



DEEC

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

TÉCNICO LISBOA

Electrónica Geral

José Gerald

Mestrado em Engenharia Aeroespacial
Licenciatura em Engenharia Física Tecnológica
Licenciatura em Engenharia Aeroespacial

MEAer: 1º ano, 1º semestre

LEFT: 3º ano, 1º semestre

LEAer: 3º ano, 1º semestre

2021/2022

Capítulo 6

Conversores Electrónicos de Potência

1. Introdução aos conversores de potência

1.1. Conversores AC/DC (rectificadores)

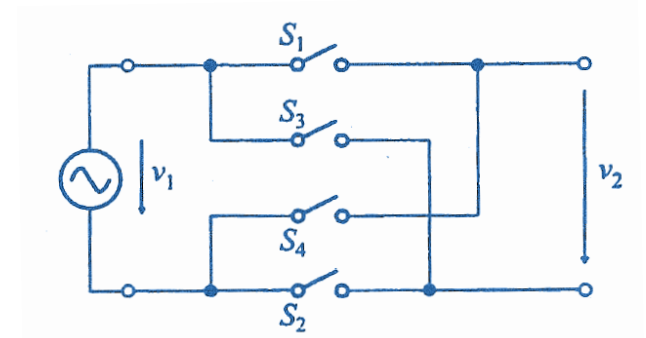
Um conversor AC/DC, ou rectificador, transforma a tensão alternada numa tensão contínua

AC – Alternating Current \sim

DC – Direct Current \equiv

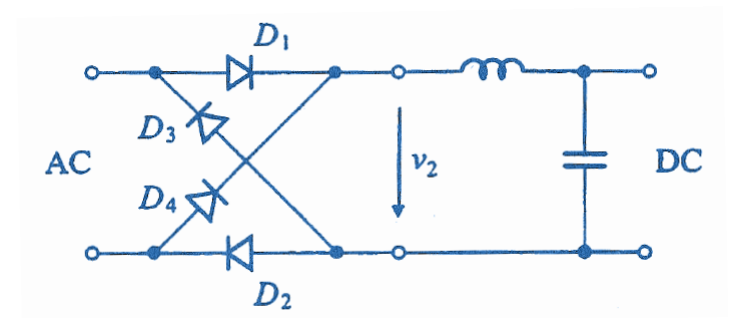
Rectificador em ponte

$$v_2 = |v_1| \quad \begin{cases} v_1 > 0 & S_1 \text{ e } S_2 \text{ Fecham} \\ v_1 < 0 & S_3 \text{ e } S_4 \text{ Fecham} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_2 = v_1 \\ v_2 = -v_1 \end{cases}$$



Rectificador em ponte de Graetz

Colocação de um filtro passa-baixo para reduzir a presença de sinais alternados

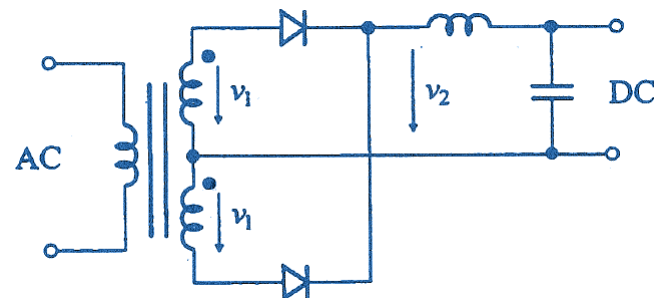


1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.1. Conversores AC/DC (rectificadores) (cont.)

Rectificador de onda completa com dois díodos

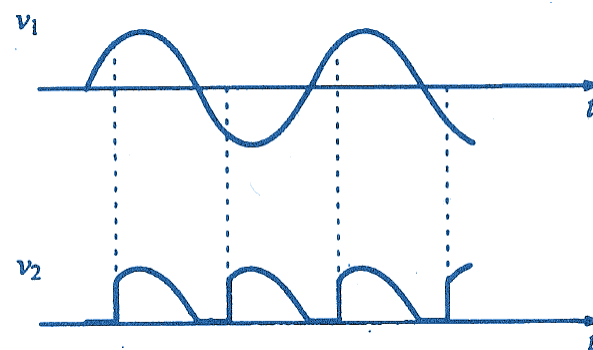
$$v_2 = |v_1| \quad \begin{cases} v_1 > 0 & \text{Conduz o díodo de cima} \Rightarrow v_2 = v_1 \\ v_1 < 0 & \text{Conduz o díodo de baixo} \Rightarrow v_2 = -v_1 \end{cases}$$



Rectificação controlada

Em vez de díodos são usados interruptores controlados (por exemplo com transístores)

O valor médio da tensão de saída depende do instante em que se inicia a condução dos dispositivos



1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.2. Conversores DC/AC (inversores)

Um conversor DC/AC, ou inversor, transforma a tensão contínua numa tensão alternada

DC – Direct Current

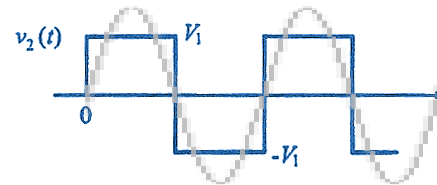


AC – Alternating Current

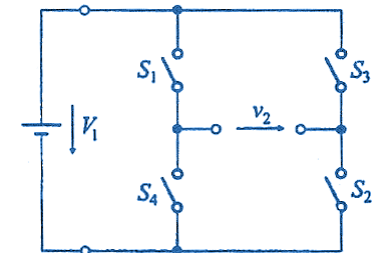
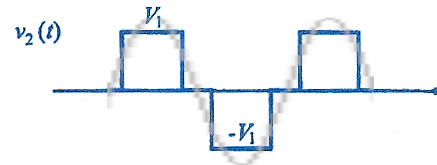


Inversor em ponte

Se conduzirem alternadamente S_1, S_2 ou S_3, S_4 obtém-se uma onda quadrada que aproxima-se menos de uma senoide (mais harmónicas)



