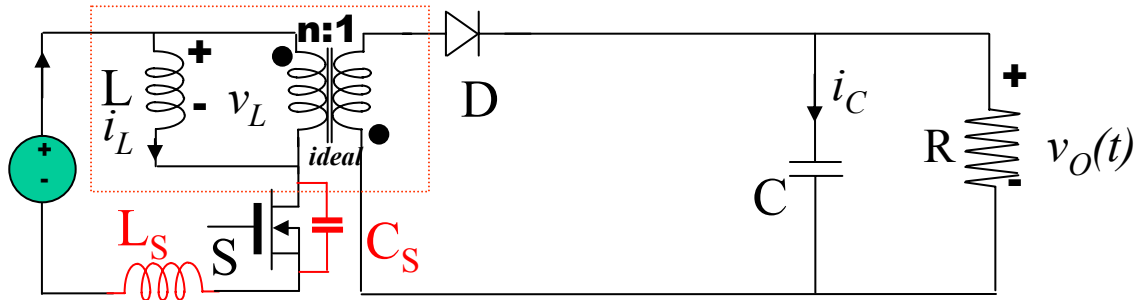
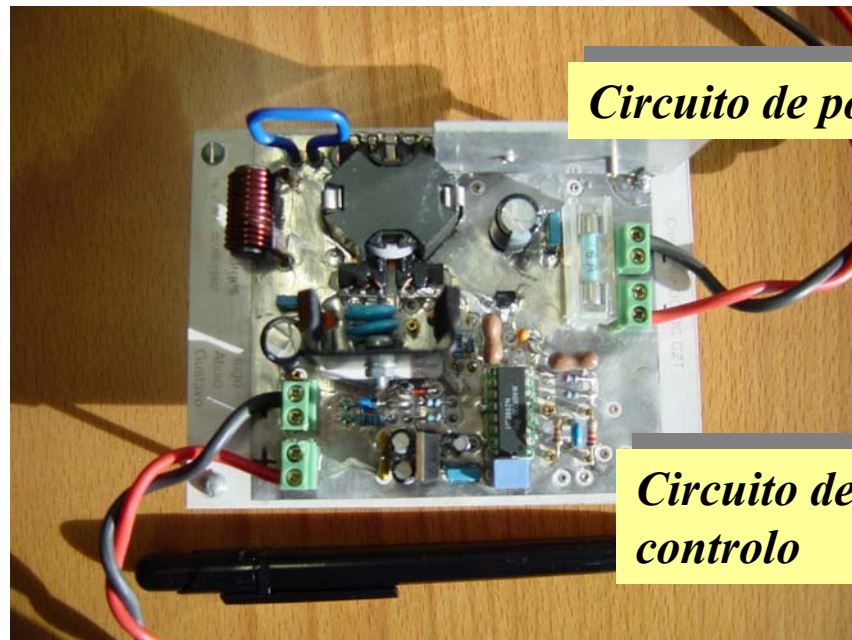


CONVERSORES RESSONANTES



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



CC-CA_{hf}-CC

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

CONVERSORES RESSONANTES

Topologias:



Conversores Com Carga Ressonante

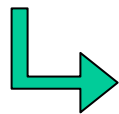
Conversores Quasi Ressonantes

Conversores Multi Ressonantes

Conversores PWM Ressonantes

Conversores com Transição Ressonante

Princípio de operação:



Inserção de uma bobine e de um condensador

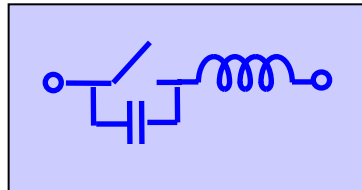
Oscilação das grandezas eléctricas



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

Comutação nos pontos de anulamento da tensão **ZVS** “**Z**ero **V**oltage **S**witching”

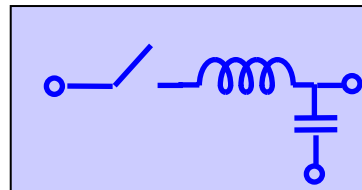
Condensador em paralelo com o dispositivo



o dispositivo
passa à condução
a tensão nula

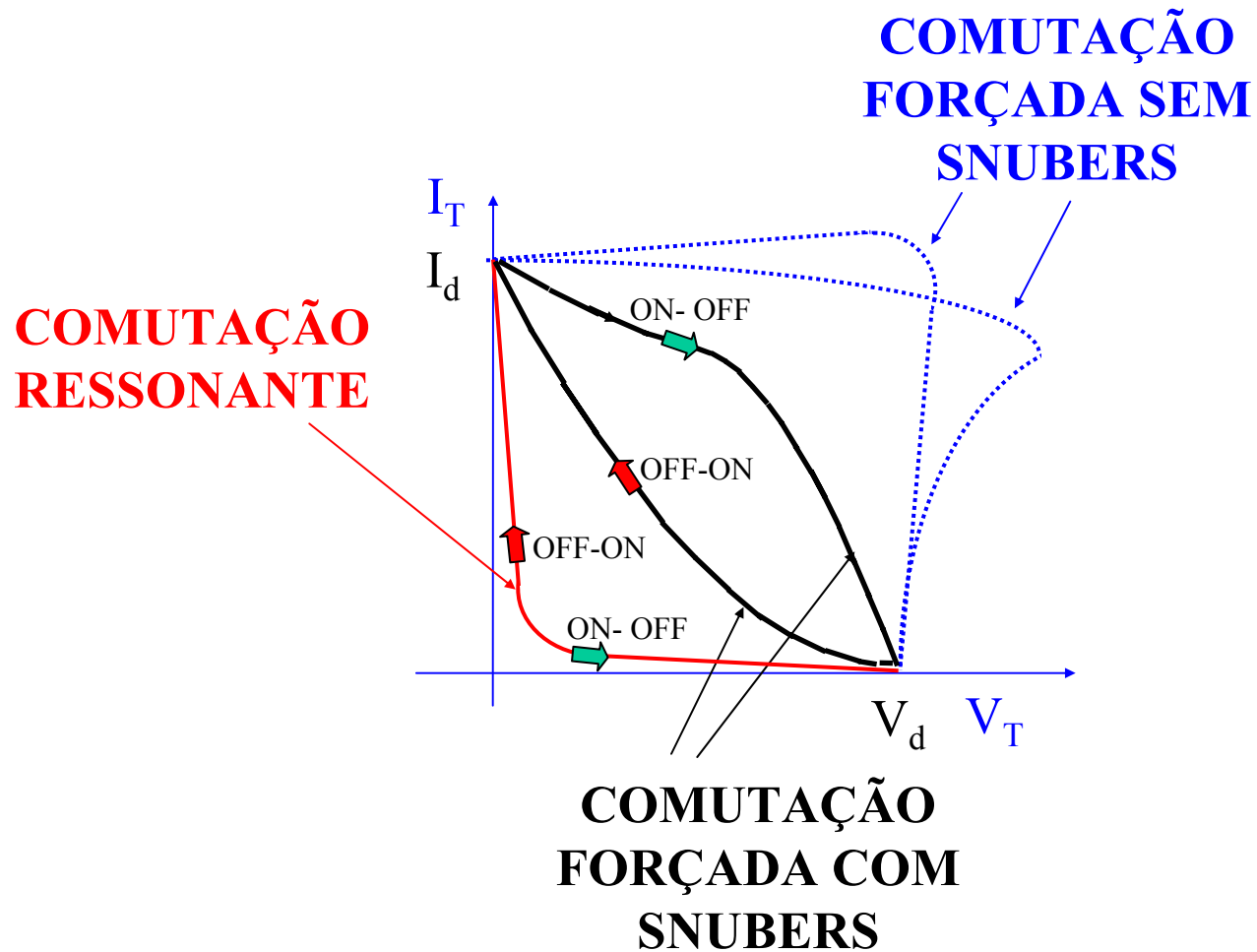
Comutação nos pontos de anulamento da corrente **ZCS** “**Z**ero **C**urrent **S**witching”

Bobine em série com o dispositivo

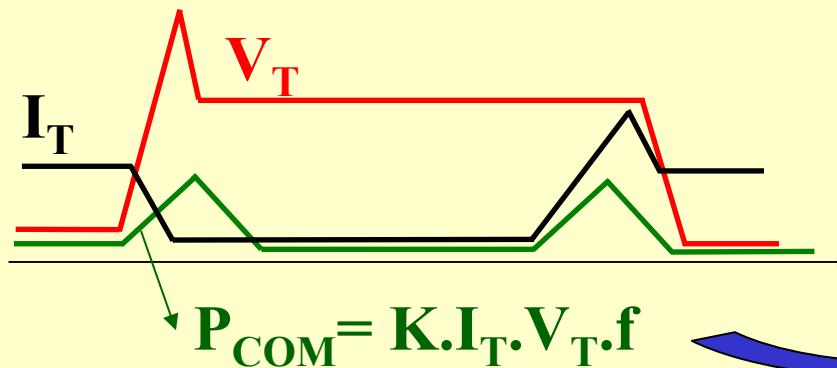


o dispositivo
passa ao corte a
corrente nula

Comparação entre comutação forçada e comutação ressonante



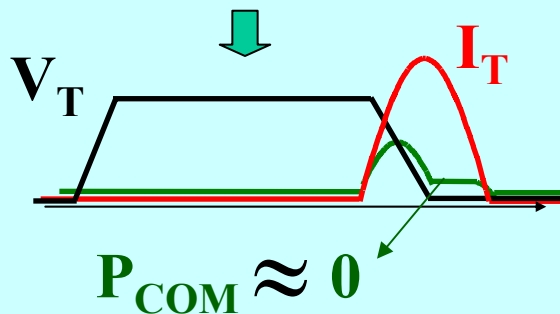
COMUTAÇÃO FORÇADA



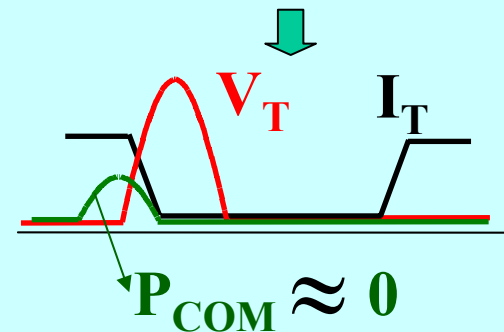
frequência $\uparrow$ 😊
rendimento $\downarrow$ ☹️

