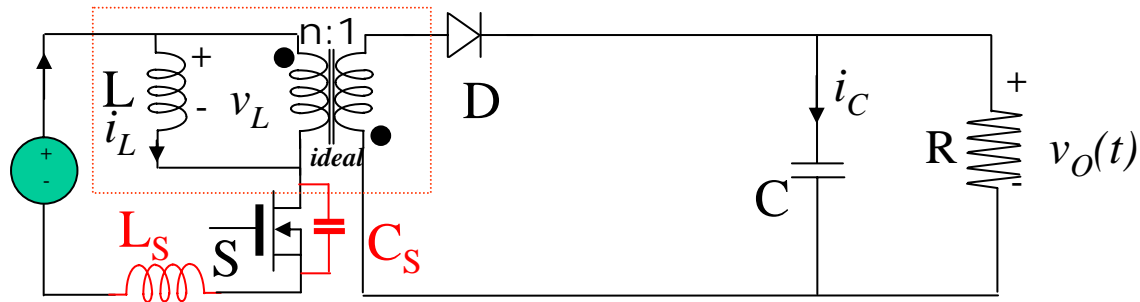
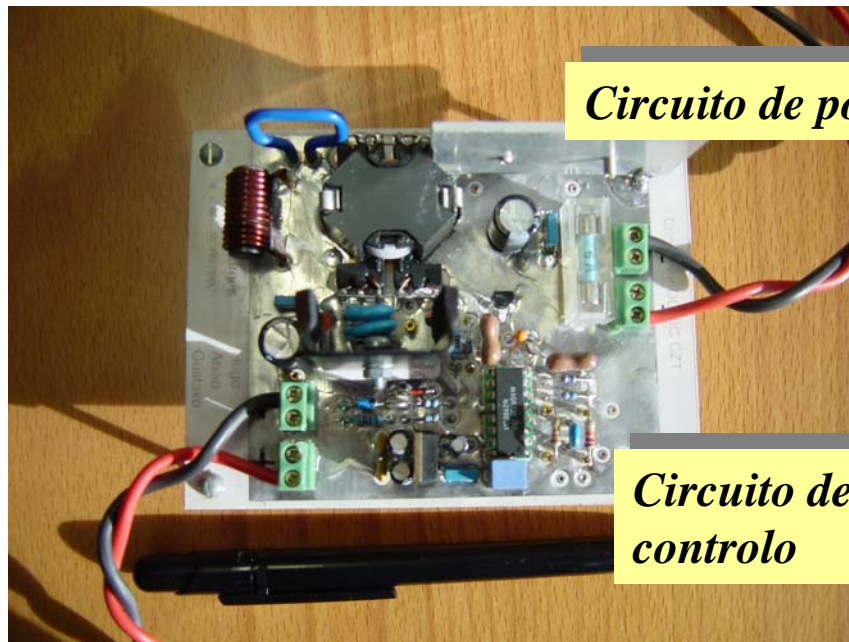


**CONVERSORES RESSONANTES**

**Fonte Quase Ressonante  
ZVS**  
“**Z**ero **V**oltage **S**witching”

**CC-CA<sub>hf</sub>-CC**

**Frequência:  
[1MHz]  
Pot < 50W  
 $\eta < 95\%$**

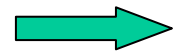


*Circuito de potência*

*Circuito de controlo*

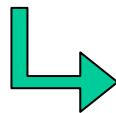
**CONVERSORES RESSONANTES**

**Topologias:**



*Conversores Com Carga Ressonante*  
**Conversores Quasi Ressonantes**  
*Conversores Multi Ressonantes*  
*Conversores PWM Ressonantes*  
*Conversores com Transição Ressonante*

**Princípio de operação:**



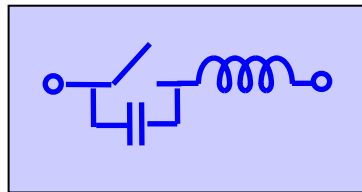
**Inserção de uma bobine e de um condensador**  
**Oscilação das grandezas eléctricas**



**Comutação do dispositivo nos pontos de anulamento da tensão ou da corrente**

## Comutação nos pontos de anulamento da tensão ZVS “Zero Voltage Switching”

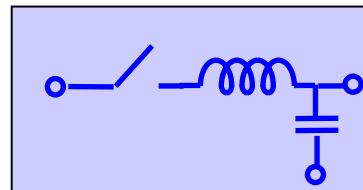
Condensador em paralelo com o dispositivo



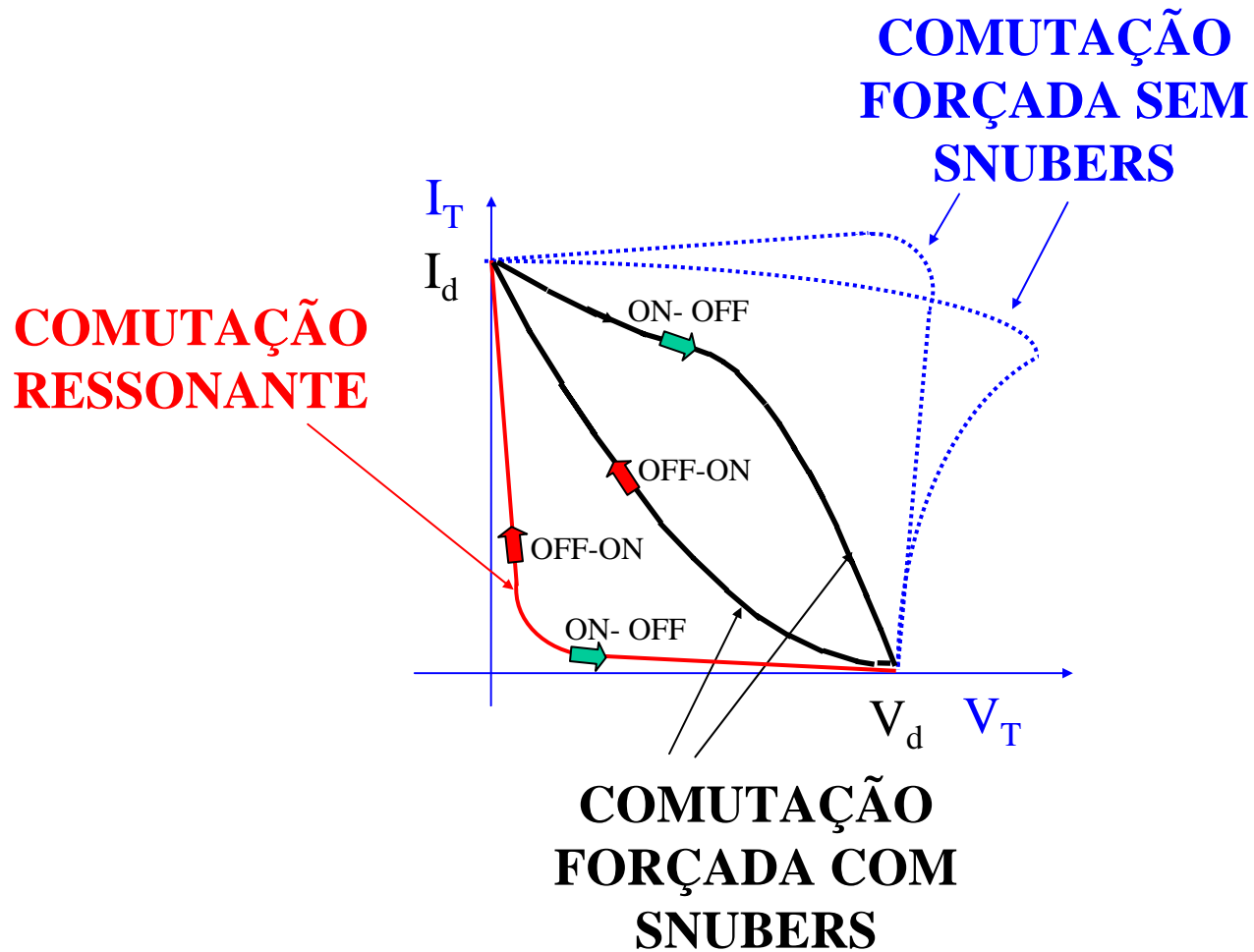
o dispositivo  
passa à condução  
a tensão nula

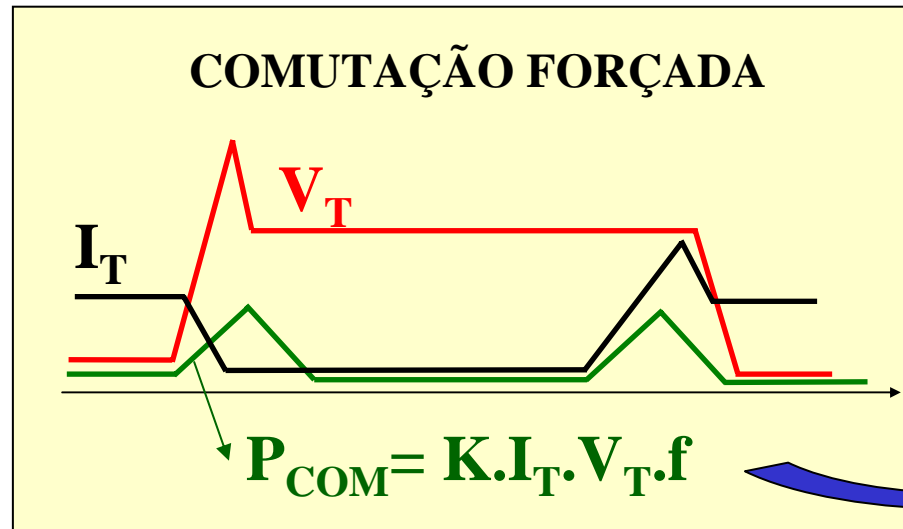
## Comutação nos pontos de anulamento da corrente ZCS “Zero Current Switching”

Bobine em série com o dispositivo



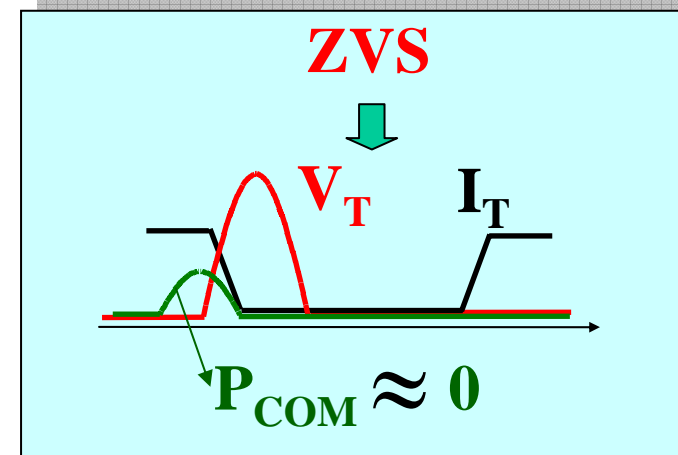
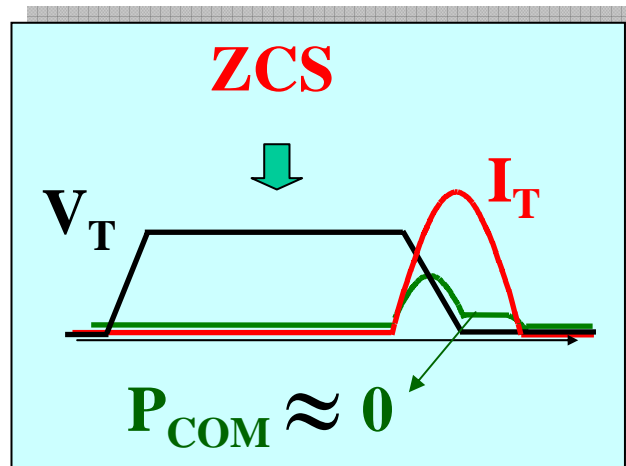
o dispositivo  
passa ao corte a  
corrente nula

