

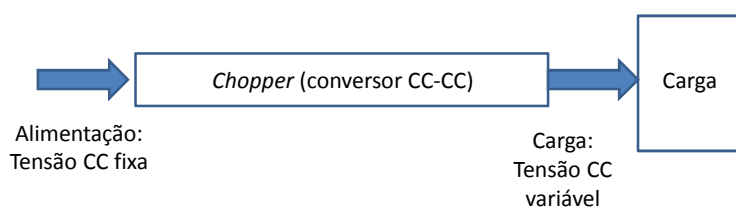
Capítulo 9

Choppers

Conversor CC-CC

Choppers

Introdução

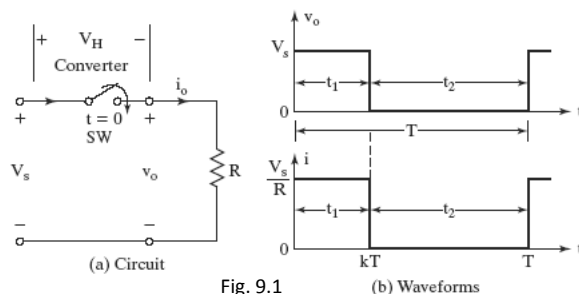


- **Equivalente** CC de um **transformador** CA
- A tensão de saída do conversor pode ser maior ou menor que a tensão de entrada
- Normalmente utilizados em alimentação de dispositivos eletromecânicos (motor CC, por exemplo)
- Muito usado em reguladores de tensão CC (fontes chaveadas)



Choppers

Princípio da operação abaixadora (STEP-DOWN)



Chave:
BJT,
MOSFET,
GTO,
SCR, etc.

Assumiremos **chave ideal**

$T = t_1 + t_2$ e $k = t_1/T \rightarrow k$ é denominado **ciclo de trabalho** e $f = 1/T$ a frequência de operação do *chopper*.

Tensão média (V_a):
$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^{t_1} v_o(t) dt = \frac{t_1}{T} V_s = f t_1 V_s = k V_s$$



Choppers

Princípio da operação abaixadora (STEP-DOWN)

Corrente média: $I_a = V_a/R = kV_s/R$

Tensão eficaz ($V_{o_{rms}}$):
$$V_{o_{rms}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^{kT} v_o^2(t) dt \right)^{1/2} = \sqrt{k} V_s$$

Supondo *chopper sem perdas*:

$$P_i = P_o = \frac{1}{T} \int_0^{kT} v_o(t) i_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{kT} \frac{v_o^2(t)}{R} dt = k \frac{V_s^2}{R}$$

Resistência efetiva de entrada, vista pela fonte:

$$R_i = \frac{V_s}{I_a} = \frac{V_s}{kV_s/R} = \frac{R}{k}$$

Operação em frequência constante: f (ou T) constante e t_1 é variado, assim k pode variar de 0 a 1



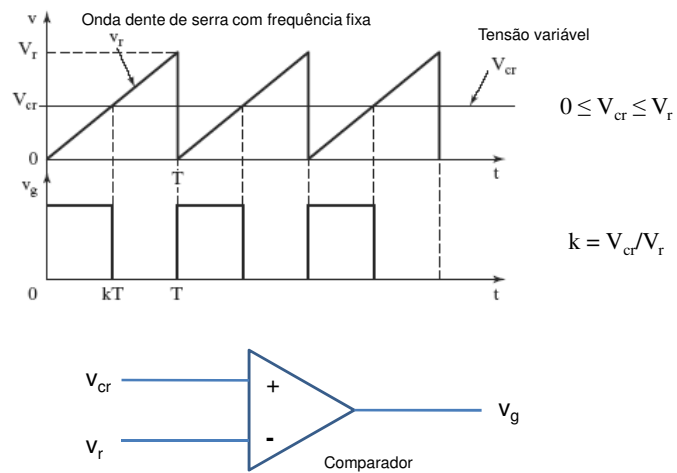
MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO: PWM
(pulse width modulation)



Choppers

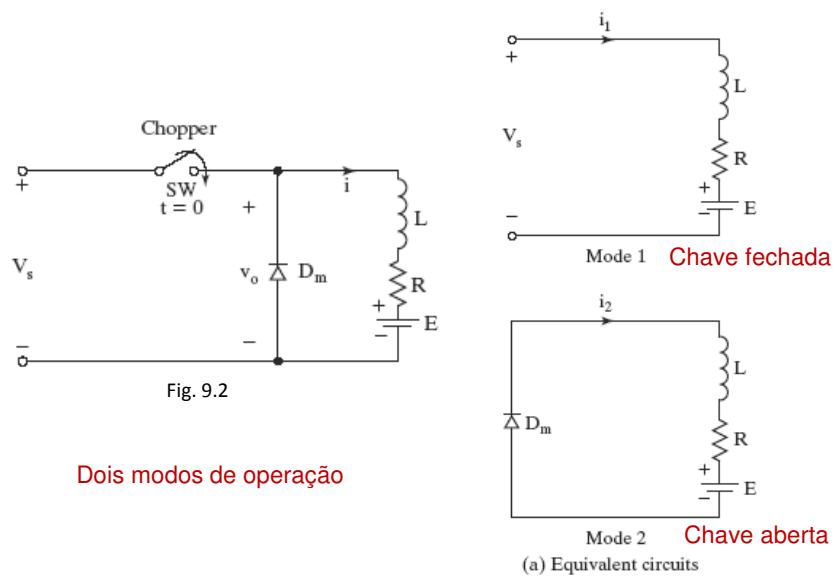
Princípio da operação abaixadora (STEP-DOWN)

Geração de um sinal PWM



Choppers

Chopper abaixador com carga RL



Choppers

Chopper abaixador com carga RL

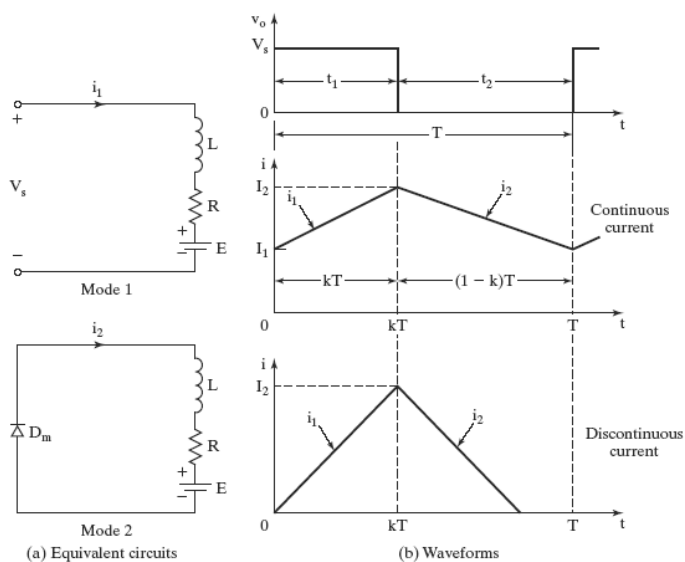


Fig. 9.3

 $L/R \gg T$ k pequeno e T relativamente grande

Na realidade as variações de corrente não são dadas por segmentos de retas

Choppers

Chopper abaixador com carga RL

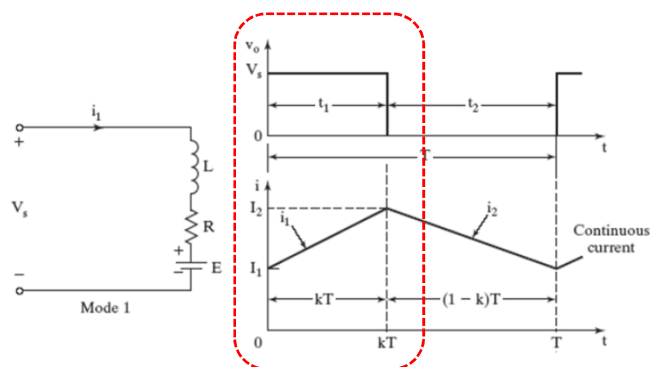
MODO 1:

$$V_s = Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} + E \quad \text{e seja } i_1(0) = I_1$$

$$i_1(t) = I_1 e^{-\frac{t}{L/R}} + \frac{V_s - E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right) \quad \text{p/ } 0 \leq t \leq (t_1 = kT)$$

$$i_1(t_1) = I_2$$

Se L/R for grande (comparado a kT) $\rightarrow$ A curva será quase uma reta



Choppers

Chopper abaixador com carga RL

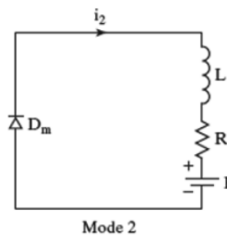
MODO 2:

