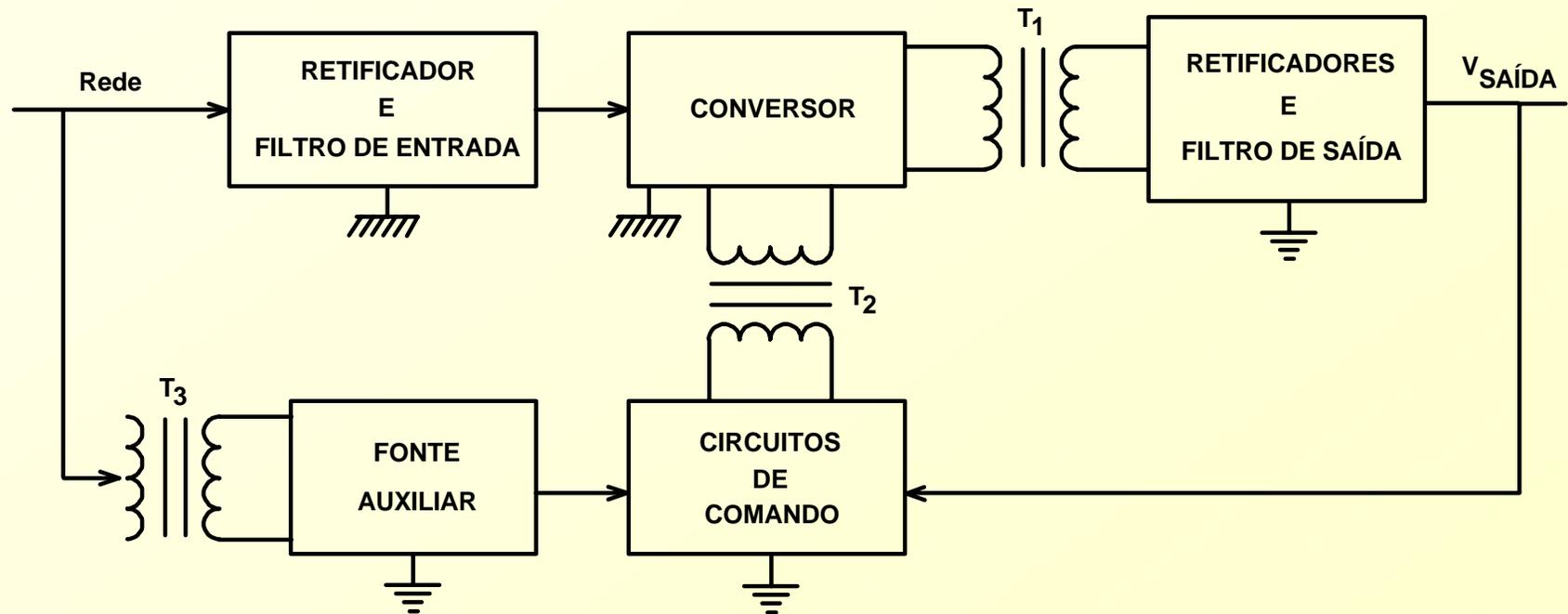
# Circuitos de Comando de MOSFETs

- Circuito de Comando Isolado



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

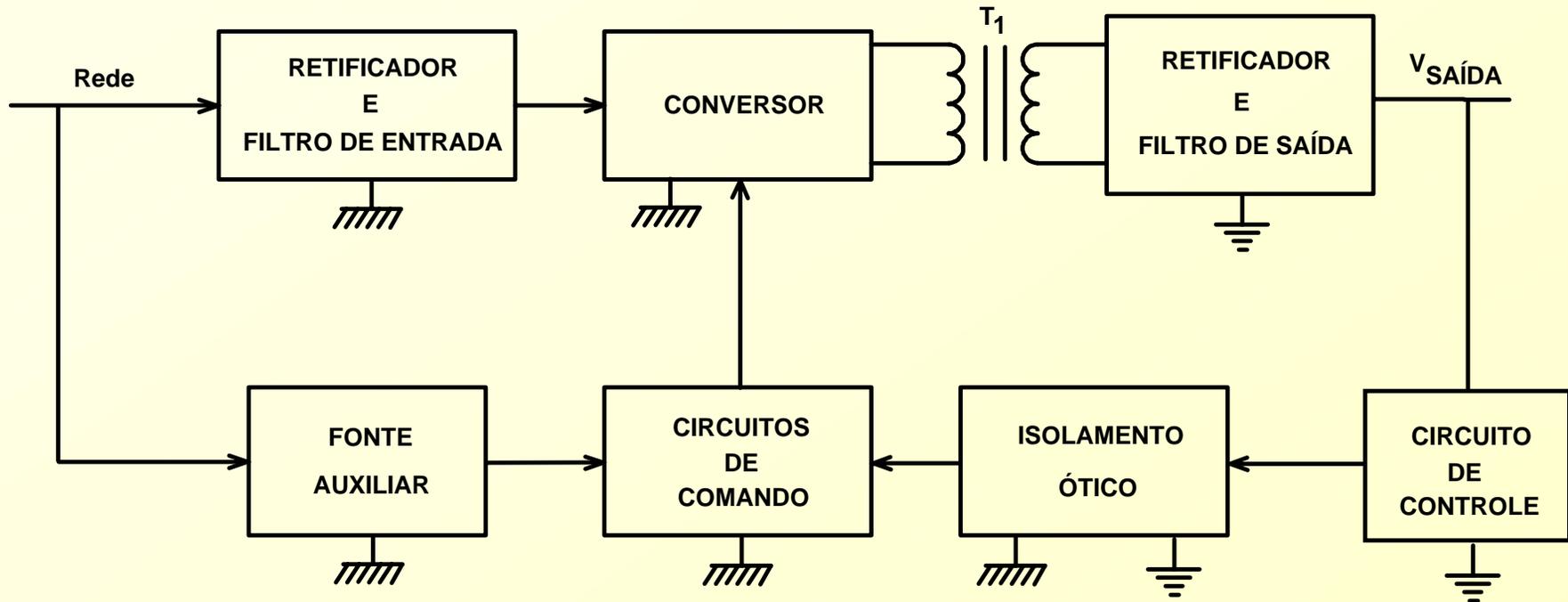
- A questão do isolamento



- Massa de alta tensão (chaves) e massa de baixa tensão (saída, comando, fonte auxiliar).
- Isolamento:  $T_1$  (transformado principal),  $T_2$  (transformador p/ comando),  $T_3$  (transformador da fonte auxiliar).

# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

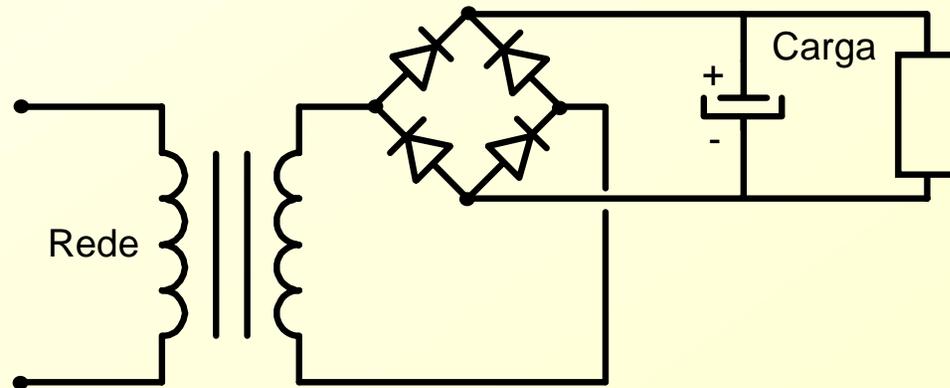
- A questão do isolamento



- Massa de alta tensão (chaves, comando, fonte auxiliar) e massa de baixa tensão (saída, controle).
- Isolamento:  $T_1$  (transformado principal) e isolador óptico.

# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

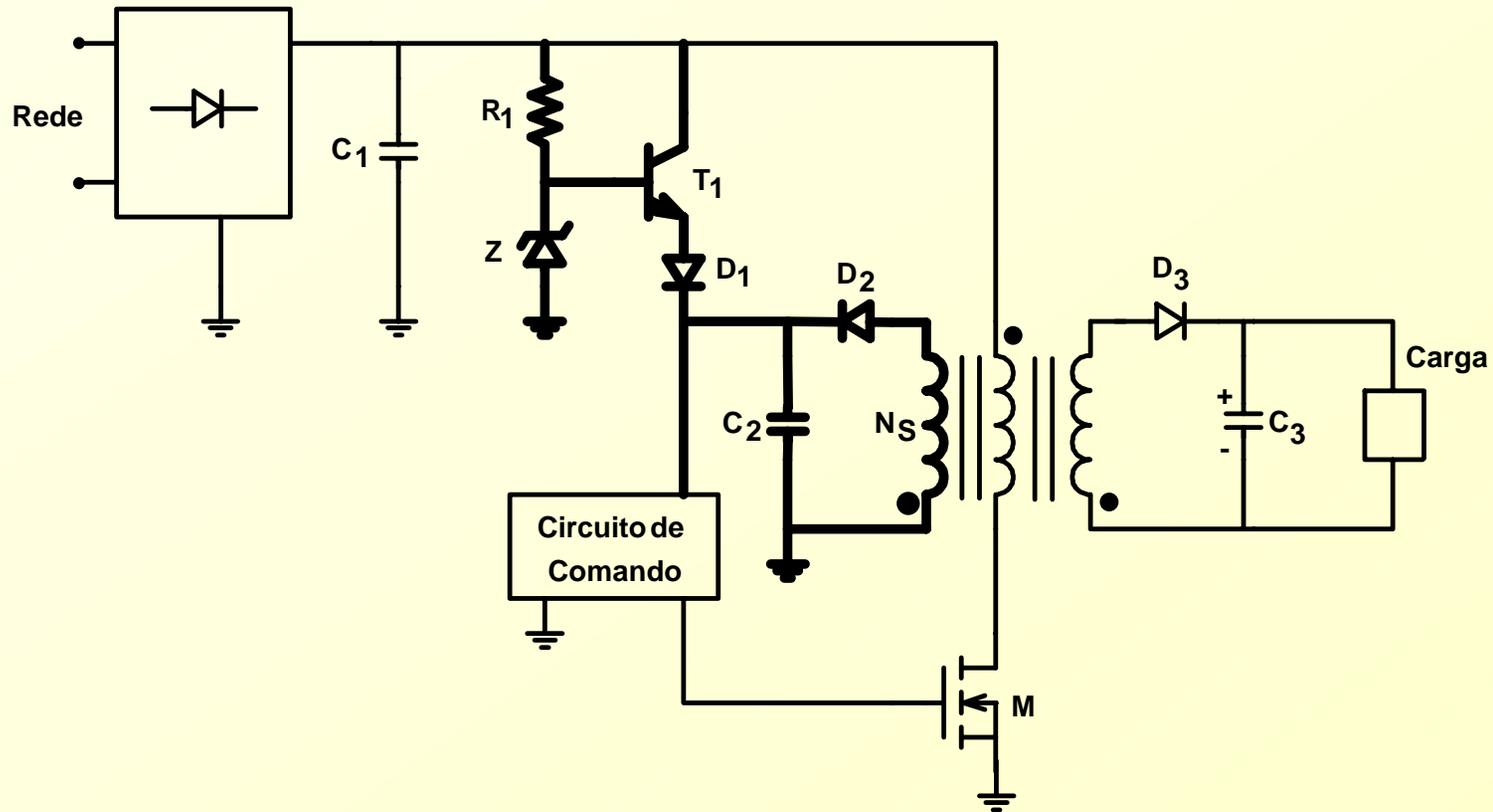
- Fonte Auxiliar



**Fonte Convencional com Isolamento**

# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

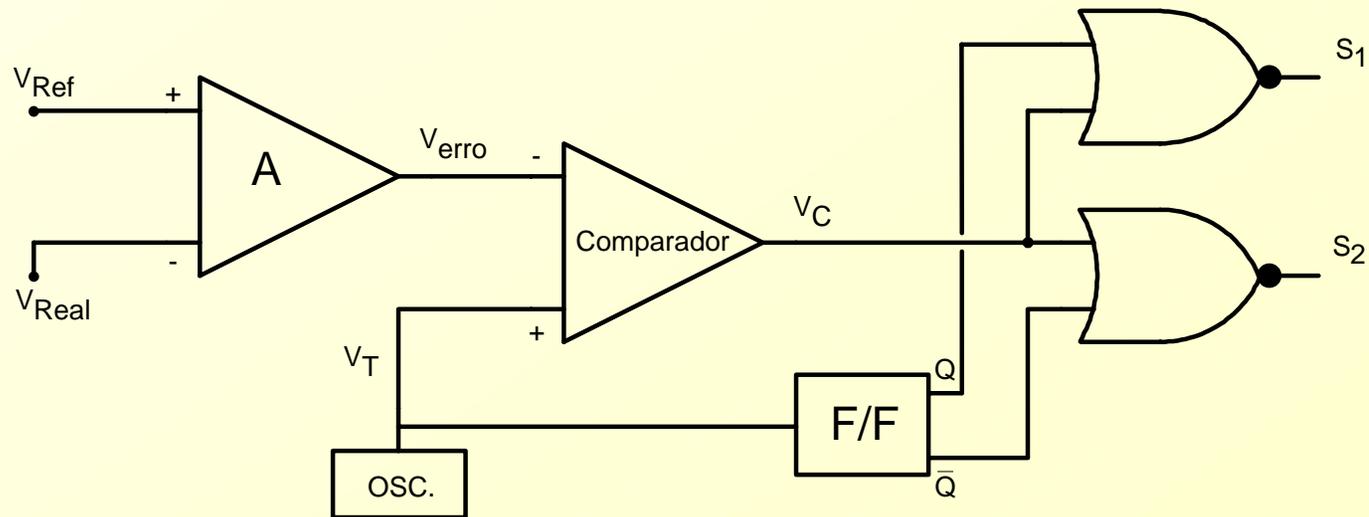
- Fonte Auxiliar



Conversor Flyback com Fonte Auxiliar sem Isolamento

# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

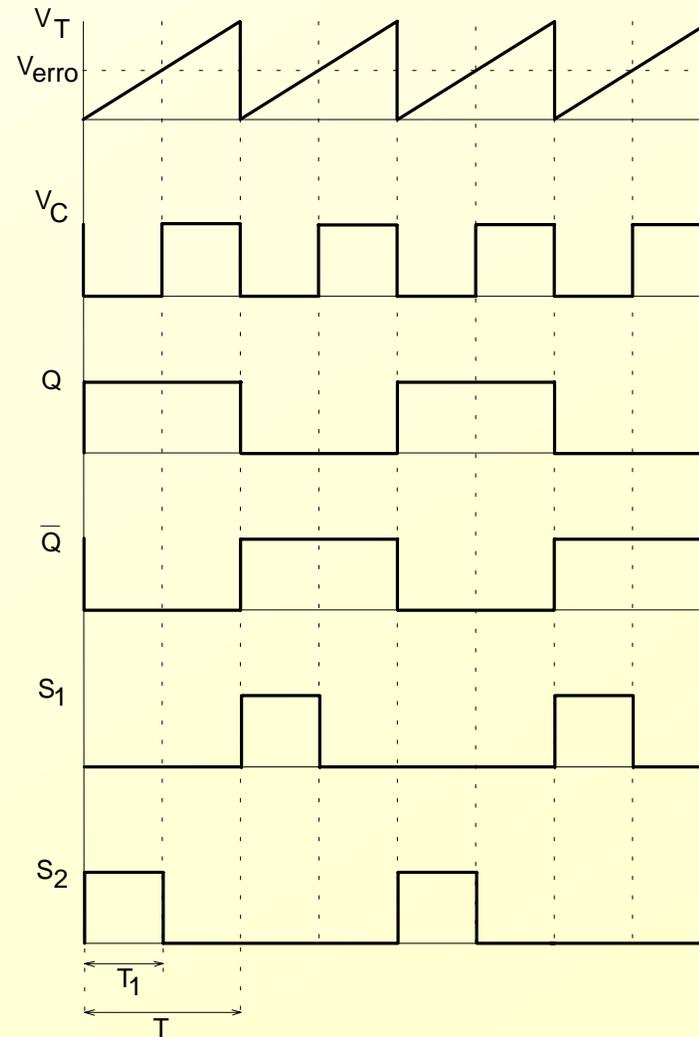
- Circuitos Integrados PWM Dedicados



**Conversores CC-CC: UC3524**

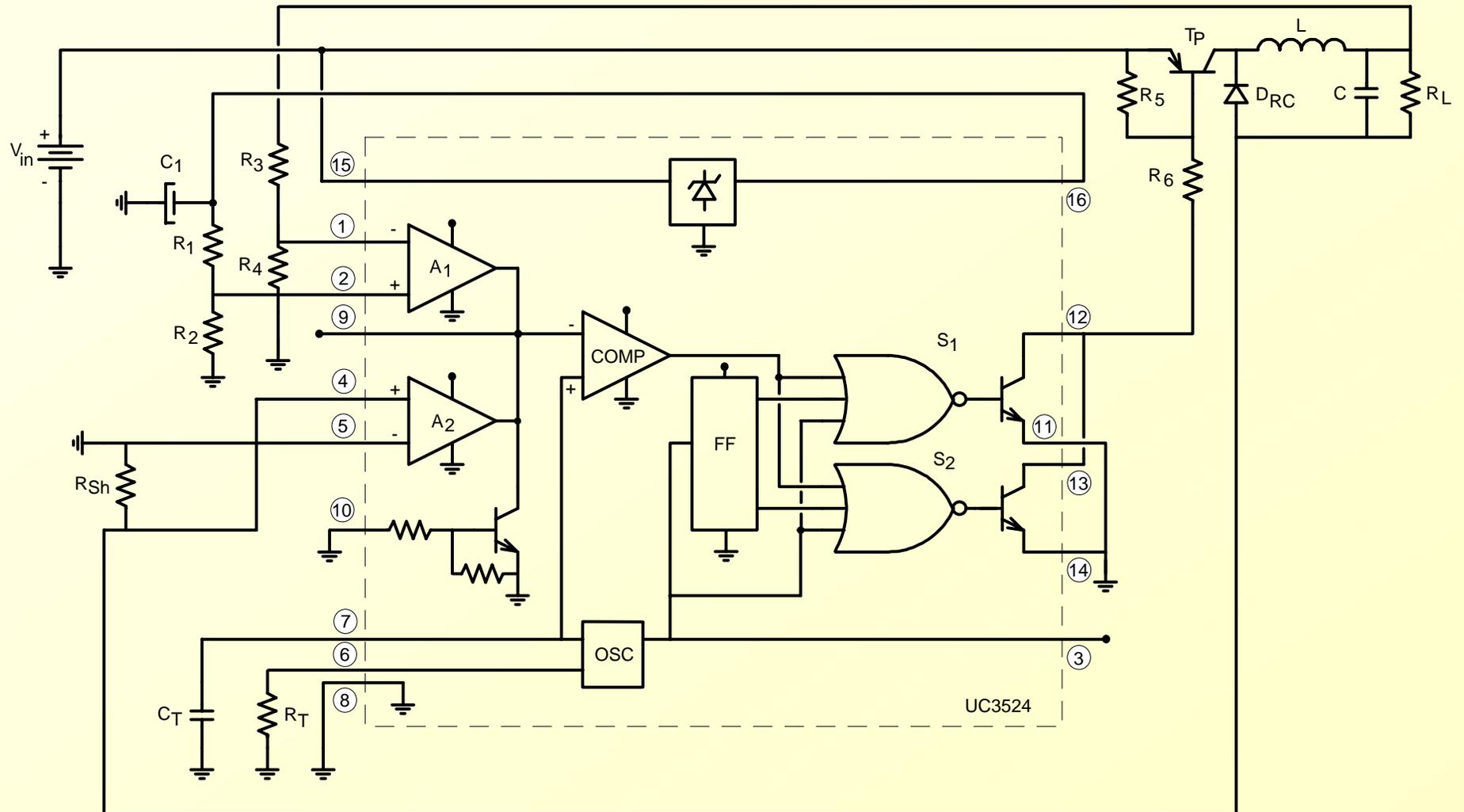
# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- Circuitos Integrados PWM Dedicados