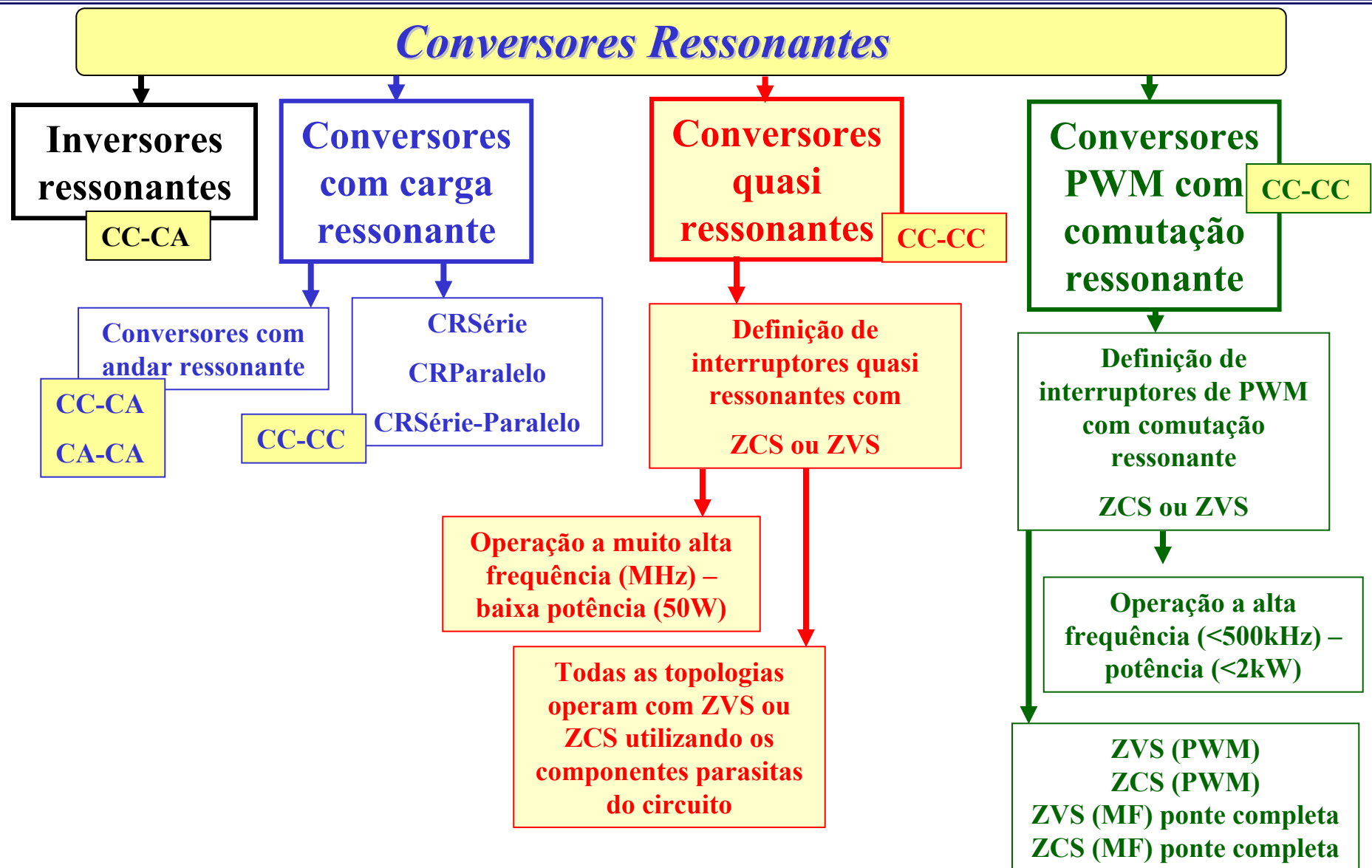
COMUTAÇÃO RESSONANTE

ZCS



ZVS





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)

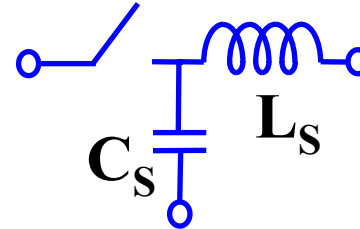
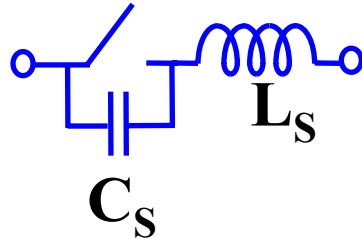
Indutâncias parasitas dos transformadores de potência (L_S)

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)

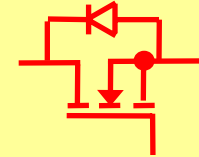
Interruptores ressonantes

ZVS

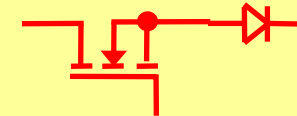


ZVS

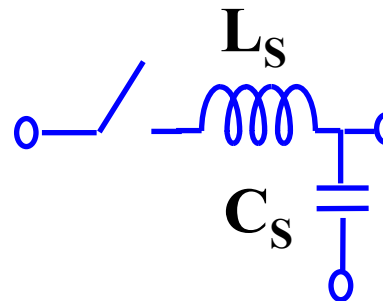
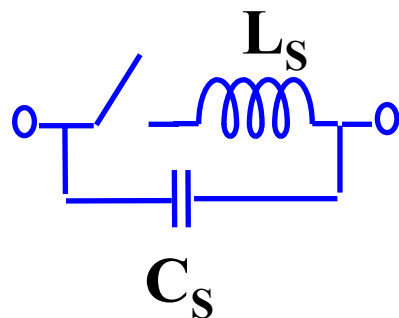
Meia onda