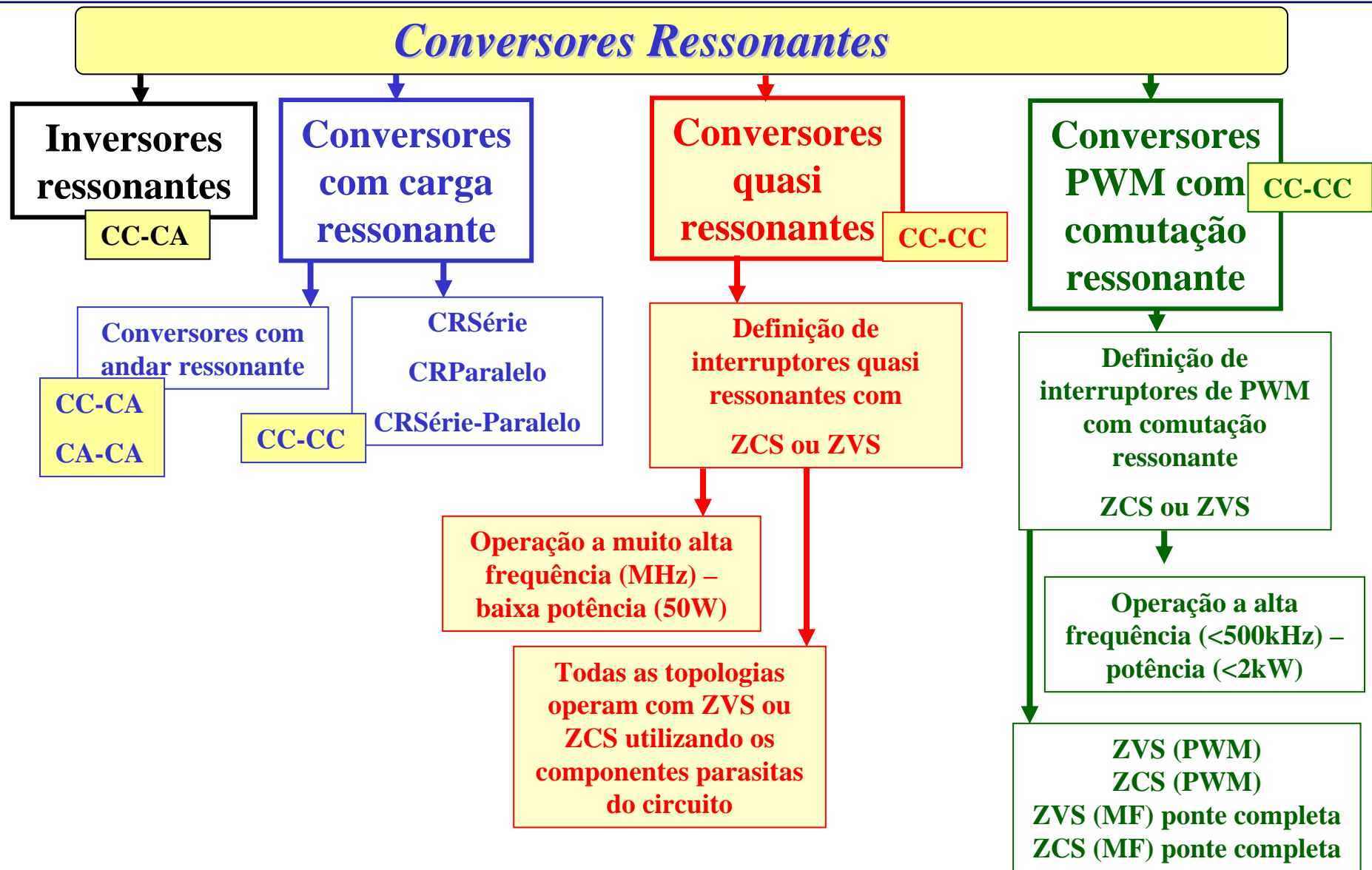
**Comparação entre comutação forçada e comutação ressonante**



frequência  $\uparrow$  😊  
 rendimento  $\downarrow$  ☹️

### COMUTAÇÃO RESSONANTE





## VANTAGENS:

- **Operação a alta frequência**
- **Perdas de comutação são reduzidas (devido à existência de ZVS ou de ZCS).**
- **Comutação suave com geração de EMI reduzida, contrariamente ao que acontece nas topologias comutadas (devido aos valores elevados de  $di/dt$  e de  $dv/dt$ ).**
- **Redução de dimensões (volume e peso). Grande densidade de potência**

**INCONVENIENTES:**

- **Difícil previsão das grandezas eléctricas**
- **Controlo mais complexo**
- **Perdas de condução não desprezáveis**



### Conversores Quasi - Ressonantes

Alta integração de potência → Alta frequência de operação

Capacidades parasitas dos transistores MOS de potência ( $C_S$ )

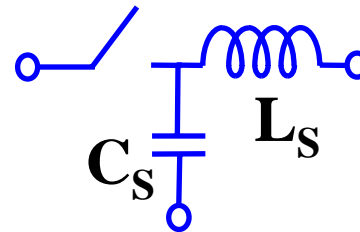
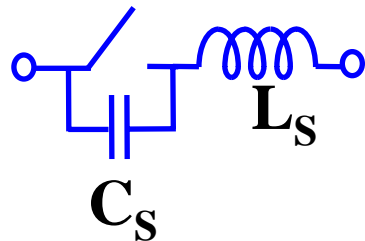
Indutâncias parasitas dos transformadores de potência ( $L_S$ )

### Topologias Quasi-Ressonantes

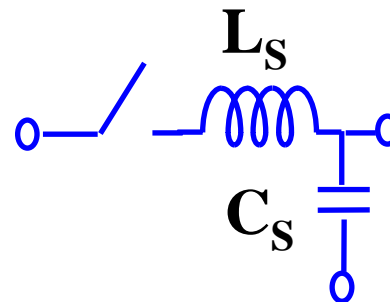
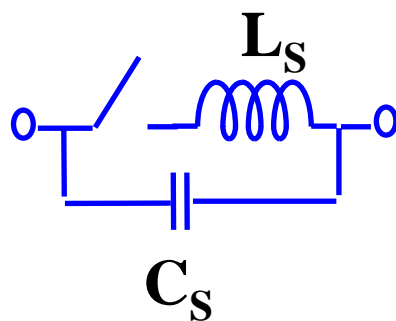
Semelhantes às topologias de PWM com o mesmo princípio de transferência de energia onde se inclui um interruptor ressonante (interruptor que engloba uma bobina ( $L_S$ ) e um condensador ( $C_S$ ) adicionais)