Se conduzirem alternadamente S_1, S_2 ou S_3, S_4 e nos intervalos não conduzir nenhum interruptor obtém-se uma onda que se aproxima mais de uma senoide (menos harmónicas)



1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.3. Conversores DC/DC

Um conversor DC/DC permite obter uma tensão contínua a partir de uma tensão contínua diferente

DC – Direct Current

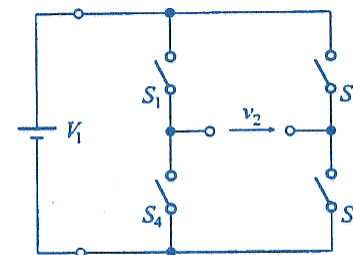
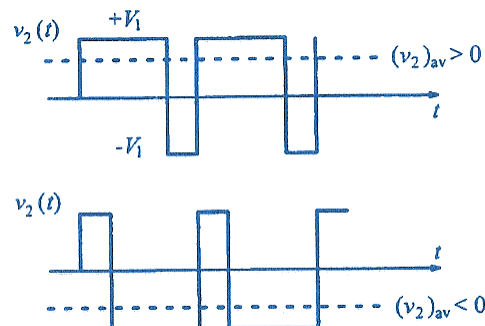


DC – Direct Current



Conversor DC/DC em ponte

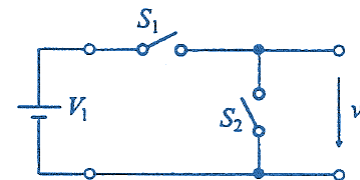
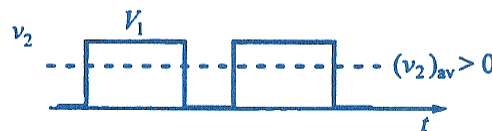
O circuito é idêntico ao do inversor em ponte só que os interruptores são comandados de tal forma que v_2 tenha um valor médio diferente de zero



Conversor DC/DC redutor simples

É redutor pois a tensão de saída é mais baixa que a de entrada

O interruptor S_2 é normalmente um diódo



1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.3. Conversores DC/DC (cont.)

Um conversor DC/DC pode ser constituído por um conversor DC/AC e outro AC/DC ligados através de um transformador, chamando-se neste caso conversor DC/DC com ligação AC (*AC link*)

O transformador faz isolamento galvânico entre a entrada e a saída e modifica o nível da tensão

A frequência de comutação pode ser elevada para que o transformador, as bobinas e os condensadores tenham pequenas dimensões



1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.4. Conversores AC/AC

Os conversores AC/AC transformam uma tensão alternada numa tensão alternada com características diferentes

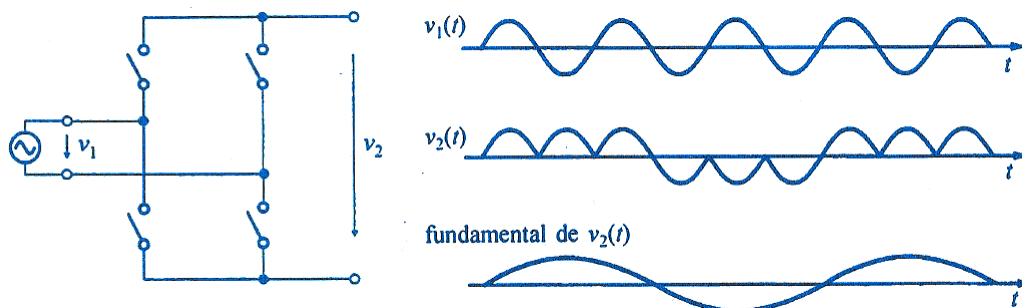
AC – Alternating Current \sim

AC – Alternating Current \sim

Cicloconversor

O cicloconversor é um conversor AC/AC em que a frequência de saída é diferente da frequência de entrada

Realizado através de um circuito em ponte seguido de um circuito de filtragem que deixa passar apenas a fundamental de $v_2(t)$



Conversor AC/AC com ligação DC (DC link)

O Conversor AC/AC com ligação DC é constituído por um conversor AC/DC e por outro DC/AC, podendo as frequências de entrada e saída serem iguais ou diferentes



Um aplicação típica é o sistema de alimentação sem interrupção (UPS – *Uninterruptible Power Supply*). A tensão de entrada é a tensão de rede estando uma bateria entre os dois conversores que é carregada a partir da rede que fornece energia à carga quando falta a tensão da rede

1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

1.4. Conversores AC/AC (cont.)

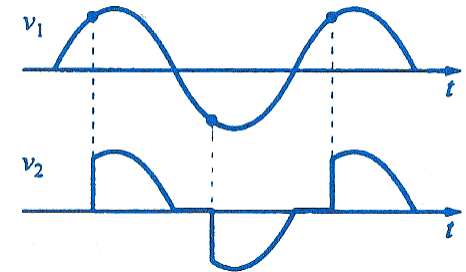
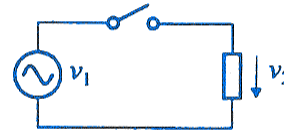
Controlador AC

O controlador AC é também um conversor AC/AC

A partir de uma tensão sinusoidal produz uma tensão alternada, não sinusoidal, com um valor eficaz diferente

Utiliza um dispositivo electrónico (normalmente um triac) que se comporta como um interruptor bidireccional (permite corrente em ambos os sentidos)

Exemplo: Reguladores de intensidade luminosa (*light dimmers*)

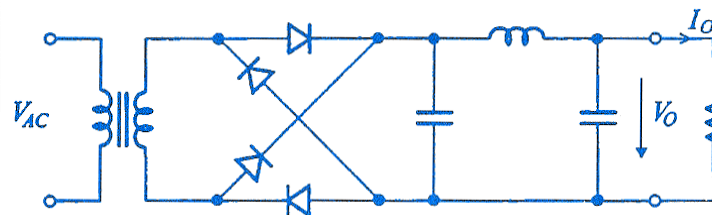


2. Regulador de tensão série

2.1. Fonte de alimentação simples

Um fonte de alimentação simples é constituída por um transformador, que reduz a amplitude da tensão alternada, por um rectificador e por um filtro