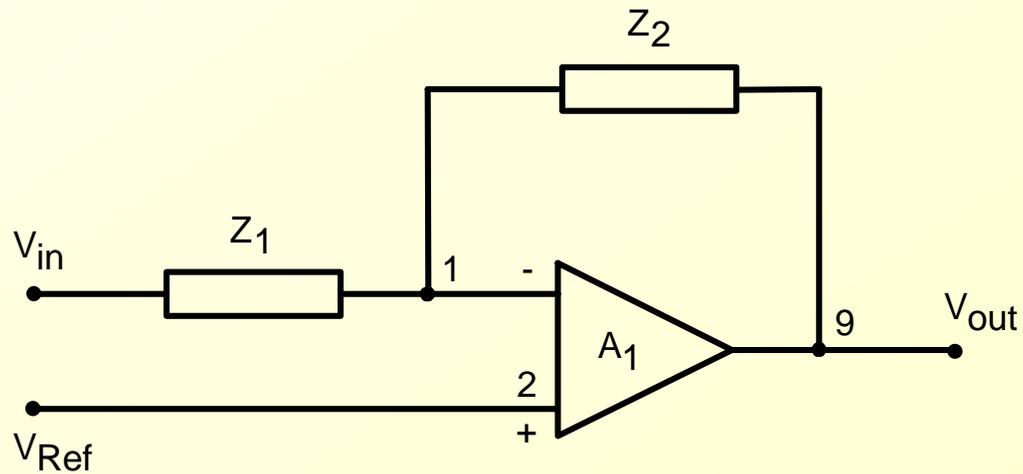
# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- Circuitos Integrados PWM Dedicados



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- Controlador de tensão

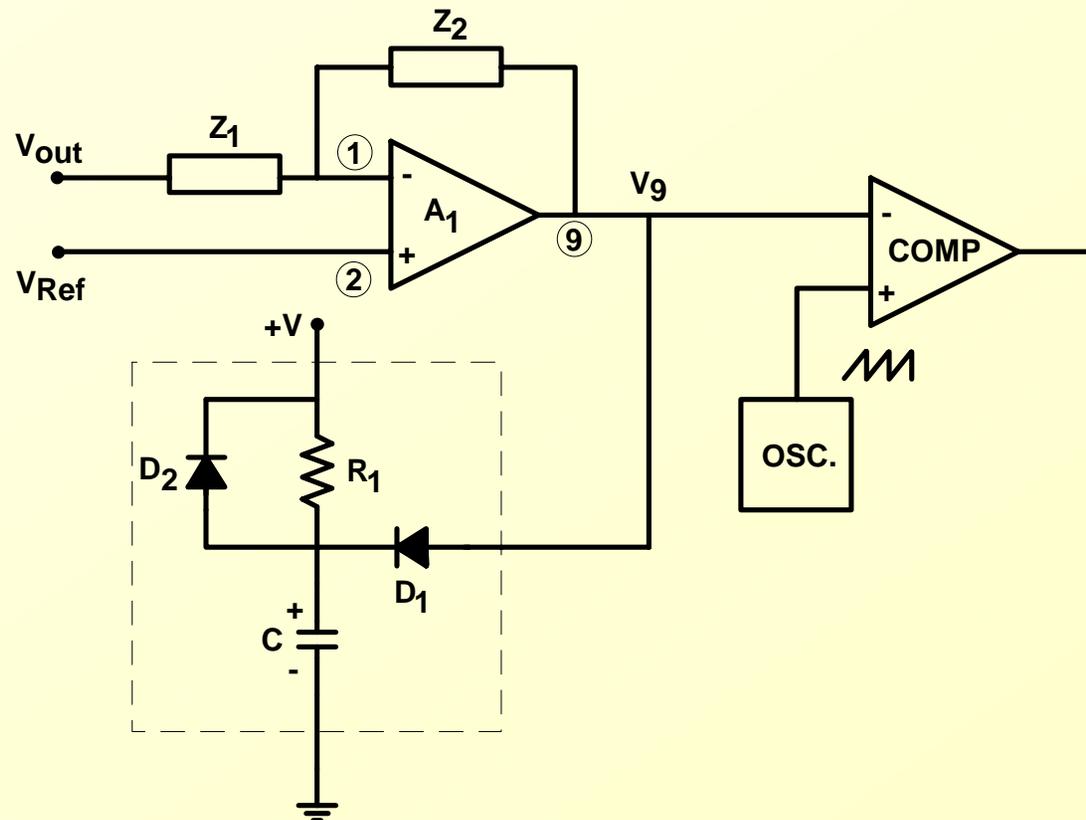


$$V_{out} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot (V_{in} - V_{REF})$$

# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- **Soft-Start (Partida Progressiva)**

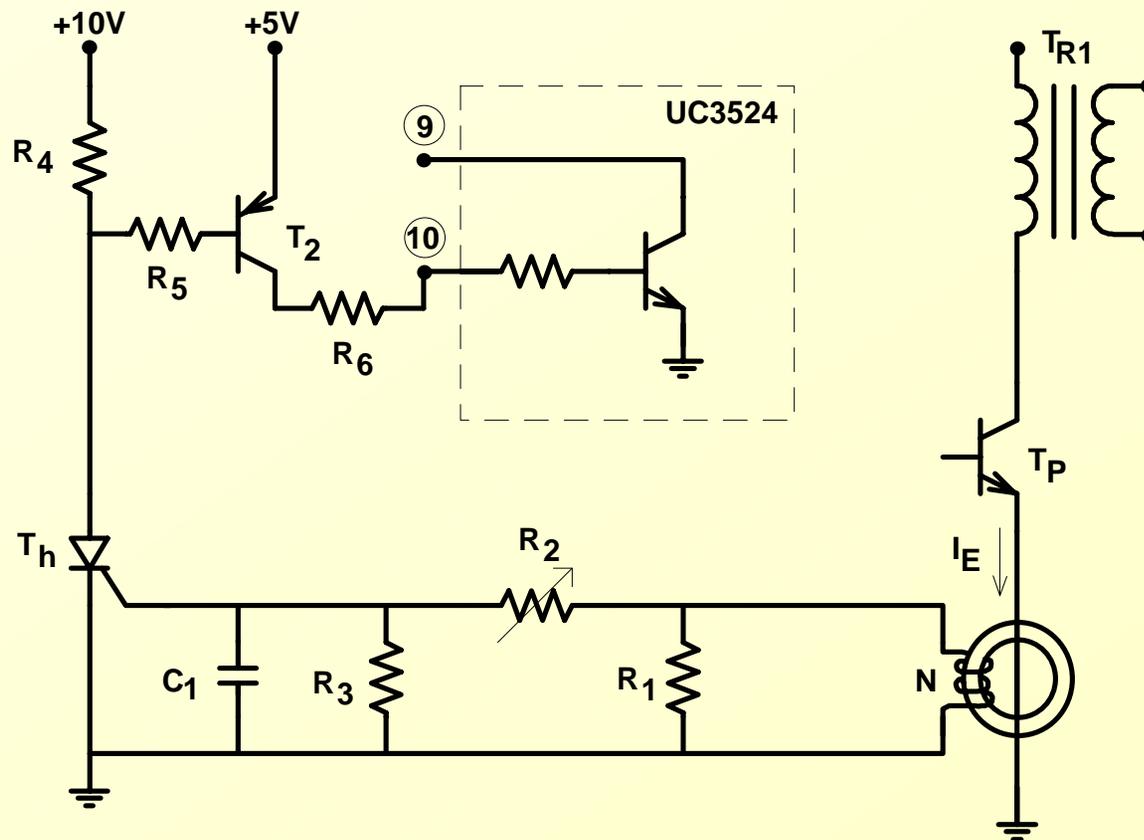
- Quando se energiza a fonte chaveada a razão cíclica deve progredir lentamente, evitando a destruição do interruptor, saturação do transformador e overshoot de saída.



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

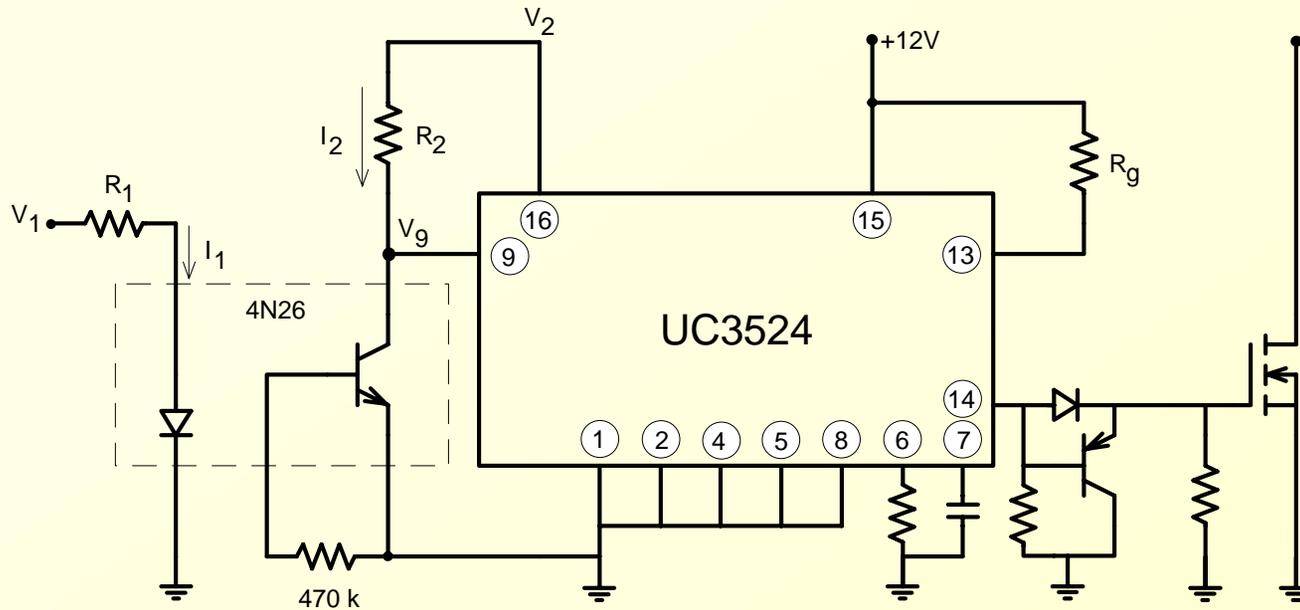
- Circuitos para Limitação de Corrente

- Curto-circuito na carga: desativar a fonte e reativar após o desligamento e religamento do equipamento.



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

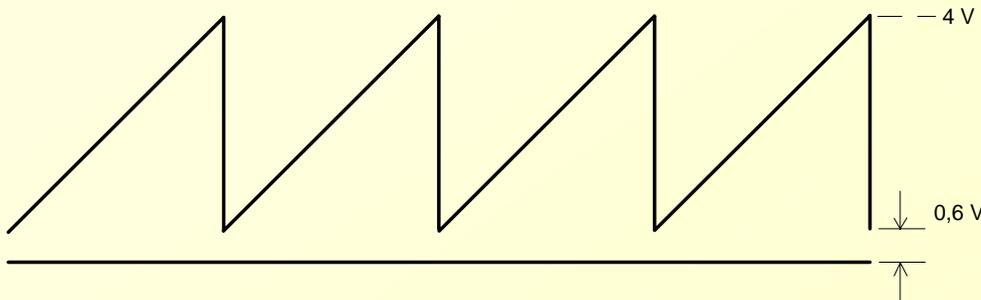
## • Utilização de Isolador Óptico



$$V_9 = V_2 - R_2 \cdot I_2$$

$$I_1 = \frac{V_1 - 1}{R_1}$$

$$I_2 = \beta I_1$$



$$V_9 = V_2 - R_2 \beta \cdot I_1 = V_2 - \frac{R_2}{R_1} \beta \cdot (V_1 - 1)$$

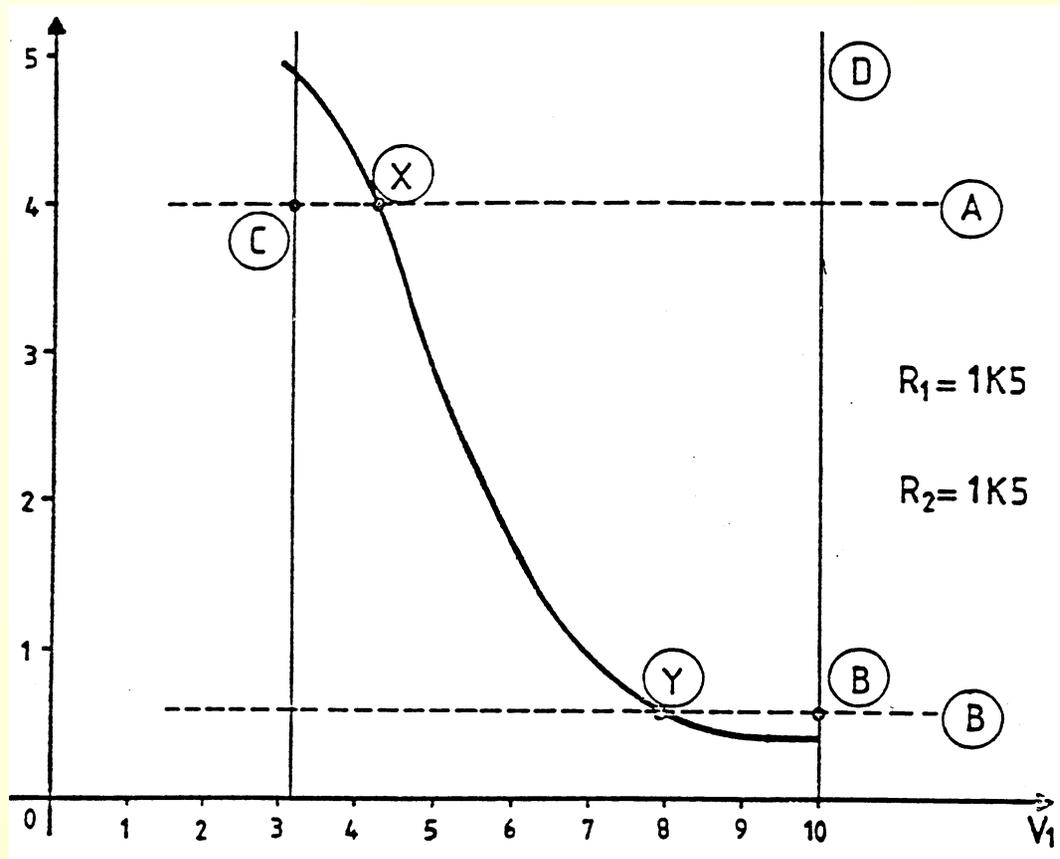
$$V_9 = V_2 - \frac{R_2}{R_1} \beta \cdot V_1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \beta$$

$$G = \frac{\partial V_9}{\partial V_1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \beta$$

$$\text{Se } R_2 = R_1 \Rightarrow G = \beta$$

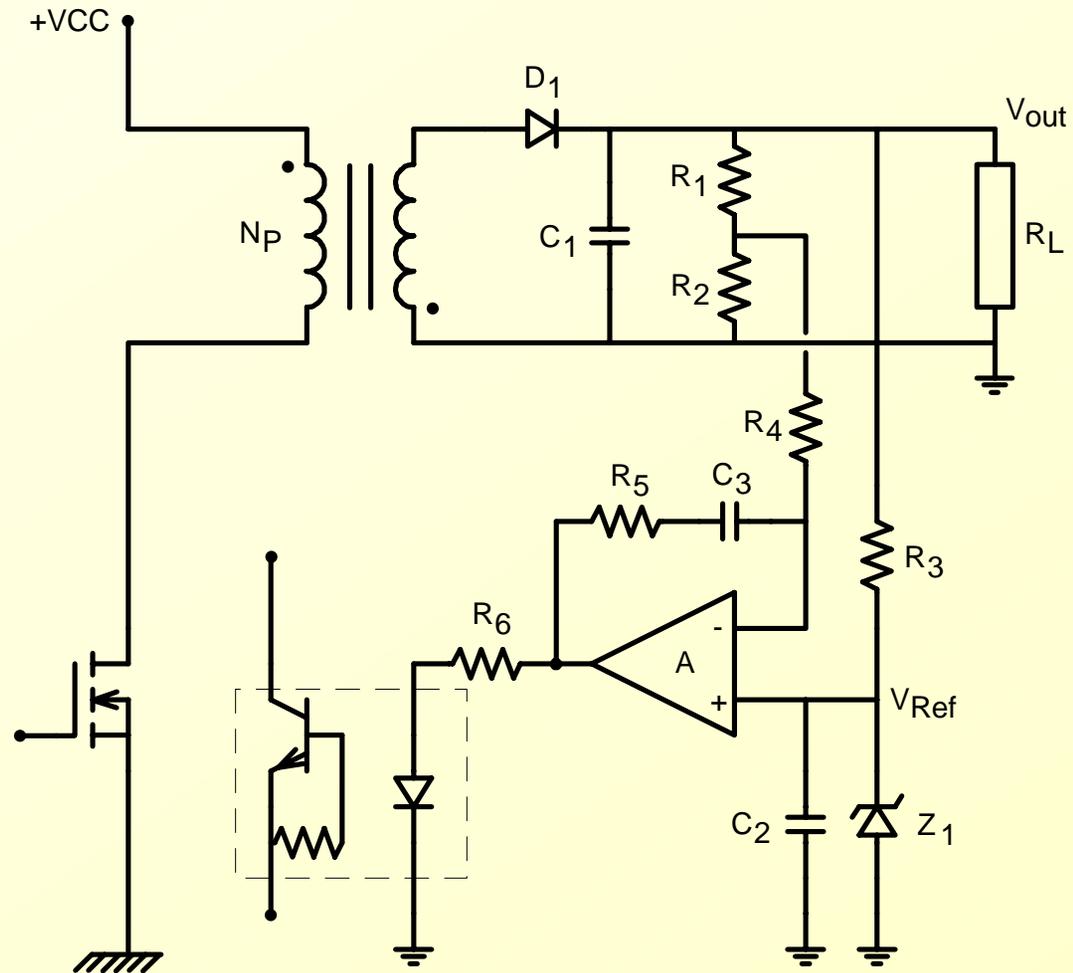
# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- Utilização de Isolador Óptico



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

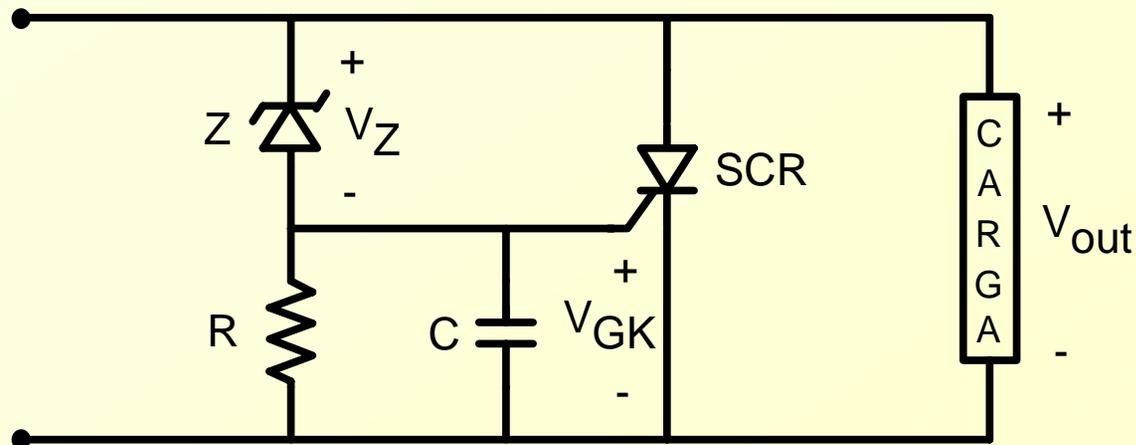
- Utilização de Isolador Óptico



# Circuitos Auxiliares das Fontes Chaveadas

- **Proteção contra Sobretensão na Saída**

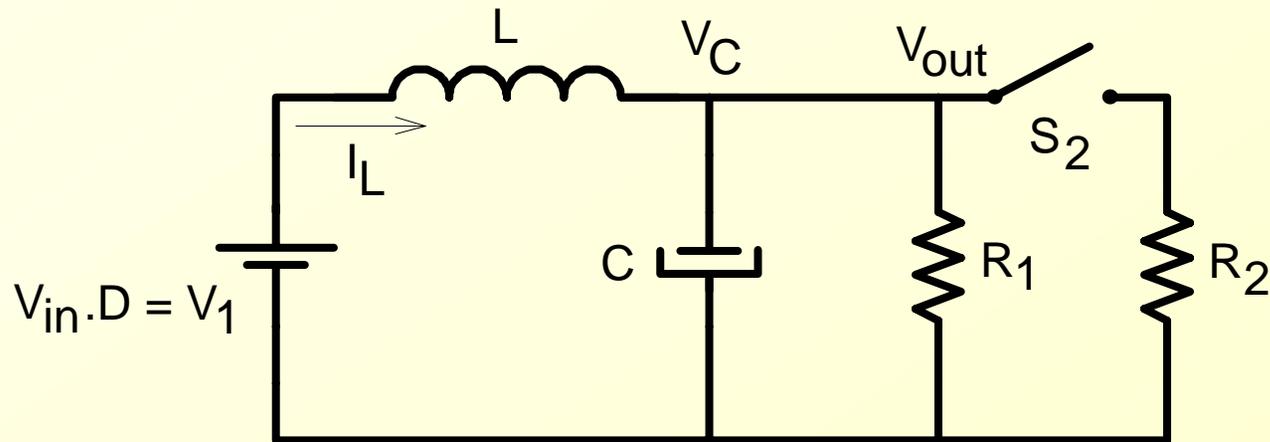
- **Sobretensão:** a fonte é colocada em curto e o circuito de proteção contra sobrecorrente é acionado e desativa a fonte.