Redefinindo a
origem

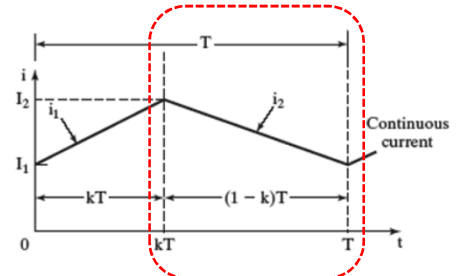
$$0 = Ri_2 + L \frac{di_2}{dt} + E \quad \text{e seja } i_2(0) = I_2$$

$$i_2(t) = I_2 e^{-\frac{t}{L/R}} - \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right) \quad \text{p/} \quad 0 \leq t \leq (1-k)T$$

$$i_2(t_2) = I_3$$

Em regime permanente $I_3 = I_1$ $I_1 > 0 \rightarrow$ Fluxo contínuo de corrente

Mode 2



Choppers

Chopper abaixador com carga RL

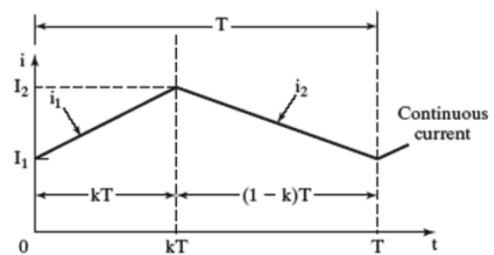
Ripple (ondulação):

$$I_2 = I_1 e^{\frac{kT}{L/R}} + \frac{V_s - E}{R} \left(1 - e^{\frac{kT}{L/R}} \right)$$

$$I_3 = I_1 = I_2 e^{-\frac{(1-k)T}{L/R}} - \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{(1-k)T}{L/R}} \right)$$

Por substituição determinam-se I_1 e I_2 e tem-se que $\Delta I = I_2 - I_1$

$$\Delta I = \frac{V_s}{R} \left(1 - e^{-\frac{kT}{L/R}} + e^{-\frac{T}{L/R}} - e^{-\frac{(1-k)T}{L/R}} \right) / \left(1 - e^{-\frac{T}{L/R}} \right)$$

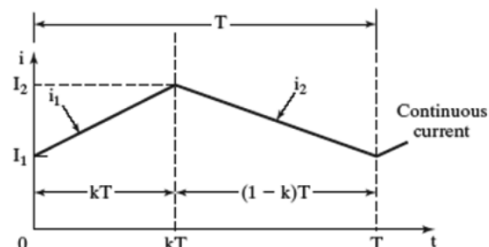
Máxima ondulação em função de k : $\frac{d(\Delta I)}{dk} = 0 \Rightarrow k = 0,5$ 

Choppers

Chopper abaixador com carga RL

Ripple (ondulação):

$$\Delta I = \frac{V_S}{R} \left(1 - e^{-\frac{kT}{L/R}} + e^{-\frac{T}{L/R}} - e^{-\frac{(1-k)T}{L/R}} \right) / \left(1 - e^{-\frac{T}{L/R}} \right)$$



Máxima ondulação em função de k : $\frac{d(\Delta I)}{dk} = 0 \Rightarrow k = 0,5$

$$\Delta I_{\max} = \frac{V_S}{R} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}} + e^{-\frac{T}{2\tau}} - e^{-\frac{T}{2\tau}} \right) / \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}} \right) \quad \text{onde } \tau = L/R$$

Quanto menor o T em relação a τ (fixo) menor o $\Delta I_{\max}$



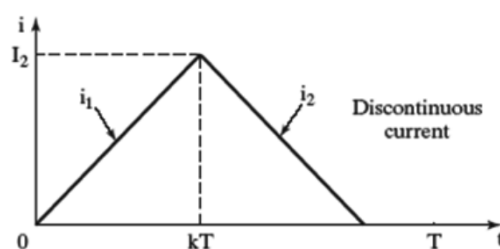
Choppers

Chopper abaixador com carga RL

Se k é pequeno ($t_2 \gg t_1$) e T é grande

→ **Fluxo descontínuo de corrente**

$$I_1 = 0 \Rightarrow i_1(t) = \frac{V_S - E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right) \quad \text{no modo 1}$$



No modo 2 $i_2(t)$ permanece com a mesma equação, mas $i_2(t)$ assume valor nulo para $t < t_2$



Choppers

Princípio da operação elevadora (STEP-UP)

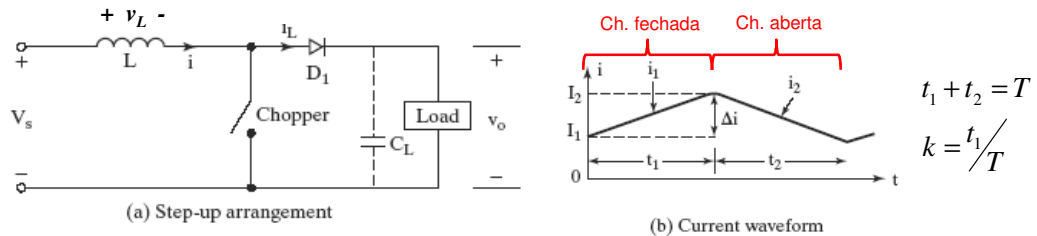


Fig. 9.4

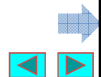
Ch. Fechada: $v_L = L \frac{di}{dt} \quad \Delta I = \frac{V_s}{L} t_1$

Ch. aberta: $v_o = V_s + L \frac{\Delta I}{t_2} = V_s \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)$

$$= V_s \frac{1}{1 - k}$$

Capacitor em paralelo com a carga: $v_o \rightarrow V_a$
Que é uma média (cte)

Maior $k \rightarrow$ maior sensibilidade de v_o/V_s



Choppers

Princípio da operação elevadora (STEP-UP)

Transferência de energia de uma fonte para outra (ex. bateria)

Modo 1:

$$V_s = L \frac{di_1}{dt} \quad i_1(t) = \frac{V_s}{L} t + I_1$$

$$\frac{di_1}{dt} > 0 \quad V_s > 0$$

Modo 2:

$$V_s = L \frac{di_2}{dt} + E \quad i_2(t) = \frac{V_s - E}{L} t + I_2$$

$$\frac{di_2}{dt} < 0 \quad V_s < E$$

Transferência controlada de energia
 $0 < V_s < E$

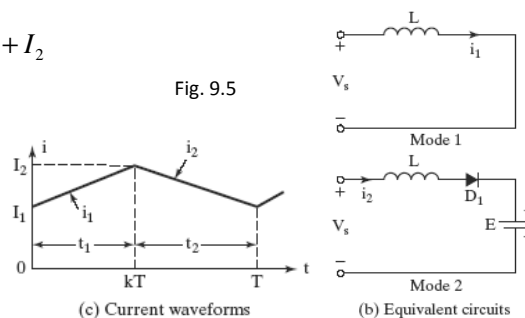
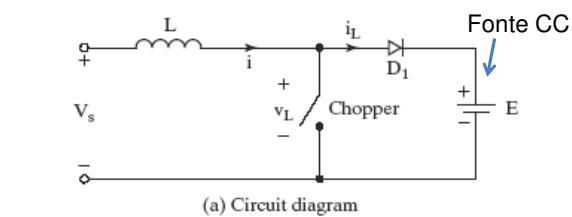
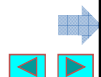


Fig. 9.5



Choppers

Parâmetro de desempenho

$$k_{\min} \leq k \leq k_{\max} \quad \text{onde} \quad k_{\min} > 0 \text{ e } k_{\max} < 1$$

→ Devido aos tempos de chaveamento

Com o aumento de f :

→ menor "ripple" de corrente, mas maior dissipação de potência na chave.