Interruptores ressonantes

ZVS

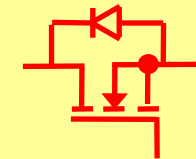


ZCS

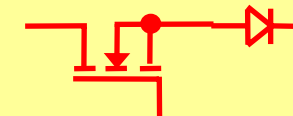


ZVS

Meia onda

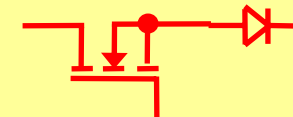


Onda completa

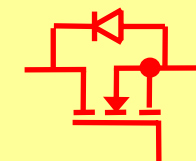


ZCS

Meia onda

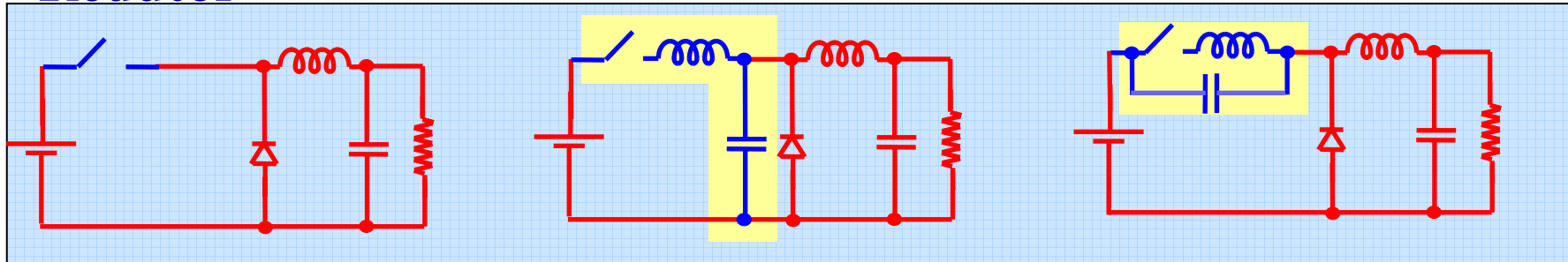


Onda completa

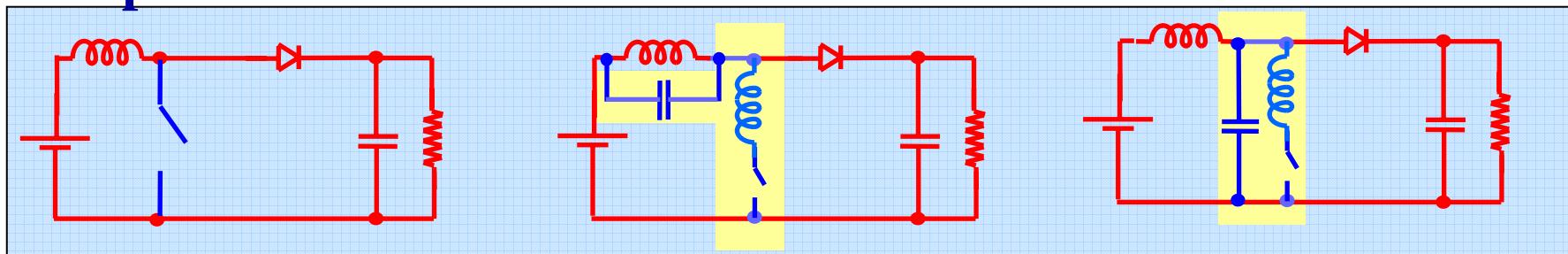


### Família de conversores quasi-ressonantes com comutação no Zero da Corrente

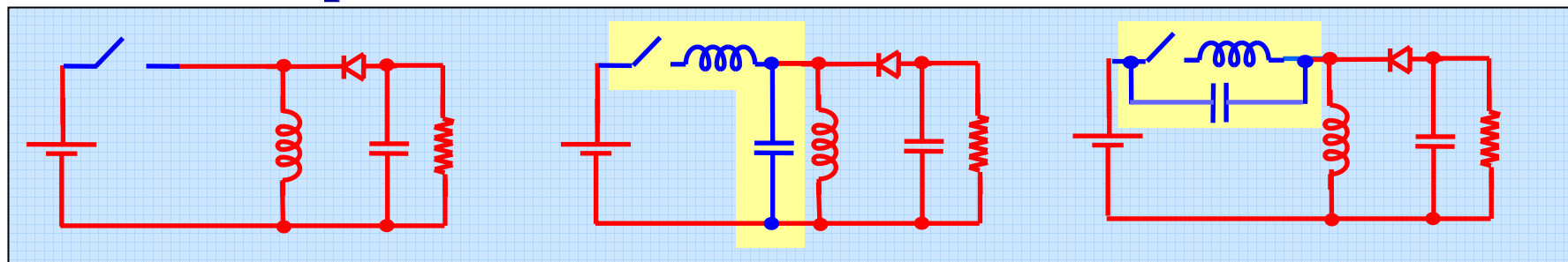
#### Redutor



#### Amplificador

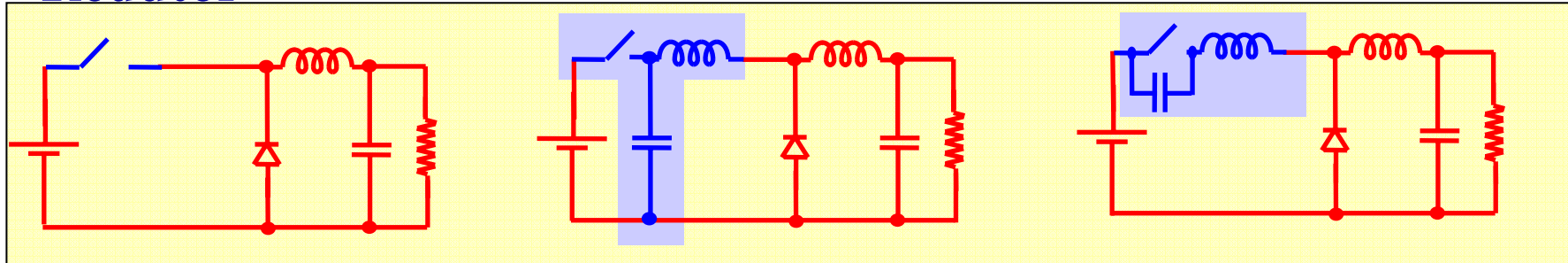


#### Redutor-amplificador

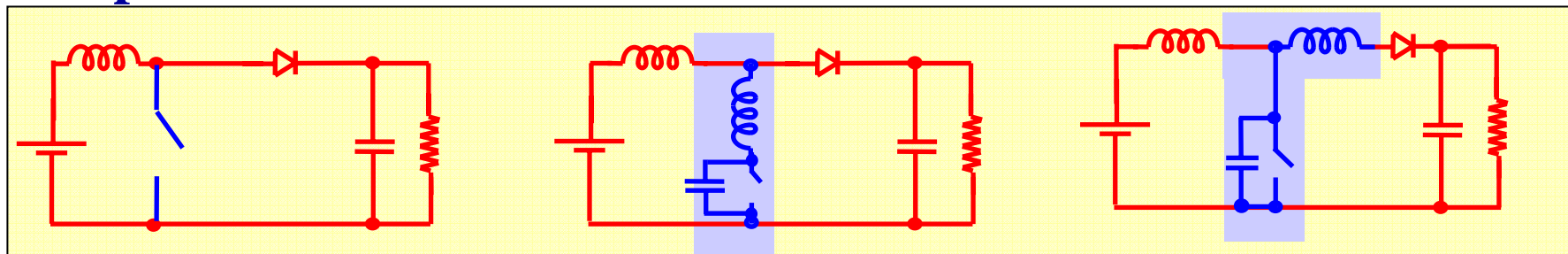


### Família de conversores quasi-ressonantes com comutação no Zero da Tensão

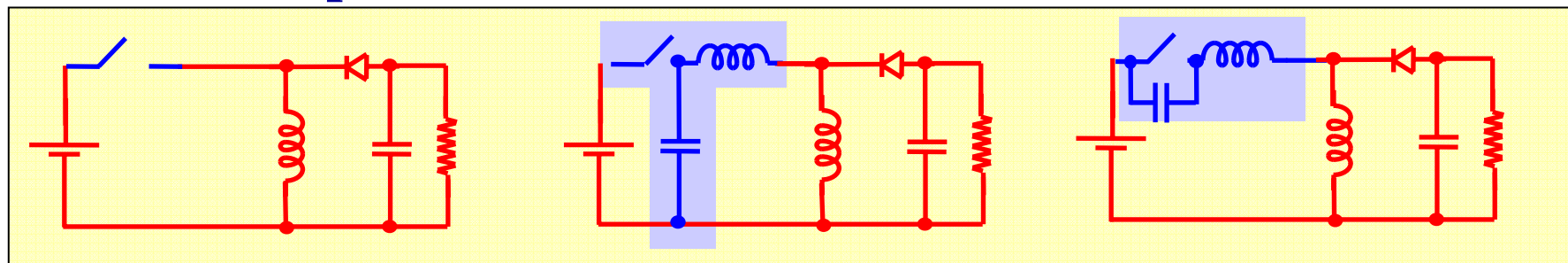
#### Redutor



#### Amplificador

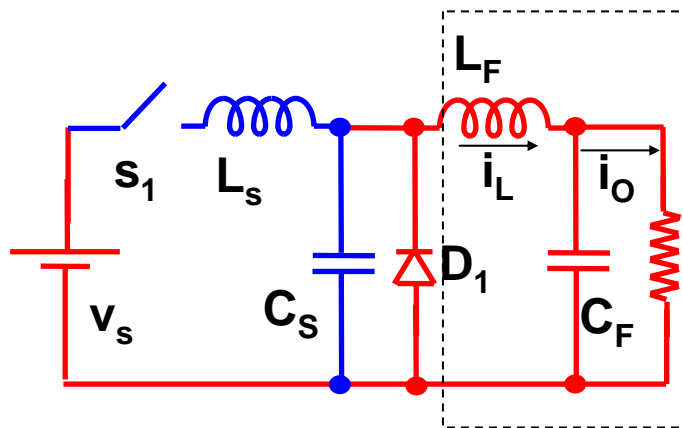


#### Redutor-amplificador

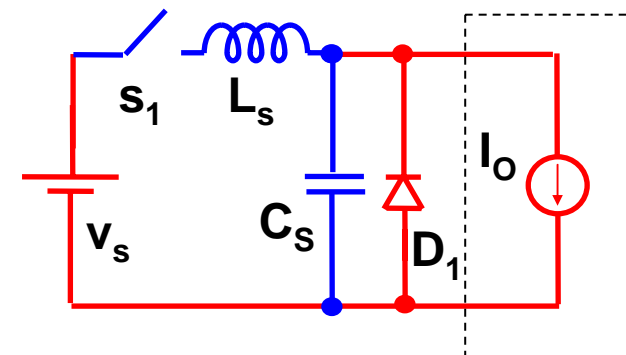


## Conversor quasi-ressonante redutor com Comutação no Zero da Corrente

# ZCS



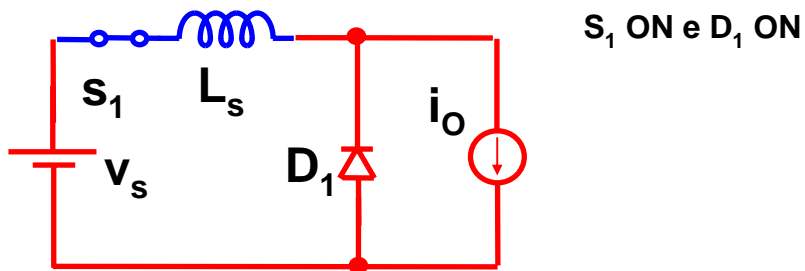
Esquema  
eléctrico



Circuito  
equivalente

### Análise de regime permanente

*Fase I – Carga da bobina  $T_0 < t < T_1$*

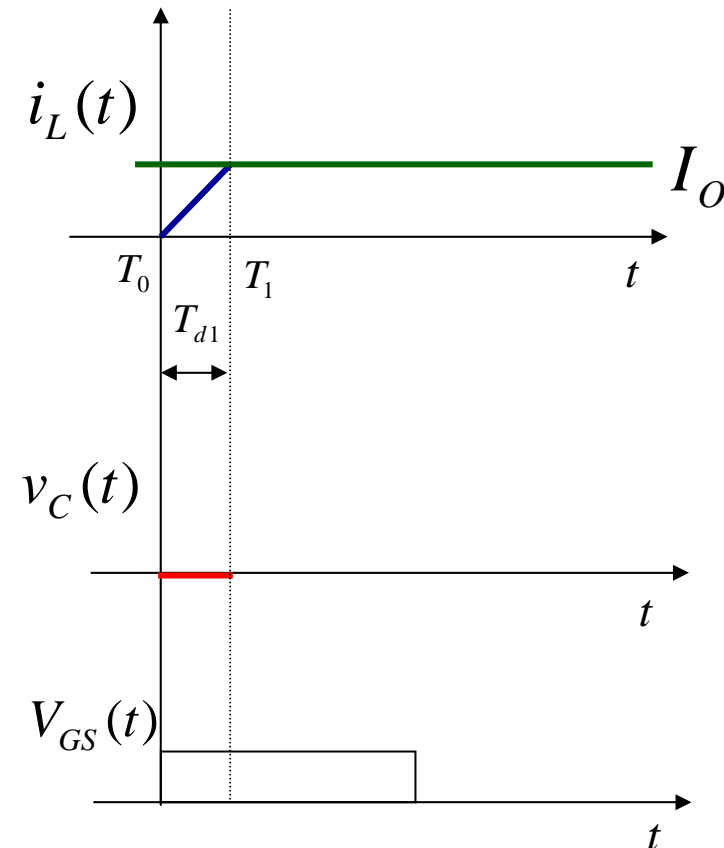
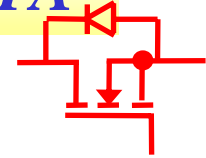


$$i_L(t) = \frac{V_S}{L_S} t \quad v_C(t) = 0$$

$$i_L(T_0) = 0 \quad \text{e} \quad i_L(T_1) = I_O$$

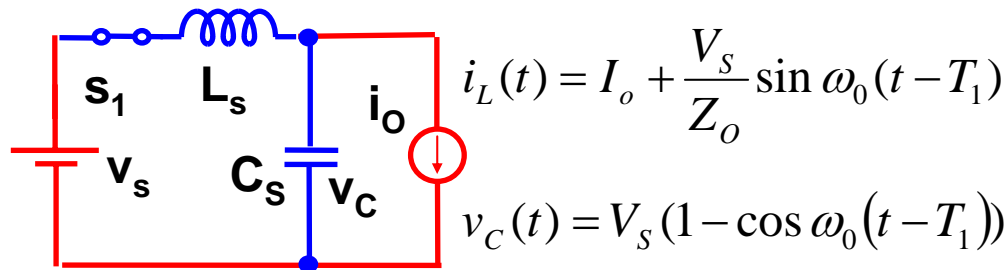
$$T_{d1} = T_1 - T_0 = \frac{L_S I_O}{V_S}$$