A tensão produzida V_o não é de muito boa qualidade:



- Contém tremor (*ripple*) que o filtro não consegue eliminar completamente
- V_o varia com a amplitude da tensão alternada, com a corrente da carga I_o e com a temperatura

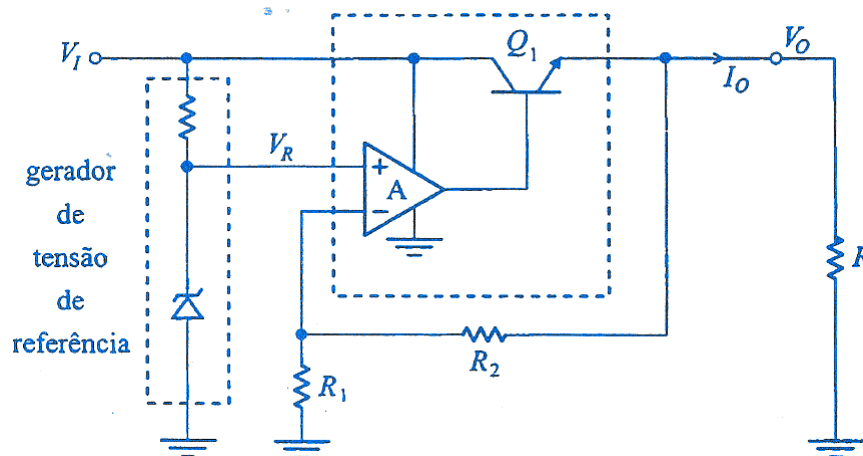
2.2. Regulador série ou regulador linear

O transistor Q1 com a resistência de carga formam um seguidor de emissor, ligado a um amplificador operacional com ganho elevado

$$V_o = A(V_R - \beta V_o) \quad \text{com} \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_R} = \frac{A}{1 + A\beta} \quad \text{como normalmente} \quad A\beta \gg 1$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_R} = \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



2. Regulador de tensão série (cont.)

2.2. Regulador série ou regulador linear (cont.)

Características principais dos reguladores série:

- Factor de regulação (*line regulation*):

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta V_I} = \frac{\Delta V_0}{\Delta V_R} \frac{\Delta V_R}{\Delta V_I} = \frac{A}{1 + A\beta} \frac{\Delta V_R}{\Delta V_I}$$

É proporcional à estabilidade da tensão de referência $\Delta V_R / \Delta V_I$

- Resistência de saída do regulador:

$$R_0 = \frac{\Delta V_0}{-\Delta I_0} = \frac{R_{01}}{1 + A\beta}$$

É a resistência R_{01} do seguidor de emissor dividida pelo ganho de retorno

- Regulação de carga (*load regulation*):

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = -R_0 \frac{\Delta I_0}{V_0}$$

É a variação relativa da tensão de saída com a variação absoluta da corrente da carga (valores máximo – mínimo), normalmente inferior a 5%

- Coeficiente de temperatura:

$$\frac{\Delta V_0}{\Delta T} = \frac{\Delta V_0}{\Delta V_R} \frac{\Delta V_R}{\Delta T} = \frac{A}{1 + A\beta} \frac{\Delta V_R}{\Delta T} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{\Delta V_R}{\Delta T}$$

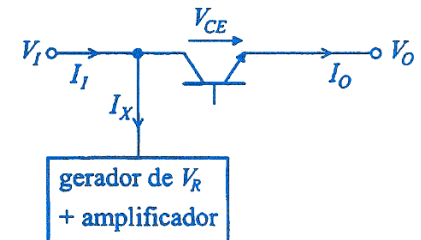
É proporcional ao coeficiente da tensão de referência (30 a 300ppm/°C)

- Rendimento:

$$\eta = \frac{V_0 I_0}{V_I I_I} = \frac{1}{\left(1 + \frac{V_{CE}}{V_0}\right) \left(1 + \frac{I_X}{I_0}\right)}$$

V_{CE} não pode ser muito baixo, pelo que o rendimento não pode ser elevado

$$V_I I_I = (V_0 + V_{CE})(I_0 + I_X) = V_0 I_0 \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_0}\right) \left(1 + \frac{I_X}{I_0}\right)$$



3. Conversor redutor

3.1. Conversor redutor (*buck*)

O interruptor S abre e fecha periodicamente com uma frequência de comutação $f_s = 1/T$

A fracção do período em que o interruptor está fechado representa-se por D e denomina-se factor de ciclo (*duty-cycle*):

$$D \in] 0,1 [$$

A bobine L e o condensador C, conjuntamente com a resistência de carga R, constituem um filtro passa-baixo, cuja frequência de corte é muito inferior à frequência de comutação:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \omega_0 \ll \frac{2\pi}{T}$$

Frequência de
corte do filtro

Em consequência a tensão de saída é aproximadamente constante e inferior à tensão de entrada:

$$V_0 = V_I D$$

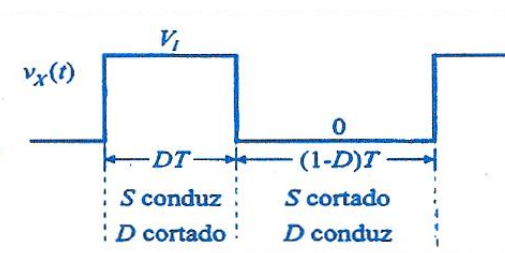
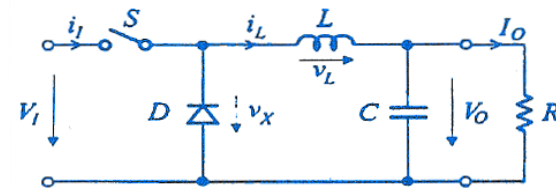
No estudo dos conversores comutados convém dar especial atenção à tensão e à corrente na bobine, v_L e i_L :

$$v_L = L \frac{di_L}{dt} \quad i_L = i_L(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v_L(\tau) d\tau$$