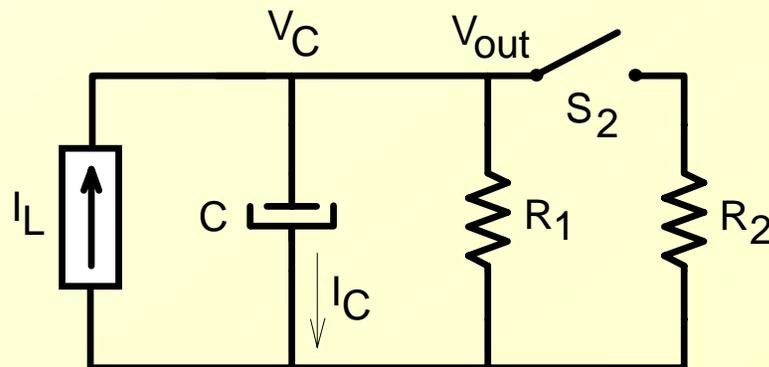
- **Isolação da tensão de saída quando o comando do transistor não é isolado:** Isolador óptico (após o controlador de tensão) ou sensor hall de tensão.

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Estrutura Simplificada de uma Fonte Chaveada



- Supõe-se que  $L$  seja suficientemente grande para que não ocorra variação significativa em  $I_L$ , quando do fechamento de  $S_2$



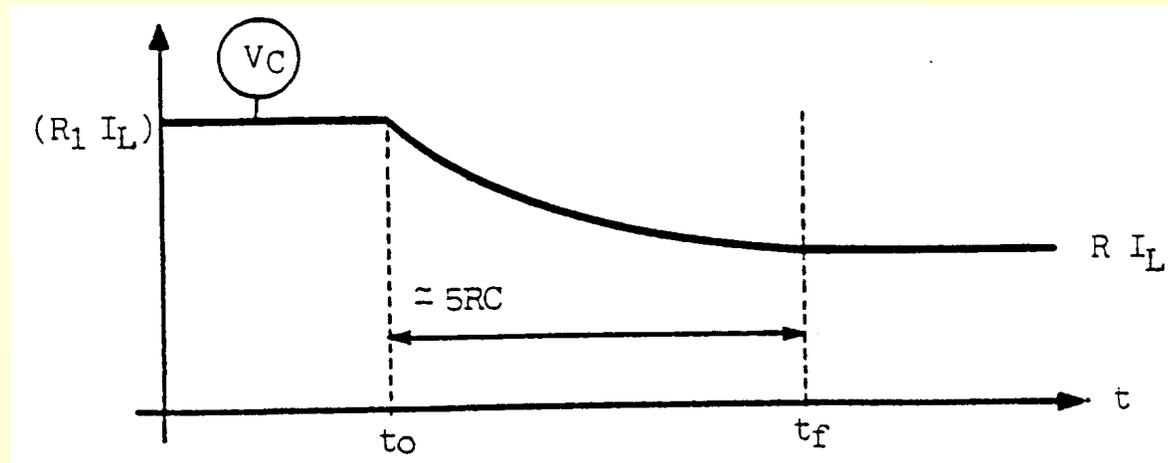
# Resposta Transitória e Estabilidade

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

• Antes do transitório  $V_{C0} = R_1 \cdot I_L$

• Após o transitório  $V_{Cf} = R \cdot I_L$

• Transitório  $V_C = I_L \left[ R_1 e^{-t/RC} + R \left( 1 - e^{-t/RC} \right) \right]$

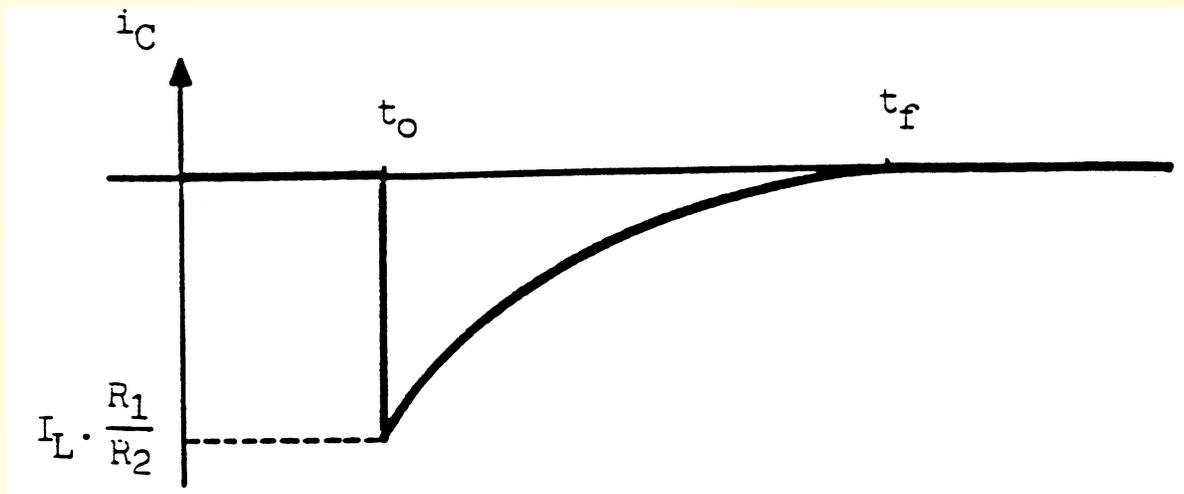


# Resposta Transitória e Estabilidade

- Corrente no Capacitor durante o transitório

$$i_C = -\frac{V_{C0}}{R_2} \cdot e^{-t/RC}$$

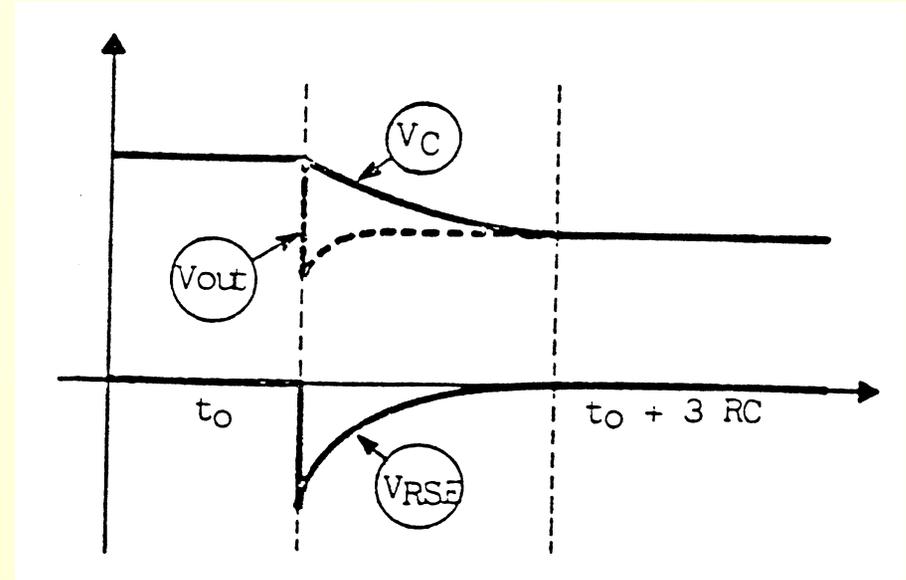
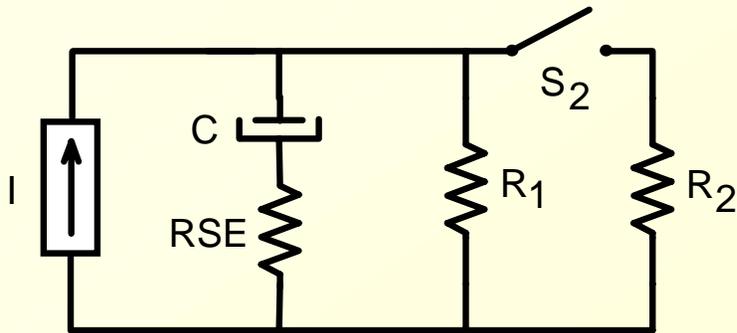
$$i_C = -\frac{R_1}{R_2} \cdot I_L \cdot e^{-t/RC}$$



- Sem RSE

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Com RSE

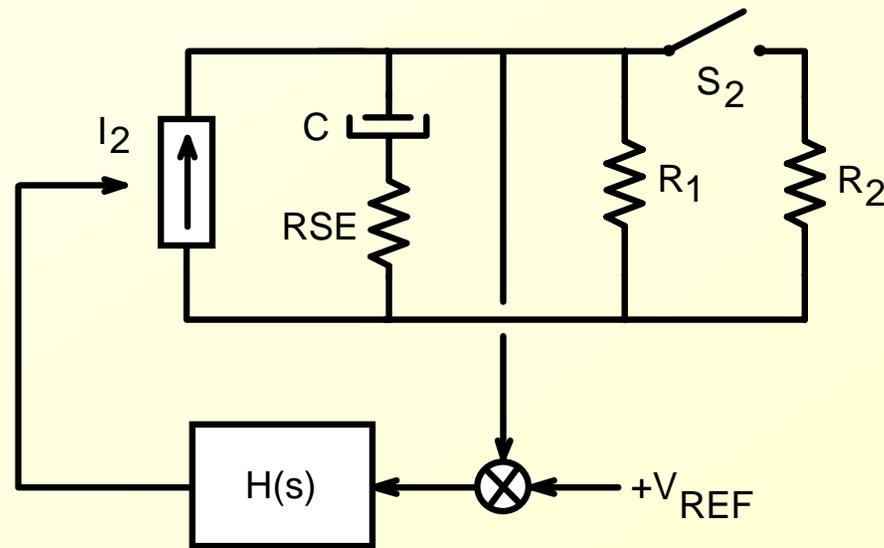


$$V_{out} = V_C + V_{RSE}$$

$$V_{RSE} = RSE \cdot i_C = -RSE \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot I_L \cdot e^{-t/RC}$$

$$V_{out} = I_L \left[ R + (R_1 - R) \cdot e^{-t/RC} \right] - RSE \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot I_L \cdot e^{-t/RC}$$

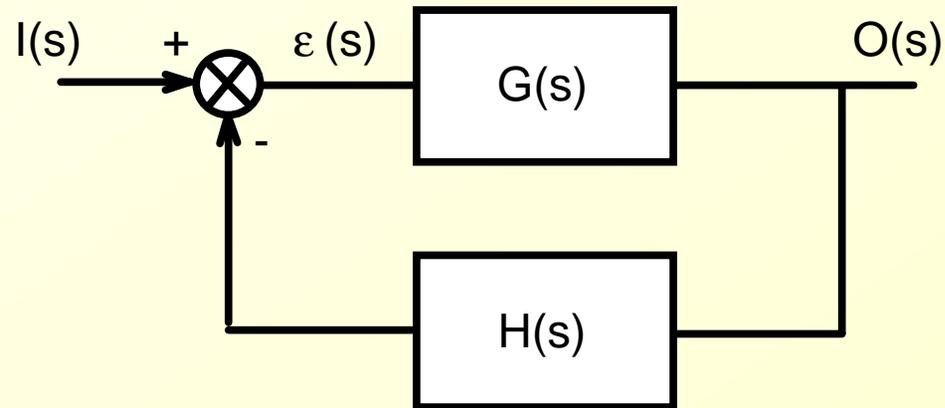
# Resposta Transitória e Estabilidade



- 1 – A amplitude do desvio de tensão depende somente da  $R_{SE}$  do capacitor.
- 2 – A natureza da resposta (tipo de amortecimento e tempo de recuperação) dependem somente do tipo de controlador empregado.

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Equação Característica e função de transferência

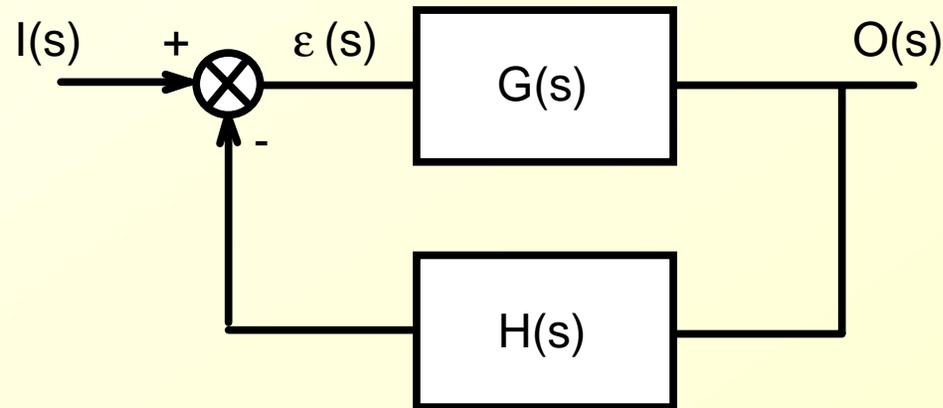


$$O(s) = G(s) \cdot \epsilon(s)$$

$$\frac{O(s)}{I(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) \cdot H(s)} = F(s)$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Critérios de Estabilidade



$$1 + G(s).H(s) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{Instabilidade}$$

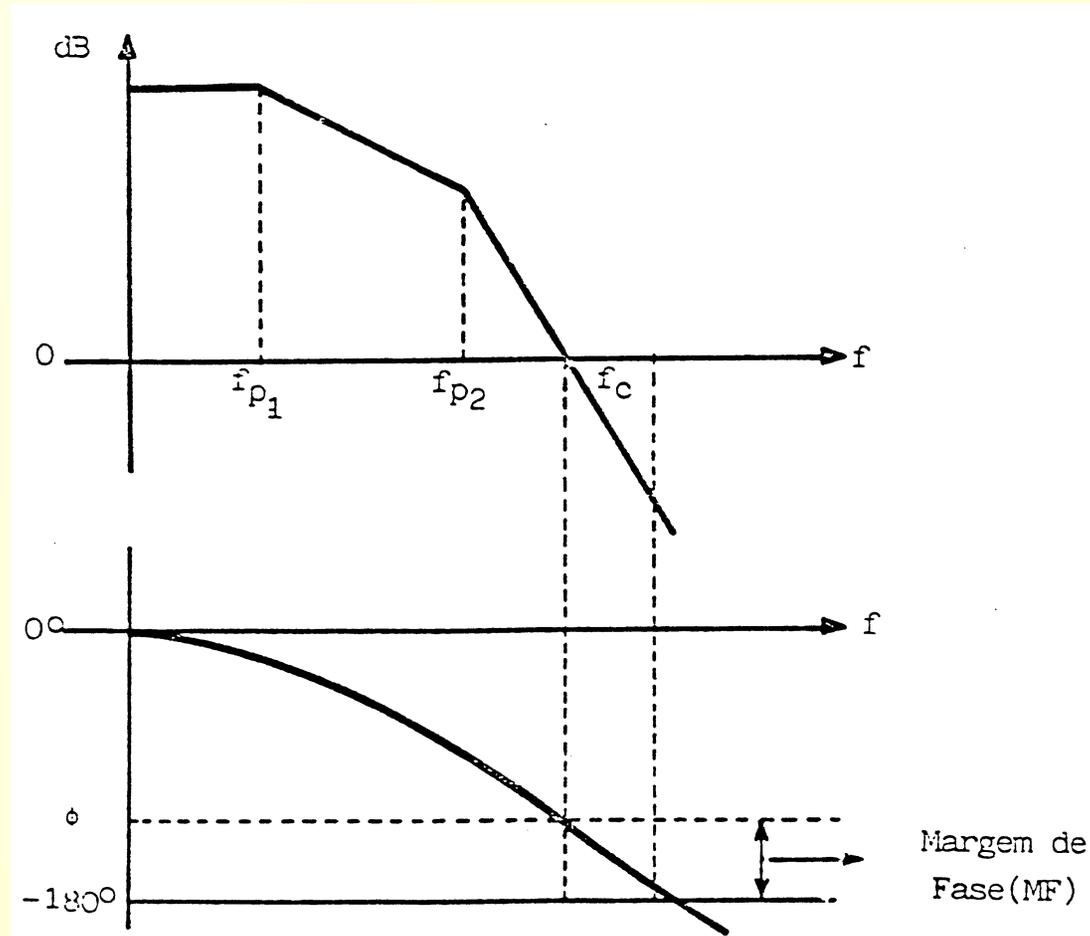
$$G(s).H(s) = -1$$

$$(G(\omega).H(\omega))_{dB} = 20.\log[|G(\omega).H(\omega)|] = 0$$

$$\Phi = -180^\circ$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

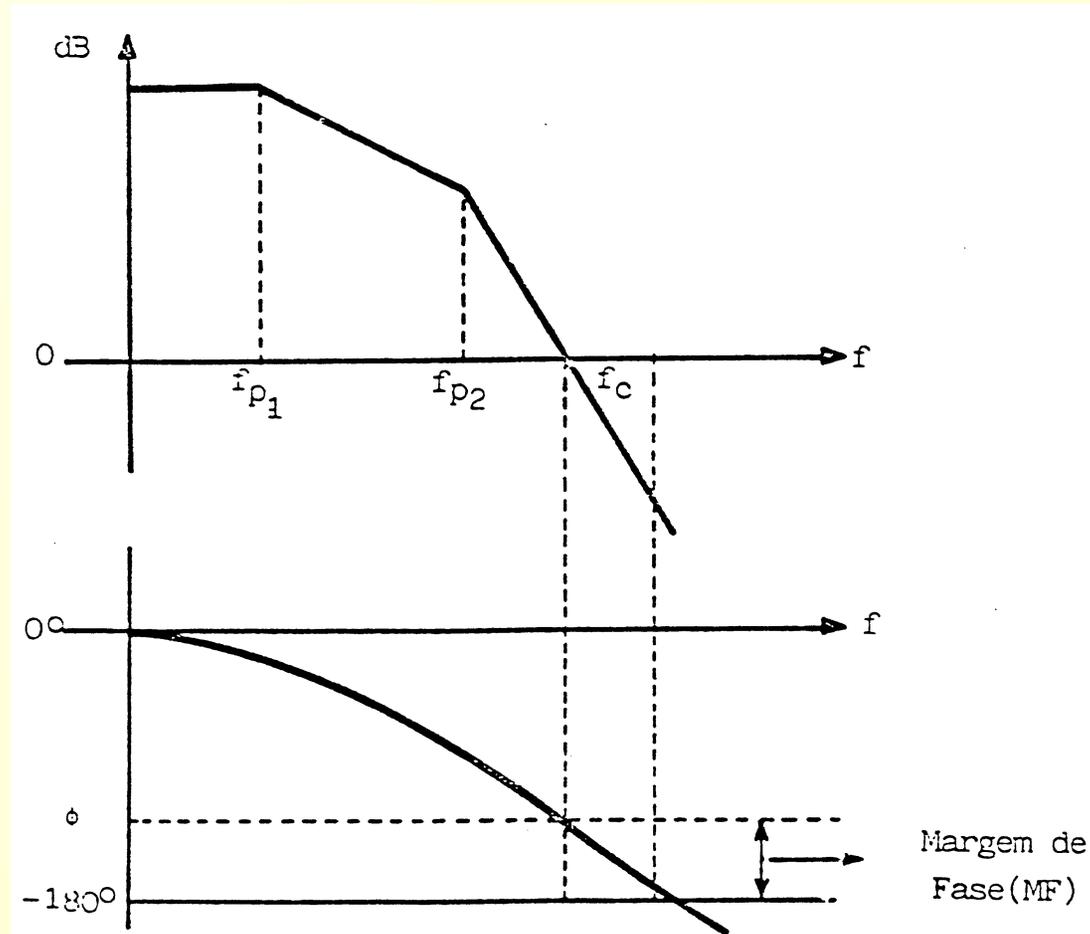
- Critérios de Estabilidade



- Margem de fase entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Critérios de Estabilidade