### ONDA COMPLETA



**Fase II – Ressonante**  $T_1 < t < T_2$

$S_1$  ON e  $D_1$  OFF



$$i_L(T_1) = I_o$$

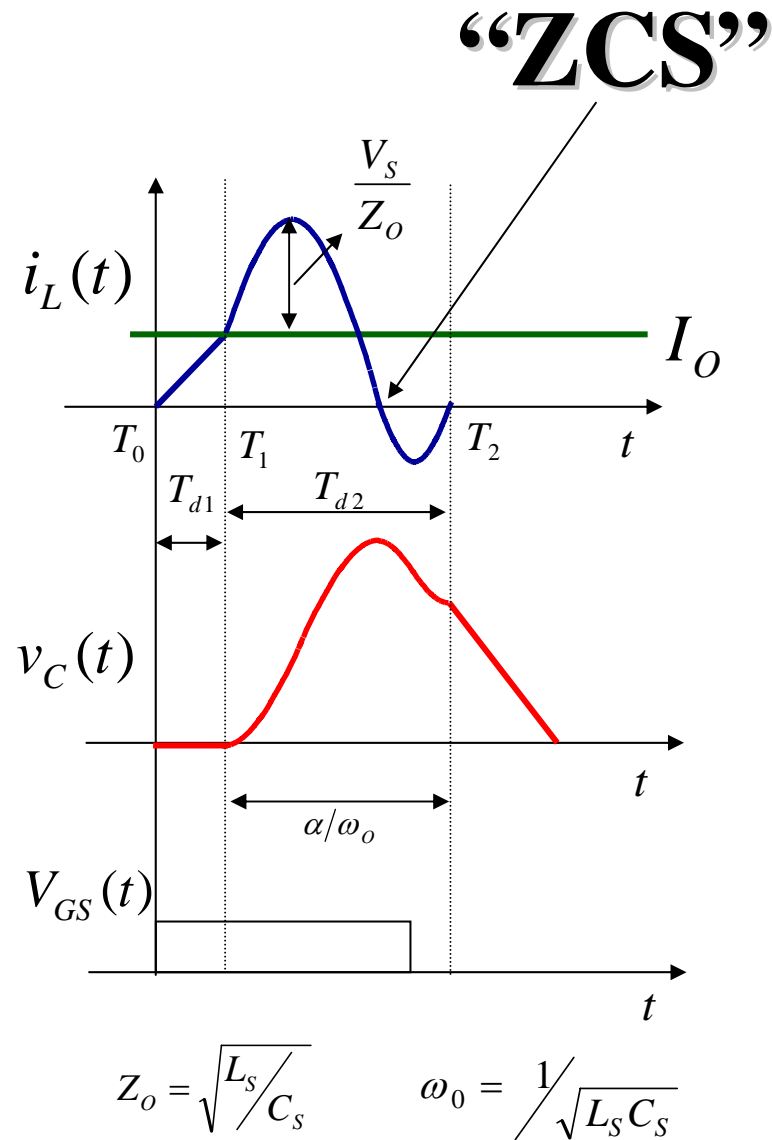
$$i_L(T_2) = 0$$

$$T_{d2} = T_2 - T_1 = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad \alpha = \arcsin\left(-\frac{Z_o I_o}{V_s}\right)$$

$$v_C(T_2) = V_{CB} = V_s(1 - \cos \alpha)$$

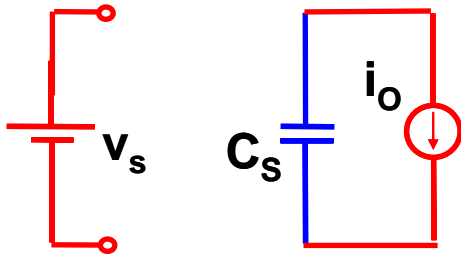
**Condição de comutação**

$$\frac{V_s}{Z_o} > I_o$$



### Fase III- Descarga do condensador $T_2 < t < T_3$

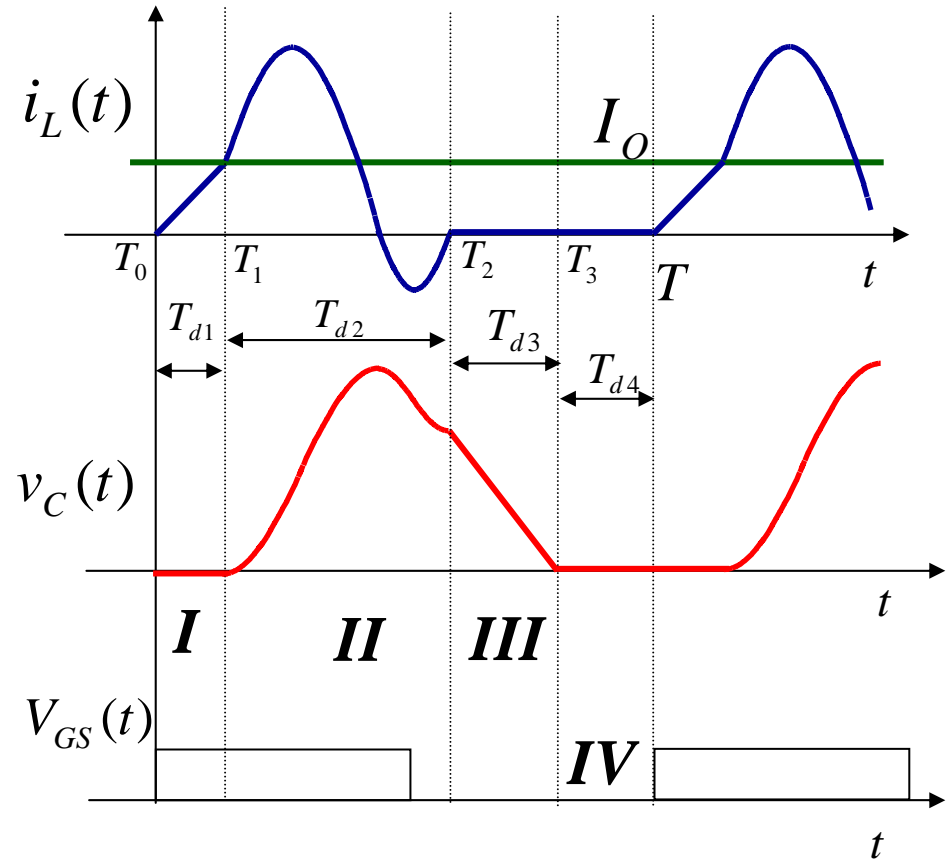
$S_1$  OFF e  $D_1$  OFF



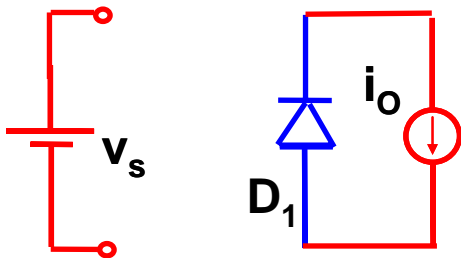
$$v_C(t) = V_{CB} - \frac{I_o}{C_s}(t - T_2) \quad i_L(t) = 0$$

$$v_C(T_3) = 0$$

$$T_{d3} = T_3 - T_2 = \frac{C_s V_{CB}}{I_o} = \frac{C_s V_s (1 - \cos \alpha)}{I_o}$$



### Fase IV- Roda Livre $T_3 < t < T_4$



$S_1$  OFF e  $D_1$  ON

$$T_{d4} = T - T_{d1} - T_{d2} - T_{d3}$$



A curva característica  $V_o/N$  ( $f_s/f_o$ ) é obtida considerando o balanço energético na entrada e na carga

$$W_S = W_O$$

A energia debitada pela fonte  $V_S$  é igual à energia recebida pela carga

### Cálculo da energia debitada pela fonte:

$$W_S = \int_{T_0}^{T_1} V_S i_L(t) dt + \int_{T_1}^{T_2} V_S i_L(t) dt \quad \longleftrightarrow \quad W_S = \int_{T_0}^{T_1} V_S \frac{V_S}{L_S} t dt + \int_{T_1}^{T_2} V_S \left( I_O + \frac{V_S}{Z_O} \sin \omega_0 t \right) dt$$

$$W_S = V_S \left\{ \frac{V_S}{2L_S} T_1^2 + I_O (T_2 - T_1) + \frac{V_S}{Z_O \omega_0} [1 - \cos \omega_0 (T_2 - T_1)] \right\}$$

como

$$I_O (T_3 - T_2) = V_S C_S (1 - \cos \alpha) \quad \frac{1}{\omega_0 Z_O} = C_S \quad I_O = \frac{V_S}{L_S} (T_1 - T_0)$$


Obtem-se

$$W_S = V_S I_O \left[ \frac{T_1}{2} + (T_2 - T_1) + (T_3 - T_2) \right] \quad (1)$$

**Energia debitada pela fonte:**

$$W_S = V_S I_O \left[ \frac{T_1}{2} + (T_2 - T_1) + (T_3 - T_2) \right] \quad (1)$$

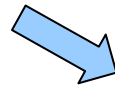
**Cálculo da energia absorvida pela carga:**



$$W_O = \int_{T_0}^{T_S} V_O I_O dt = V_O I_O T_S \quad (2)$$

**Igualando (1) e (2):**

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{T_S} \left[ \frac{T_1}{2} + (T_2 - T_1) + (T_3 - T_2) \right]$$



$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{T_S} \left\{ \frac{L I_O}{2 V_S} + \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \frac{-Z_O I_O}{V_S} + \frac{C V_S}{I_O} [1 - \cos \omega_0 (T_2 - T_1)] \right\}$$

### Ganho de tensão em função da frequência de operação

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{T_s} \left\{ \frac{LI_o}{2V_s} + \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \frac{-Z_o I_o}{V_s} + \frac{CV_s}{I_o} [1 - \cos \omega_0 (T_2 - T_1)] \right\}$$