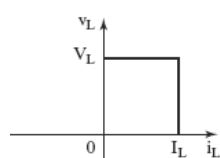
Choppers

Classificação dos choppers

Fig. 9.6

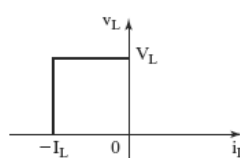
Classe A
retificador

Ex: chopper
abaixador



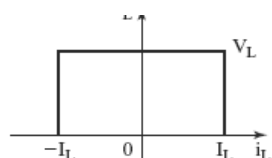
(a) First quadrant converter

Classe B
inversor



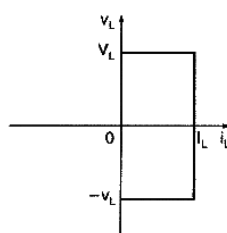
(b) Second quadrant converter

Classe C

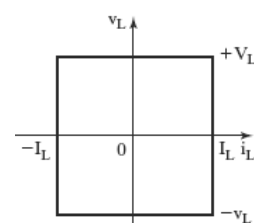


(c) First and Second quadrant converter

Classe D



Classe E



(e) Four-quadrant converter



Choppers

Classificação dos choppers – Ex. chopper classe B

Parte da carga (ex. fcm de uma máquina CC)

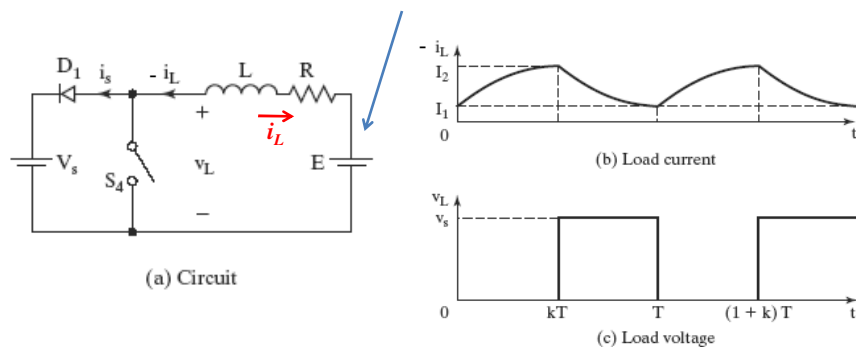


Fig. 9.7

Choppers

Classificação dos choppers – Ex. chopper classe B

$$0 = L \frac{di_L}{dt} + Ri_L + E \quad \text{Chave ligada}$$

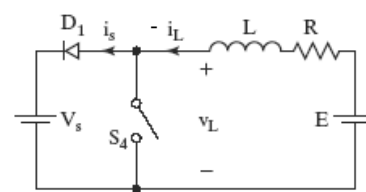
$$i_L(t) = I_1 e^{-tR/L} - \frac{E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

$$\text{Em } t = t_1 = kT \quad i_L(t = t_1 = kT) = I_2$$

$$V_s = Ri_L + L \frac{di_L}{dt} + E \quad \text{Chave desligada}$$

$$i_L(t) = I_2 e^{-tR/L} + \frac{V_s - E}{R} (1 - e^{-tR/L})$$

$$\text{Em } t = t_2 = (1-k)T \quad i_L(t = t_2 = (1-k)T) = I_1$$



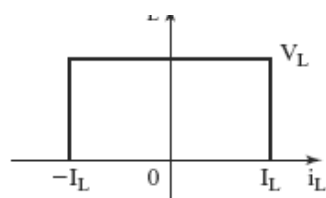
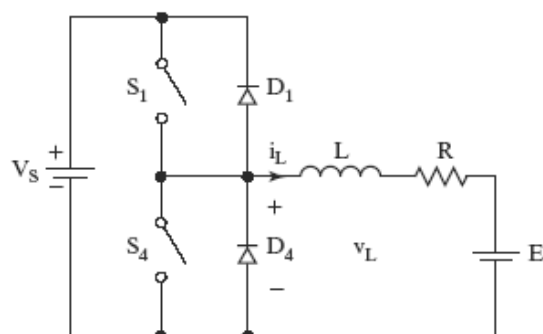
(a) Circuit

Para corrente que não se anula

Choppers

Classificação dos choppers –Classe C

- S1 e D4 operam como classe A
- S4 e D1 operam como classe B



(c) First and Second quadrant converter

Fig. 9.8

Choppers

Classificação dos choppers –Classe D

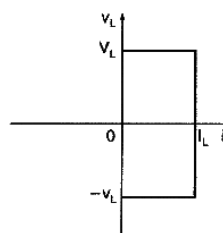
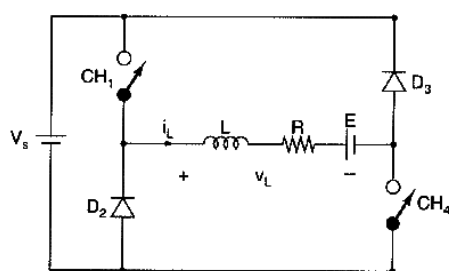


Fig. 9.9

Com Ch1 e Ch4 fechadas i_L é positiva

Com Ch1 e Ch4 abertas i_L continua positiva (carga indutiva), pois D2 e D3 conduzem, mas a tensão sobre a carga se torna negativa

Choppers

Classificação dos choppers – Classe E

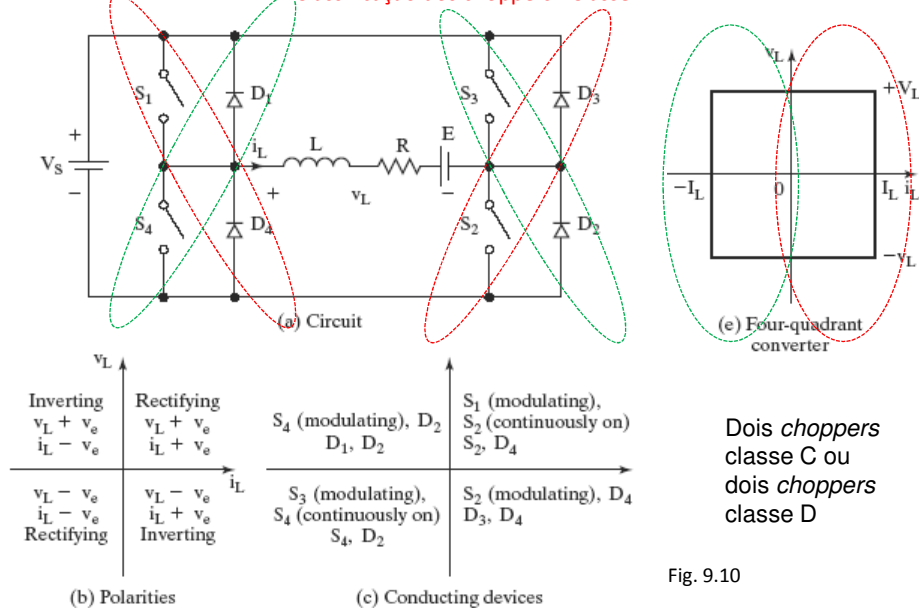
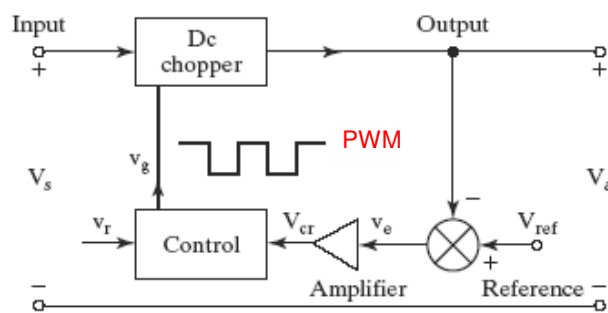