- Margem de fase entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$

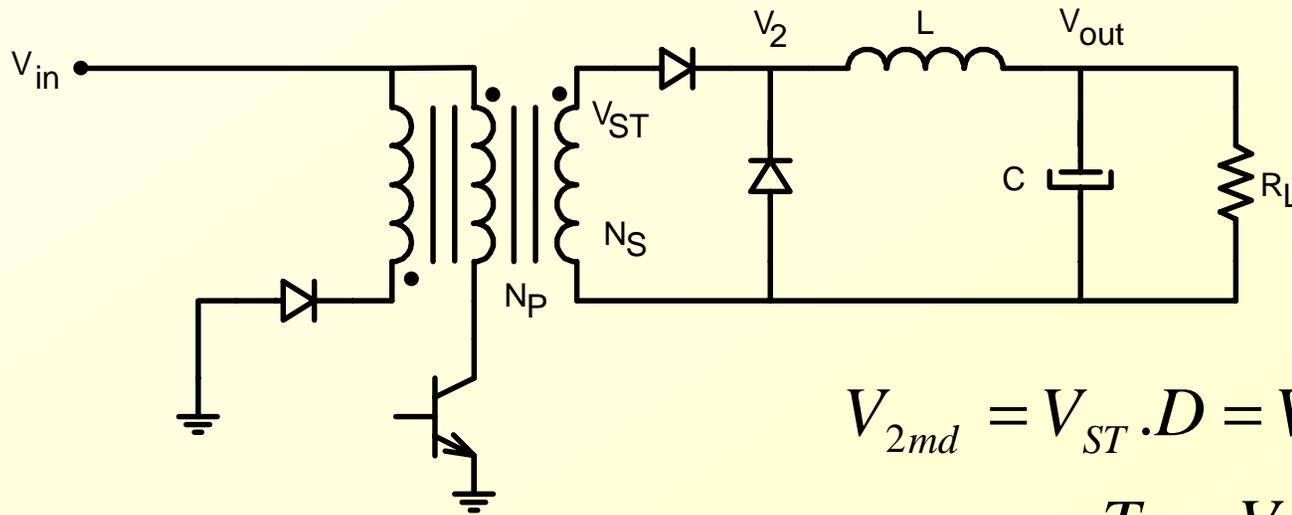
# Resposta Transitória e Estabilidade

- Para erro estático pequeno - Ganhos elevados em baixa frequência
- Pólo na origem
- Frequência de cruzamento por zero o mais alta possível

$$f_c \cong \frac{f_s}{4}$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Forward

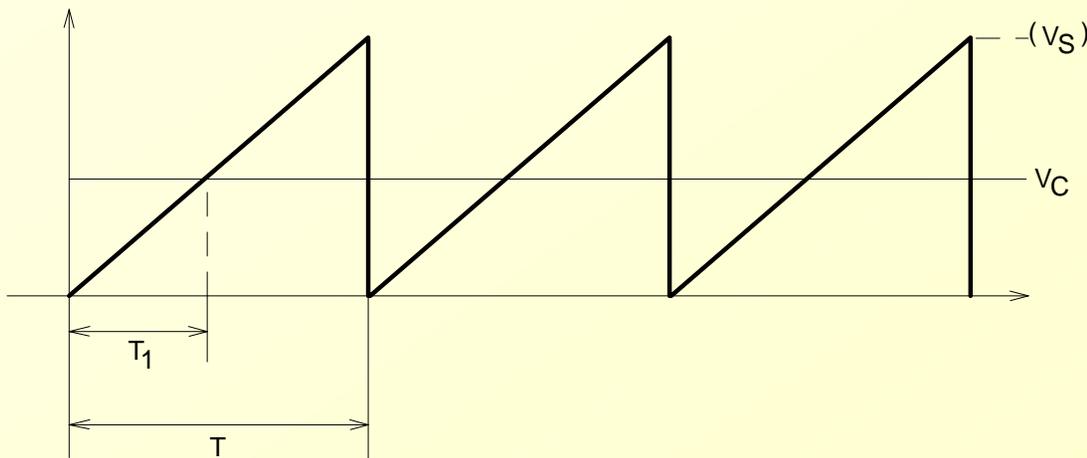


$$V_{2md} = V_{ST} \cdot D = V_{in} \frac{N_S}{N_P} \cdot D$$

$$D = \frac{T_1}{T} = \frac{V_C}{V_S}$$

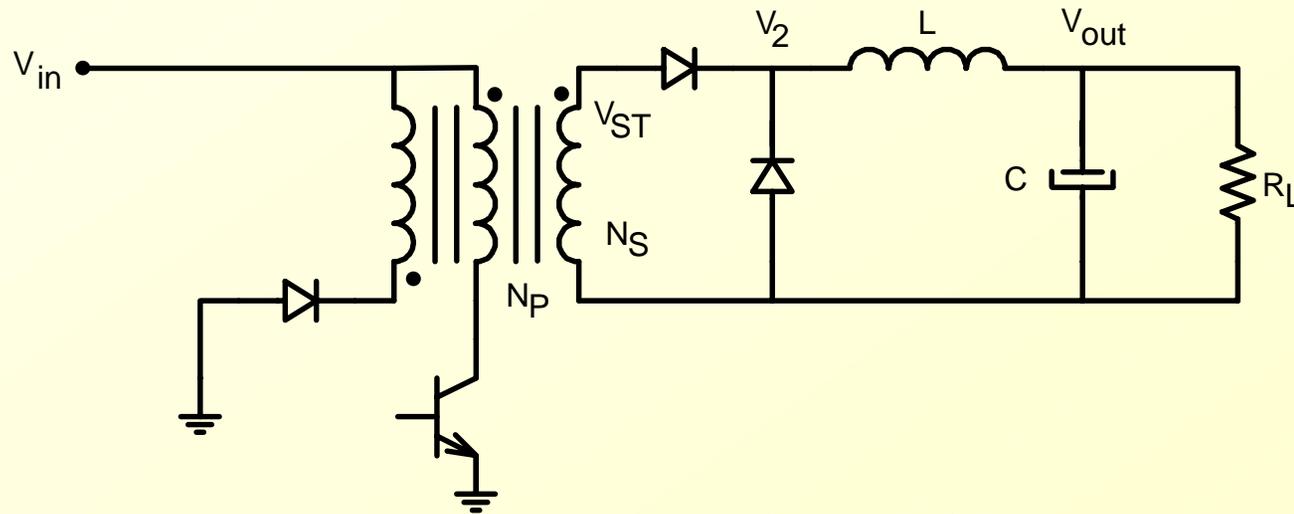
$$V_{2md} = V_{in} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot \frac{V_C}{V_S}$$

$$\frac{V_{2md}}{V_C} = \frac{V_{in}}{V_S} \cdot \frac{N_S}{N_P}$$



# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Forward



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} = \frac{1}{s^2 LC + 1}$$

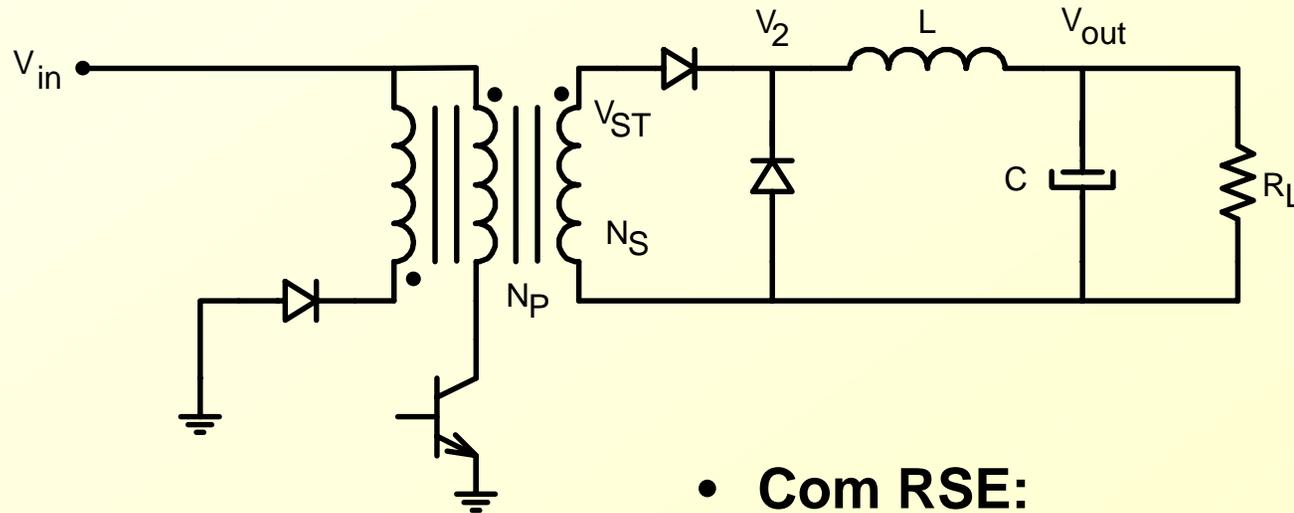
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} = \frac{1}{\left( \frac{s^2}{\omega_0^2} + 1 \right)}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} = \frac{1}{\left( \frac{j\omega}{\omega_0} \right)^2 + 1}$$

$$|G(\omega)|_{dB} = -20 \log \sqrt{1 + (\omega / \omega_0)^4}$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Forward



$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} \cdot \frac{V_{2md}(s)}{V_C(s)} = \frac{V_{out}(s)}{V_C(s)}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} = \frac{V_{in}}{V_S} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot \frac{1}{(s^2 / \omega_0^2 + 1)}$$

- Com RSE:

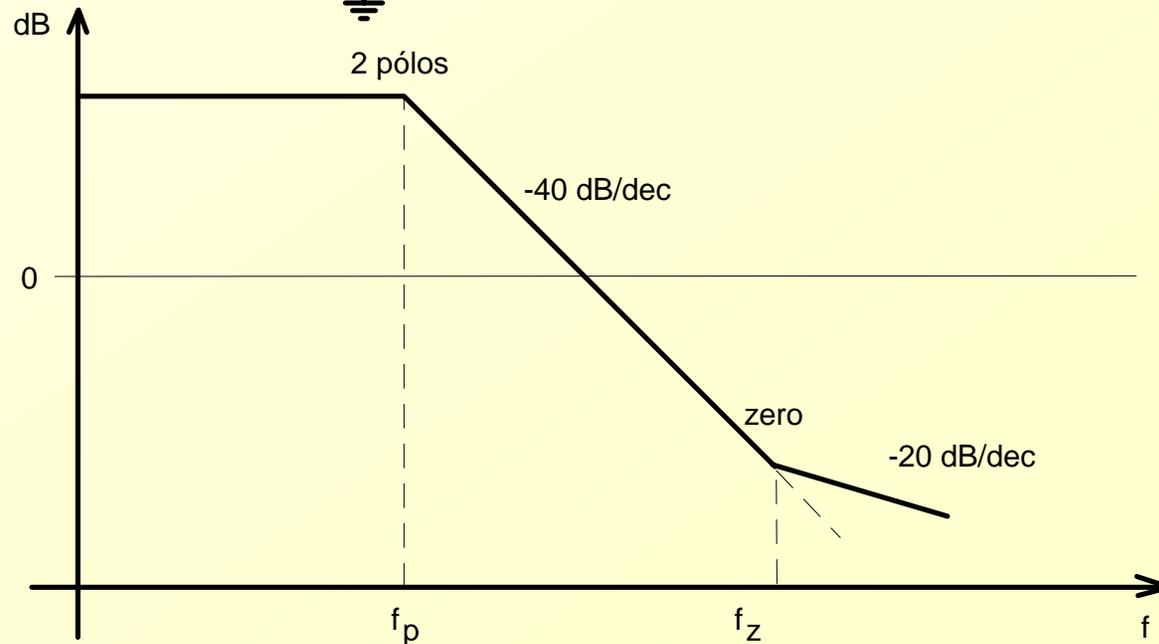
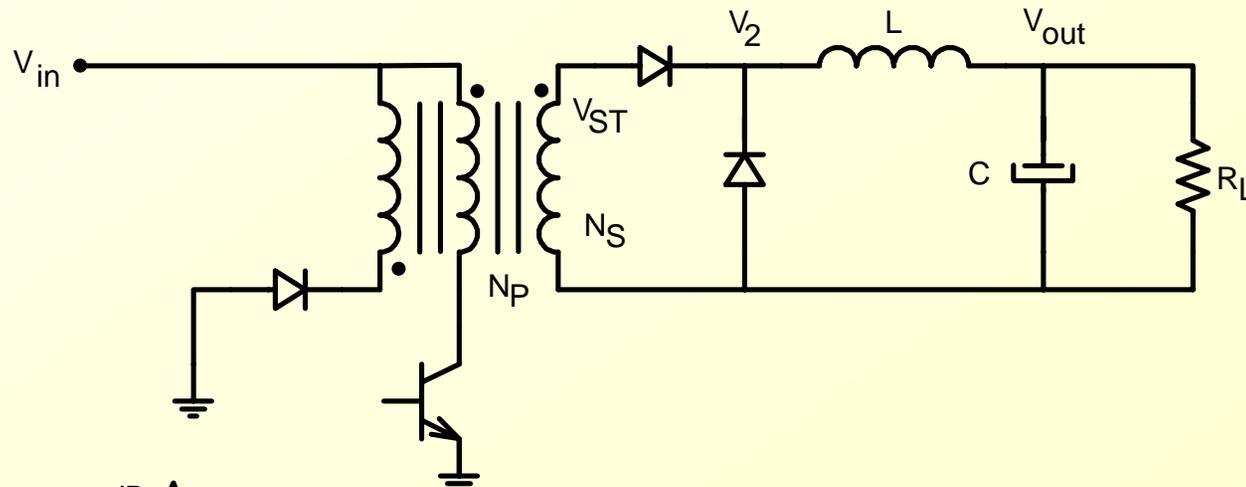
$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} = \frac{(1 + s \cdot C \cdot RSE)}{(1 + s^2 / \omega_0^2)}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{2md}(s)} = \frac{(1 + s / \omega_Z)}{(1 + s^2 / \omega_0^2)}$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} = \frac{V_{in}}{V_S} \cdot \frac{N_S}{N_P} \cdot \frac{(1 + s / \omega_Z)}{(1 + s^2 / \omega_0^2)}$$

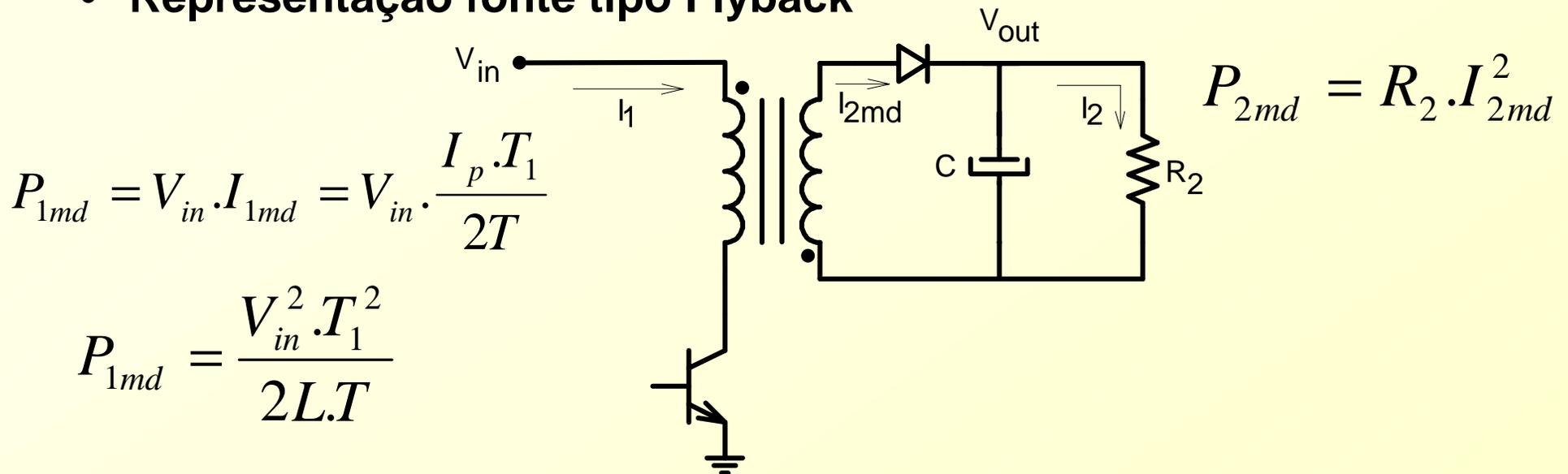
# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Forward



# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Flyback



$$P_{1md} = V_{in} \cdot I_{1md} = V_{in} \cdot \frac{I_p \cdot T_1}{2T}$$

$$P_{1md} = \frac{V_{in}^2 \cdot T_1^2}{2L \cdot T}$$

$$P_{2md} = P_{1md}$$

$$R_2 I_{2md}^2 = \frac{V_{in}^2 \cdot T_1^2}{2L \cdot T}$$

$$I_{2md}^2 = \frac{V_{in}^2}{2L \cdot R_2} \cdot T \frac{T_1^2}{T^2} = \frac{V_{in}^2}{2L \cdot R_2 \cdot f} \cdot \frac{T_1^2}{T^2}$$