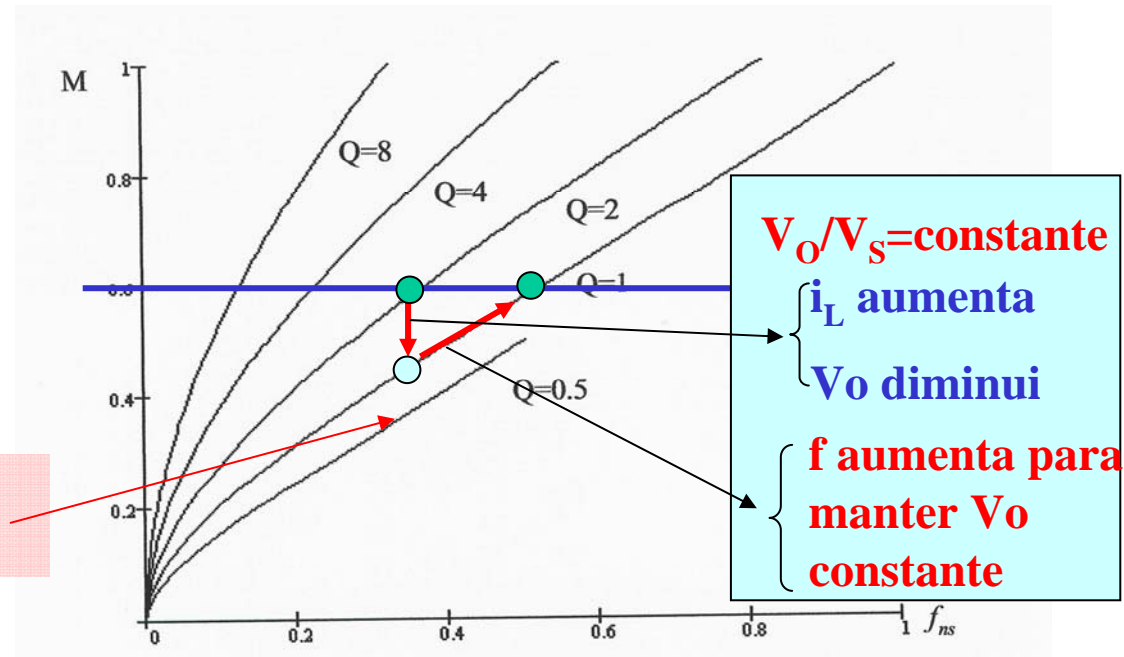
# ZCS

$$M = \frac{V_o}{V_s} \quad I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$Q = \frac{R_o}{Z_o} \quad f_N = \frac{f_s}{f_o}$$

$$M = \frac{f_N}{2\pi} \left\{ \frac{M}{2Q} + \alpha + \frac{Q}{M} [1 - \cos \alpha] \right\}$$

Curvas Características  $V_{on}/V_s(f_s/f_o)$



Quanto maior é a corrente de carga mais difícil é obter ZCS

**ANÁLISE NO PLANO DE ESTADOS:****ZCS****Estado 1**

$$i_L(t) = \frac{V_S}{L_S} t$$

$$v_{CN}(t) = \frac{v_C(t)}{V_S} = 0$$

**Estado 2**

$$i_L(t) = I_o + \frac{V_S}{Z_o} \sin \omega_0 t$$

$$v_C(t) = V_S (1 - \cos \omega_0 t)$$

$$\left( \frac{i_L}{V_S/Z_o} - \frac{I_o}{V_S/Z_o} \right)^2 + (v_{CN} - 1)^2 = 1$$

**Estado 3**

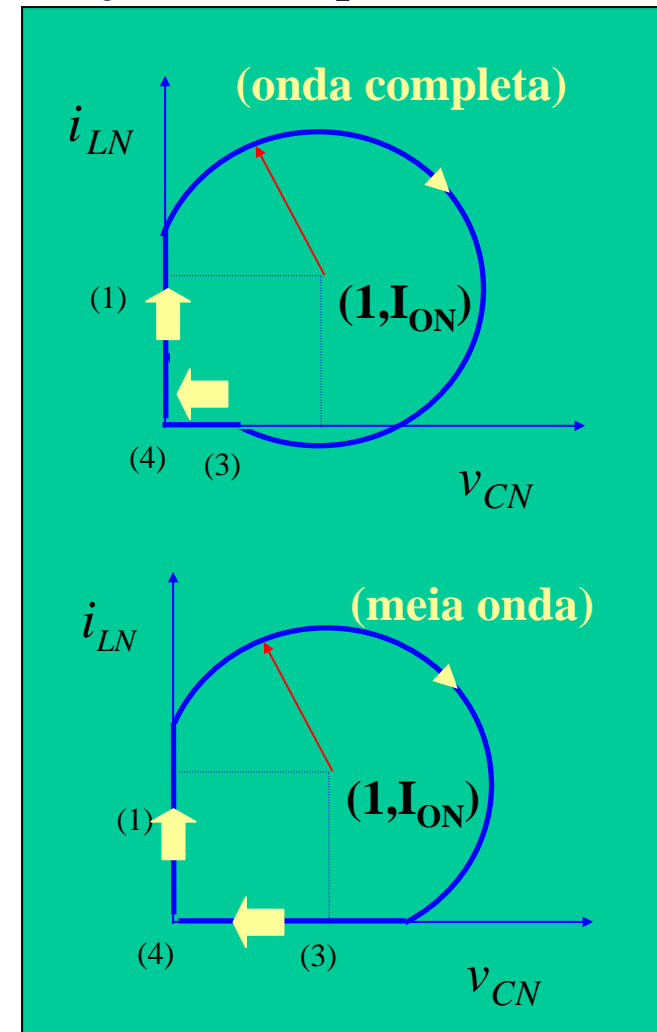
$$v_C(t) = V_{CB} - \frac{I_o}{C_S} t$$

$$i_{LN}(t) = \frac{i_L(t)}{V_S/Z_o} = 0$$

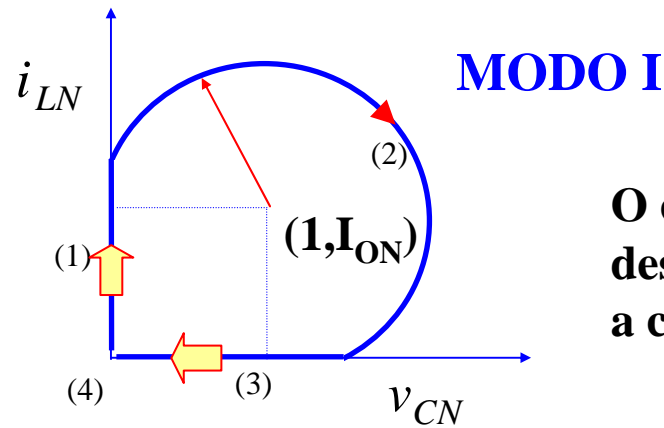
**Estado 4**

$$i_{LN}(t) = 0$$

$$v_{CN}(t) = 0$$

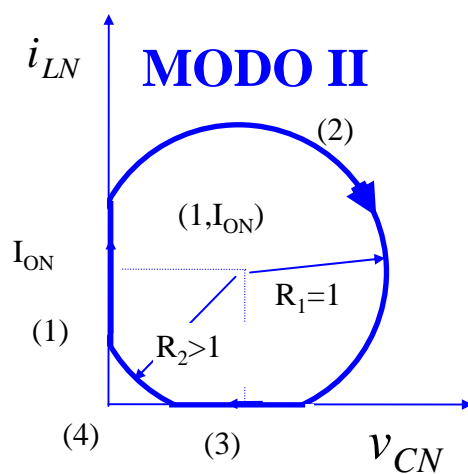
**Trajectória no plano de estados**

**(operação em meia onda)**

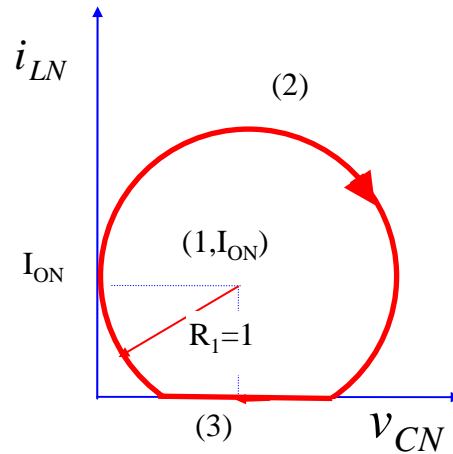


**O condensador descarrega até zero e a corrente anula-se**

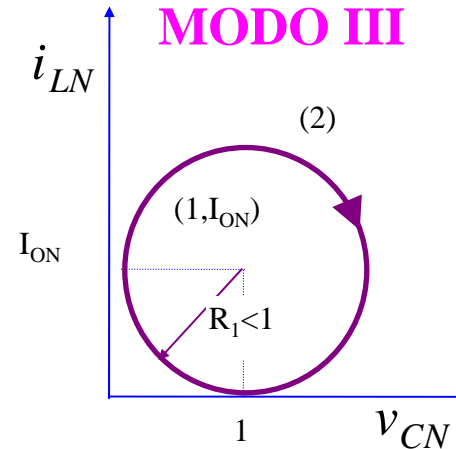
Quando  $\omega$  tende para  $\omega_0$   $Td4$  tende para zero: fronteira entre o Modo I e o Modo II



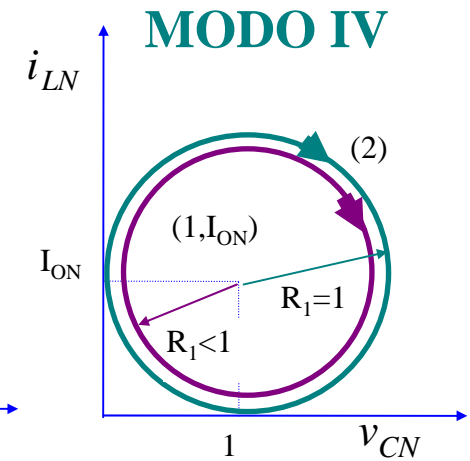
**O condensador não chega a descarregar totalmente,  $\omega \uparrow$**



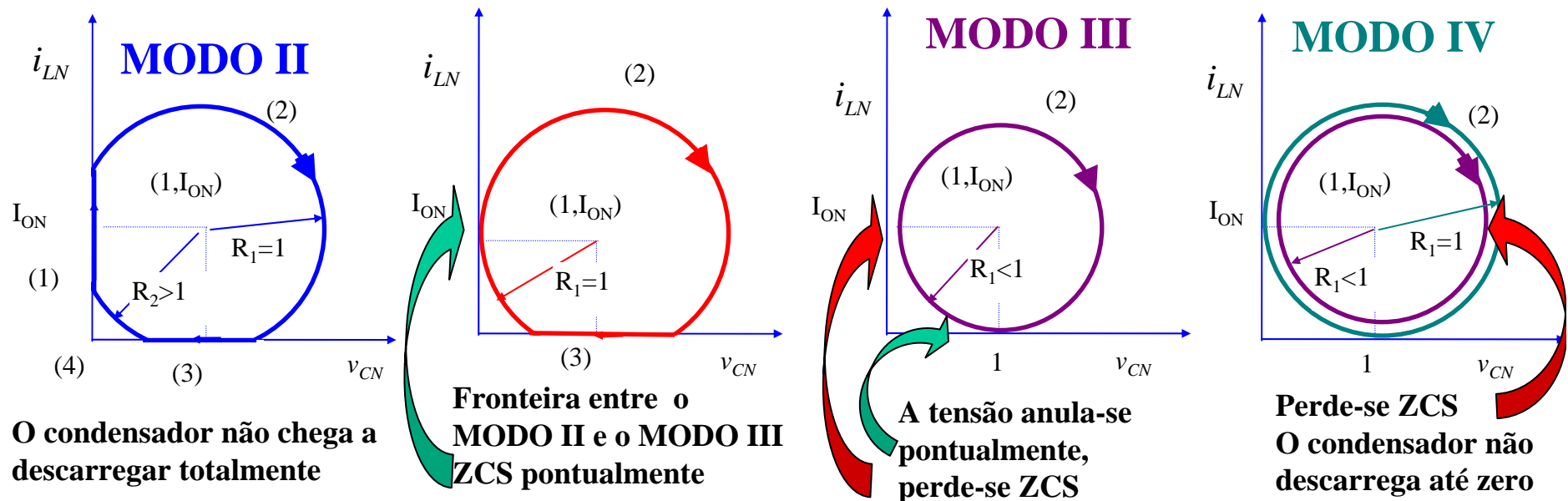
**Fronteira entre o MODO II e o MODO III**