Fig. 9.10

Choppers

Reguladores chaveados



Saída contém harmônicas que podem ser filtradas

Topologias básicas:

- Regulador Buck (abaixador)
- Regulador Boost (elevador)
- Regulador Buck-Boost
- Regulador Cúk

Chaves:

- BJT
- MOSFET
- IGBT

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck

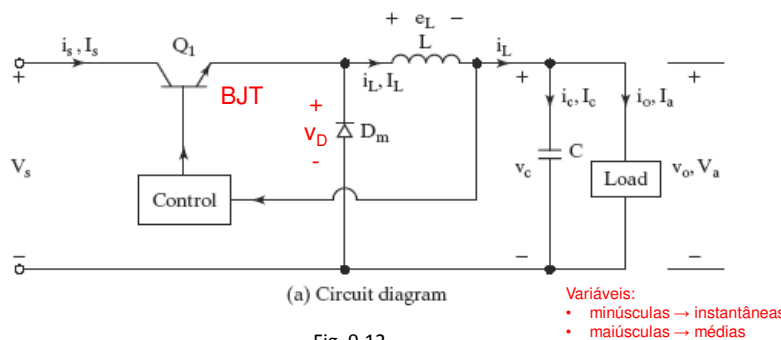


Fig. 9.12

Tensão média de saída (V_a) é menor que a de entrada V_s

É um **chopper abaixador**

L e C formam um filtro

Modo 1: Q_1 ligado por t_1 segundos

Modo 2: Q_1 desligado por t_2 segundos

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck

Modo 1: $e_L = L \frac{di}{dt}$

corrente de I_1 a I_2 por t_1 seg. $\Rightarrow \Delta I = I_2 - I_1$

$$V_s - V_a = L \frac{\Delta I}{t_1} \Rightarrow t_1 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s - V_a}$$

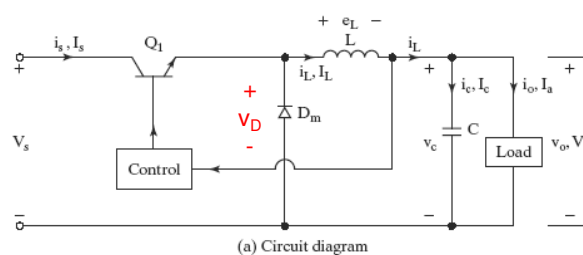
Modo 2:

$$-V_a = L \frac{I_1 - I_2}{t_2} = L \frac{-\Delta I}{t_2} \Rightarrow t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_a}$$

Ripple de corrente ΔI :

$$\Delta I = \frac{(V_s - V_a)t_1}{L} = \frac{V_a t_2}{L} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 = kT \\ t_2 = (1-k)T \end{array} \right. \Rightarrow V_a = V_s \frac{t_1}{T} \Rightarrow V_a = kV_s$$

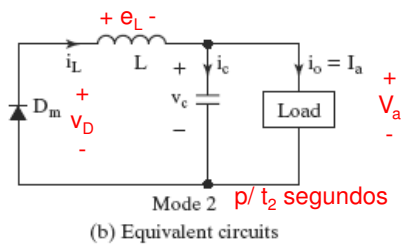
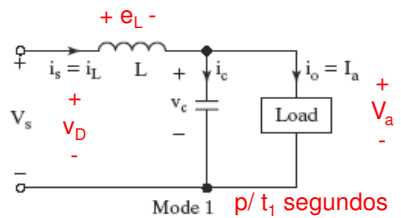
Abaixador de tensão



Ver fig. 9.12

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck



(b) Equivalent circuits

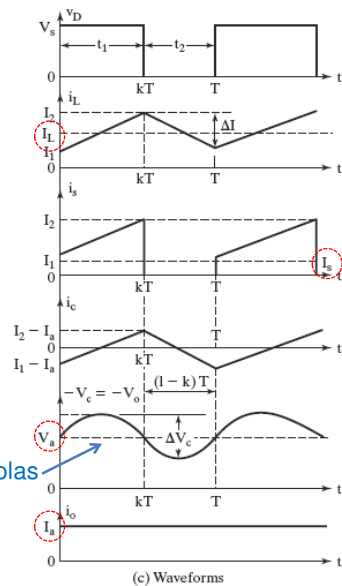


Fig. 9.12

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck

Supondo 100% de rendimento (sem perdas):

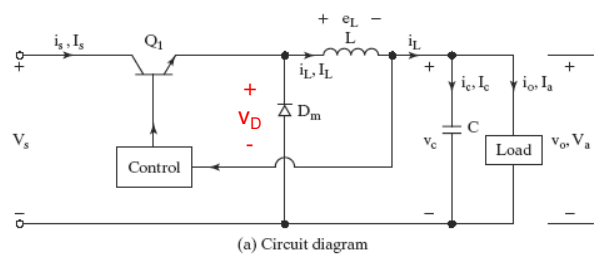
$$V_S I_S = V_a I_a = k V_S I_a \Rightarrow I_S = k I_a$$

Período de chaveamento:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_S - V_a} + \frac{\Delta I \cdot L}{V_a} = \frac{\Delta I \cdot L \cdot V_S}{V_a (V_S - V_a)}$$

$$\Delta I = \frac{V_a (V_S - V_a)}{f L V_S} \Rightarrow \Delta I = \frac{k V_S (1 - k)}{f L}$$

$$f \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow \quad \text{e} \quad L \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow$$



Ver fig. 9.12

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck

Variáveis corrente e tensão no capacitor:

No indutor $i_L = i_C + i_O \rightarrow$ Se ΔI_O for desprezível $\rightarrow \Delta I_C = \Delta I_L$

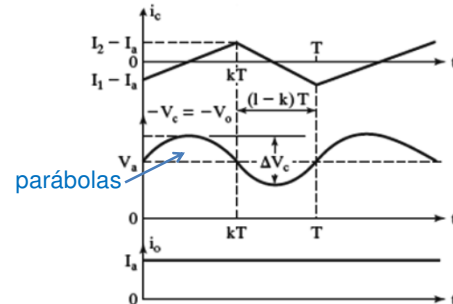
$$I_S = \frac{(I_1 + I_2)kT}{2} = \frac{(I_1 + I_2)}{2}k$$

$$I_L = \frac{1}{T} \left[\frac{(I_1 + I_2)}{2}kT + \frac{(I_1 + I_2)}{2}(1-k)T \right] = \frac{(I_1 + I_2)}{2}$$

$$I_L = I_C + I_a \Rightarrow I_C = I_L - I_a = I_L - \frac{I_S}{k}$$

$$I_C = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{I_1 + I_2}{2} = 0 \Rightarrow I_L = I_a$$

$$I_C = 0$$



Observe: $I_a = I_L$

$$\Rightarrow I_a = I_L = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck

Variáveis corrente e tensão no capacitor:

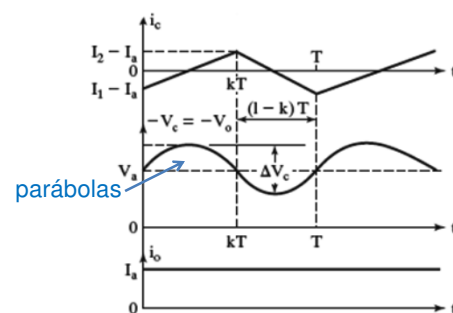
Entre $t = 0$ e $t = t_1/2$

$$\begin{aligned} v_C(t_1/2) &= \frac{1}{C} \int_0^{t_1/2} \left\{ (I_1 - I_L) + \frac{\Delta I}{t_1} t \right\} dt + V_a = \\ &= \frac{1}{2C} (I_1 - I_L) t_1 + \frac{1}{C} \frac{\Delta I t_1}{8} + V_a \end{aligned}$$