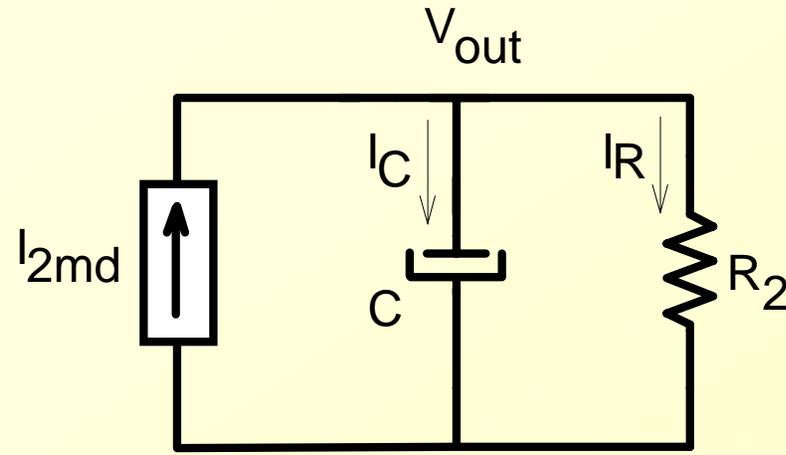
$$I_{2md} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2L \cdot R_2 \cdot f}} \cdot D$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Flyback

$$I_{2md} = C \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2}$$

$$\frac{V_{in}}{C\sqrt{2L.R_2.f}} \cdot D = \frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2.C}$$



$$D = \frac{V_C}{V_S} \quad A = \frac{V_{in}}{\sqrt{2L.f.R_2.C}}$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} + \frac{V_{out}}{R_2.C} = A \cdot \frac{V_C}{V_S}$$

$$S.V_{out}(s) + \frac{V_{out}(s)}{R_2.C} = \frac{A}{V_S} \cdot V_C(s)$$

$$V_{out}(s)[s.R_2.C + 1] = \frac{A.R_2.C}{V_S} \cdot V_C(s)$$

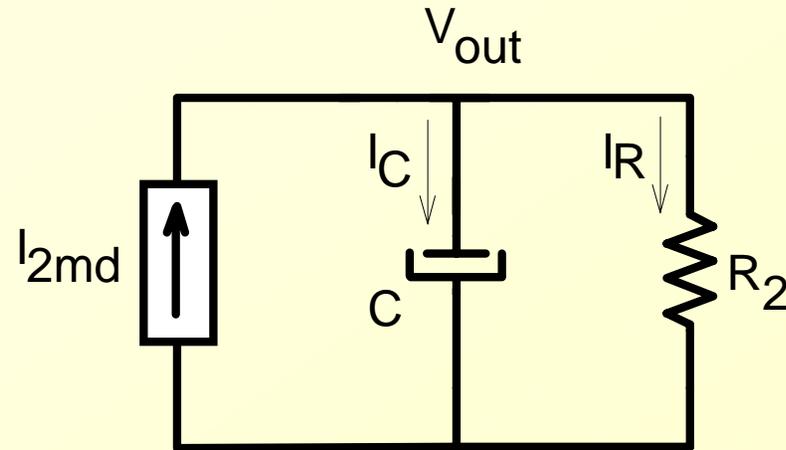
# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Flyback

$$V_{out}(s)[s.R_2C + 1] = \frac{A.R_2C}{V_s} \cdot V_C(s)$$

$$\frac{V_{out}(s)}{V_C(s)} = \frac{A.R_2C}{V_s} \cdot \frac{1}{(1 + s.R_2C)}$$

$$G(s) = \frac{V_{in} \cdot R_2 C}{\sqrt{2L \cdot R_2 \cdot f} \cdot C} \cdot \frac{1}{(1 + s.R_2C)}$$



$$G(s) = \frac{V_{in}}{\sqrt{\frac{2L \cdot f}{R_2}}} \cdot \frac{1}{(1 + s.R_2C)}$$

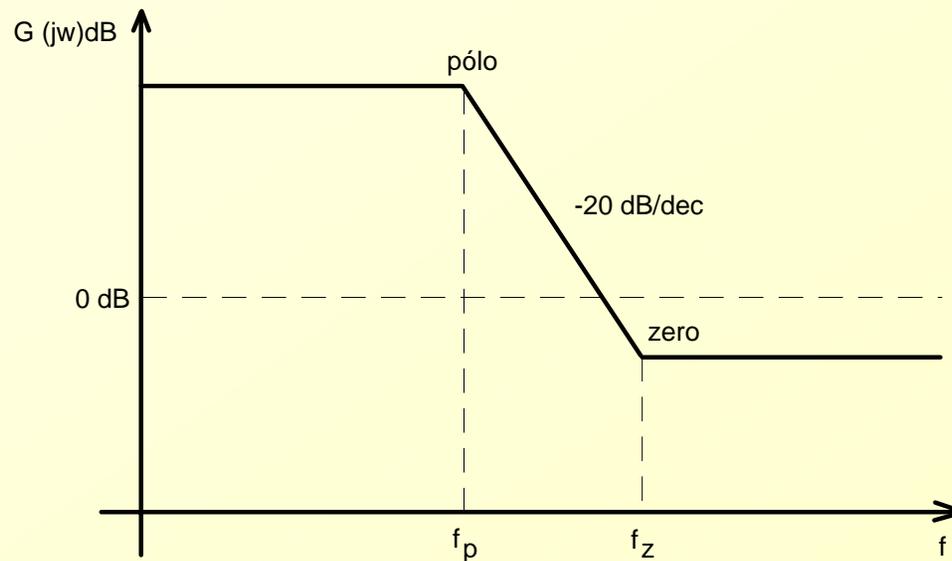
- Sistema de 1ª ordem
- Ganho depende da Resistência de carga

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Representação fonte tipo Flyback

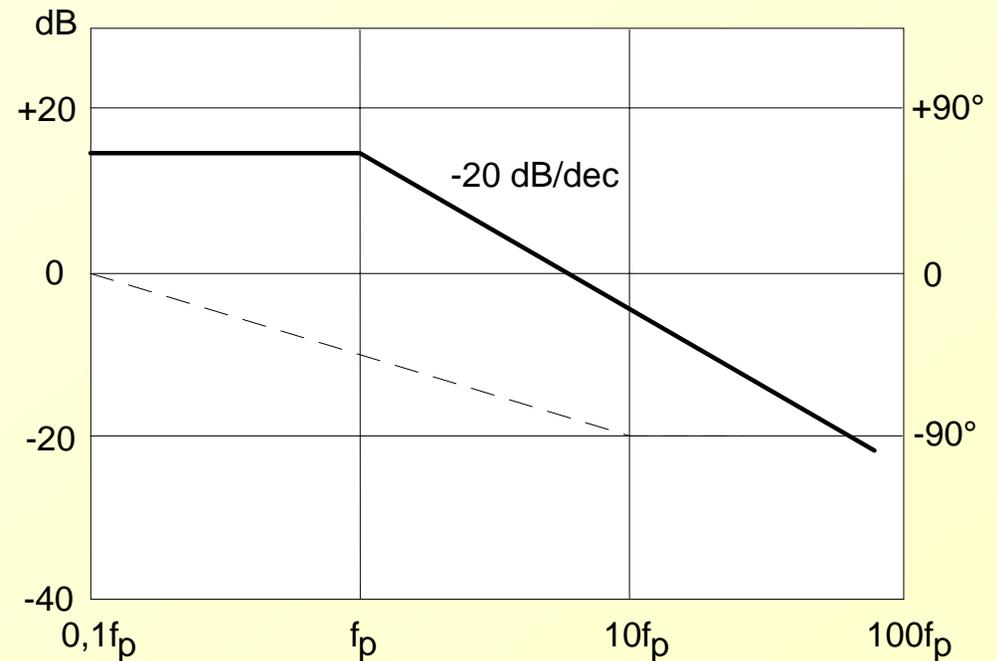
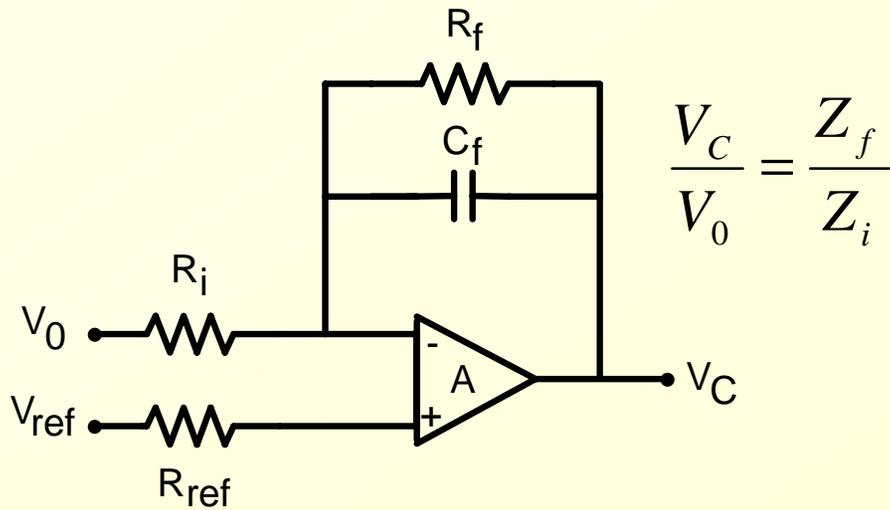
Com RSE:

$$G(s) = \frac{V_{in}}{\sqrt{\frac{2L \cdot f}{R_2}}} \cdot \frac{(1 + s \cdot RSE \cdot C)}{(1 + s \cdot R_2 \cdot C)}$$



# Resposta Transitória e Estabilidade

- Circuitos de Compensação
  - Compensador de 1 pólo



$$Z_i = R_i \quad Z_f = \frac{R_f / C_f \cdot s}{R_f + 1 / C_f \cdot s}$$

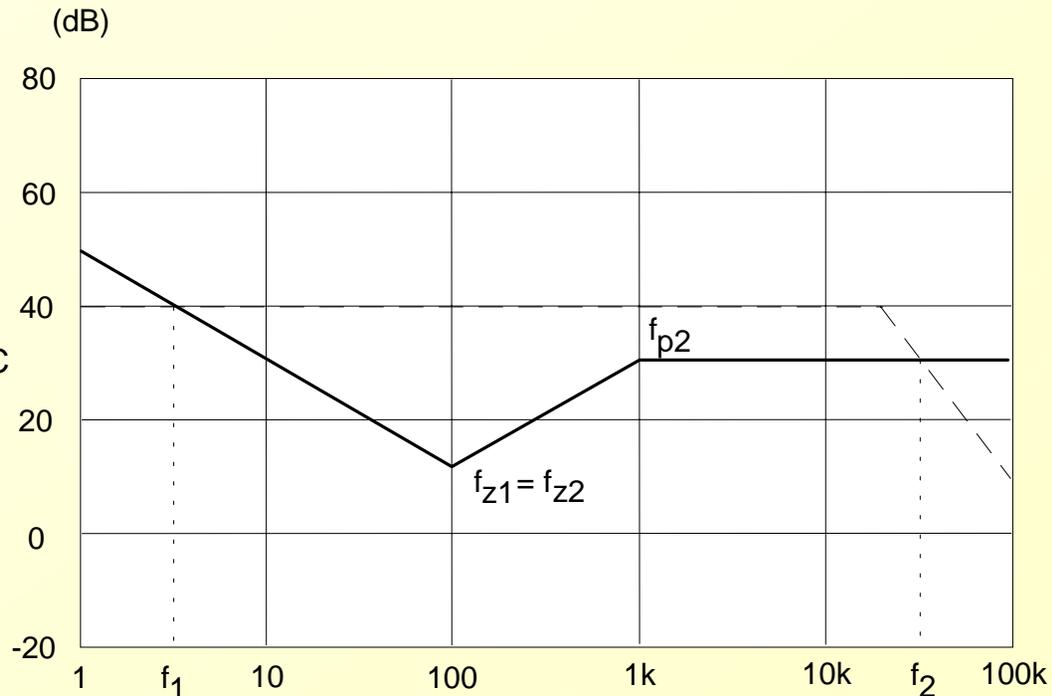
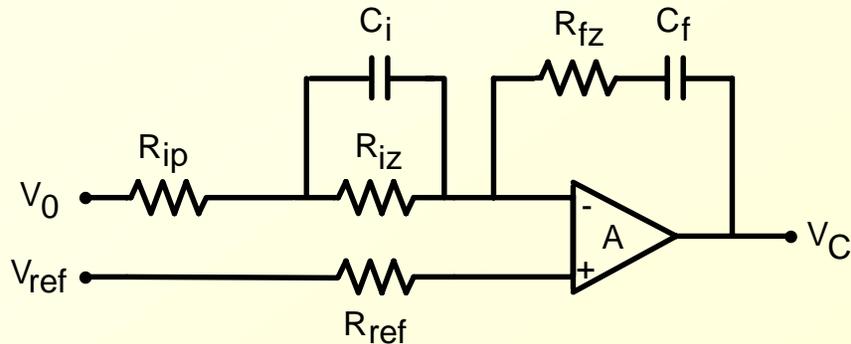
$$\frac{V_C(s)}{V_0(s)} = \frac{R_f}{C_f \cdot s (R_f + 1 / C_f \cdot s) R_i} = \frac{R_f}{R_i} \cdot \frac{1}{(1 + s \cdot C_f \cdot R_f)}$$

$$R_{ref} = \frac{R_i \cdot R_f}{R_i + R_f}$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Circuitos de Compensação

- Compensador de 2 pólos



$$Z_f = R_{fz} + \frac{1}{s.C_f}$$

$$Z_i = R_{ip} + \frac{R_{iz} / s.C_i}{R_{iz} + \frac{1}{s.C_i}} = \frac{R_{iz}}{s.C_i} \cdot \frac{1}{\left(R_{iz} + \frac{1}{s.C_i}\right)} + R_{ip}$$

$$\frac{V_C(s)}{V_0(s)} = \frac{(1 + R_{iz}.C_i.s)(1 + C_f.R_{fz}.s)}{\left[ C_f.s.(R_{ip} + R_{iz}). \left( 1 + C_i.s. \frac{R_{ip}.R_{iz}}{R_{iz} + R_{ip}} \right) \right]}$$

$$f_{z1} = f_{z2}$$

$$C_f.R_{fz} = C_i.R_{iz}$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- **Método prático p/ cálculo do compensador para conversor Forward**

1º) Traçar o diagrama  $G(s)$  em dB.

2º) Escolher a topologia do controlador. Recomenda-se o controlador de 2 pólos estudado neste capítulo.

3º) Definir a freqüência  $f_c$ , na qual a curva da função  $G(s).H(s)$  passa por 0 dB. Recomenda-se  $f_c \leq \frac{f_s}{4}$  sendo  $f_s$  a freqüência de chaveamento .

4º) Determinar o ganho de  $H(s)$  para  $f = f_c$ .

5º) Situar os dois zeros de  $H(s)$  na freqüência  $f_0$  do filtro.

6º) Situar o 1º pólo de  $H(s)$  na origem (0 Hz). Assim  $f_{p1} = 0$  Hz.

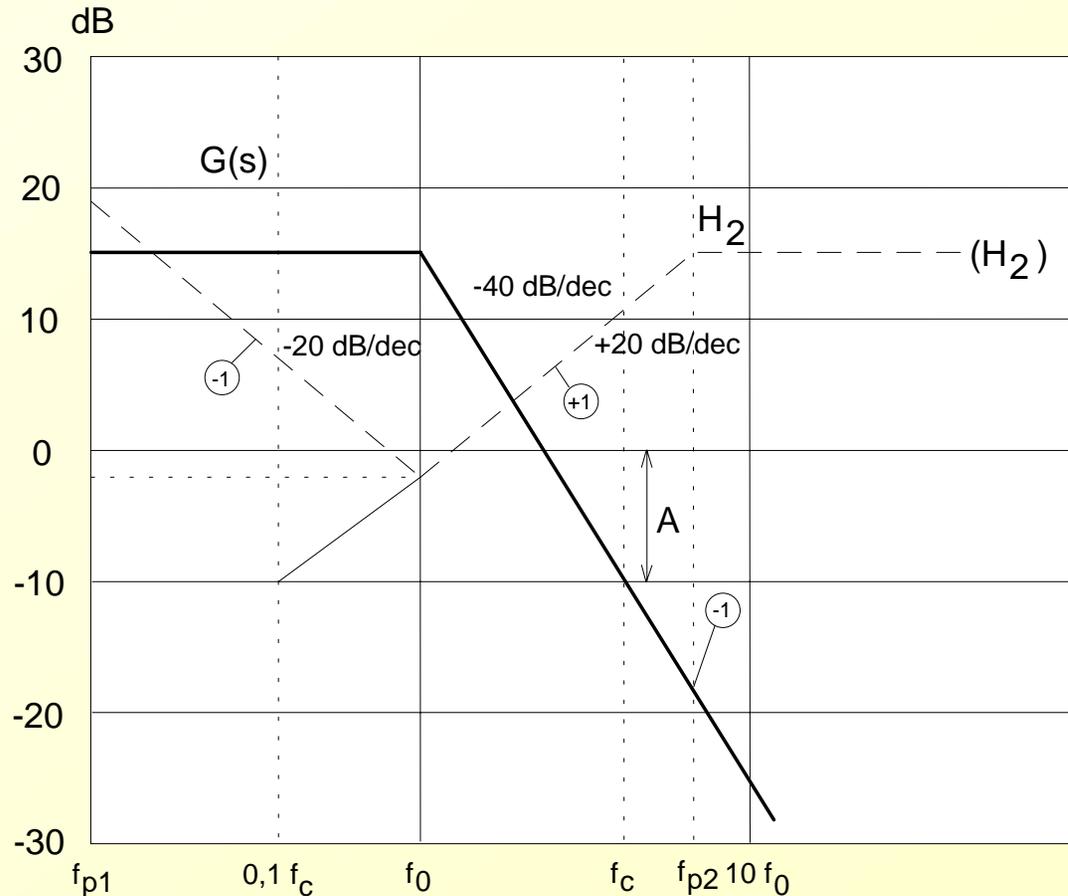
7º) Situar o 2º pólo de  $H(s)$ , destinado a compensar o zero da RSE, numa freqüência igual a 5 vezes a freqüência de ressonância do filtro.

8º) Calcular  $H_1$  e  $H_2$  empregando o procedimento descrito a seguir

9º) Calcular os valores dos resistores e capacitores do circuito de compensação

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Método prático p/ cálculo do compensador para conversor Forward



$$H_2 = A + 20 \log \frac{f_{p2}}{f_c} = 20 \log A_2$$

$$H_1 = A - 20 \log \frac{f_c}{f_0} = 20 \log A_1$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Exemplo de Projeto – Conversor Forward

$$\begin{array}{llll} V_{out} = 12 \text{ V} & P_{out} = 240 \text{ W} & f_s = 40 \text{ kHz} \rightarrow T = 25 \mu\text{s} & V_{in} = 60 \text{ V} \\ I = 2 \text{ A a } 20 \text{ A} & R_1 = 6 \Omega \text{ a } 0,6 \Omega & C = 4000 \mu\text{F} & D = 0,2 \text{ a } 0,4 & L = 60 \mu\text{H} \\ RSE = 25 \text{ m}\Omega & \frac{N_s}{N_p} = 1,0 & V_s = 5,0 \text{ V} & & \end{array}$$