Se v_L for constante i_L é uma
rampa com declive v_L/L

Se i_L não se anular durante todo o período de comutação diz-se que o circuito funciona em regime de condução contínua

Se i_L se anular durante parte do período o conversor funciona em regime de condução descontínua



3. Conversor redutor (cont.)

3.1.1. Regime de condução contínua

Considerando que:

- O interruptor e o diódo são ideais (despreza-se a tensão quando conduzem)

Quando o interruptor está fechado:

A tensão na bobina vale: $v_L = V_I - V_0$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I - V_0}{L} DT$ $v_x = V_I$

Quando o interruptor está aberto:

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = -V_0$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{-V_0}{L} (1-D)T$ $v_x = 0$

Dois métodos de cálculo de V_0 :

- Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

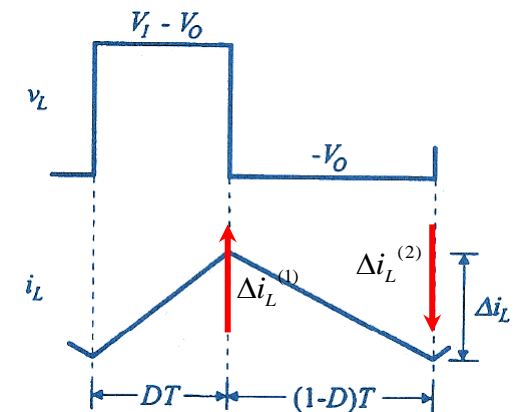
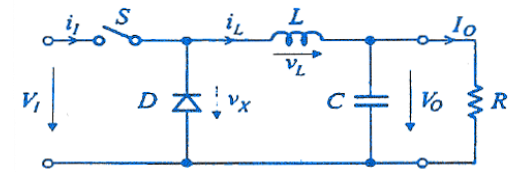
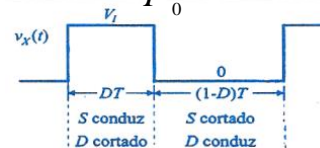
$$\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_I - V_0}{L} DT + \frac{-V_0}{L} (1-D)T = 0 \Rightarrow$$

$$V_0 = DV_I$$

- Considerando que a bobine e o condensador formam um filtro passa-baixo, pelo que V_0 é o valor médio de v_x :

$$V_0 = (v_x)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T v_x(t) dt \Rightarrow$$



Regime de condução contínua

3. Conversor redutor (cont.)

Para que o regime seja de condução contínua é necessário que o valor médio da corrente seja superior a metade do desvio:

$$I_L = (i_L)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i_L(t) dT = I_0 = \frac{V_0}{R}$$

$$I_L > \frac{\Delta i_L}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{L}{R} > \frac{1-D}{2f_s}$$

3.1.2. Regime de condução descontinua

Quando o interruptor está fechado:

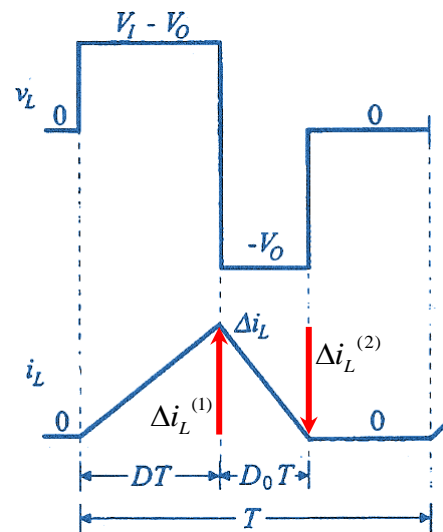
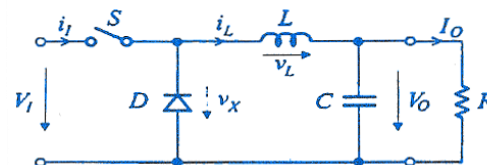
A tensão na bobina vale: $v_L = V_I - V_0$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I - V_0}{L} DT$ $v_x = V_I$

Quando o interruptor está aberto (antes de se anular i_L):

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = -V_0$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{-V_0}{L} D_0 T$ $v_x = 0$

Quando o interruptor está aberto (depois de se anular i_L):

A corrente na bobina $i_L = 0$ $v_L = 0$ $i_L = 0$



3. Conversor redutor (cont.)

3.1.2. Regime de condução descontínua (cont.)

Dois métodos de cálculo de V_0 :

1. Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

$$\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_I - V_0}{L} DT + \frac{-V_0}{L} D_0 T = 0 \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{D}{D + D_0} V_I$$

2. Considerando que a bobine e o condensador formam um filtro passa-baixo, pelo que V_0 é o valor médio de v_x :

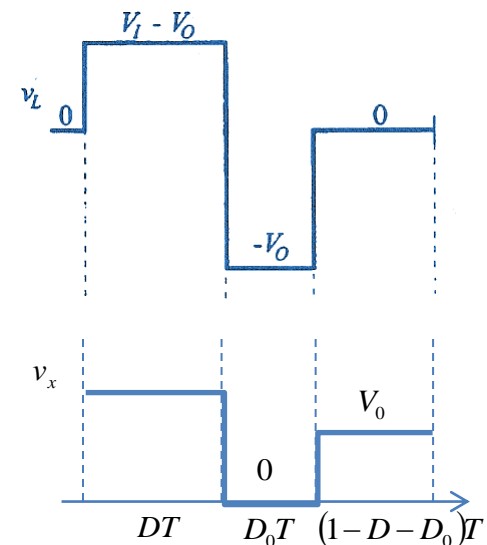
$$V_0 = (v_x)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T v_x(t) dt \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{D}{D + D_0} V_I$$

Para determinar D_0 :

$$I_L = \frac{V_0}{R} = \frac{\Delta I_L}{2} (D + D_0) \Rightarrow D_0^2 + DD_0 - \frac{2L}{RT} = 0 \Rightarrow$$

$$D_0 = -\frac{D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \frac{2L}{RT}}$$