Onda completa

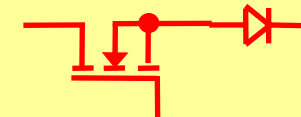


ZCS

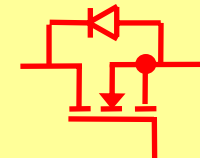


ZCS

Meia onda

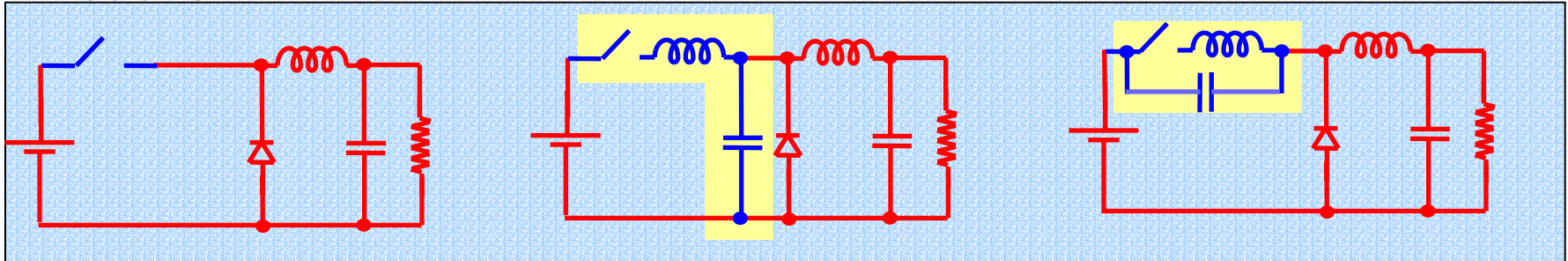


Onda completa

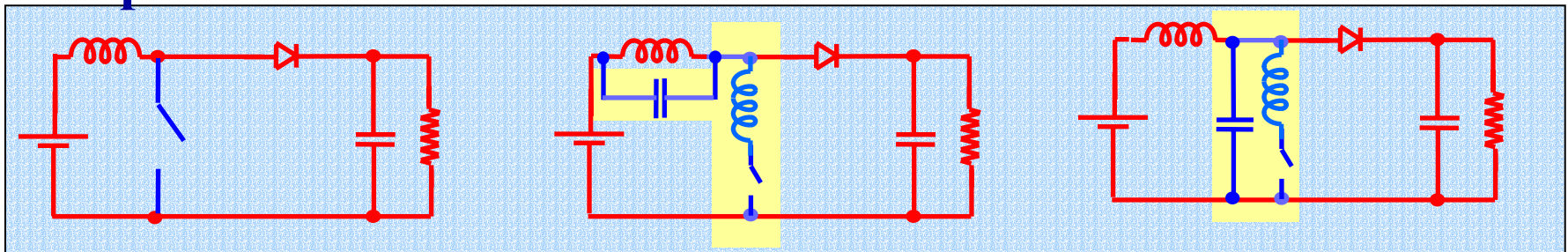


Família de conversores quasi-ressonantes com comutação no Zero da Corrente

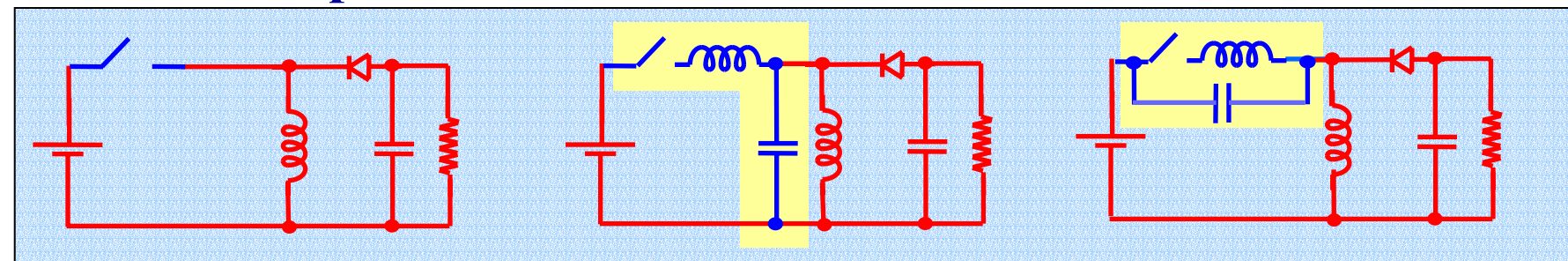
Redutor



Amplificador

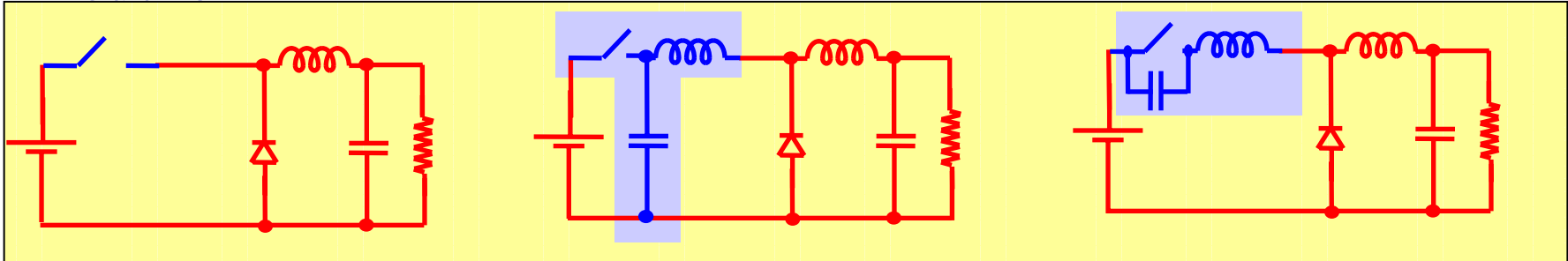


Redutor-amplificador

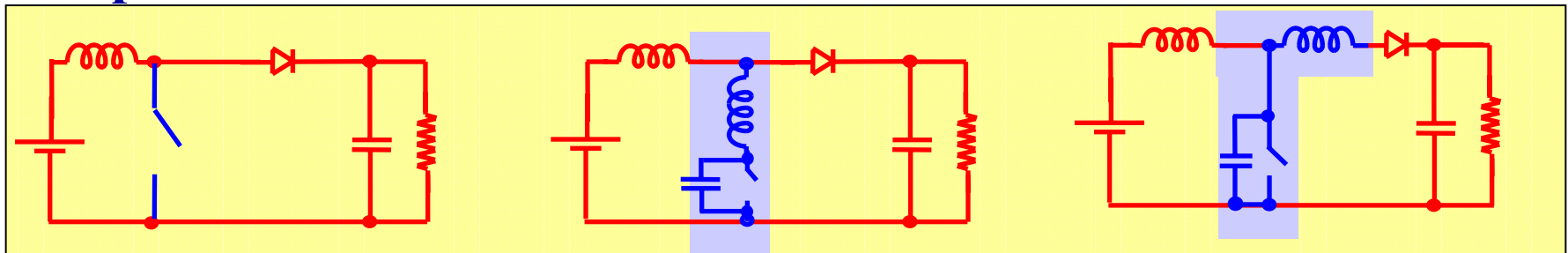


Família de conversores quasi-ressonantes com comutação no Zero da Tensão

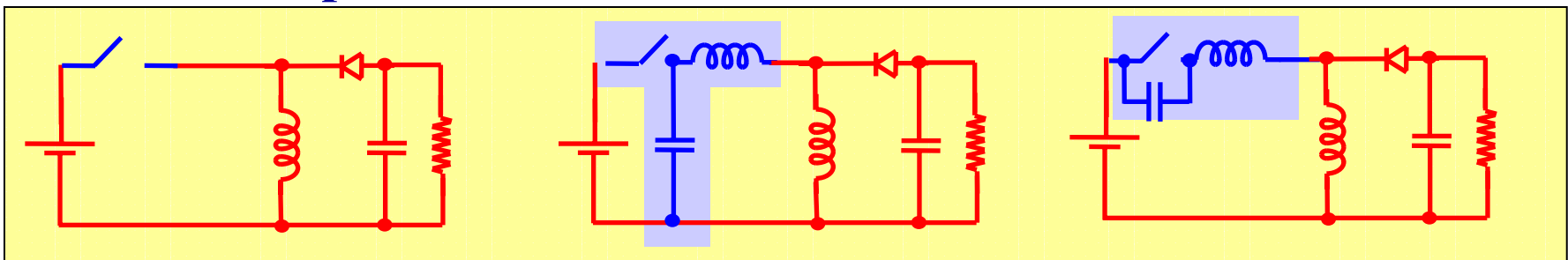
Redutor



Amplificador

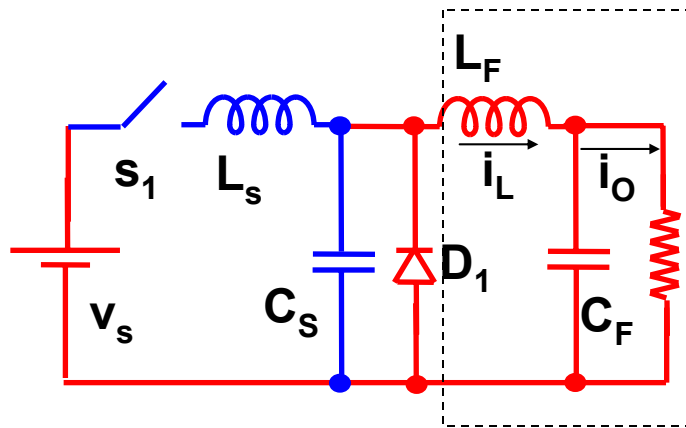


Redutor-amplificador

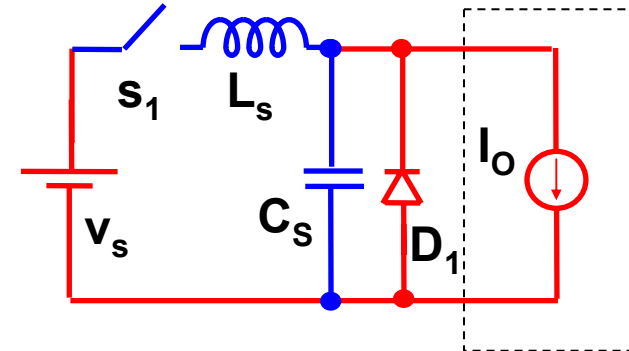


Conversor quasi-ressonante redutor com Comutação no **Z**ero da **C**orrente

ZCS



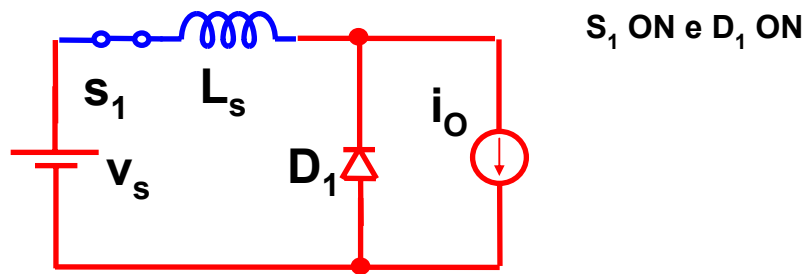
Esquema
eléctrico



Circuito
equivalente

Análise de regime permanente

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

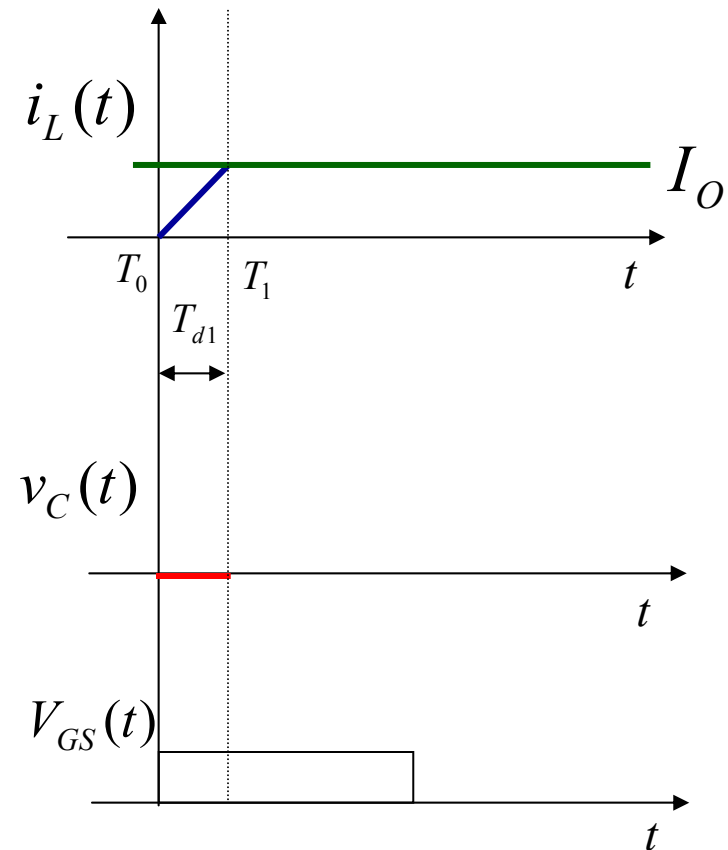
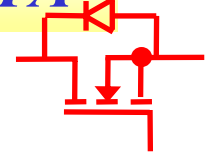


$$i_L(t) = \frac{V_S}{L_S} t \quad v_C(t) = 0$$

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

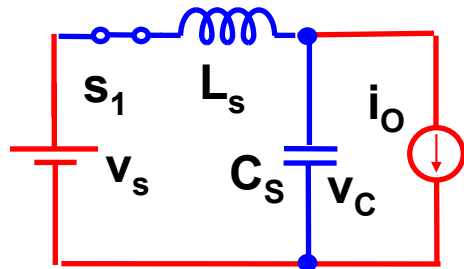
$$T_{d1} = T_1 - T_0 = \frac{L_S I_O}{V_S}$$