Entre $t = 0$ e $t = t_2/2$ (redefinindo origem de tempo)

$$\begin{aligned} v_C(t_2/2) &= \frac{1}{C} \int_0^{t_2/2} \left\{ (I_2 - I_L) - \frac{\Delta I}{t_2} t \right\} dt + V_a = \\ &= \frac{1}{2C} (I_2 - I_L) t_2 - \frac{1}{C} \frac{\Delta I t_2}{8} + V_a \end{aligned}$$

$$\Delta v_C = v_C(t_2/2) - v_C(t_1/2) = \frac{\Delta I T}{4C} - \frac{\Delta I T}{8C} = \frac{\Delta I T}{8C} = \frac{\Delta I}{8fC} \Rightarrow \Delta v_C = \frac{V_S k(1-k)}{8f^2 LC}$$



$$\begin{cases} f \uparrow \Rightarrow \Delta v_C \downarrow \\ L \uparrow \Rightarrow \Delta v_C \downarrow \\ C \uparrow \Rightarrow \Delta v_C \downarrow \end{cases}$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Boost

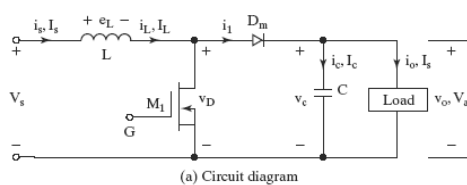
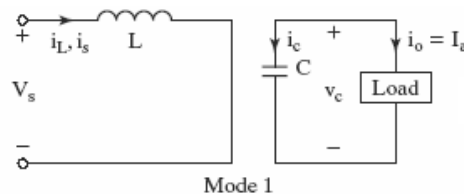


Fig. 9.13



Modo 1: $e_L = L \frac{di}{dt}$

corrente de I_1 a I_2 por t_1 seg. $\Rightarrow \Delta I = I_2 - I_1$

$$V_s = L \frac{\Delta I}{t_1} \Rightarrow t_1 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s}$$



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Boost

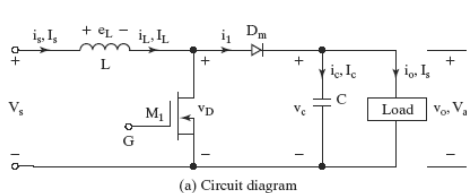
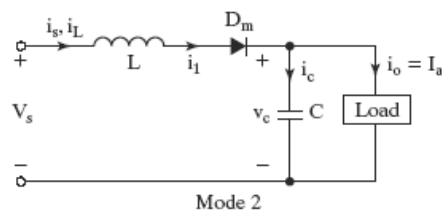


Fig. 9.13



(b) Equivalent circuits

Modo 2:

$$V_s - V_a = L \frac{I_1 - I_2}{t_2} = L \frac{-\Delta I}{t_2} \Rightarrow t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_a - V_s}$$

Ripple de corrente ΔI :

$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{(V_a - V_s) t_2}{L} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 = kT \\ t_2 = (1-k)T \end{array} \right. \Rightarrow V_a = V_s \frac{1}{1-k}$$

Elevador de tensão



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Boost

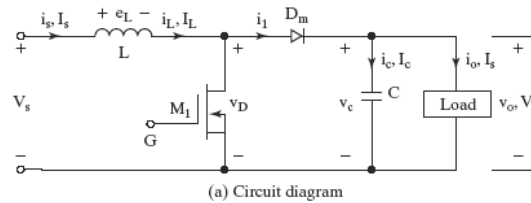


Fig. 9.13

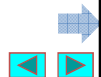
Supondo 100% de rendimento (sem perdas):

$$V_s I_s = V_a I_a = \frac{V_s I_a}{(1-k)} \Rightarrow I_a = (1-k) I_s$$

Período de chaveamento:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s} + \frac{\Delta I \cdot L}{V_a - V_s} = \frac{\Delta I \cdot L \cdot V_a}{V_s (V_a - V_s)}$$

$$\Delta I = \frac{V_s (V_a - V_s)}{f L V_a} \Rightarrow \Delta I = \frac{k V_s}{f L} \quad f \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow \quad e \quad L \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow$$

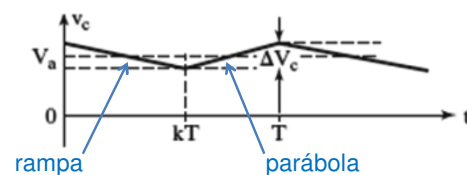


Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Boost

No capacitor, por t_1 segundos:

$$-\Delta v_c = v_c(t_1) - v_c(0) = \frac{1}{C} \int_0^{t_1} -I_a dt \Rightarrow \Delta v_c = \frac{I_a t_1}{C}$$



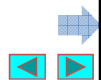
mas

$$V_s t_1 = (V_a - V_s) t_2 = (V_a - V_s)(T - t_1) \Rightarrow t_1 = \frac{(V_a - V_s) T}{V_a} = \frac{V_a - V_s}{V_a f}$$

logo

$$\Delta v_c = \frac{I_a (V_a - V_s)}{V_a f C} = \frac{I_a \left(1 - \frac{V_s}{V_a}\right)}{f C} \Rightarrow \Delta v_c = \frac{I_a k}{f C}$$

$$f \uparrow \Rightarrow \Delta v_c \downarrow \quad e \quad C \uparrow \Rightarrow \Delta v_c \downarrow$$



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Boost

Tensão de saída maior que a de entrada

$$V_a = \frac{V_s}{1-k} \quad I_s = \frac{I_a}{1-k} \quad \Delta I = \frac{V_s k}{fL}$$

$$\Delta V_c = \frac{I_a (V_a - V_s)}{V_a fC} = \frac{I_a k}{fC}$$

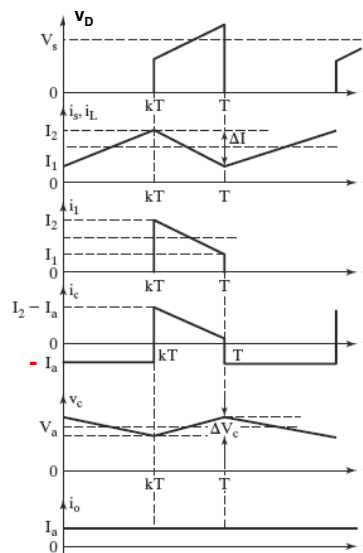
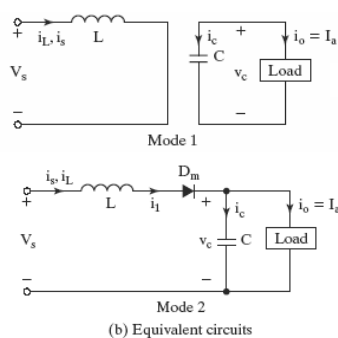


Fig. 9.13

(c) Waveforms

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost

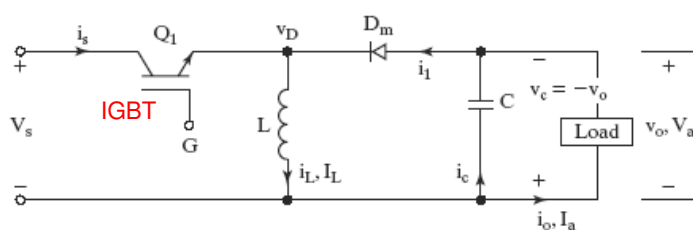
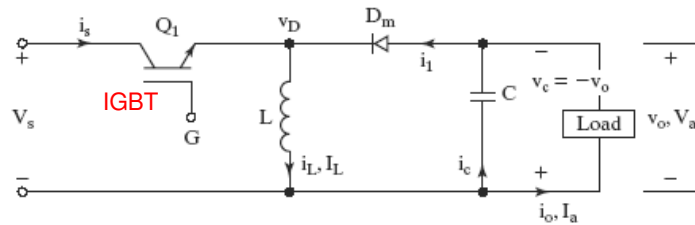


Fig. 9.14

- O módulo da tensão média de saída, $|V_a|$, é maior ou menor que o módulo da tensão média de entrada, $|V_s|$
- É um **chopper elevador ou abaixador de tensão**
- Polaridade de V_a oposta à de V_s
- Modo 1: Q_1 ligado por t_1 segundos
- Modo 2: Q_1 desligado por t_2 segundos