3. Conversor redutor (cont.)

3.1.3. Rendimento do conversor em regime de condução contínua

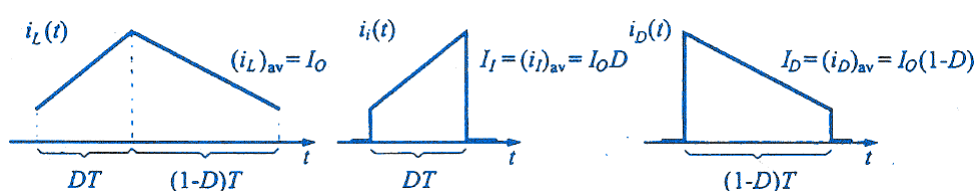
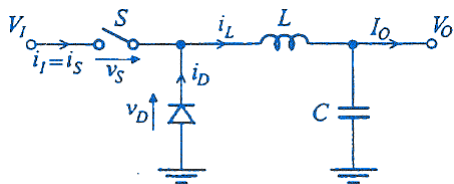
O rendimento dos conversores comutados é elevado (teoricamente 100%)

Considerando que as tensões no interruptor e no diódo valem V_S e V_D , respectivamente, o rendimento vale:

$$\eta = \frac{V_0 I_0}{V_I I_I} \quad \text{Pela conservação da energia, com } I_S \text{ e } I_D \text{ os valores médios das correntes no interruptor e no diódo, respectivamente} \quad V_I I_I = V_0 I_0 + V_S I_S + V_D I_D$$

$$\Rightarrow 1 = \eta + \frac{V_S}{V_I} + \frac{V_D}{V_I} \frac{I_D}{I_I}$$

$$\text{como } I_I = I_S \quad e \quad I_L = (i_L)_{av} = I_0 \quad e \quad I_I = (i_I)_{av} = D I_0 \quad e \quad I_D = (i_D)_{av} = (1-D) I_0$$



$$\text{conclui-se: } \frac{I_D}{I_I} = \frac{1-D}{D} \Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{V_S}{V_I} - \frac{V_D}{V_I} \frac{1-D}{D}}$$

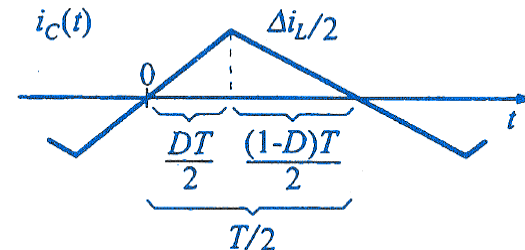
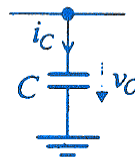
3. Conversor redutor (cont.)

3.1.4. Tremor ou ondulação (ripple) do conversor em regime de condução contínua

Considerou-se V_0 constante contudo apresenta um tremor ou ondulação

A corrente no condensador i_C tem valor médio nulo em regime estacionário (caso contrário a tensão de saída não parava de crescer ou decrescer)

$$i_C = C \frac{dV_0}{dt} \Rightarrow \Delta V_0 = \frac{1}{C} \int_0^{T/2} i_C(t) dt = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{T}{2} \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{T}{8C} \Delta i_L$$



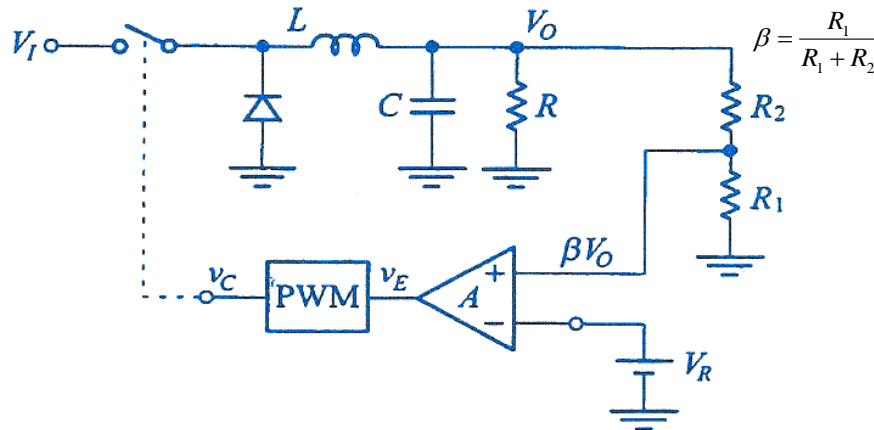
$$\text{como } \Delta i_L = \frac{V_0}{L} (1-D)T \Rightarrow \frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{(1-D)T^2}{8LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left(\frac{f_0}{f_s} \right)^2$$

em que f_0 é a frequência de ressonância de L e C: $f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$

e f_s é a frequência de comutação do conversor: $f_s = \frac{1}{T}$

3. Conversor redutor (cont.)

3.1.5. Sistema de controle



A tensão $v_E = A(\beta V_O - V_R)$ actua no modulador de largura de impulsos (PWM – *Pulse-Width Modulation*), o qual vai actuar no interruptor, sendo v_C invertido face a v_E

Se o ganho A for elevado:

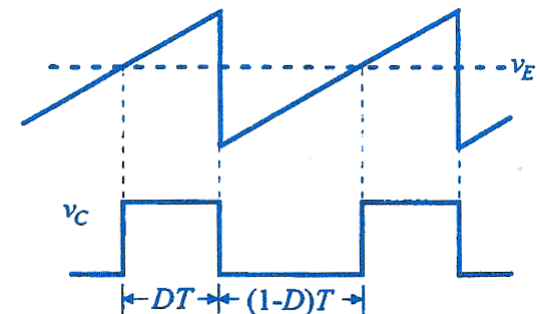
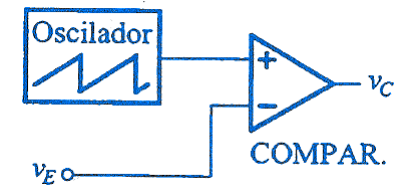
$$\beta V_O = V_R \quad \text{ou} \quad V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_R$$