ONDA COMPLETA



Fase II – Ressonante $T_1 < t < T_2$

S_1 ON e D_1 OFF



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

$$v_C(t) = V_s(1 - \sin \omega_0 t)$$

$$i_L(T_1) = I_o$$

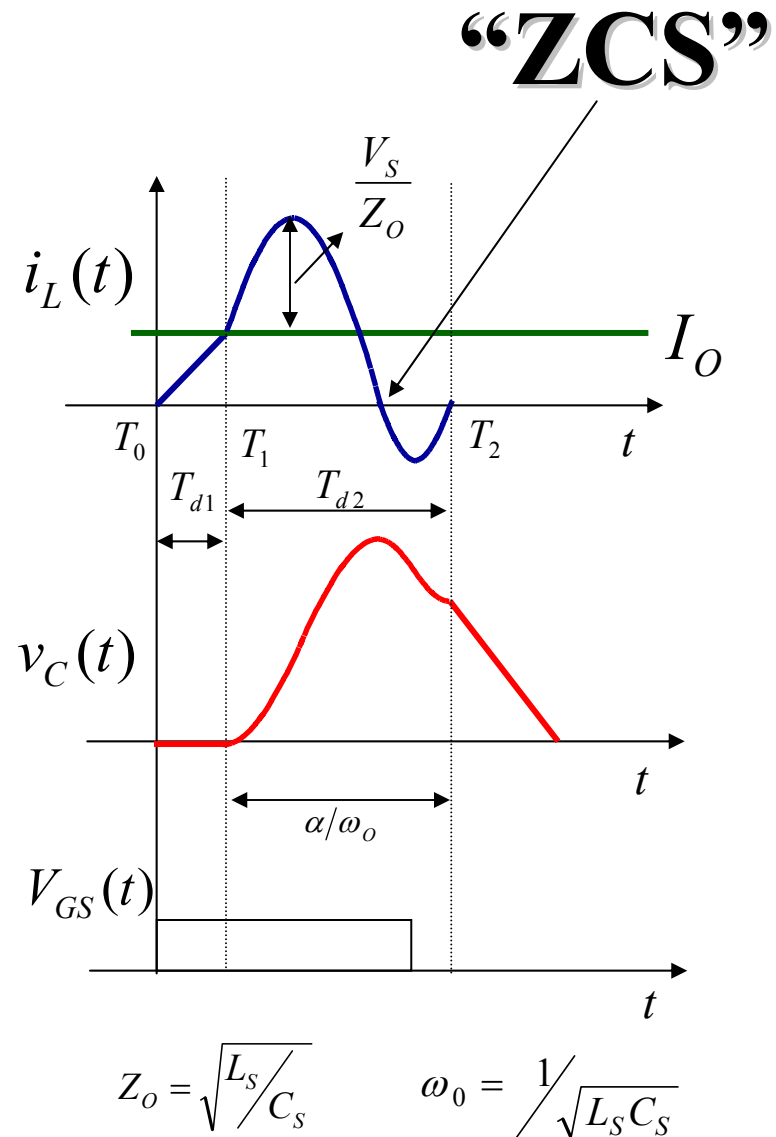
$$i_L(T_2) = 0$$

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

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

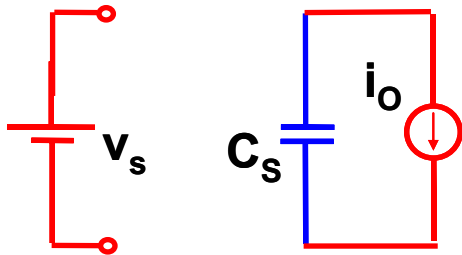
Condição de comutação

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



Fase III– Descarga do condensador $T_2 < t < T_3$

S_1 OFF e D_1 OFF

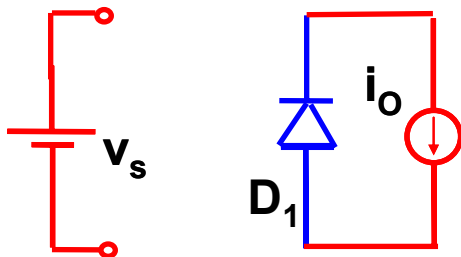


$$v_C(t) = V_{CB} - \frac{I_O}{C_S} t \quad i_L(t) = 0$$

$$v_C(T_3) = 0$$

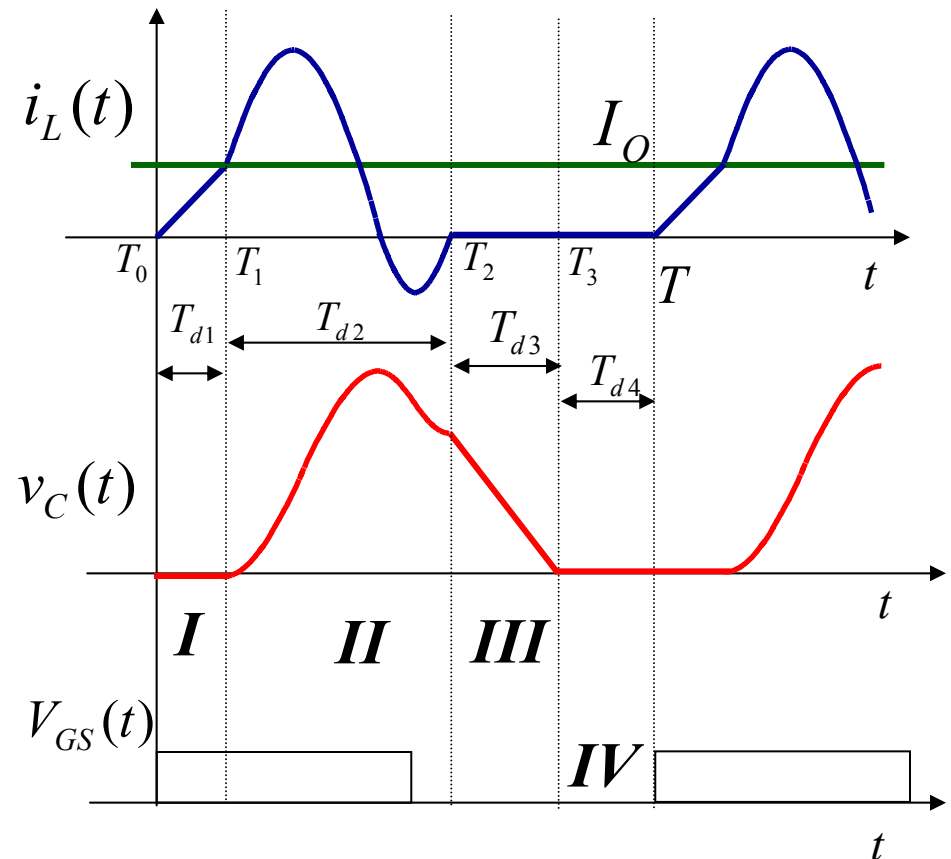
$$T_{d3} = T_3 - T_2 = \frac{C_S V_{CB}}{I_O} = \frac{C_S V_S (1 - \cos \alpha)}{I_O}$$

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 VoN (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:

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

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

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

Cálculo da energia absorvida pela carga:

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

Igualando (1) e (2):

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{T_S} \left[\frac{T_1}{2} + (T_2 - T_1) + (T_3 - T_2) \right] \quad \longrightarrow \quad \frac{V_O}{V_S} = \frac{1}{T_S} \left\{ \frac{L I_O}{2 V_S} + \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \frac{Z_O I_O}{V_S} + \frac{C V_S}{I_O} [1 - \cos \omega_0 (T_2 - T_1)] \right\}$$