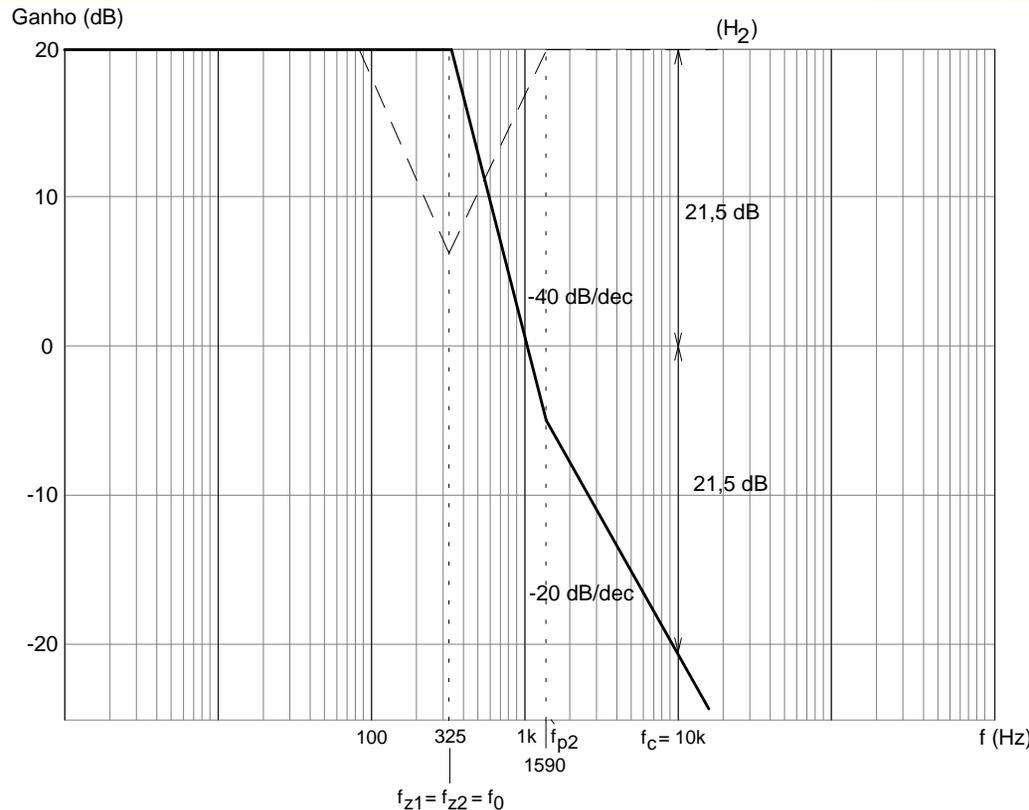
## a) Diagrama de G(s)

$$\frac{V_{out}}{V_C} = \frac{V_{in}}{V_s} = G \quad G = \frac{60}{5} = 12 = 21,6\text{dB}$$

$$f_0 = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} = 325\text{Hz} \quad f_z = \frac{1}{2.\pi.RSE.C} = 1590\text{Hz}$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Exemplo de Projeto – Conversor Forward



$$f_c = \frac{f_s}{4} = 10\text{kHz}$$

Para  $f = 10 \text{ kHz}$ , o ganho de  $G(s)$  é de  $-21 \text{ dB}$

$$f_{z1} = f_{z2} = f_0 = 325 \text{ Hz}$$

$$f_{p1} = 0 \text{ Hz}$$

$$f_{p2} = 5 \cdot f_0 = 1625 \text{ Hz}$$

$$H_2 = 21,5 \text{ dB} \Rightarrow H_2 = 20 \log A_2$$

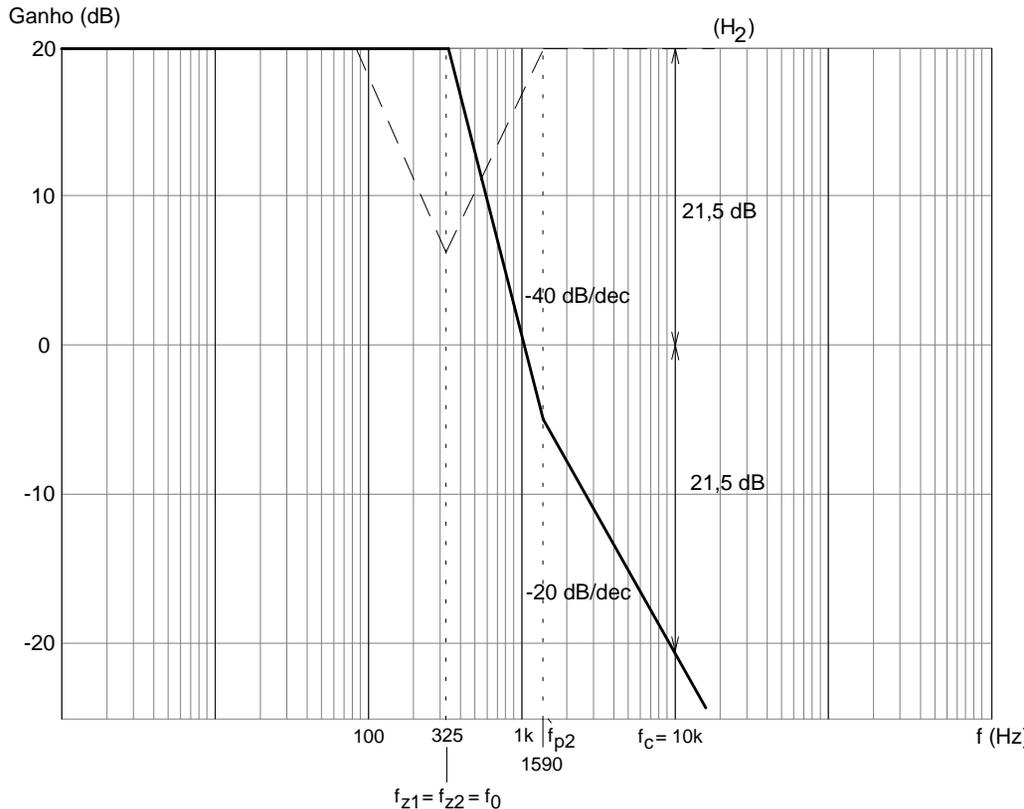
$$\log A_2 = \frac{H_2}{20} = 1,075 \quad A_2 = 11,9$$

$$H_1 = H_2 - 20 \log \frac{f_{p2}}{f_0} \quad H_1 = 21,5 - 13,8 = 7,68 \text{ dB} = 20 \log A_1 \quad \log A_1 = \frac{7,6}{20}$$

$$A_1 = 2,4$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Exemplo de Projeto – Conversor Forward



$$A_2 = \frac{R_{fz}}{R_{ip}} = 2,4$$

$$f_{z1} = f_{z2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_i \cdot R_{iz}} = 326 \text{ Hz}$$

$$\frac{1}{2\pi \cdot C_f \cdot R_{fz}} = 326 \text{ Hz}$$

$$f_{p2} = \frac{1}{2\pi \cdot C_i \cdot \left( \frac{R_{ip} \cdot R_{fz}}{R_{fz} + R_{ip}} \right)} = 1600 \text{ Hz}$$

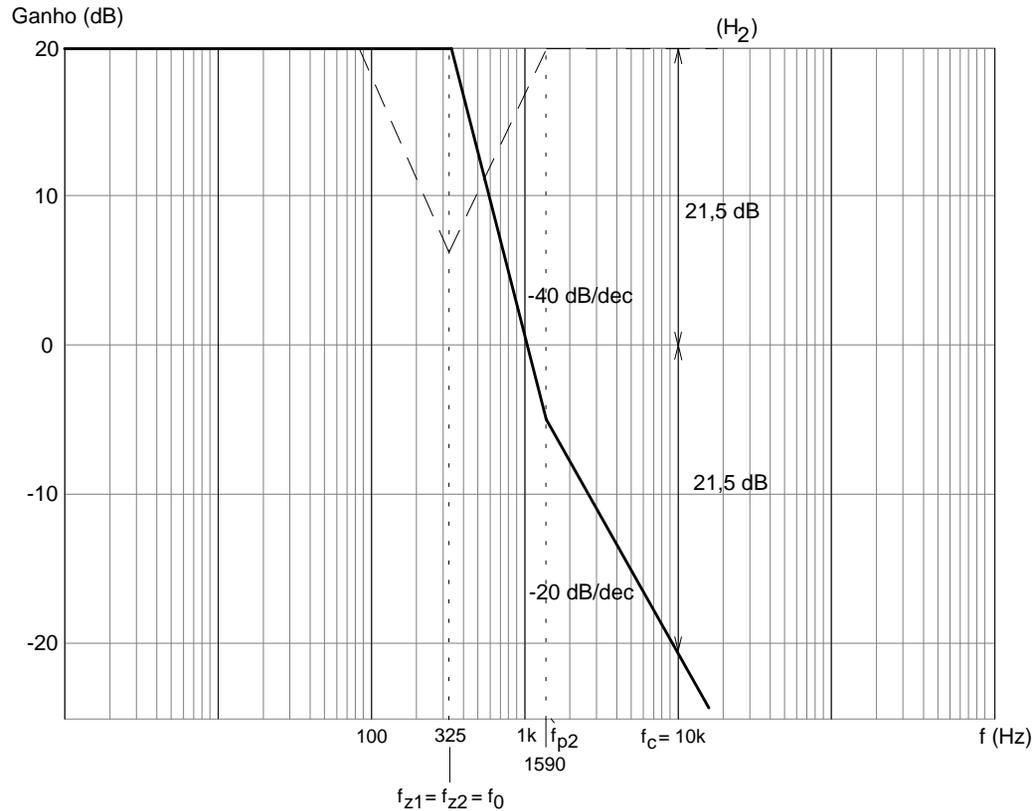
$$R_{iz} = 47k$$

$$C_i = \frac{1}{2\pi \cdot R_{iz} \cdot f_{z1}}$$

$$C_i = 0,01\mu F$$

# Resposta Transitória e Estabilidade

- Exemplo de Projeto – Conversor Forward



$$\frac{R_{fz}}{R_{ip}} = 11,9$$

$$\frac{R_{fz}}{R_{ip} + R_{iz}} = 2,4$$

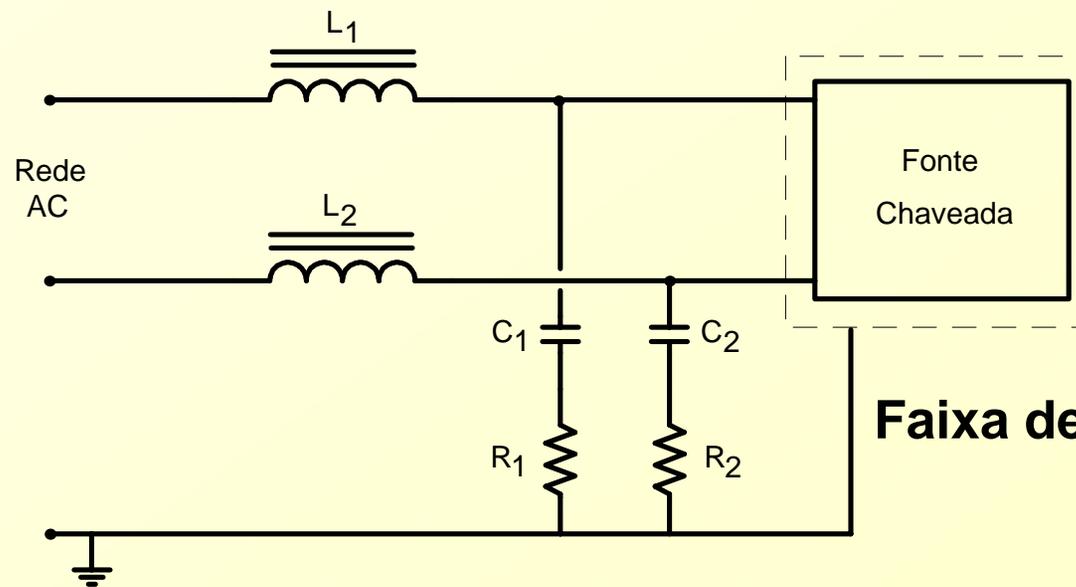
$$R_{ip} = 11,87k\Omega$$

$$C_i \cdot R_{iz} = C_f \cdot R_{fz}$$

$$C_f = \frac{C_i \cdot R_{iz}}{R_{fz}} \quad C_f = 3,33nF$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Interferências por radiofrequência podem ser transmitidas por radiação direta ou por condução através dos terminais de entrada.
- Interferências que a fonte produz nos terminais de entrada se propagam para outros equipamentos, podendo provocar ruídos e mau funcionamento.
- **MEDIÇÃO DA INTERFERÊNCIA CONDUZIDA.**



$$\begin{aligned}L_1 &= L_2 = 500 \mu\text{H} \\ C_1 &= C_2 = 0,1 \mu\text{F} \\ R_1 &= R_2 = 150 \Omega\end{aligned}$$

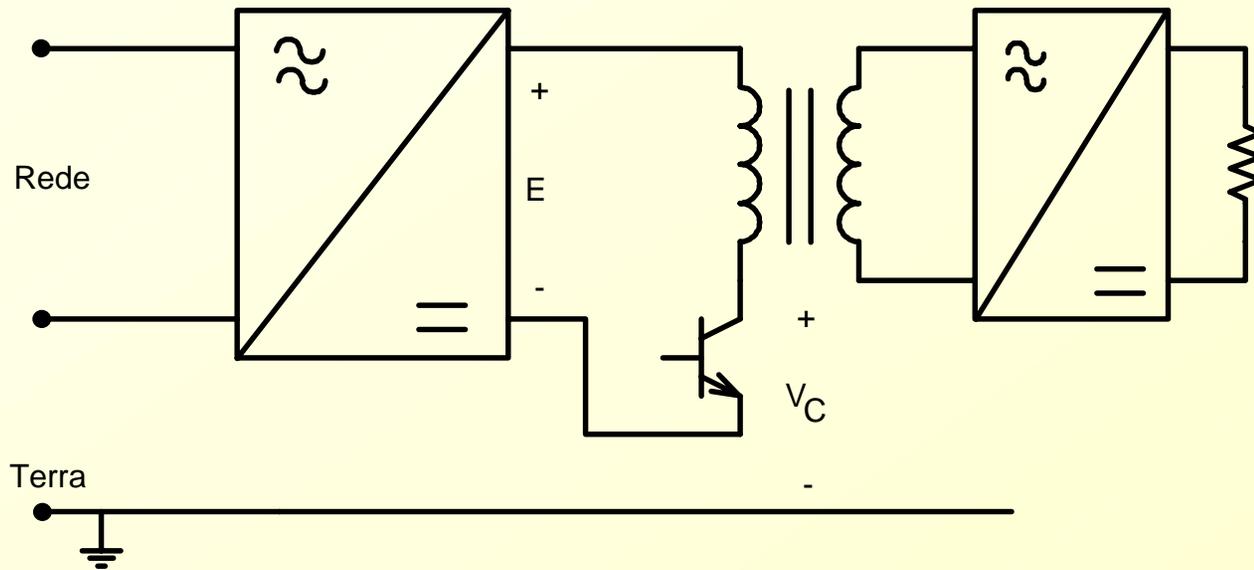
**Faixa de medição – 150 kHz a 30 MHz**

**LISN – Line Impedance Stabilization Network**

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

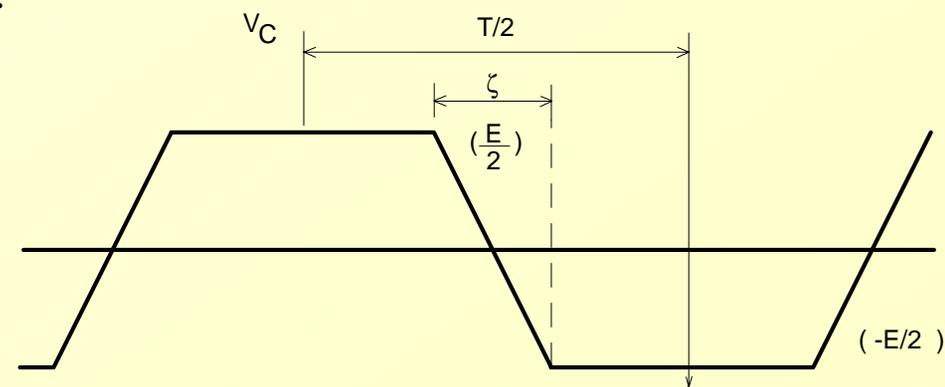
- Causas da Interferência

## Comutação do transistor



$$V_n = \frac{E}{2} \cdot \left[ \frac{1}{n^2 \cdot f \cdot \pi^2 \cdot \zeta} \cdot \text{sen}^2 \left( n \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot \text{sen}(n \cdot f \cdot \pi \cdot \zeta)$$

$$f = \frac{1}{T}$$



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- **Se:**

$$f = 50 \text{ kHz}$$

$$\zeta = 500 \text{ ns}$$

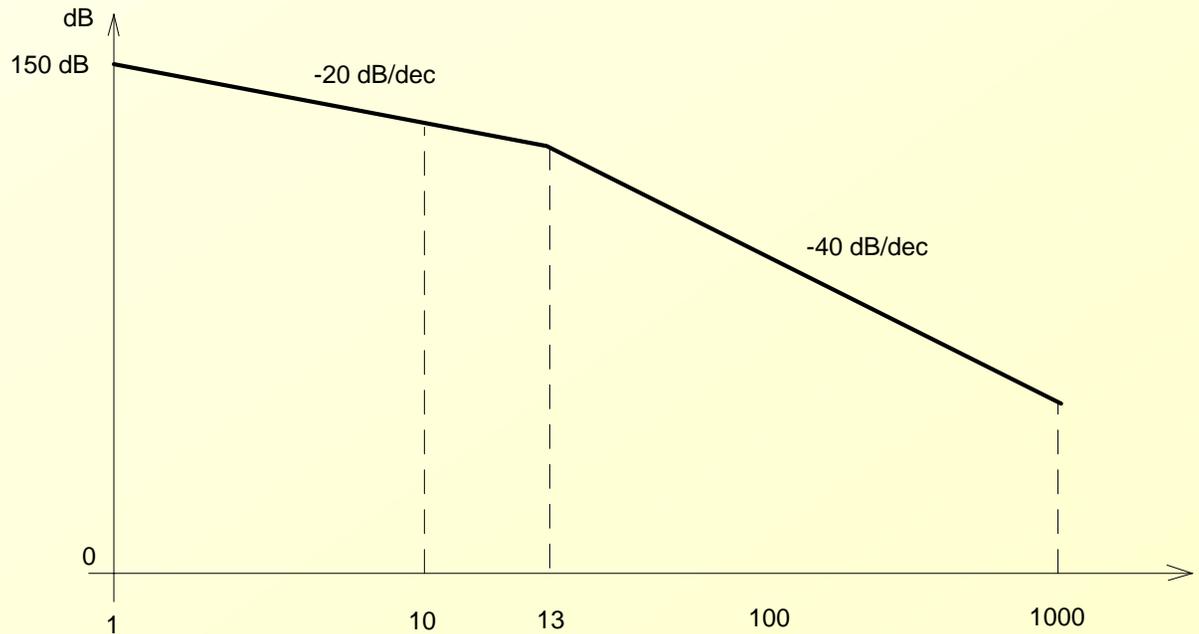
$$E = 150 \text{ V}$$

$$n = 1 \text{ a } 1000$$

$$n = 3$$

$$f_3 = 150 \text{ kHz}$$

$$V_3 = 31,537 \text{ V}$$



$$V_{3\text{dB}} = 20 \log \frac{V_3}{1\mu\text{V}} = 20 \log \frac{31,537\text{V}}{1\mu\text{V}}$$

$$V_{3\text{dB}} = 150,57\text{dB} / \mu\text{V}$$

## Amplitudes das tensões parasitas dependem:

- **Da tensão E**
- **Da freqüência de comutação da fonte**
- **Dos tempos de comutação**

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

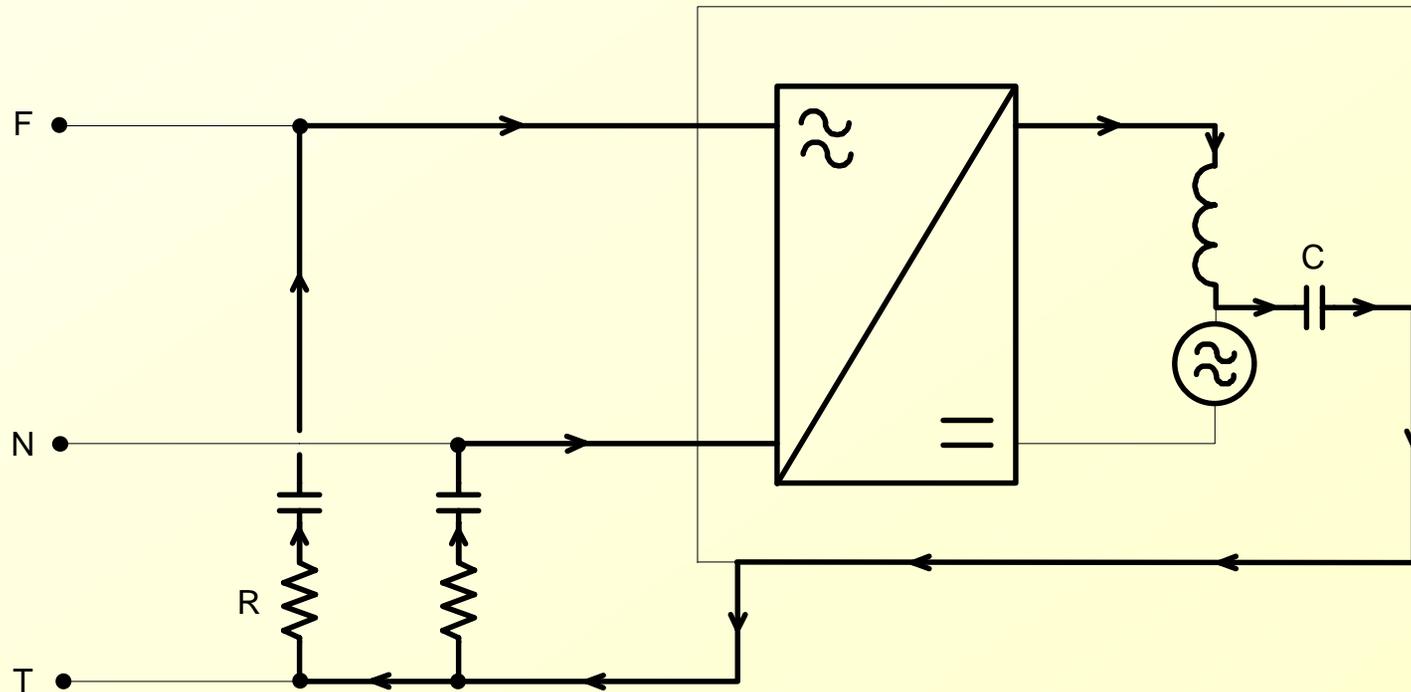
- Propagação das tensões parasitas:

Isolante	Espessura (mm)	C calculado (pF)	C medido (pF)	$\epsilon_R$
Mica	0,1	155	160	3,5
Plástico	0,2	93	96	4,2
Cerâmica	2,0	20	23	9,0

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot \frac{\text{Área}}{\text{Espessura}} \quad \epsilon_0 = 8,855 \text{ pF} / \text{m}$$

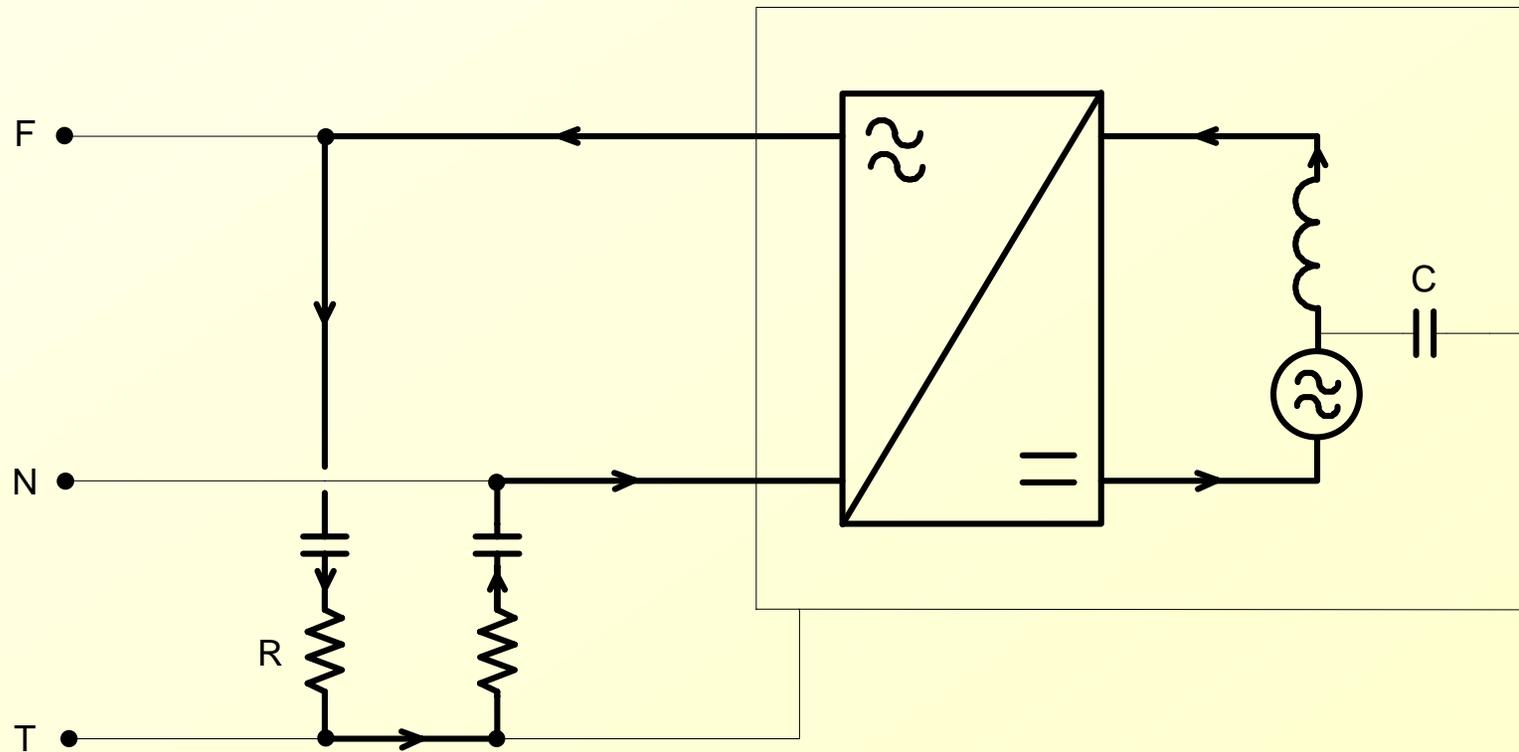
# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Correntes parasitas simétricas – tensões de modo comum



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Correntes parasitas assimétricas – tensões de modo diferencial



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Exemplo

$$C = 150 \text{ pF} \therefore$$

$$f_3 = 150 \text{ kHz (frequência de harmônica)}$$

$$V_3 = 31,537 \text{ V}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot fC} = \frac{10^{12}}{2\pi \cdot 150 \times 10^3 \cdot 150} \quad X_C = \frac{10^{12}}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 0,15 \cdot 0,15 \times 10^6} = \frac{10^3}{2\pi \cdot 0,15^2} = 7073\Omega$$

$$i_3 = \frac{V_3}{X_C} = \frac{31,537}{7073} = 4,46\text{mA} \quad \Delta V_3 = \frac{R}{2} \cdot i_3 = \frac{150}{2} \cdot 4,46\text{mA} = 334,5\text{mV}$$

$$\Delta V_{3\text{dB}} = 20 \log \frac{334,5\text{mV}}{1\mu\text{V}} \cong 170,5\text{dB}$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Medidas para redução de rádio interferência

a) Redução da capacitância de acoplamento entre o encapsulamento e o dissipador

b) Isolamento do dissipador em relação à massa

Dissipador afastado de uma distância  $x$  em relação à massa

$$C_x = 80 \text{ pF} \quad \text{para} \quad x = 1 \text{ mm}$$

$$C_x = 4 \text{ pF} \quad \text{para} \quad x = 2 \text{ cm}$$

$C = 150 \text{ pF}$  Capacitância entre dissipador e interruptor

Assim:

$$C_{TC} = \frac{C \cdot C_x}{C + C_x}$$

Assim, para  $x = 2 \text{ cm}$

$$C_{TC} = \frac{150 \cdot 4}{150 + 4} \cong 3,9 \text{ pF}$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

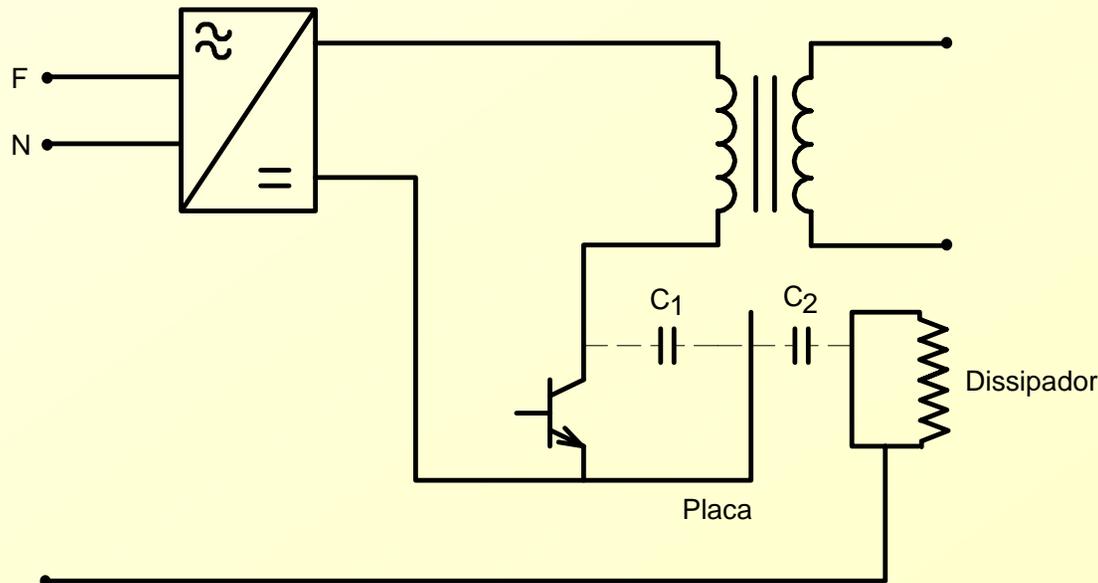
- Medidas para redução de rádio interferência

## b) Isolamento do dissipador em relação à massa

$$i_3 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{TC} \cdot V_3 \quad i_3 = 2 \cdot \pi \cdot 150 \times 10^3 \cdot 3,9 \times 10^{-12} \cdot 31,537 = 115,92 \mu A$$

$$V_3 = \frac{150}{2} \cdot 115,92 \mu A = 8694 \mu V \quad \Delta V_{3dB} = 78,78 dB$$

## c) Placa condutora entre o interruptor e o dissipador

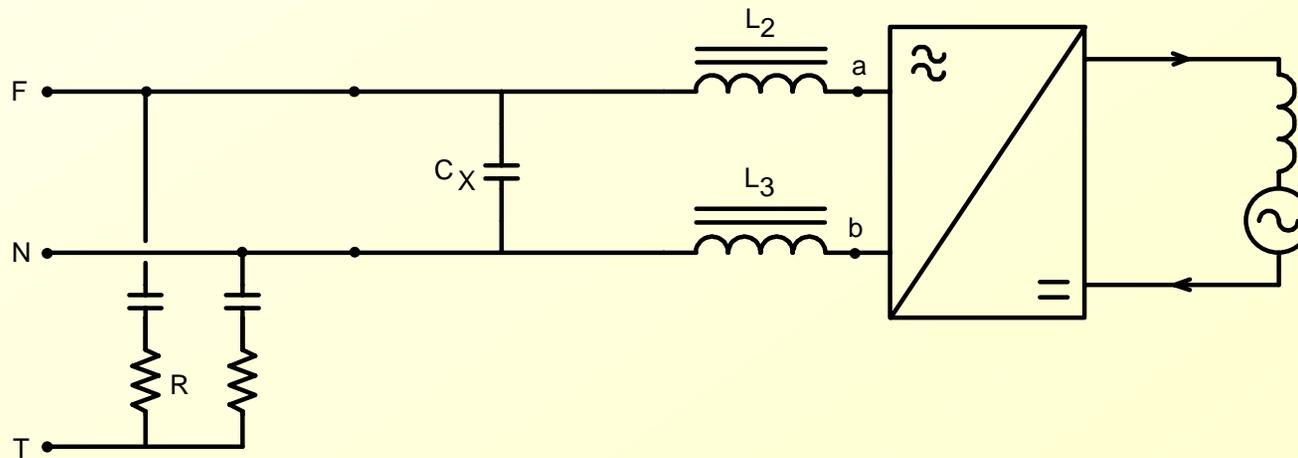


# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Medidas para redução de rádio interferência

## d) Emprego do filtro de rede

### d.1) para correntes simétricas



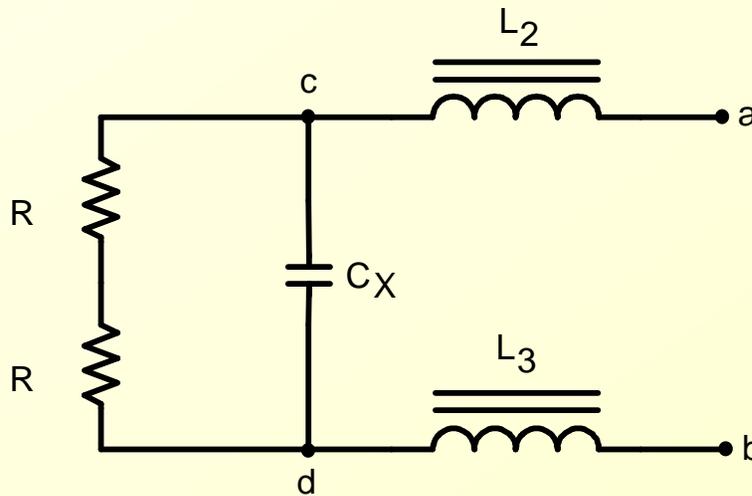
**$C_X$  é baixa impedância para as correntes simétricas**

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Medidas para redução de rádio interferência

## d) Emprego do filtro de rede

### d.1) para correntes simétricas



$$Z_{cd} = \frac{-j2RX_c}{2R - jX_c} = \frac{-j2R / \omega C_X}{2R - \frac{j}{\omega C_X}}$$

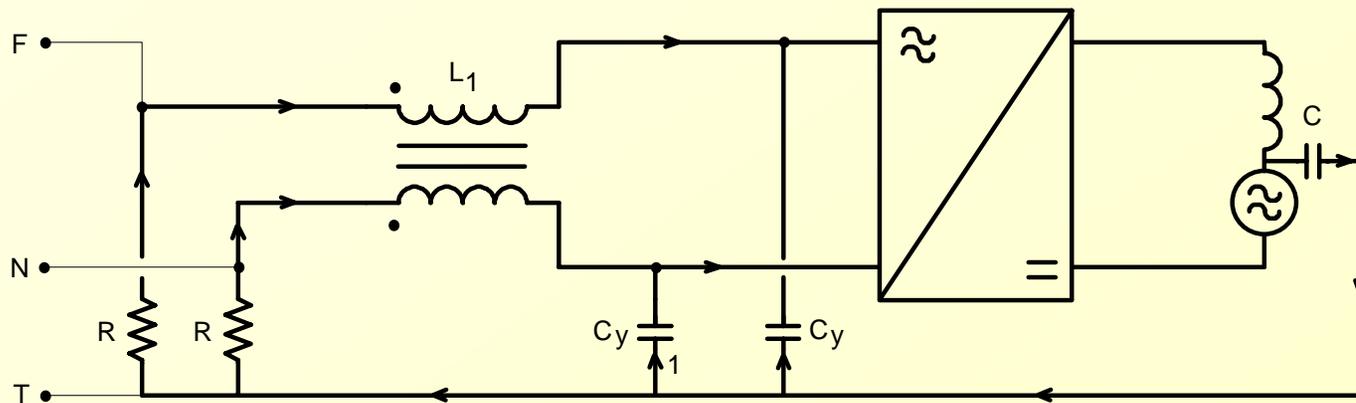
$$Z_{cd} = \frac{2R}{1 + j2R\omega X_c}$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Medidas para redução de rádio interferência

## d) Emprego do filtro de rede

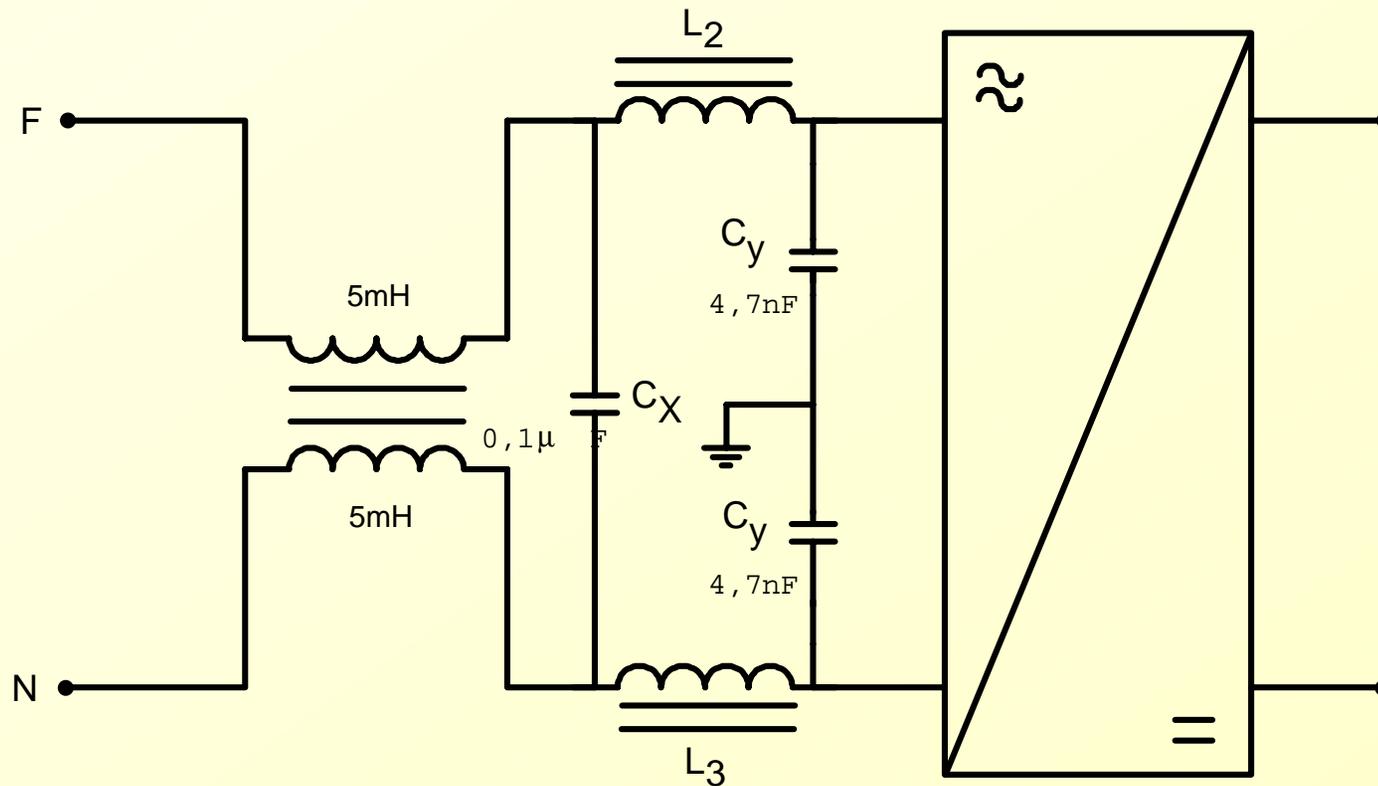
### d.1) para correntes assimétricas



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

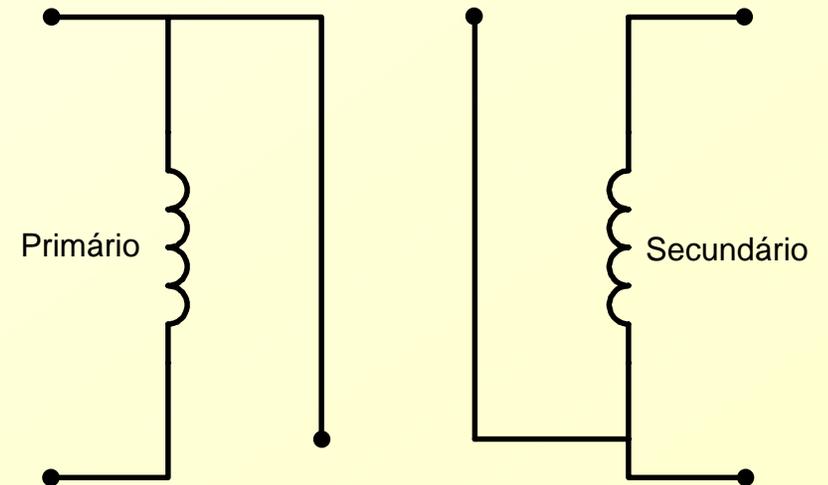
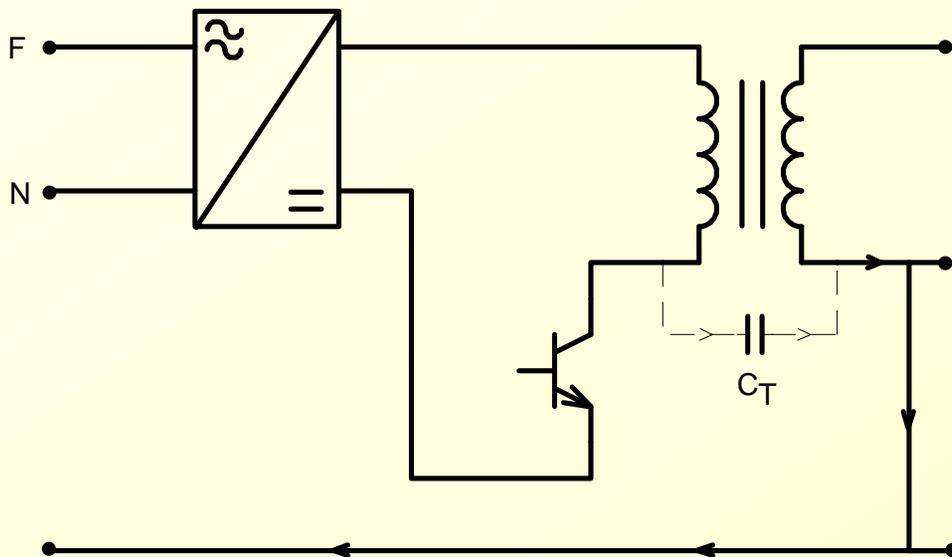
- Medidas para redução de rádio interferência

## d) Emprego do filtro de rede



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Influência da capacitância entre enrolamentos



- Grades condutoras

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

- Exemplo de cálculo do filtro de rede

$V_{CA} = 220 \text{ V}$  (tensão da rede).