**A tensão anula-se pontualmente**



**Perde-se ZCS**



**MODO II**

D1 sempre no corte

$$(i_{LN} - I_{ON})^2 + (v_{CN} - 1)^2 > 1$$

Fronteira entre o MODO II e o MODO III

$$(i_{LN} - I_{ON})^2 + (v_{CN} - 1)^2 = 1$$

**MODO III**

Fronteira entre o MODO III e o MODO IV

$$I_{ON} = 1$$

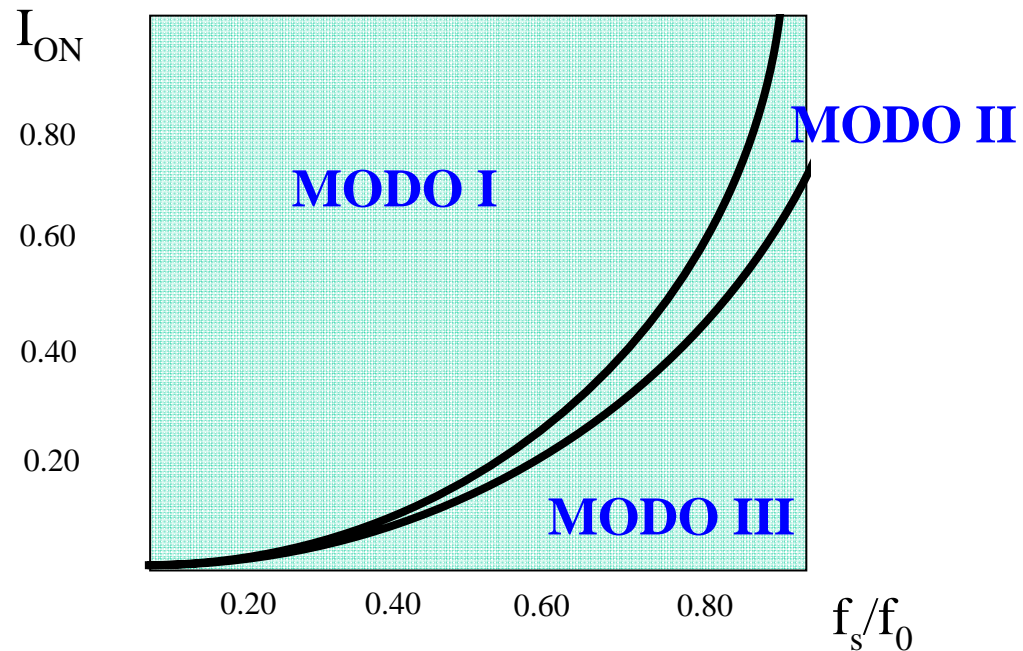
a trajetória é tangente aos dois eixos

**MODO IV**

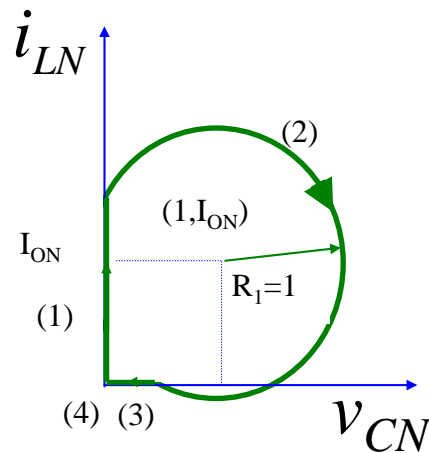
$$I_{ON} > 1 \quad I_o > \frac{V_S}{Z_n}$$

**ZCS perde-se**

Variação da corrente de saída com a frequência (**operação em meia onda**)