Ganho de tensão em função da frequência de operação

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

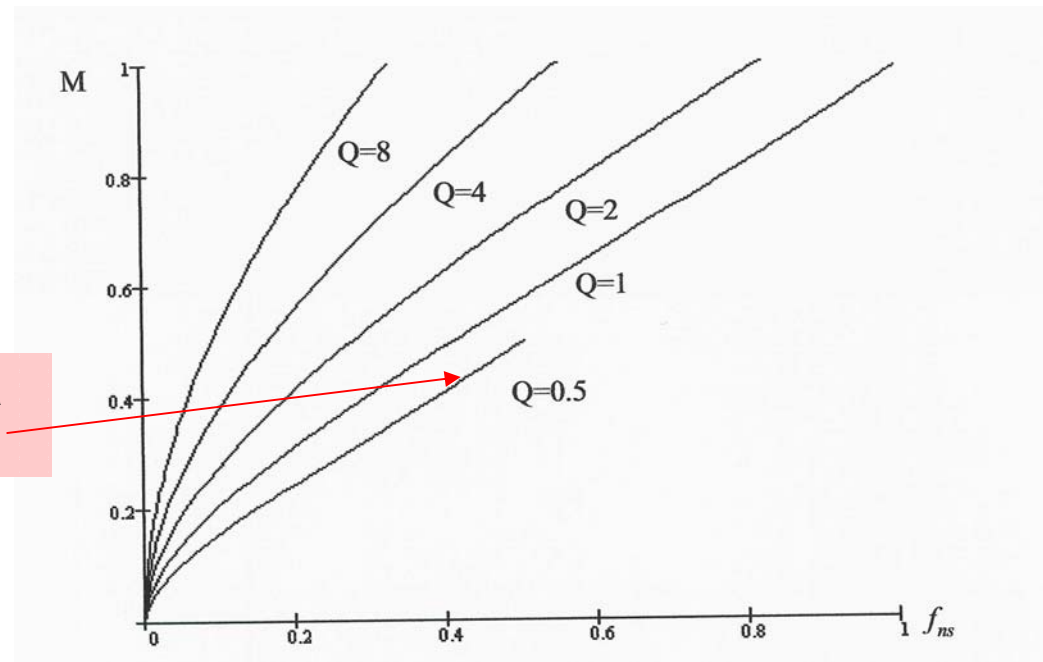
ZCS

$$M = \frac{V_o}{V_s} \quad I_o = \frac{V_o}{R_o}$$
$$Q = \frac{R_o}{Z_o} \quad f_N = \frac{f_s}{f_o}$$

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

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

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

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

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

Estado 3

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

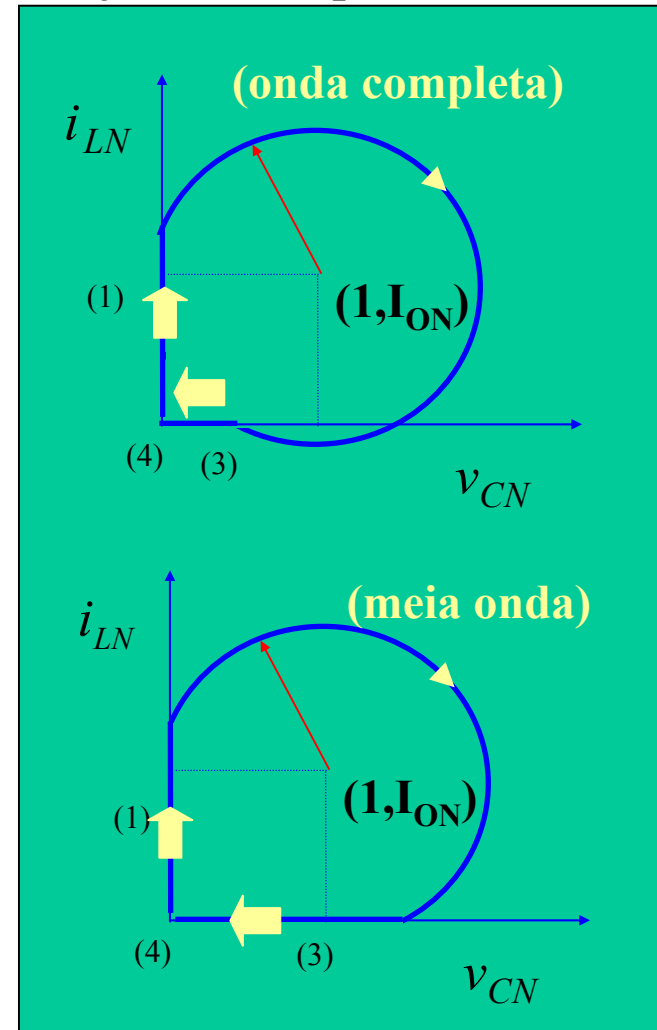
$$i_{LN}(t) = \frac{i_L(t)}{V_S/Z_o} = 0$$

Estado 4

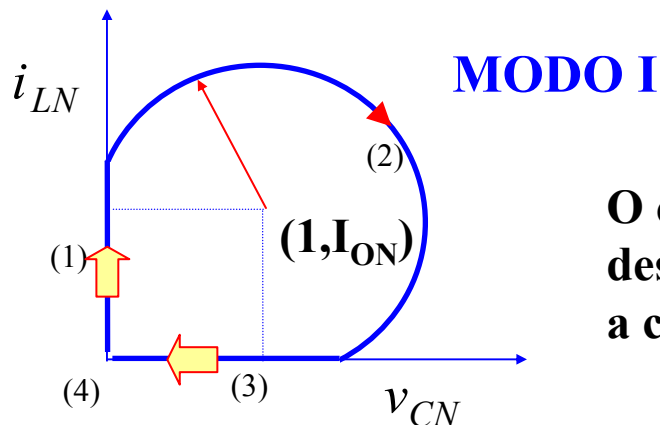
$$i_{LN}(t) = 0$$

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

Trajectória no plano de estados

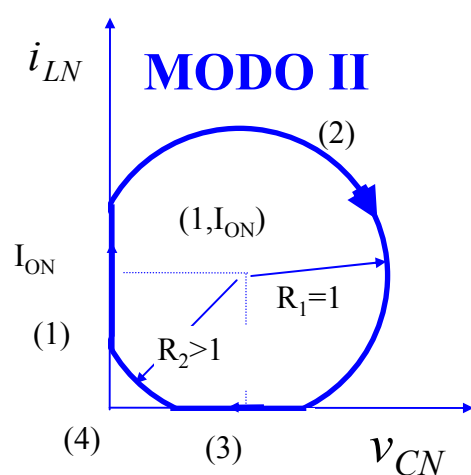


(operação em meia onda)

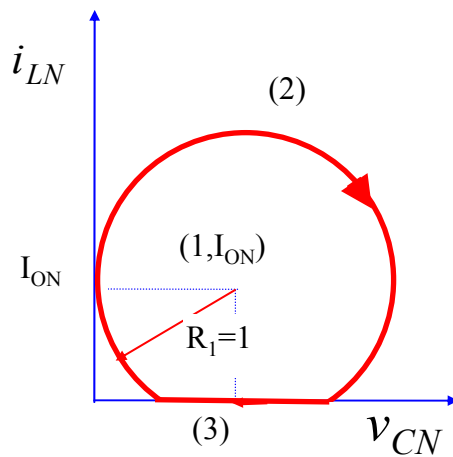


O condensador descarrega até zero e a corrente anula-se

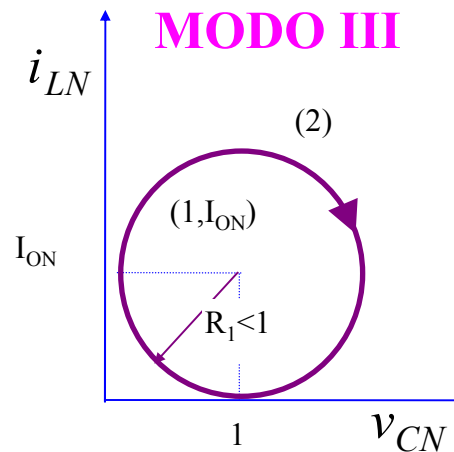
Quando ω tende para ω_0 Td_4 tende para zero: fronteira entre o Modo I e o Modo II



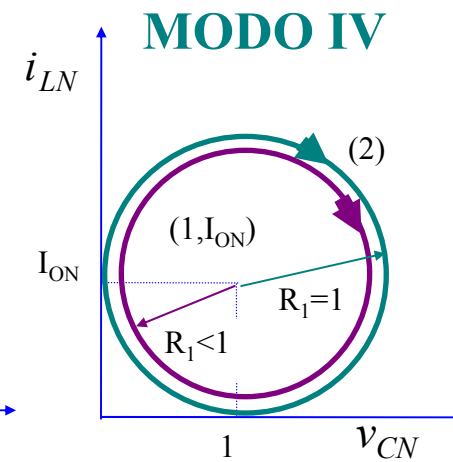
O condensador não chega a descarregar totalmente, $\omega \uparrow$



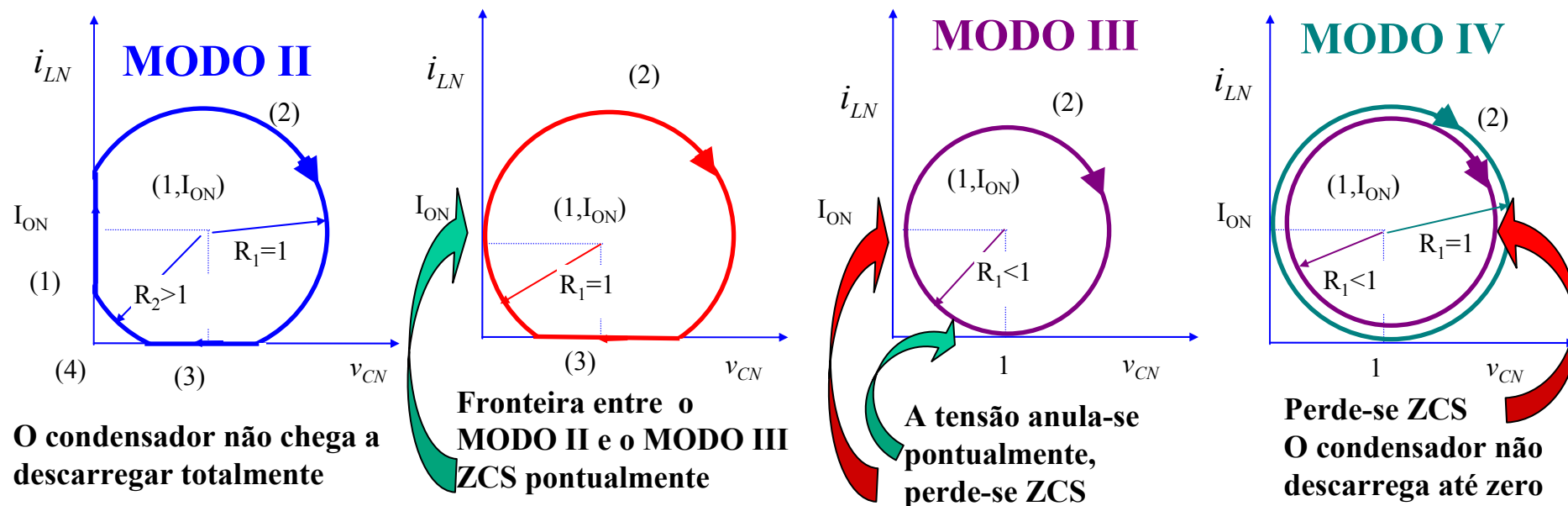
Fronteira entre o **MODO II** e o **MODO III**