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(a) Circuit diagram

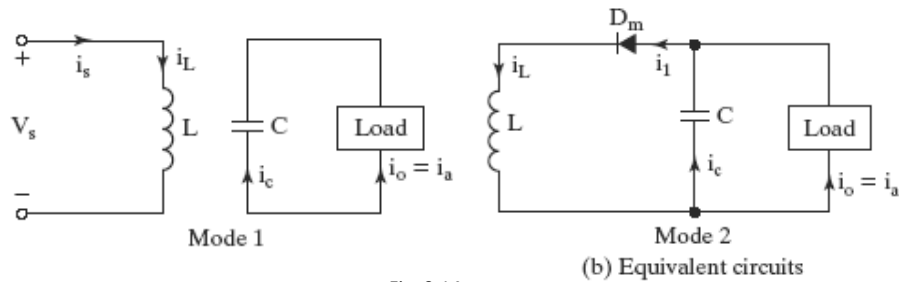
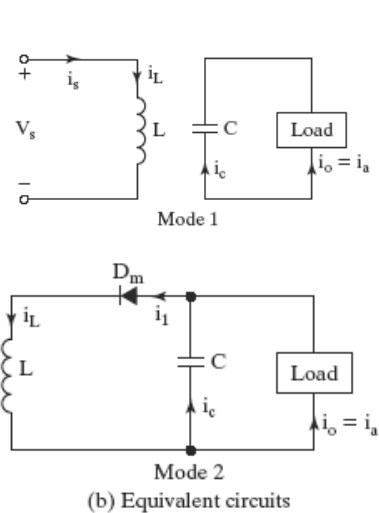


Fig. 9.14

Choppers

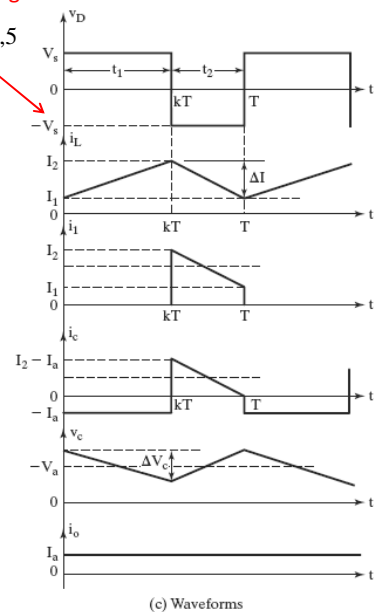
Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(b) Equivalent circuits

Obs. $i_s(t)$ é descontínua

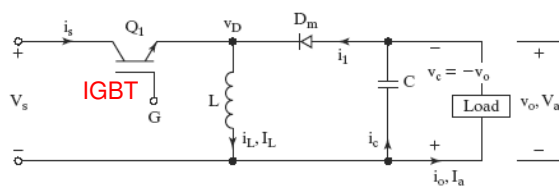
Fig. 9.14

 $p/k = 0,5$ 

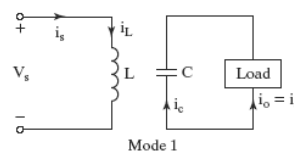
(c) Waveforms

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(a) Circuit diagram



Mode 1

Modo 1: $e_L = L \frac{di}{dt}$

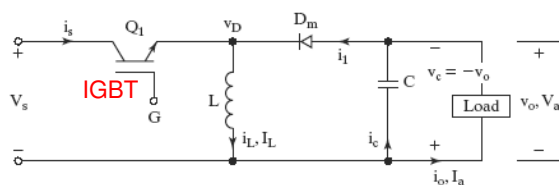
corrente de I_1 a I_2 por t_1 seg. $\Rightarrow \Delta I = I_2 - I_1$

$$V_s = L \frac{\Delta I}{t_1} \Rightarrow t_1 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s}$$

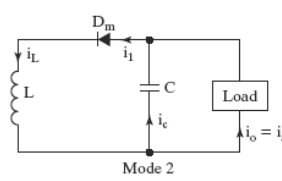


Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(a) Circuit diagram



(b) Equivalent circuits

Modo 2:

$$V_a = L \frac{I_1 - I_2}{t_2} = -L \frac{\Delta I}{t_2} \Rightarrow t_2 = \frac{-\Delta I \cdot L}{V_a}$$

Ripple de corrente ΔI :

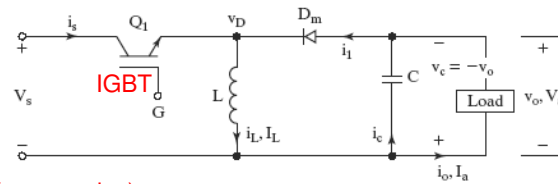
$$\Delta I = \frac{V_s t_1}{L} = \frac{-V_a t_2}{L} \quad \left\{ \begin{array}{l} t_1 = kT \\ t_2 = (1-k)T \end{array} \right. \Rightarrow V_a = -\frac{k}{1-k} V_s$$

Elevador ou abaixador de tensão



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(a) Circuit diagram

Supondo 100% de rendimento (sem perdas):

$$V_s I_s = -V_a I_a = V_s I_a k / (1-k) \Rightarrow I_a = \frac{(1-k)}{k} I_s \quad \text{Obs. } i_s(t) \text{ é descontínua.}$$

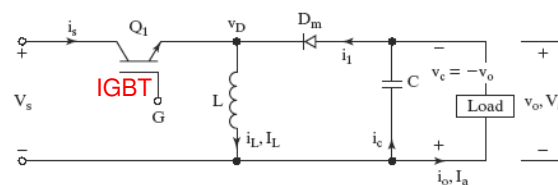
Período de chaveamento:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I \cdot L}{V_s} - \frac{\Delta I \cdot L}{V_a} = \frac{\Delta I \cdot L \cdot (V_a - V_s)}{V_s V_a}$$

$$\Delta I = \frac{V_a V_s}{f L (V_a - V_s)} = \frac{V_s}{f L \left(1 + \frac{1-k}{k}\right)} \Rightarrow \Delta I = \frac{k V_s}{f L} \quad f \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow \quad \text{e} \quad L \uparrow \Rightarrow \Delta I \downarrow$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost



(a) Circuit diagram

De 0 a t_1 segundos (Q_1 conduz) $\rightarrow i_c = -I_a$

$$\Delta V_c = -\frac{1}{C} \int_0^{t_1} i_c dt = -\frac{1}{C} I_a t \Big|_0^{t_1} \Rightarrow \Delta V_c = \frac{I_a t_1}{C}$$

mas, $V_s t_1 = -V_a t_2 = -V_a (T - t_1) \Rightarrow V_s t_1 = -V_a T + V_a t_1 \Rightarrow t_1 = \frac{V_a T}{V_a - V_s} = \frac{V_a}{f(V_a - V_s)}$

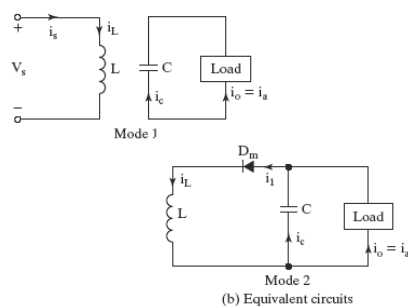
$$\Delta V_c = \frac{I_a V_a}{f C (V_a - V_s)} \Rightarrow \Delta V_c = \frac{I_a k}{f C} \quad f \uparrow \Rightarrow \Delta V_c \downarrow \quad \text{e} \quad C \uparrow \Rightarrow \Delta V_c \downarrow$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Buck-Boost