PWM

O modulador de largura de impulso (PWM) é constituído por um oscilador que produz uma tensão em dente de serra e um comparador

A tensão dente de serra é comparada com v_E , obtendo-se na saída do comparador a tensão de comando v_C :

- Quando v_E aumenta D diminui
- Quando v_E diminui D aumenta



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador

4.1. Conversor amplificador (boost)

O interruptor S abre e fecha periodicamente com uma frequência de comutação $f_s = 1/T$

A fracção do período em que o interruptor está fechado representa-se por D e denomina-se factor de ciclo (*duty-cycle*):

$$D \in] 0,1 [$$

A resistência R e o condensador C, apresentam uma constante de tempo muito superior ao período de comutação:

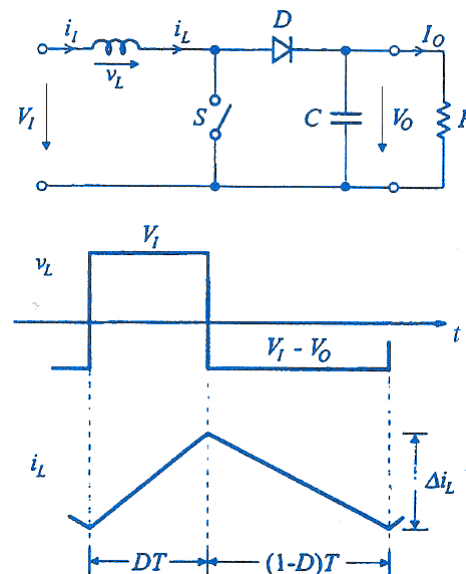
$$RC \gg T$$

Em consequência a tensão de saída é aproximadamente constante

Considera-se em primeiro lugar que o interruptor e o diodo são ideais

Se i_L não se anular durante todo o período de comutação diz-se que o circuito funciona em regime de condução contínua

Se i_L se anular durante parte do período o conversor funciona em regime de condução descontínua



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

4.1.1. Regime de condução contínua

Considerando que:

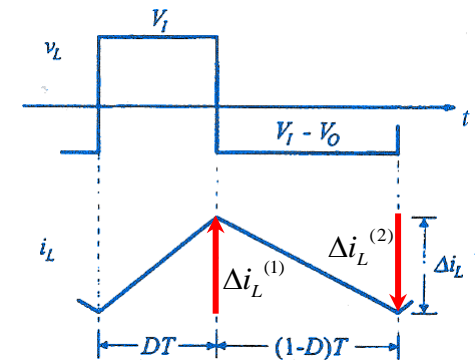
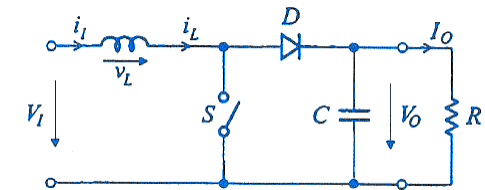
- O interruptor e o diódo são ideais (despreza-se a tensão quando conduzem)

Quando o interruptor está fechado:

A tensão na bobina vale: $v_L = V_I$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I}{L} DT$

Quando o interruptor está aberto:

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = V_I - V_0$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{V_I - V_0}{L} (1-D)T$



Regime de condução contínua

Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine: $\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$

$$\frac{V_I}{L} DT + \frac{V_I - V_0}{L} (1-D)T = 0 \Rightarrow \boxed{V_0 = \frac{V_I}{1-D}}$$

Considerando que as tensões no interruptor e no diódo valem V_S e V_D , respectivamente, o rendimento vale:

$\eta = \frac{V_0 I_0}{V_I I_I}$ Pela conservação da energia, com I_S e I_D os valores médios das correntes no interruptor e no diódo, respectivamente $V_I I_I = V_0 I_0 + V_S I_S + V_D I_D$

Considerando $I_L = I_I$ passa por S durante DT e pelo diódo durante $(1-D)T$

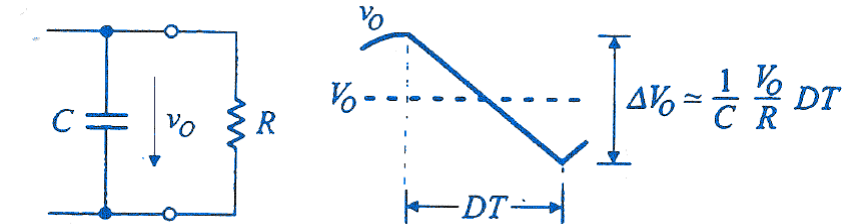
$$I_S = I_I D \quad I_D = I_I (1-D)$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = 1 - \frac{V_S}{V_I} D - \frac{V_D}{V_0}}$$

4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

O tremor da tensão de saída calcula-se sabendo que durante o intervalo DT o diódo está cortado e o condensador descarrega-se sobre a resistência:

$$\Delta V_0 \approx \frac{1}{C} I_0 DT = \frac{1}{C} \frac{V_0}{R} DT$$

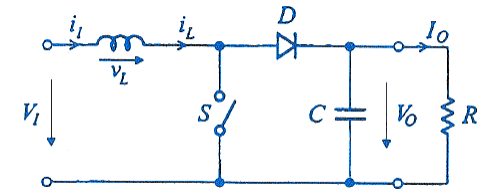


O regime de condução contínua mantém-se enquanto:

$$I_L > \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$I_L = I_I = \frac{V_0 I_0}{V_I} = \frac{1}{1-D} \frac{V_0}{R} \quad \Delta i_L = \frac{V_I}{L} DT = \frac{V_0 (1-D) DT}{L}$$

$$\Rightarrow \frac{L}{R} > \frac{D(1-D)^2}{2f_s}$$



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

4.1.2. Regime de condução descontinua

Quando o interruptor está fechado:

A tensão na bobina vale: $v_L = V_I$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I}{L} DT$

Quando o interruptor está aberto (antes de se anular i_L):

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = V_I - V_0$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{V_I - V_0}{L} D_0 T$

Quando o interruptor está aberto (depois de se anular i_L):