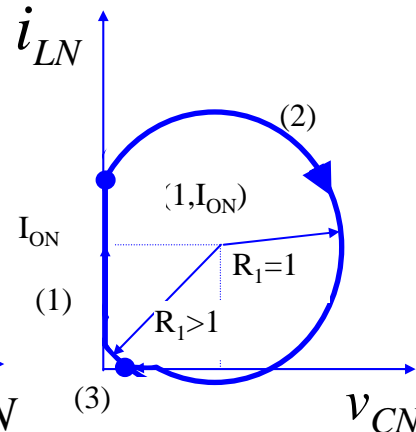


**(operação em onda completa)**



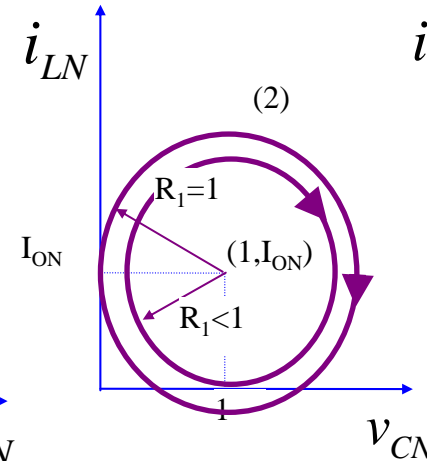
**MODO I**

O condensador descarrega até zero e a corrente anula-se e torna-se negativa



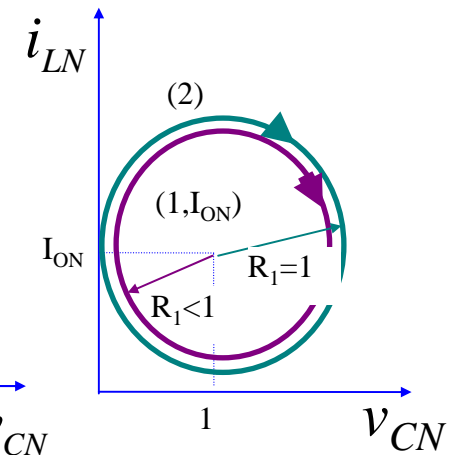
**MODO II**

O condensador não chega a descarregar totalmente,  $\omega \uparrow$



**MODO III**

A tensão anula-se pontualmente

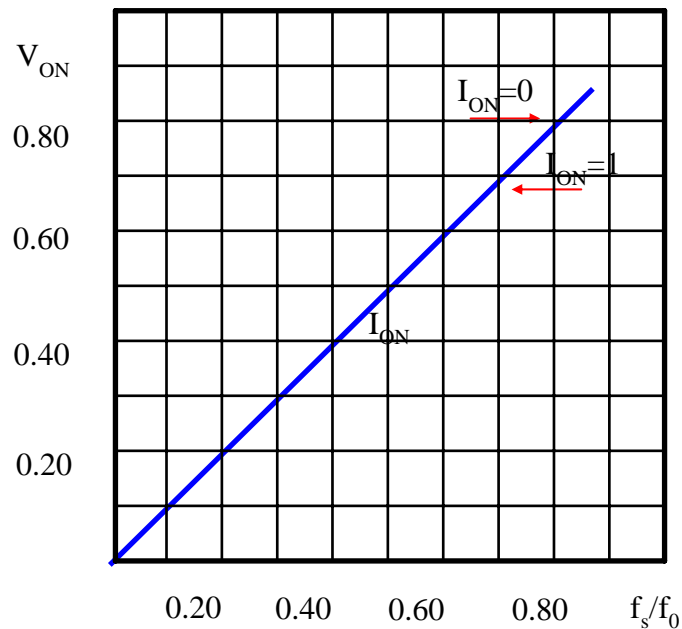


**MODO IV**

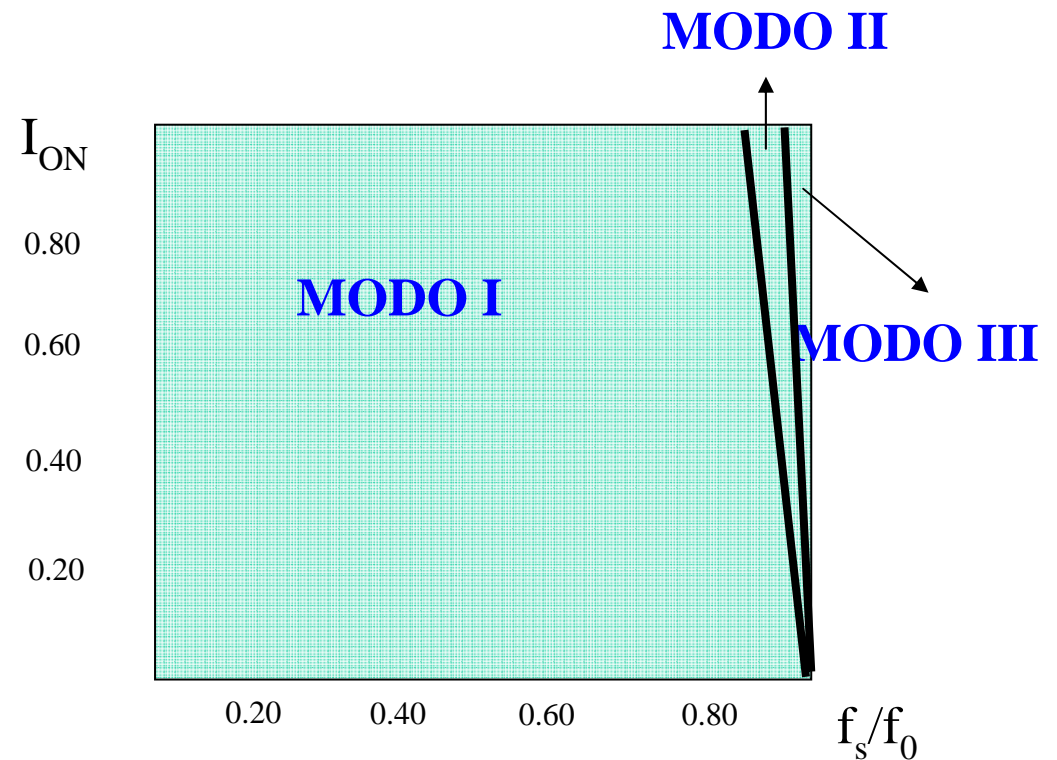
Perde-se ZCS



**Curva Característica  $V_{on}(f_s/f_o)$**   
(ganho de tensão em função da frequência de operação)



**Varição da corrente de saída com a frequência (operação em onda completa)**

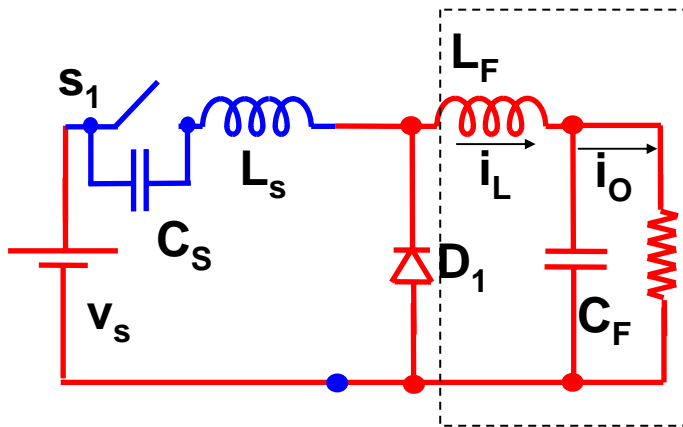




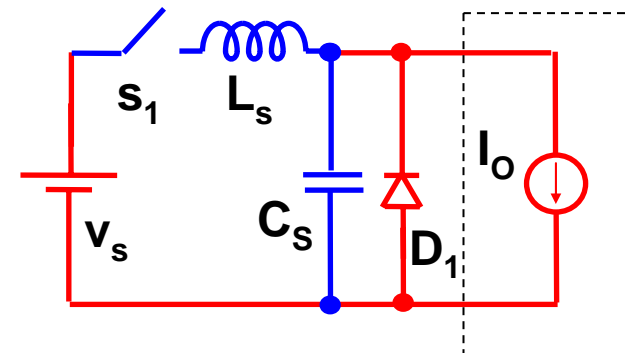


## Conversor quasi-ressonante redutor com Comutação no **Z**ero da **T**ensão

# “ZVS”



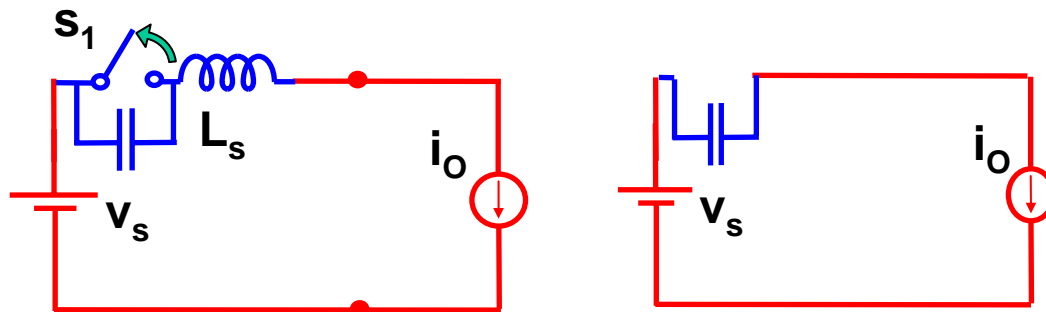
Esquema  
eléctrico



Circuito  
equivalente

### Análise de regime permanente

Fase I – Carga do condensador  $T_0 < t < T_1$



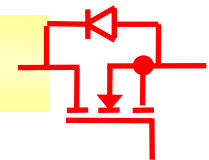
$$v_C(t) = \frac{I_o}{C_s} t \quad i_L(t) = I_o$$

$$v_C(T_0) = 0 \quad v_C(T_1) = V_s$$

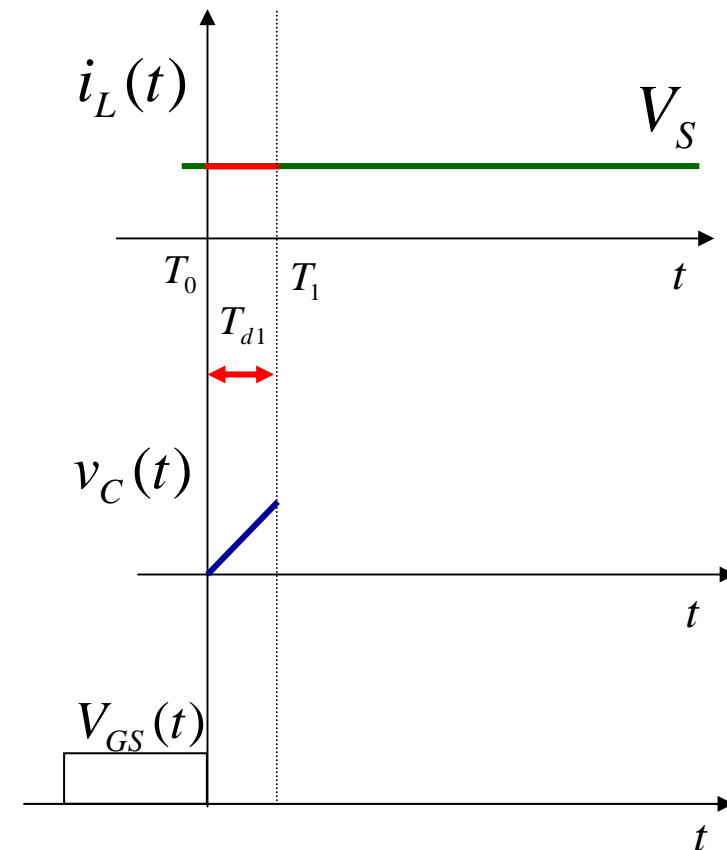
$$i_L(T_0) = I_o \quad \text{e} \quad i_L(T_1) = I_o$$

$$T_{d1} = T_1 - T_0 = \frac{C_s V_s}{I_o}$$

### MEIA ONDA

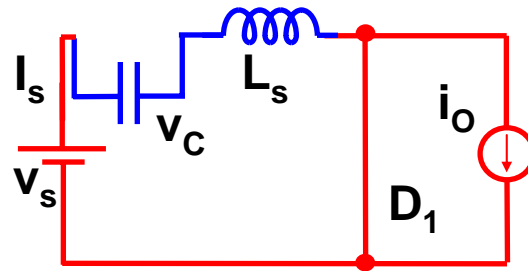
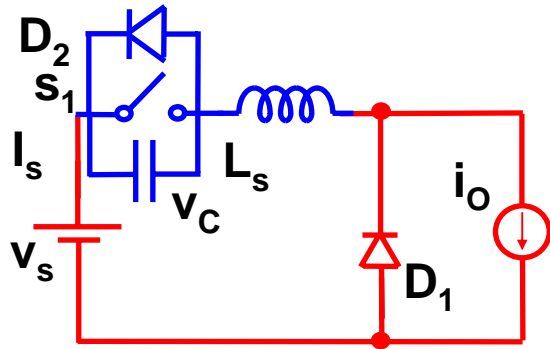


**S<sub>1</sub> OFF e D<sub>1</sub> OFF**



Fase II – Ressonante  $T_1 < t < T_2$

**S<sub>1</sub> OFF, D2 OFF**  
**D<sub>1</sub> ON**



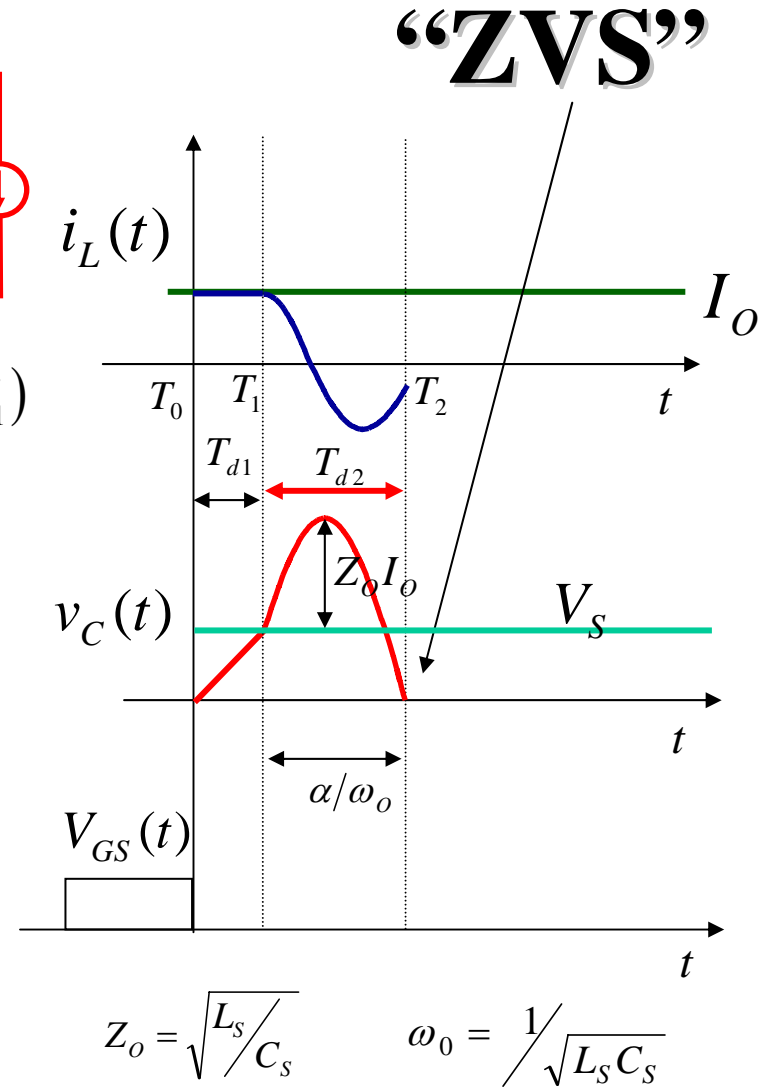
$$i_L(t) = I_o \cos \omega_0(t - T_1) \quad v_C(t) = V_s + Z_o I_o \sin \omega_0(t - T_1)$$

$$v_C(T_1) = V_s \quad v_C(T_2) = 0$$

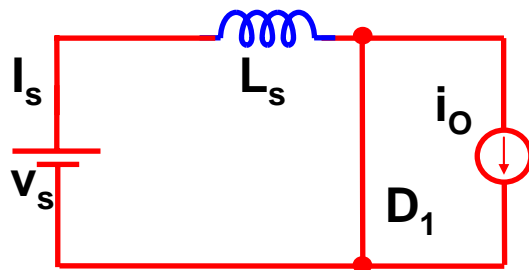
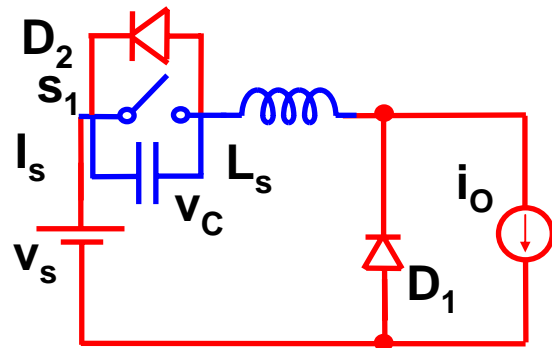
$$T_{d2} = T_2 - T_1 = \frac{\alpha}{\omega}$$