$f = 60 \text{ Hz}$  (frequência de rede).

$P = 150 \text{ W}$  (potência de entrada da fonte).

$E = 300 \text{ V}$  (tensão no estágio de corrente contínua, após o retificador de entrada).

$f_s = 50 \text{ kHz}$  (frequência de chaveamento).

$\tau = 500 \text{ ns}$  (tempo de subida da tensão de coletor do transistor).

$C = 50 \text{ pF}$  (capacitância entre o transistor e a carcaça).

$V_{RdB} = 54 \text{ dB}/\mu\text{V}$  (nível da tensão máxima permitida nos resistores da rede artificial, para 150 kHz).

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

## 1) Primeiro passo

$$f_3 = 150 \text{ kHz}$$

$$V_3 = 15,8 \text{ dB}$$

## 2) Segundo passo – verificação do nível de interferência de modo comum sem o filtro de rede.

$$X_{C_3} = \frac{1}{W_3 C} = \frac{1}{2\pi \cdot 150 \times 10^3 \cdot 50 \times 10^{-12}} \cong 21 \text{ k}\Omega \quad i_{C_3} = \frac{V_3}{X_{C_3}} = \frac{15,8 \text{ V}}{21 \text{ k}\Omega} = 0,752 \text{ mA}$$

Queda de tensão nos resistores da rede artificial.

$$V_{R3} = \frac{R}{2} i_{C_3} = 75 \cdot 0,752 \cdot \Omega \cdot \text{mA} = 56,4 \text{ mV} \quad V_{R3\text{dB}} = 20 \log \frac{V_3}{1 \mu\text{V}} = 20 \log \frac{56,4 \text{ mV}}{1 \mu\text{V}}$$

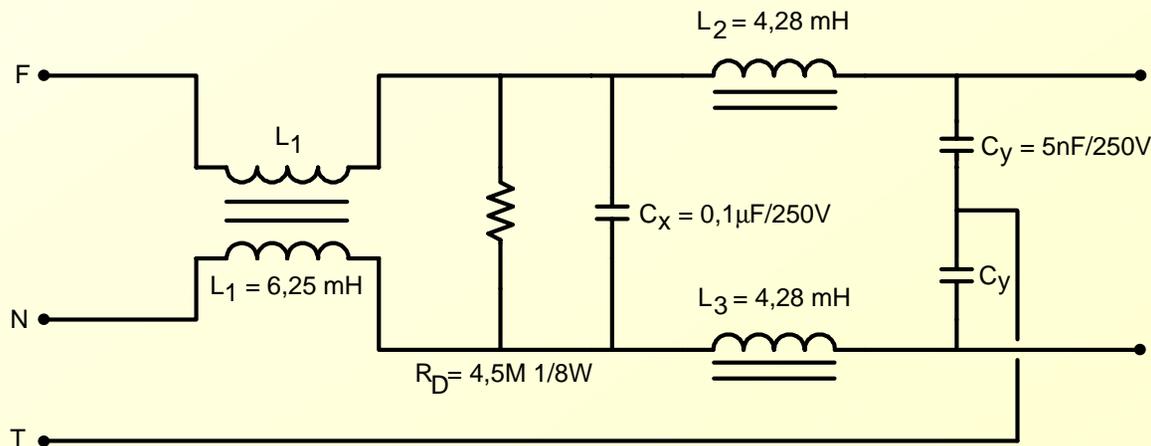
$$V_{R3\text{dB}} = 20 \log 4,75 = 95 \text{ dB} / \mu\text{V} \quad \Delta V_{3\text{dB}} = 95 - 54 = 41 \text{ dB} / \mu\text{V}$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

3) Terceiro passo – escolha dos capacitores  $C_y$ , de modo comum

$$C_y = 5 \text{ nF}$$

4) Quarto passo – escolha do indutor  $L_o$  para filtrar correntes de modo comum

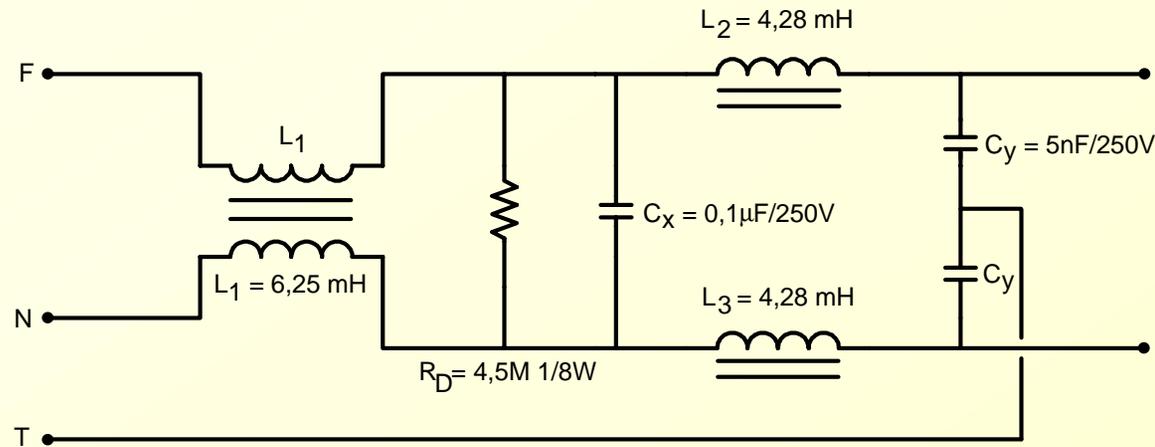


$$X_{C_3} = 21\text{k}\Omega$$

$$X_{C_y} = \frac{1}{W_3 \cdot 2 \cdot C_y} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150 \times 10^3 \cdot 2.5 \times 10^{-9}} = 106\Omega$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

## 4) Quarto passo – escolha do indutor $L_0$ para filtrar correntes de modo comum



Para  $V_{0dB} = 54 \text{ dB}/\mu\text{V}$ , obtém-se

$$54 = 20 \log \frac{V_0}{1 \mu\text{V}} \quad V_0 = 500 \mu\text{V}$$

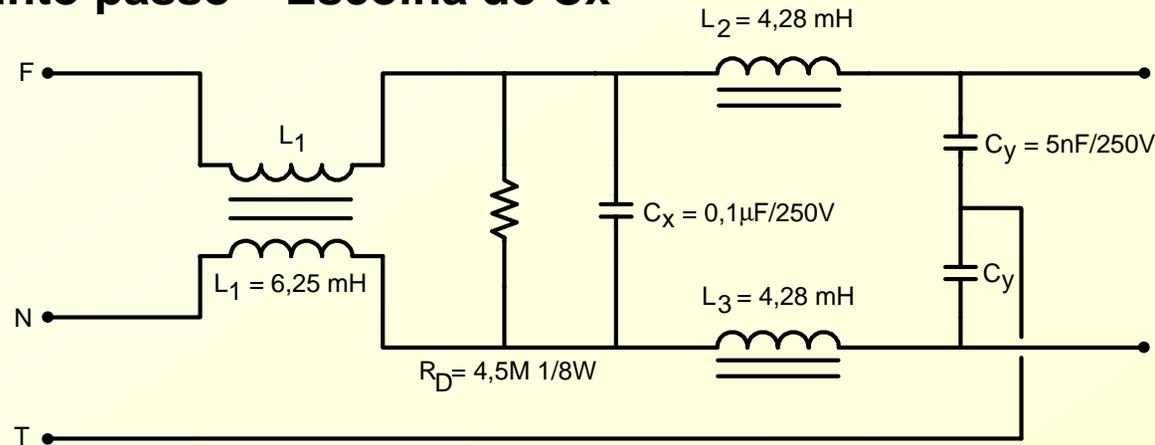
$$i_0 = \frac{V_0}{R_0} = \frac{500 \mu\text{V}}{75 \Omega} = 0,0067 \text{ mA}$$

Como  $i_0 \ll$  , a tensão  $V_{ob}$  é dada por

$$V_{ob} = X_{C_y} \cdot i_{C_3} = 106.0,752 = 0,08 \text{ V}$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

## 5) Quinto passo – Escolha de Cx

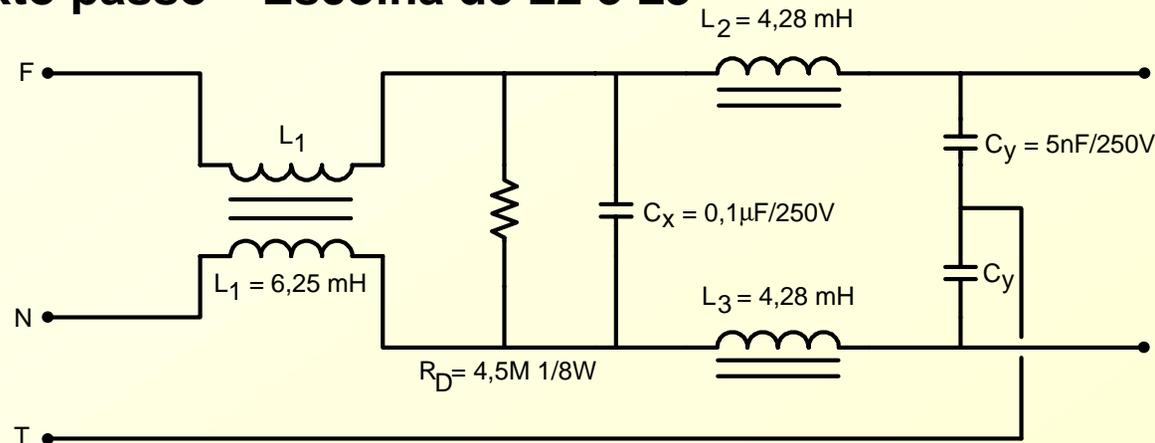


$$i = \frac{P}{V} = \frac{150}{220} = 0,68A \quad I_{C_X} = 0,001 \cdot i = 0,0068A$$

$$C_X = \frac{i_{C_X}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V} = \frac{0,0068}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 220} = 0,084 \mu F \quad C_X = 0,1 \mu F$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

## 6) Sexto passo – Escolha de L2 e L3



$$\Delta V_L = 0,01\%$$

$$V = 220V$$

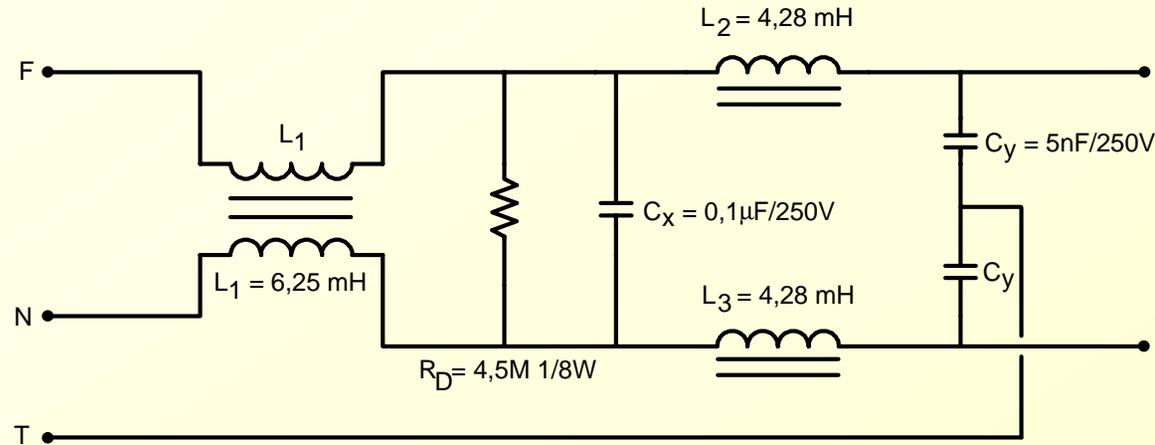
$$\Delta V_L = 2,2 \text{ V}$$

$$\omega(L_2 + L_3).i = \Delta V_L \quad L_2 + L_3 = \frac{\Delta V_L}{\omega_0.i} = \frac{2,2}{2.\pi.60.0,68} = 8,58mH$$

$$L_2 = L_3 = \frac{L_2 + L_3}{2} = 4,28mH$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

## 7) Sétimo passo – Escolha do resistor de descarga



$$R_D = \frac{t}{2,21 \cdot C_X} \quad t = 1 \text{ s}$$

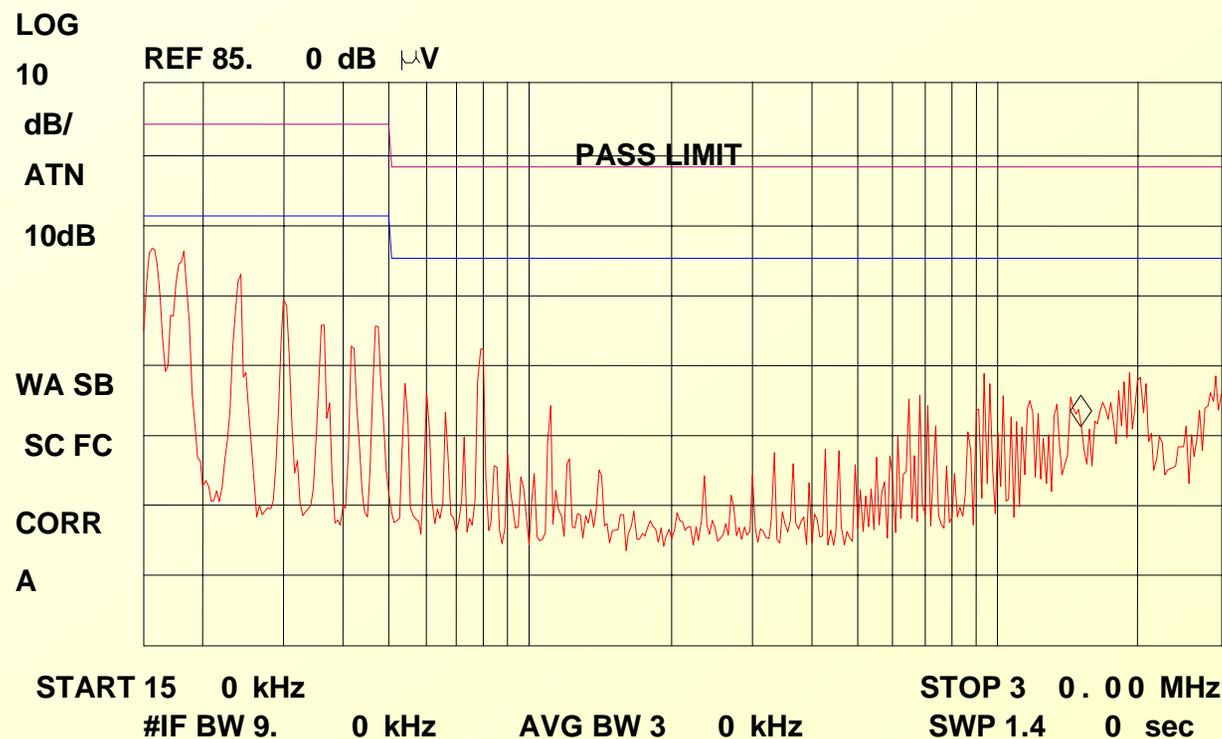
$$R_D = \frac{10^6}{2,21 \cdot 0,1} \cong 4,5 \text{ M}\Omega$$

# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

Ensaio de Interferência conduzida numa fonte para telecomunicações

hp

ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP AVG  
MKR 15.1 0 MHz  
36. 0.7 dB  $\mu$ V

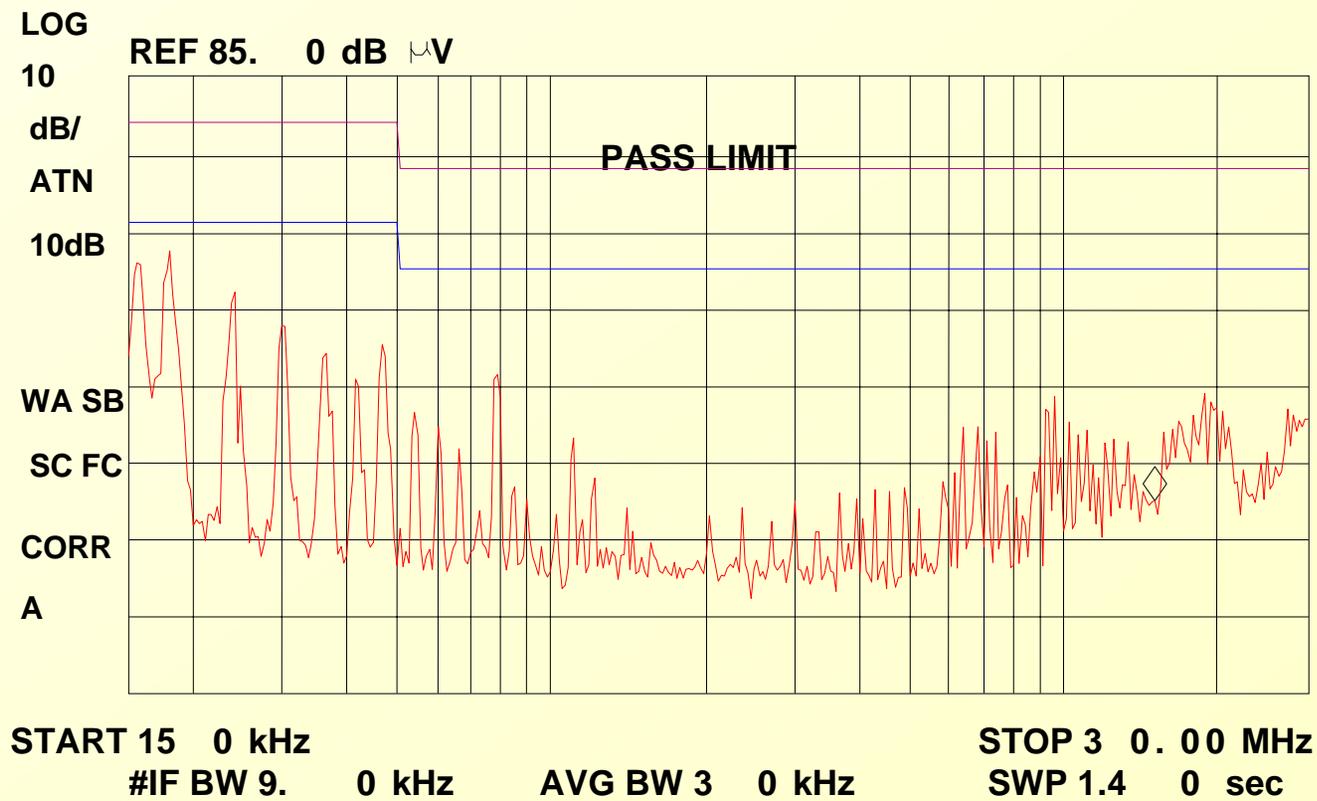


# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

Ensaio de Interferência conduzida numa fonte para telecomunicações

*hp*

ACTV DET: PEAK  
MEAS DET: PEAK QP AVG  
MKR 15.1 0 MHz  
29.98 dB  $\mu$ V



# Interferência Radioelétrica (RFI) nas Fontes Chaveadas

Ensaio de Interferência conduzida numa fonte para telecomunicações