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

$$I_{ON} = 1$$

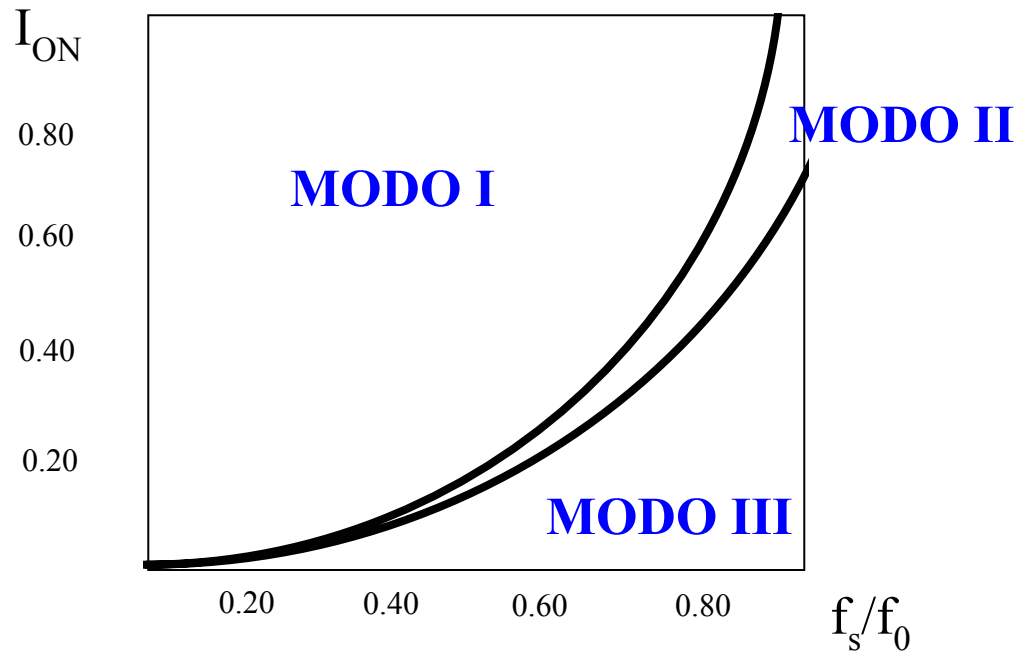
a trajetória é tangente aos dois eixos

MODO IV

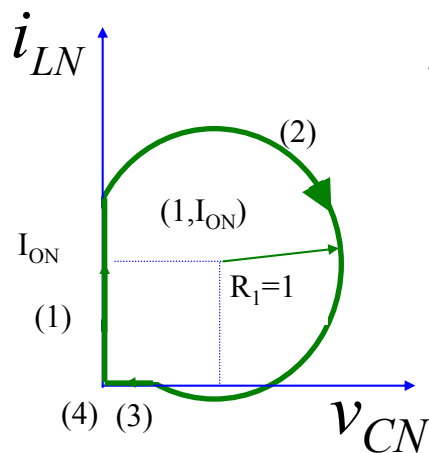
$$I_{ON} > 1 \quad I_O > \frac{V_S}{Z_n}$$

ZCS perde-se

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

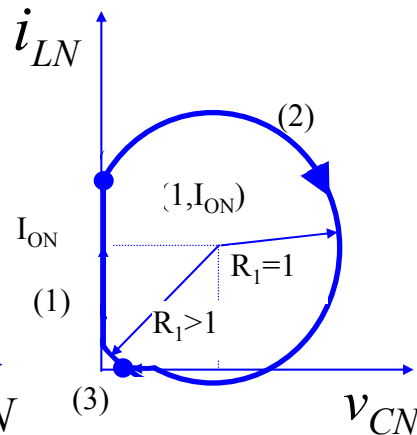


(operação em onda completa)