$$i_L(T_2) = I_o \cos \alpha$$

**Condição de comutação**  $V_s < Z_o I_o$



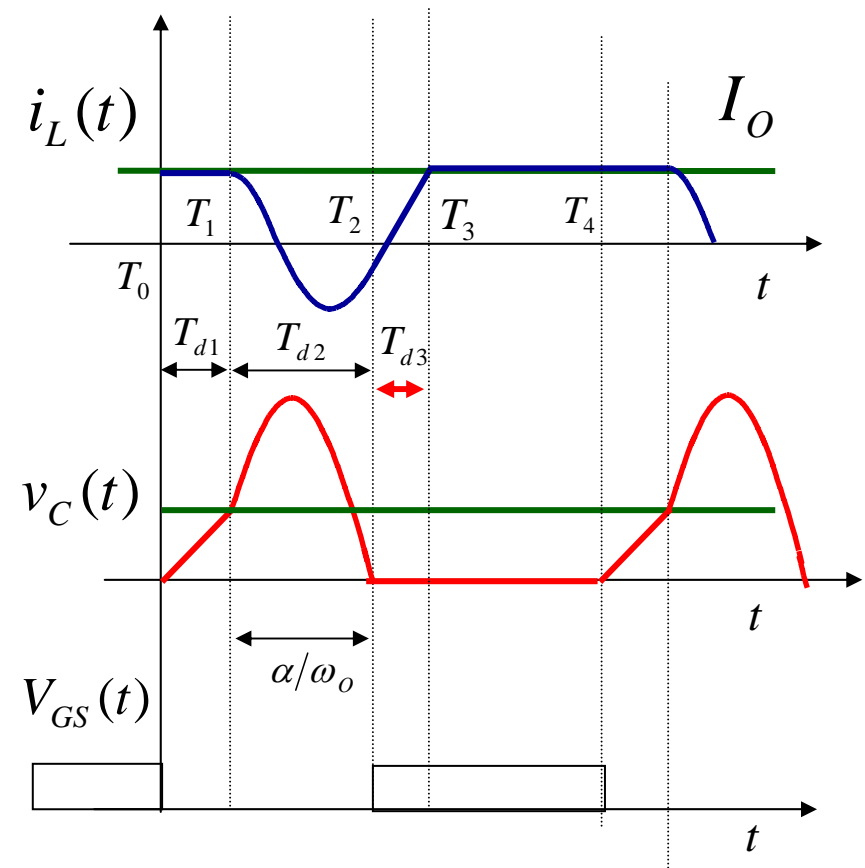
*Fase III – Carga da bobina  $T_2 < t < T_3$*



$$v_C(T_2) = 0$$

$$i_L(t) = \frac{V_s}{L_s}(t - T_2) + I_o \cos \alpha$$

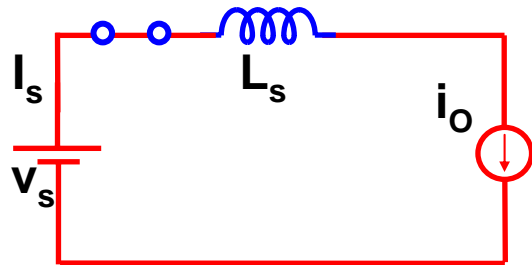
**$S_1$  ON ou  $D_2$  ON**  
**D1 ON**



*Fase IV – Transferência de energia*

$T_3 < t < T_4$

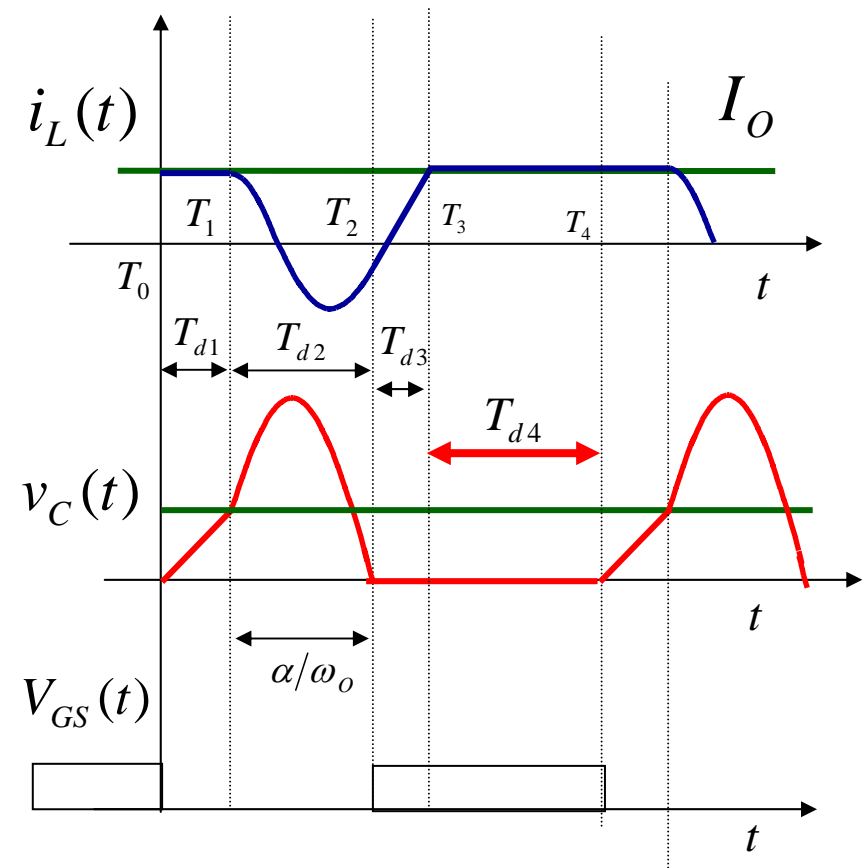
**$S_1$  ON e  $D_1$  OFF**



$$v_C = 0$$

$$i_L = I_O$$

# “ZVS”





A curva característica  $V_o/N$  (fs/fo) é obtida considerando o balanço energético na entrada e na carga

$$W_S = W_O$$

A energia debitada pela fonte  $V_S$  é igual à energia recebida pela carga

**Cálculo da energia debitada pela fonte:**

$$W_S = \int_{T_0}^{T_1} i_L(t) V_S dt + \int_{T_1}^{T_2} i_L(t) V_S dt + \int_{T_2}^{T_3} i_L(t) V_S dt + \int_{T_3}^{T_4} i_L(t) V_S dt$$

$$W_S = V_S \left[ I_O T_1 + I_O \sqrt{LC} \sin \omega_0 (T_2 - T_1) + \frac{V_S}{2L} (T_3 - T_2)^2 + I_O \sin \alpha (T_3 - T_2) + I_O (T_S - T_3) \right]$$

$$W_S = V_S I_O \left[ \frac{-Q}{M \omega_0} - \frac{ML}{2R_O} + T_S + \frac{\alpha}{\omega_0} + \frac{ML}{R_O} \cos \alpha - \frac{ML}{2R_O} \cos^2 \alpha \right] \quad (1)$$

**Cálculo da energia absorvida pela carga:**

$$\rightarrow W_O = \int_{T_0}^{T_S} V_O I_O dt = V_O I_O T_S \quad (2)$$

**Igualando (1) e (2):**

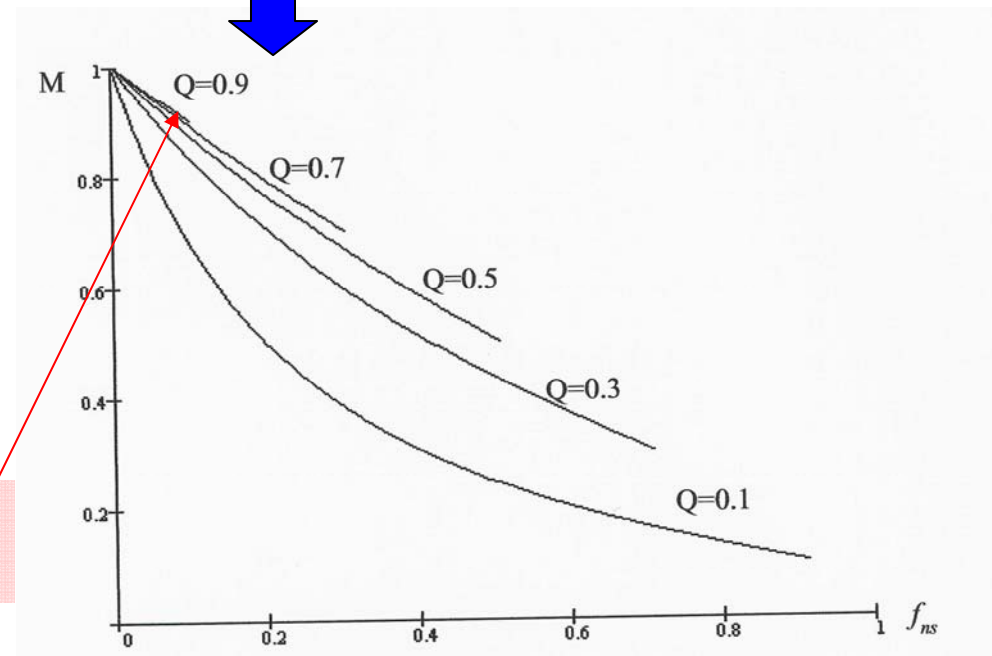
## Ganho de tensão em função da frequência de operação

“ZVS”

$$M = 1 - \frac{f_N}{2\pi} \left\{ \frac{M}{2Q} + \alpha + \frac{Q}{M} [1 - \cos \alpha] \right\}$$

$$M = \frac{V_o}{V_s} \quad I_o = \frac{V_o}{R_o}$$

$$Q = \frac{Z_o}{R_o} \quad f_N = \frac{f_s}{f_o}$$

Curvas Características  $V_{on} / V_s (f_s / f_o)$ Quanto menor é a corrente de carga  
mais difícil é obter ZVS

## ZCS Comutação no zero da corrente

- Para garantir ZCS a carga **elevada** tem que se verificar a condição  $V_s/Z_o > I_o$  logo  $Z_o$  terá que **diminuir**.

- Se  $Z_o$  diminui, **aumenta** o pico de corrente no dispositivo

$$i_{Q\text{pico}} = V_s/Z_o + I_o$$

## ZVS Comutação no zero da tensão

- Para garantir ZVS a carga **baixa** tem que se verificar a condição  $I_o Z_o > V_s$  logo  $Z_o$  terá que **aumentar**

- Se  $Z_o$  aumenta, **aumenta** o pico de tensão no dispositivo

$$V_{D\text{Spico}} = I_o Z_o + V_s$$

**CONCLUSÕES**

	<b>ZCS</b>	<b>ZVS</b>
<i>Controlo</i>	Tempo de condução constante	Tempo de corte constante
<i>Tensão no dispositivo</i>	Aprox. rectangular	Quase-sinusoidal
<i>Corrente no dispositivo</i>	Quase-sinusoidal	Aprox. rectangular
<i>Gama de variação da carga</i>	Rmin a Vazio	0 a Rmax
<i>M aumenta quando</i>	A frequência aumenta	A frequência diminui
<i>M aumenta quando</i>	R aumenta	R diminui
<i>Onda completa</i>	Diodo em anti-paralelo com S	Diodo em série com S
<i>Meia onda</i>	Diodo em série com S	Diodo em anti-paralelo com S