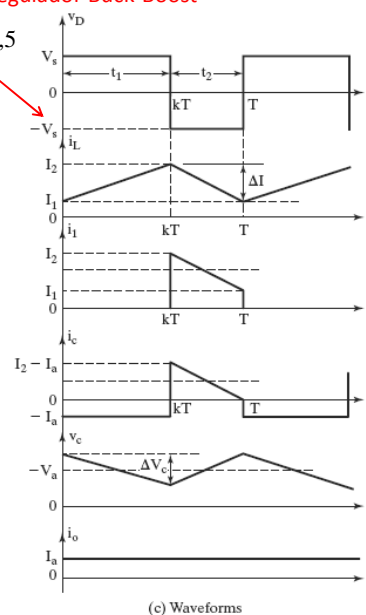
$$V_a = \frac{-kV_s}{1-k} \quad I_s = \frac{kI_a}{1-k} \quad \Delta I = \frac{V_s k}{fL}$$

$$\Delta V_C = \frac{I_a V_a}{(V_a - V_s) fC} = \frac{I_a k}{fC}$$



Obs. $i_s(t)$ é descontínua

Fig. 9.14



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk

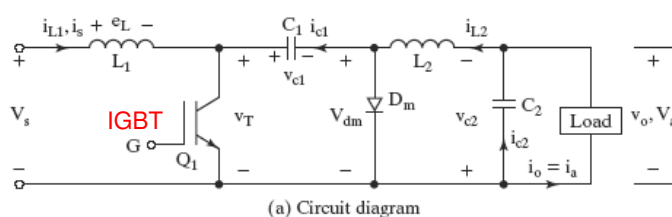
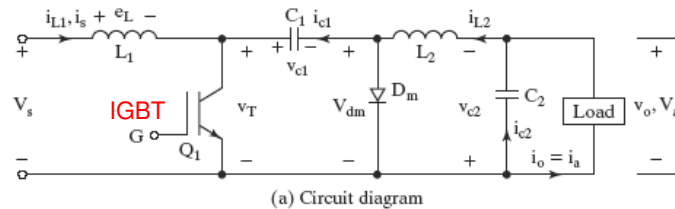


Fig. 9.15

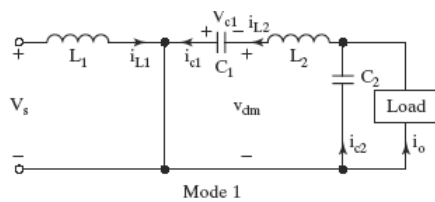
- A corrente $i_s(t)$ será **não descontínua** (contrário ao observado no buck-boost).
- O módulo da tensão média de saída, $|V_a|$, é maior ou menor que o módulo da tensão média de entrada, $|V_s|$
- É um **chopper elevador ou abaixador de tensão**
- Polaridade de V_a oposta à de V_s
- Modo 1: Q_1 ligado por t_1 segundos
- Modo 2: Q_1 desligado por t_2 segundos

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk

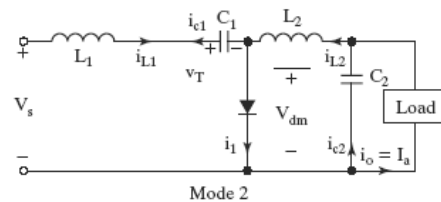


Inicialmente: Q_1 desligado, C_1 se carrega.



Modo 1:

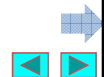
$Q_1 \rightarrow$ saturado de $t = 0$ até $t = t_1$ seg.
 $C_1 \rightarrow$ polariza inversamente D_m e se descarrega em C_2 , L_2 e carga



(b) Equivalent circuits

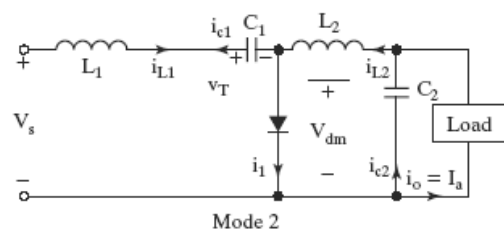
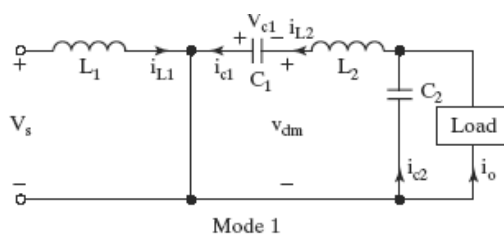
Modo 2:

$Q_1 \rightarrow$ cortado de $t = t_1$ até $t = t_1 + t_2$ seg.
 $C_1 \rightarrow$ é carregado (D_m conduz)

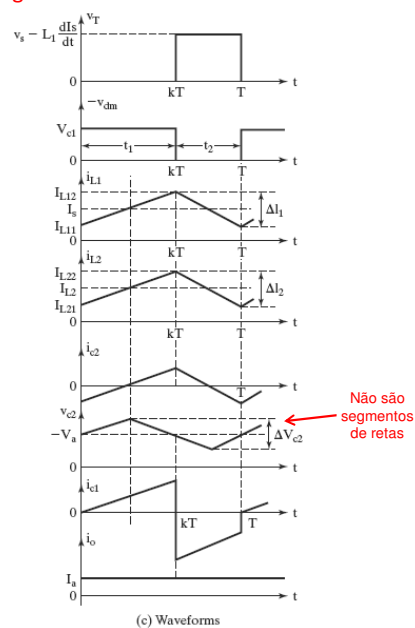


Choppers

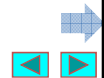
Reguladores chaveados – Regulador Cúk



(b) Equivalent circuits

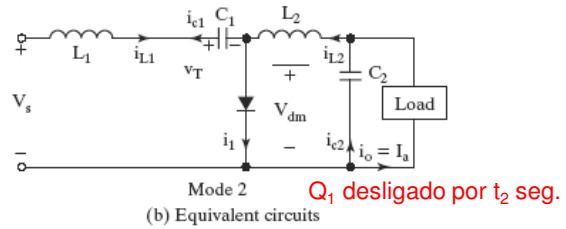
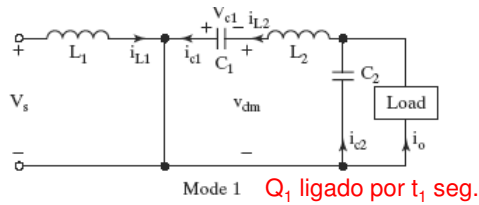


Não são segmentos de retas



Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk



Análise:

$$V_s = L_1 \frac{I_{L12} - I_{L11}}{t_1} = L_1 \frac{\Delta I_1}{t_1} \Rightarrow t_1 = \frac{L_1 \Delta I_1}{V_s}$$

Devido a C_1 , carregado por t_2 seg.

$$V_s - V_{C1} = -L_1 \frac{\Delta I_1}{t_2} \Rightarrow t_2 = -\frac{L_1 \Delta I_1}{V_s - V_{C1}}$$

 $V_{C1} \rightarrow$ tensão média em $C1$

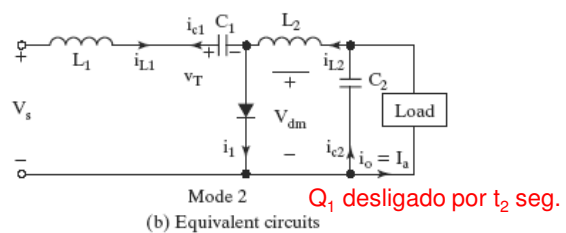
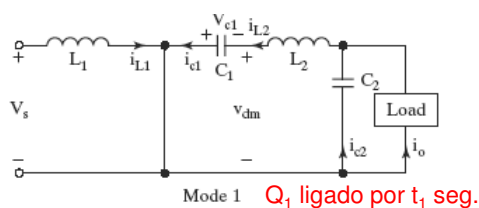
Assim,

$$\Delta I_1 = \frac{V_s t_1}{L_1} = \frac{-(V_s - V_{C1}) t_2}{L_1} \begin{cases} t_1 = kT \\ t_2 = (1-k)T \end{cases}$$

$$V_{C1} = \frac{V_s}{1-k} \quad (\text{com } V_{C1} > V_s)$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk

Determinar V_a em função de V_{C1} Durante t_1 seg:

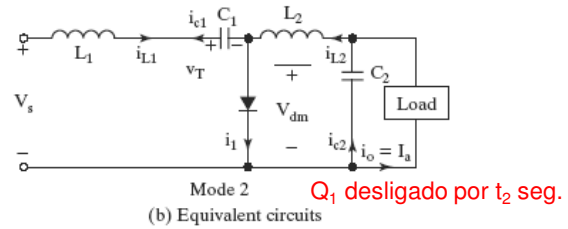
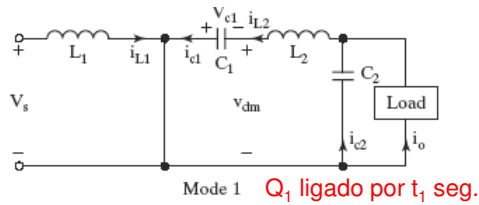
$$V_a - (-V_{C1}) = V_{C1} + V_a = L_2 \frac{I_{L22} - I_{L21}}{t_1} = L_2 \frac{\Delta I_2}{t_1} \Rightarrow t_1 = \frac{L_2 \Delta I_2}{V_{C1} + V_a}$$

Durante t_2 seg:

$$V_a = -L_2 \frac{\Delta I_2}{t_2} \Rightarrow t_2 = -\frac{L_2 \Delta I_2}{V_a}$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk



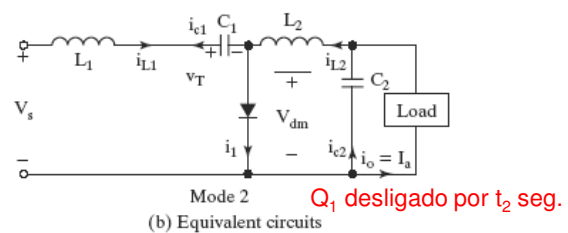
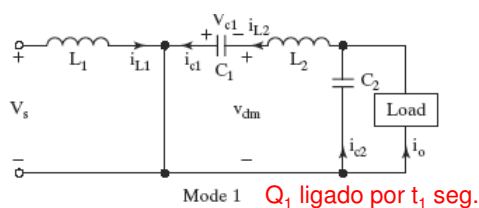
$$\Delta I_2 = \frac{(V_{C1} + V_a)t_1}{L_2} = -\frac{V_a t_2}{L_2} \quad \begin{cases} t_1 = kT \\ t_2 = (1-k)T \end{cases} \Rightarrow V_{C1} = -\frac{V_a}{k}$$

Como $V_{C1} = \frac{V_s}{1-k} \Rightarrow V_a = -V_s \frac{k}{1-k}$

Sem perdas de energia: $V_s I_s = -V_a I_a = V_s \frac{k}{1-k} I_a \Rightarrow I_a = I_s \frac{1-k}{k}$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk



Período de chaveamento:

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I_1 L_1}{V_s} - \frac{\Delta I_1 L_1}{V_s - V_{C1}} = \frac{-V_{C1} \Delta I_1 L_1}{V_s (V_s - V_{C1})} \Rightarrow \Delta I_1 = \frac{-V_s (V_s - V_{C1})}{f V_{C1} L_1} \Rightarrow \Delta I_1 = \frac{k V_s}{f L_1}$$

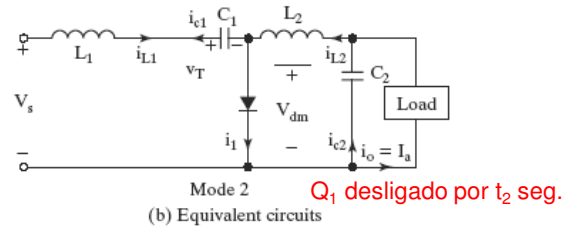
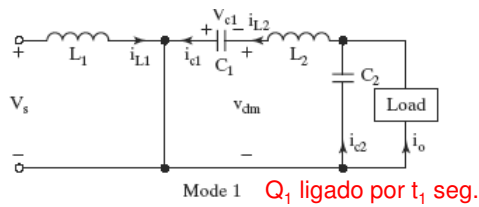
ou

$$T = \frac{1}{f} = t_1 + t_2 = \frac{\Delta I_2 L_2}{V_{C1} + V_a} - \frac{\Delta I_2 L_2}{V_a} = \frac{-V_{C1} \Delta I_2 L_2}{V_a (V_{C1} + V_a)} \Rightarrow \Delta I_2 = -\frac{V_a (V_{C1} + V_a)}{f V_{C1} L_2} = -\frac{V_a (1-k)}{f L_2}$$

$$\Rightarrow \Delta I_2 = \frac{k V_s}{f L_2}$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk

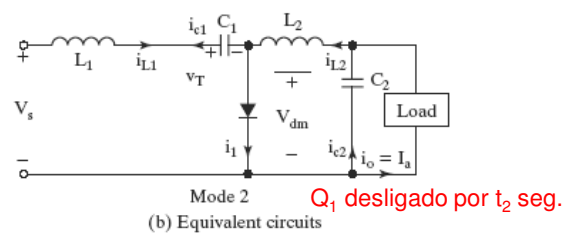
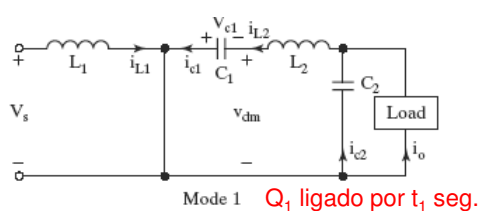
Durante t_2 s $\rightarrow I_{C1} = I_S$

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_0^{t_2} I_S dt = \frac{I_S t_2}{C_1} \quad \text{Como} \quad V_a = -V_s \frac{k}{1-k} = -V_s \frac{T-t_2}{t_2} \quad \Rightarrow t_2 = \frac{V_s}{(V_s - V_a)f}$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_S V_s}{(V_s - V_a) f C_1} \quad \Rightarrow \Delta V_{C1} = \frac{I_S (1-k)}{f C_1}$$

Choppers

Reguladores chaveados – Regulador Cúk

Se $\Delta i_o \approx 0 \rightarrow \Delta i_{L2} = \Delta i_{C2}$

- Integra-se i_{C2} de 0 a $t_1/2 \rightarrow v_{C2A}$
- Integra-se i_{C2} de t_1 a $t_1 + t_2/2 \rightarrow v_{C2B}$

$$\Delta V_{C2} = v_{C2B} - v_{C2A} = \frac{\Delta I_2}{8 f C_2}$$

$$\text{mas} \quad \Delta I_2 = \frac{k V_s}{f L_2} \quad \Rightarrow \Delta V_{C2} = \frac{k V_s}{8 f^2 L_2 C_2}$$

Choppers

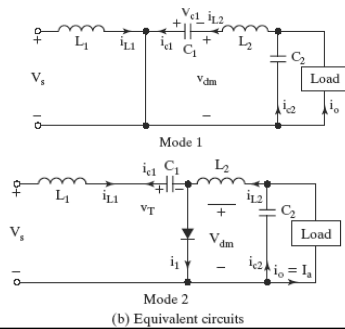
Reguladores chaveados – Regulador Cúk

$$V_a = \frac{k V_s}{1-k} \quad I_s = \frac{k I_a}{1-k}$$

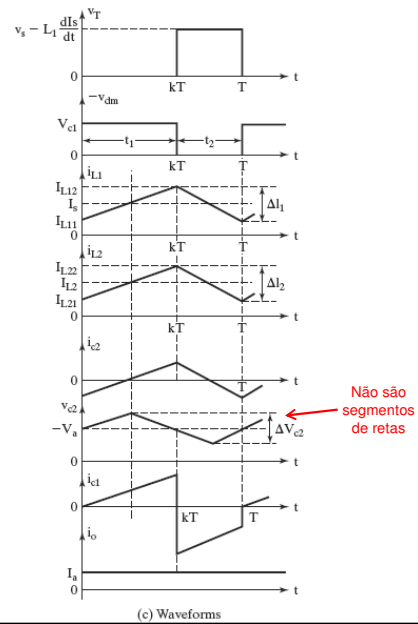
$$\Delta I_1 = \frac{V_s k}{f L_1} \quad \Delta I_2 = \frac{V_s k}{f L_2}$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{I_s V_s}{(V_s - V_a) f C_1} = \frac{I_s (1-k)}{f C_1}$$

$$\Delta V_{C2} = \frac{V_a (1-k)}{8 C_2 L_2 f^2} = \frac{k V_s}{8 C_2 L_2 f^2}$$



(b) Equivalent circuits



(c) Waveforms