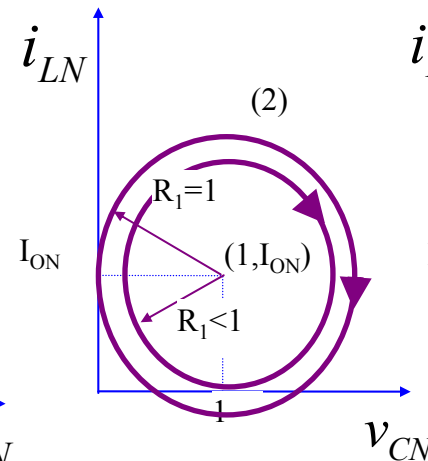
MODO I

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



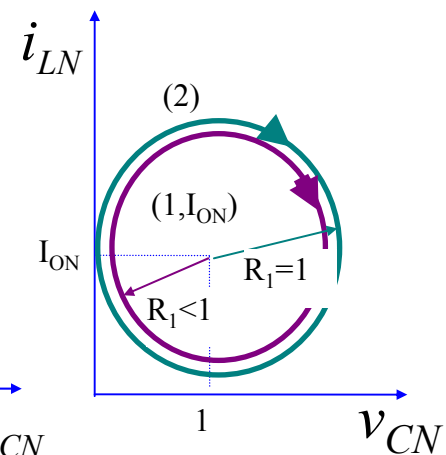
MODO II

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



MODO III

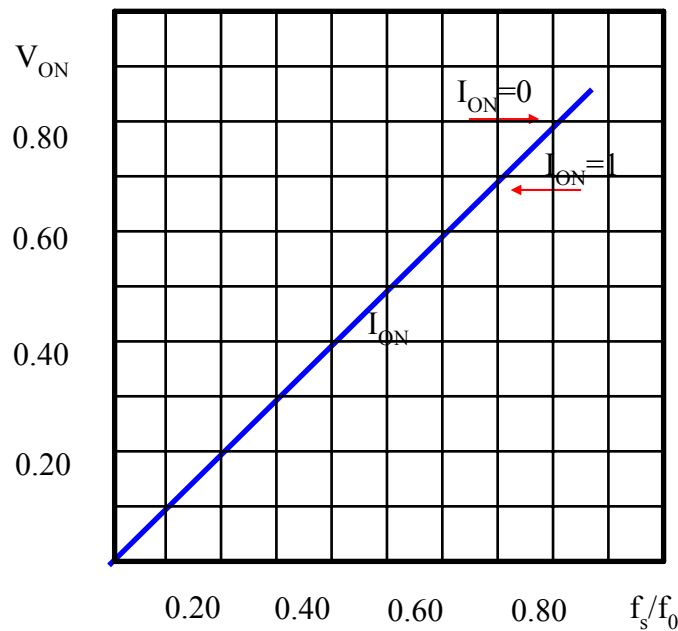
A tensão anula-se pontualmente



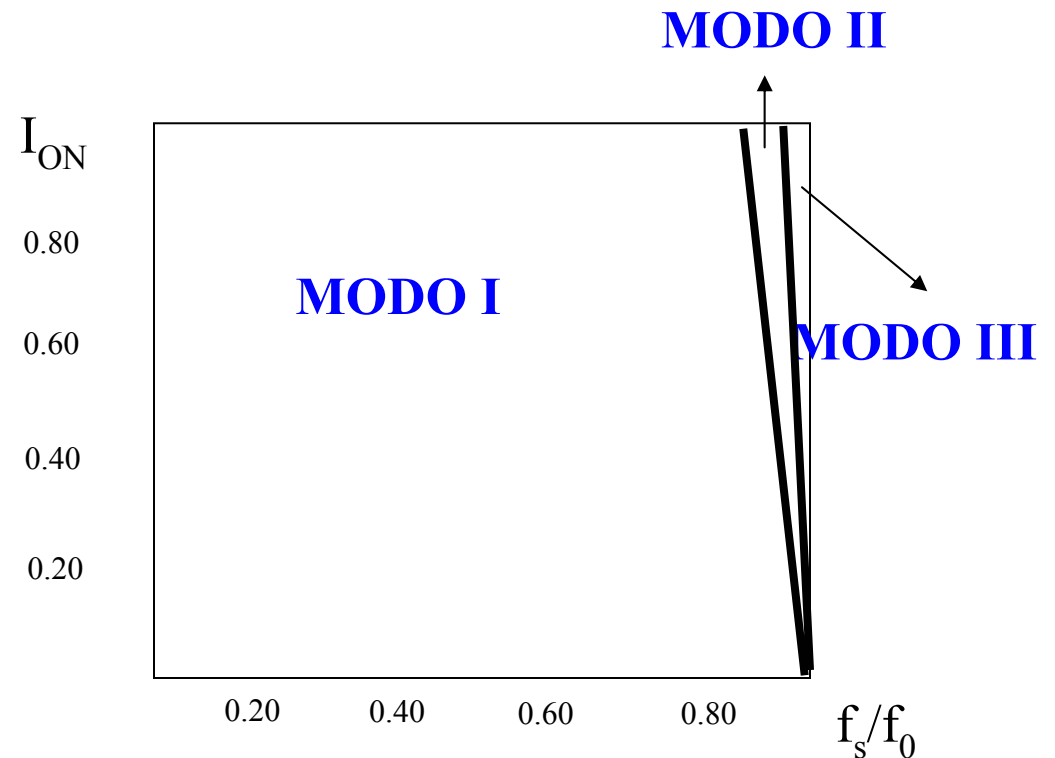
MODO IV

Perde-se ZCS

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

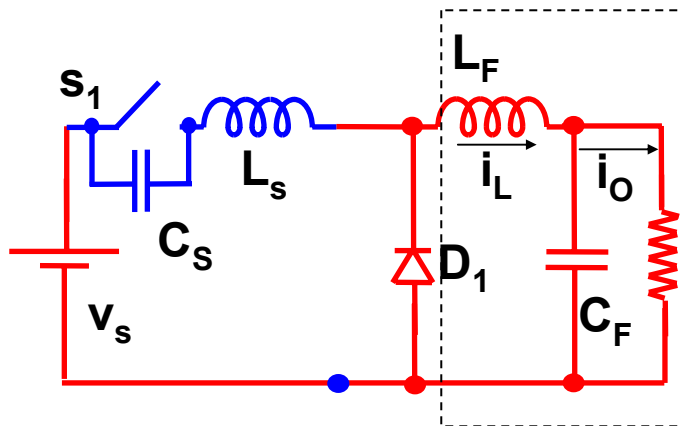


**Variação da corrente de saída
com a frequência (**operação em
onda completa**)**

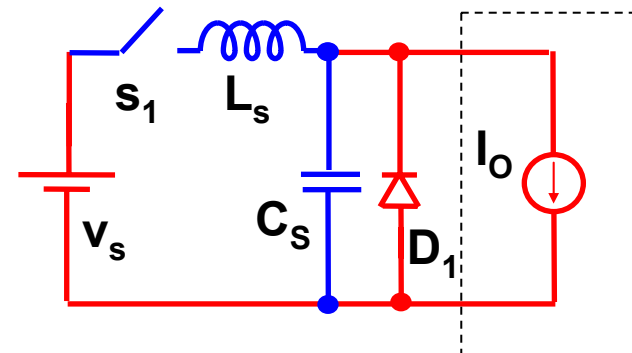


Conversor quasi-ressonante redutor com Comutação no **Z**ero da **T**ensão

“ZVS”



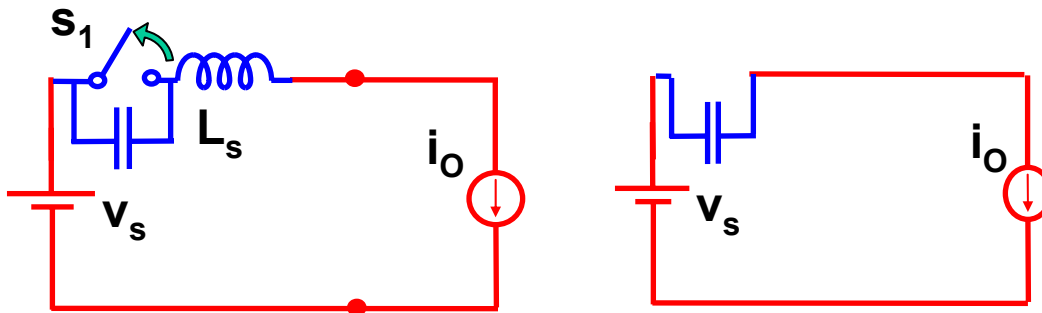
Esquema
eléctrico



Circuito
equivalente

Análise de regime permanente

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



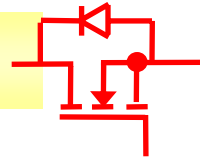
$$v_C(t) = \frac{I_O}{C_S} t \quad i_L(t) = I_O$$

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

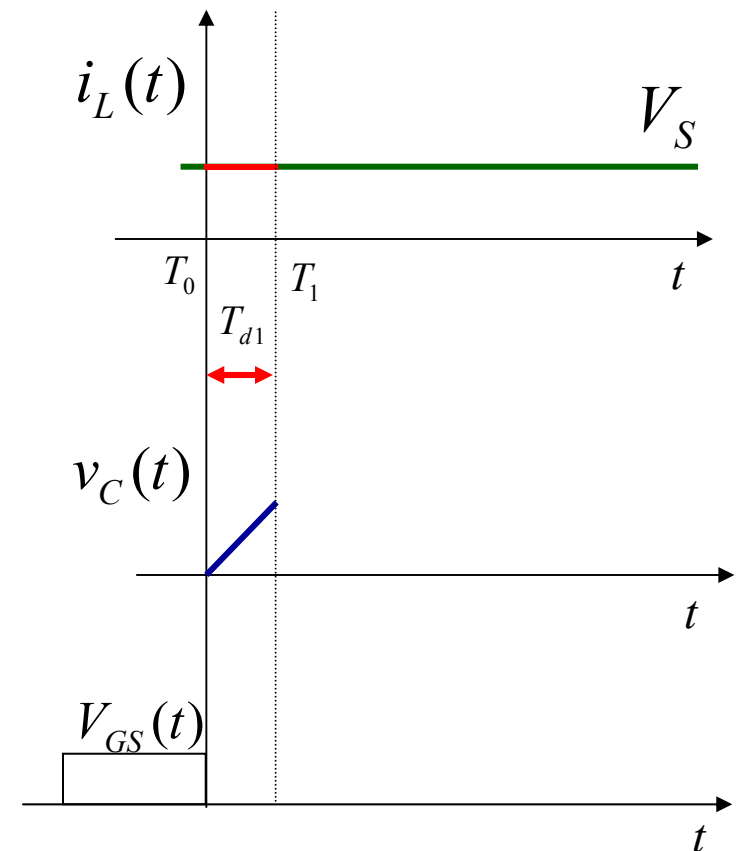
$$i_L(T_0) = I_O \quad \text{e} \quad i_L(T_1) = I_O$$

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

MEIA ONDA



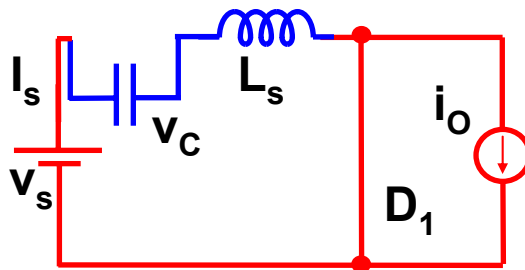
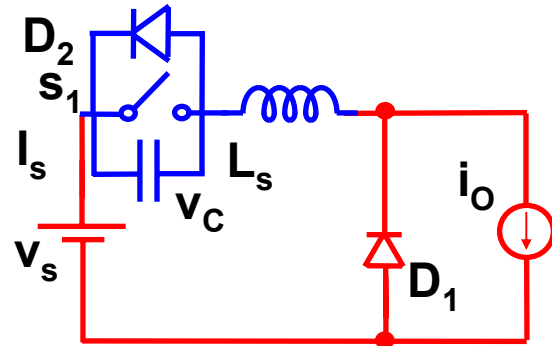
S_1 OFF e D_1 OFF



Fase II – Ressonante $T_1 < t < T_2$

S_1 OFF, D_2 OFF

D_1 ON



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

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

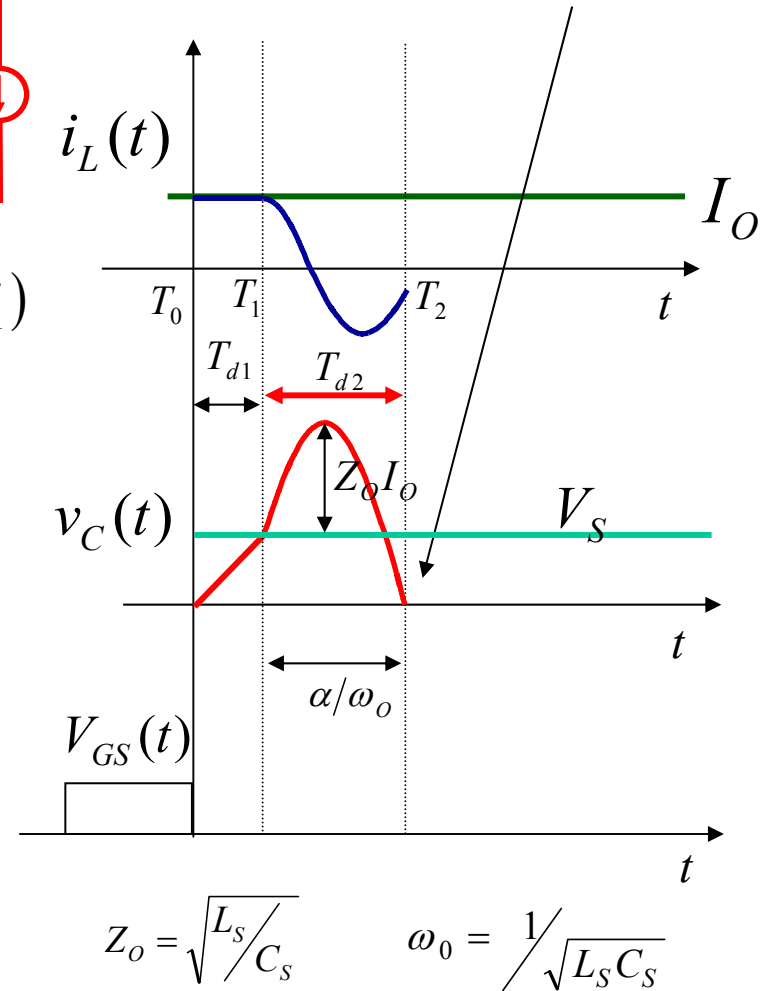
$$T_{d2} = T_2 - T_1 = \frac{\alpha}{\omega}$$