A corrente na bobina $i_L = 0$ $v_L = 0$ $i_L = 0$

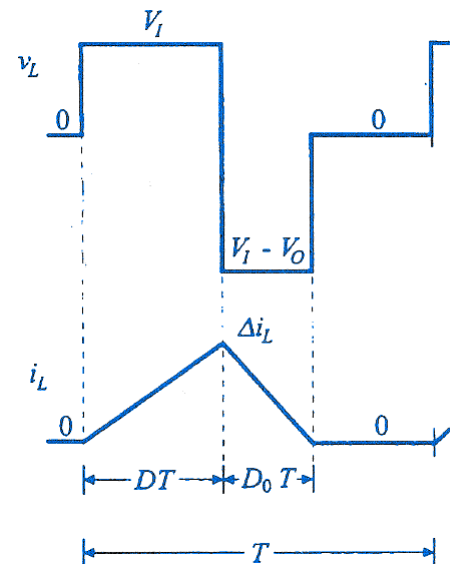
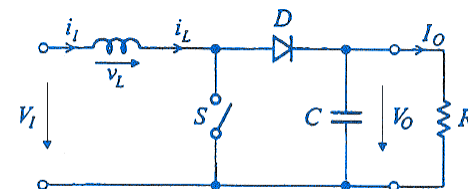
Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

$$\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_I}{L} DT + \frac{V_I - V_0}{L} D_0 T = 0 \Rightarrow V_0 = \frac{D + D_0}{D_0} V_I$$

Para determinar D_0 :

$$I_I = \frac{V_0}{V_I} \frac{V_0}{R} = I_L = \frac{\Delta I_L}{2} (D + D_0) \Rightarrow \frac{D + D_0}{DD_0^2} = \frac{RT}{2L} \Rightarrow D_0 = \frac{L}{DRT} \pm \sqrt{\left(\frac{L}{DRT}\right)^2 + \frac{2L}{RT}}$$



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

4.2. Conversor redutor-amplificador (buck-boost)

O interruptor S abre e fecha periodicamente com uma frequência de comutação $f_s = 1/T$

A fracção do período em que o interruptor está fechado representa-se por D e denomina-se factor de ciclo (*duty-cycle*):

$$D \in] 0,1 [$$

A resistência R e o condensador C, apresentam uma constante de tempo muito superior ao período de comutação:

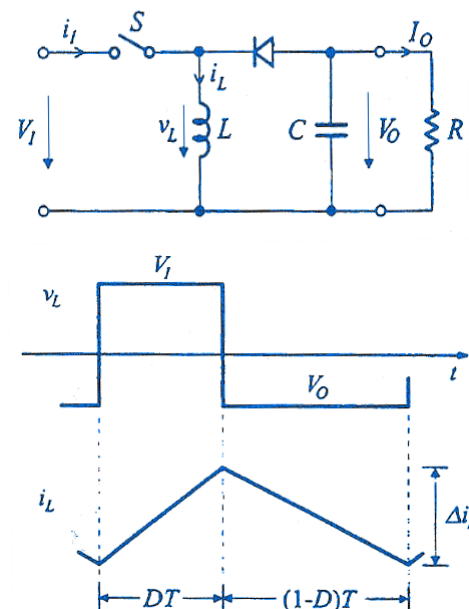
$$RC \gg T$$

Em consequência a tensão de saída é aproximadamente constante

Considera-se em primeiro lugar que o interruptor e o diodo são ideais

Se i_L não se anular durante todo o período de comutação diz-se que o circuito funciona em regime de condução contínua

Se i_L se anular durante parte do período o conversor funciona em regime de condução descontínua



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

4.2.1. Regime de condução contínua

Considerando que:

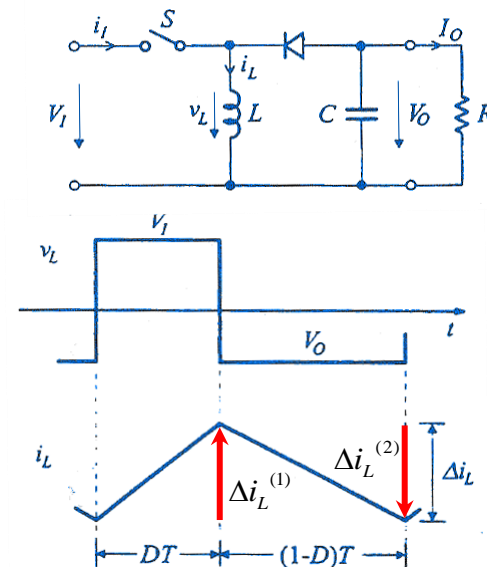
- O interruptor e o díodo são ideais (despreza-se a tensão quando conduzem)

Quando o interruptor está fechado:

A tensão na bobina vale: $v_L = V_I$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I}{L} DT$

Quando o interruptor está aberto:

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = V_O$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{V_O}{L} (1-D)T$



Regime de condução contínua

Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine: $\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$

$$\frac{V_I}{L} DT + \frac{V_O}{L} (1-D)T = 0 \Rightarrow V_O = -V_I \frac{D}{1-D}$$

Considerando que as tensões no interruptor e no díodo valem V_S e V_D , respectivamente, o rendimento vale:

$$\eta = \frac{V_O I_O}{V_I I_I} \quad \text{Pela conservação da energia, com } I_S \text{ e } I_D \text{ os valores médios das correntes no interruptor e no díodo, respectivamente}$$

$$V_I I_I = V_O I_O + V_S I_S + V_D I_D$$

Considerando $I_L = I_I$ passa por S durante DT e pelo díodo durante (1-D)T

$$I_I = I_S = I_L D \quad I_O = -I_D = -I_L (1-D)$$

$$\Rightarrow \eta = 1 - \frac{V_S}{V_I} - \frac{V_D}{|V_O|}$$

4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

O tremor da tensão de saída calcula-se sabendo que durante o intervalo DT o díodo está cortado e o condensador descarrega-se sobre a resistência, devendo ter-se em atenção que V_0 e I_0 são negativos:

$$\Delta V_0 \approx \frac{1}{C} |I_0| DT = \frac{1}{C} \frac{|V_0|}{R} DT$$

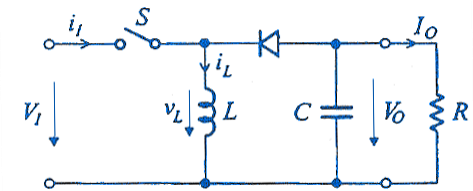
O regime de condução contínua mantém-se enquanto:

$$I_L > \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$I_L D = I_I = \frac{V_0 I_0}{V_I} = \frac{D}{1-D} \frac{|V_0|}{R}$$

$$\Delta i_L = \frac{|V_0|}{L} (1-D) T$$

$$\Rightarrow \frac{L}{R} > \frac{(1-D)^2}{2f_s}$$



4. Conversor amplificador e redutor-amplificador (cont.)

4.2.2. Regime de condução descontínua

Quando o interruptor está fechado:

A tensão na bobina vale: $v_L = V_I$ $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I}{L} DT$

Quando o interruptor está aberto (antes de se anular i_L):

Conduz D que assegura a continuidade da corrente na bobina, ficando: $v_L = V_0$ $\Delta i_L^{(2)} = \frac{V_0}{L} D_0 T$

Quando o interruptor está aberto (depois de se anular i_L):

A corrente na bobina $i_L = 0$ $v_L = 0$ $i_L = 0$

Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

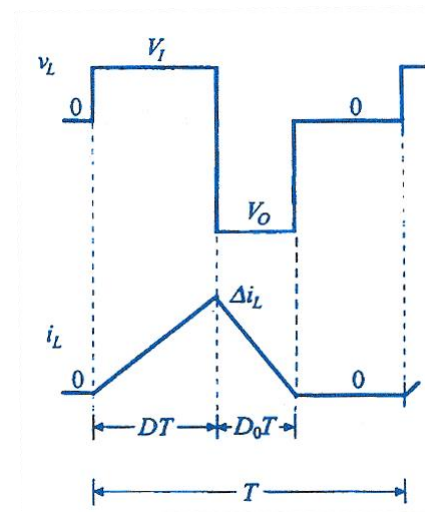
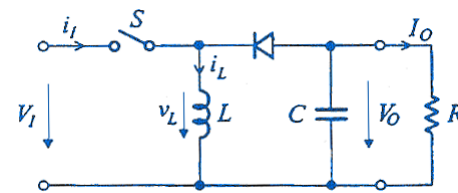
$$\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{V_I}{L} DT + \frac{V_0}{L} D_0 T = 0 \Rightarrow$$

$$V_0 = -\frac{D}{D_0} V_I$$

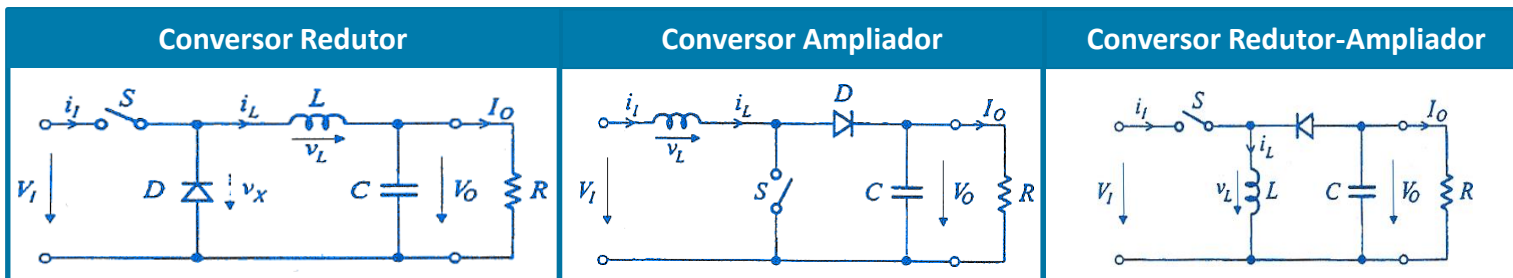
Para determinar D_0 :

$$I_I = \frac{V_0}{V_I} \frac{V_0}{R} = \frac{\Delta I_L}{2} D \Rightarrow D_0 = \sqrt{\frac{2L}{RT}}$$



6. Resumo dos conversores

Esquema



Regime de condução contínua

V_0	$V_0 = V_I D$	$V_0 = \frac{V_I}{1-D}$	$V_0 = -V_I \frac{D}{1-D}$
Condição	$\frac{L}{R} > \frac{1-D}{2f_s}$	$\frac{L}{R} > \frac{D(1-D)^2}{2f_s}$	$\frac{L}{R} > \frac{(1-D)^2}{2f_s}$
Rendimento (η)	$\eta = 1 - \frac{V_s}{V_I} - \frac{V_D}{V_I} \frac{1-D}{D}$	$\eta = 1 - \frac{V_s}{V_I} D - \frac{V_D}{V_O}$	$\eta = 1 - \frac{V_s}{V_I} - \frac{V_D}{ V_O }$
ΔV_0	$\frac{dV_0}{V_0} = \frac{(1-D)T^2}{8LC} = \frac{\pi^2}{2} (1-D) \left(\frac{f_0}{f_s} \right)^2$	$\Delta V_0 \approx \frac{1}{C} I_0 DT = \frac{1}{C} \frac{V_0}{R} DT$	$\Delta V_0 \approx \frac{1}{C} I_0 DT = \frac{1}{C} \frac{ V_0 }{R} DT$

Regime de condução descontínua

V_0	$V_0 = \frac{D}{D+D_0} V_I$	$V_0 = \frac{D+D_0}{D_0} V_I$	$V_0 = -\frac{D}{D_0} V_I$
Cálculo de D_0	$D_0^2 + DD_0 - \frac{2L}{RT} = 0$	$\frac{D+D_0}{DD_0^2} = \frac{RT}{2L}$	$D_0 = \sqrt{\frac{2L}{RT}}$