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

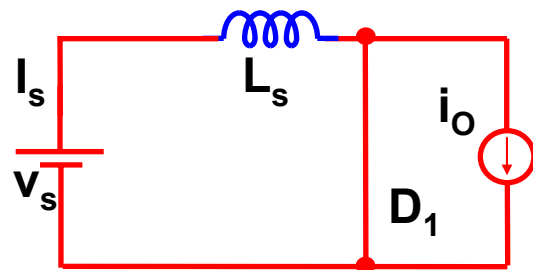
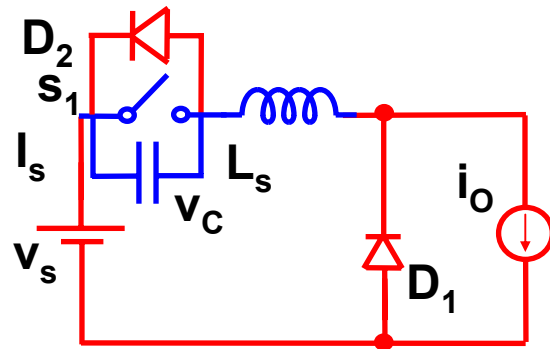
Condição de
comutação

$$V_s < Z_n I_o$$

“ZVS”



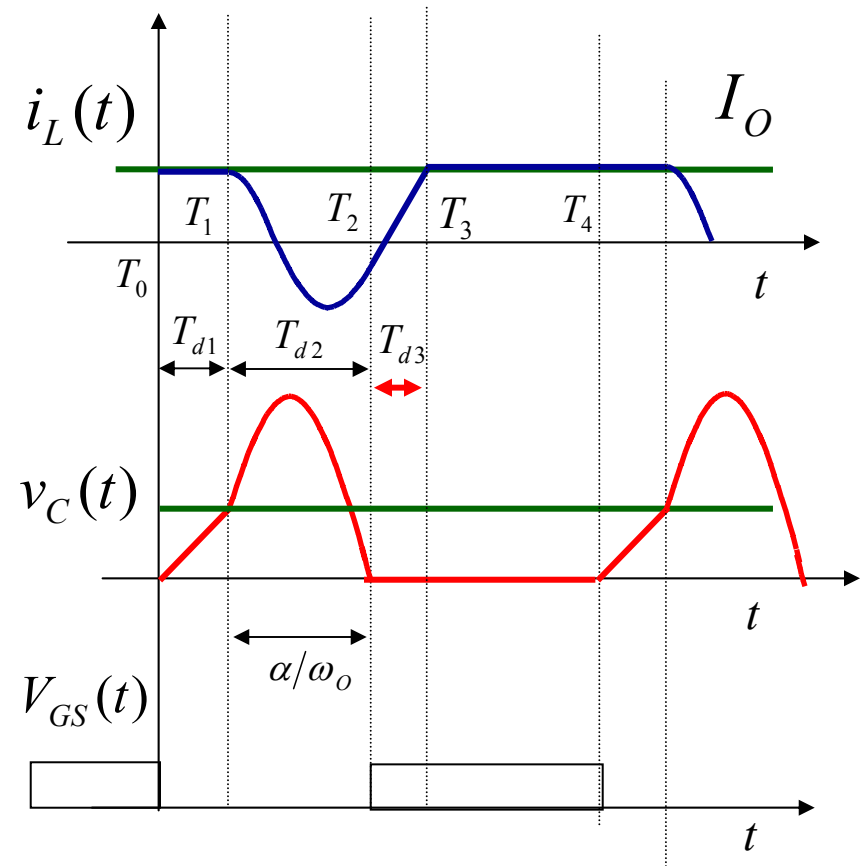
Fase III – Carga da bobina $T_2 < t < T_3$



$$v_C(T_2) = 0$$

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

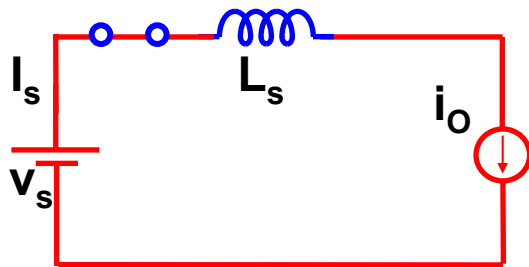
S_1 ON ou D_2 ON
 D_1 ON



Fase IV – Transferência de energia

$$T_3 < t < T_4$$

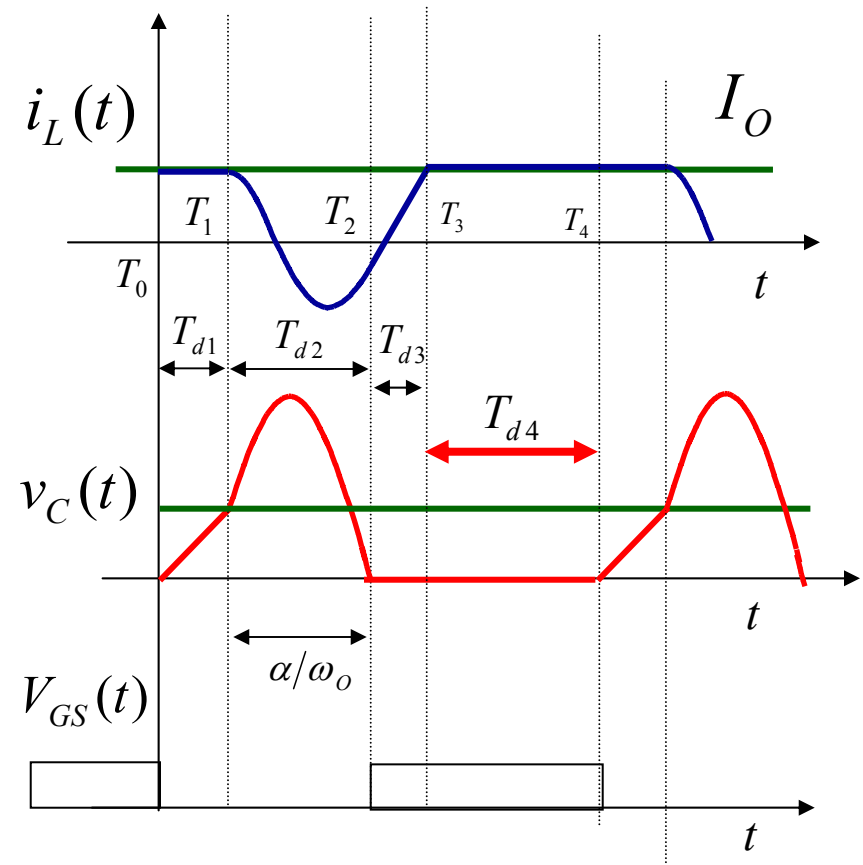
S₁ ON e D₁ OFF



$$v_C = 0$$

$$i_L = I_O$$

“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:  $W_o = \int_{T_0}^{T_s} V_o I_o dt = V_o I_o T_s \quad (2)$

Igualando (1) e (2):

Ganho de tensão em função da frequência de operação “ZVS”

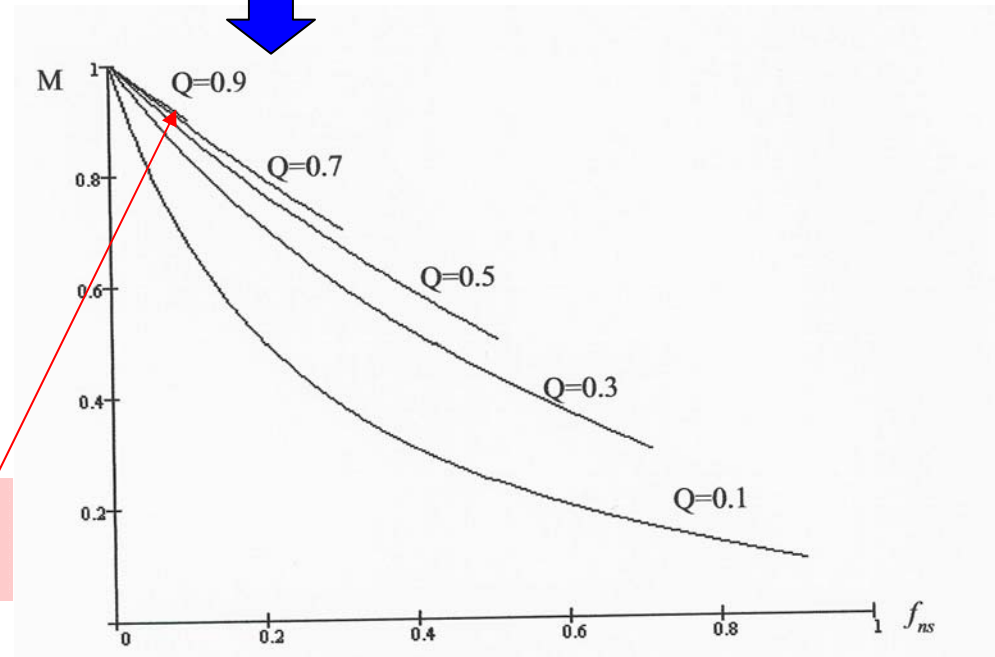
$$M = 1 - \frac{f_N}{2\pi} \left\{ \frac{M}{2Q} + \alpha + \frac{Q}{M} [1 - \cos \alpha] \right\}$$

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

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

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
$$i_{Qpico} = V_s/Z_o + I_o$$

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
$$V_{DSpico} = I_o Z_o + V_s$$

CONCLUSÕES

	ZCS	ZVS
<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