



**DEEC**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

TÉCNICO LISBOA

# Electrónica Geral

Autores: Pedro Vitor e José Gerald

MEAer: 4<sup>o</sup> ano, 1<sup>o</sup> semestre

MEFT: 3<sup>o</sup> ano, 1<sup>o</sup> semestre

2020/2021



## Capítulo 6

## Conversores Electrónicos de Potência

# 1. Introdução aos conversores de potência

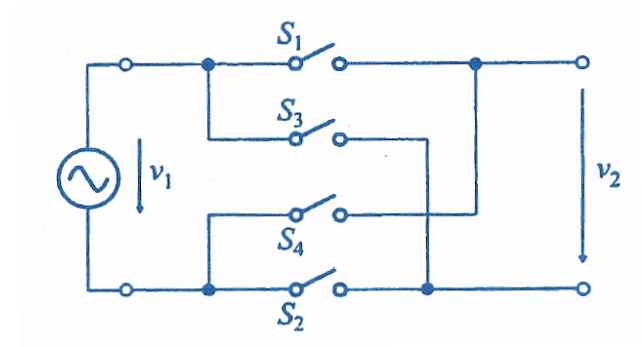
## 1.1. Conversores AC/DC (rectificadores)

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

AC – Alternating Current        
 DC – Direct Current            

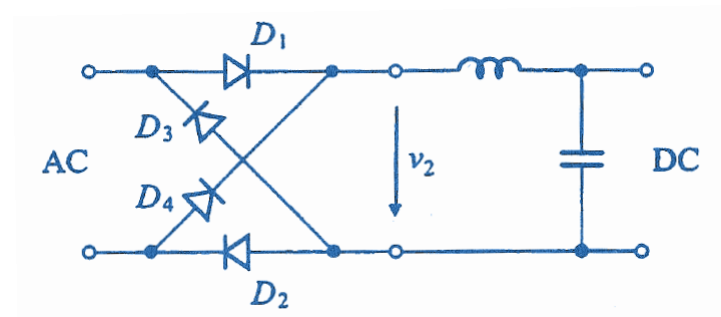
### Rectificador em ponte

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



### Rectificador em ponte de Graetz

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

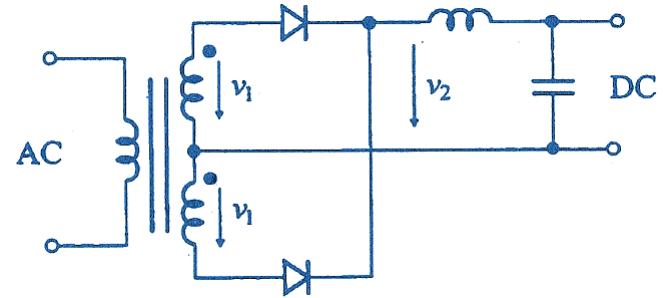


# 1. Introdução aos conversores de potência (cont.)

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

### Rectificador de onda completa com dois díodos

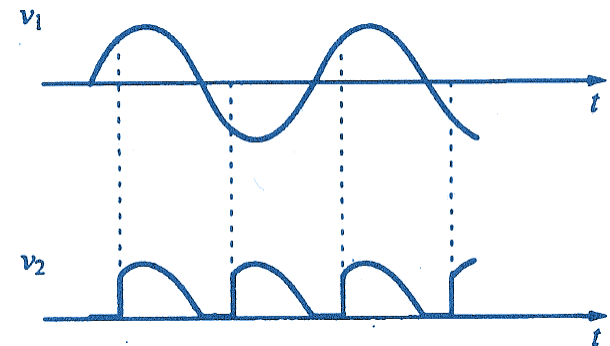
$$v_2 = |v_1| \quad \begin{cases} v_1 > 0 & \text{Conduz o díodo de cima} \Rightarrow v_2 = v_1 \\ v_1 < 0 & \text{Conduz o díodo de baixo} \Rightarrow v_2 = -v_1 \end{cases}$$



### 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

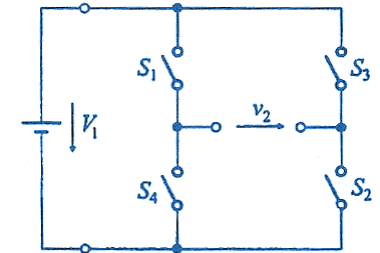
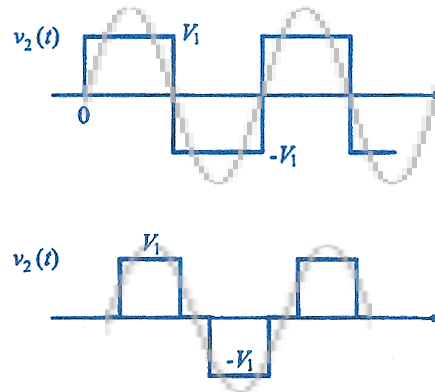
DC – Direct Current 

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

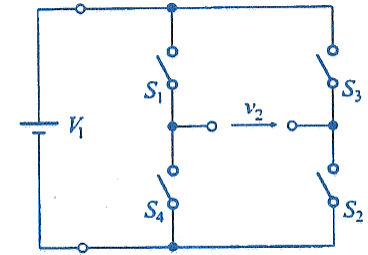
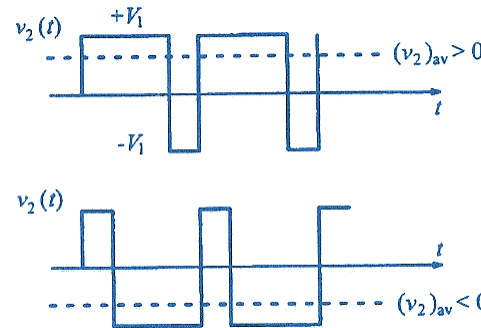
Um conversor DC/DC permite obter uma tensão contínua a partir de uma tensão contínua diferente

DC – Direct Current 

DC – Direct Current 

### Conversor DC/DC em ponte

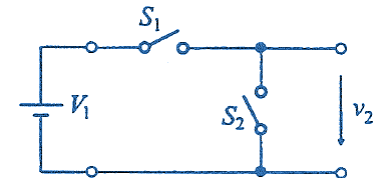
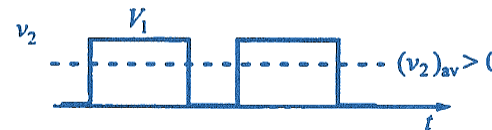
O circuito é idêntico ao do inversor em ponte só que os interruptores são comandados de tal forma que  $v_2$  tenha um valor médio diferente de zero



### 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

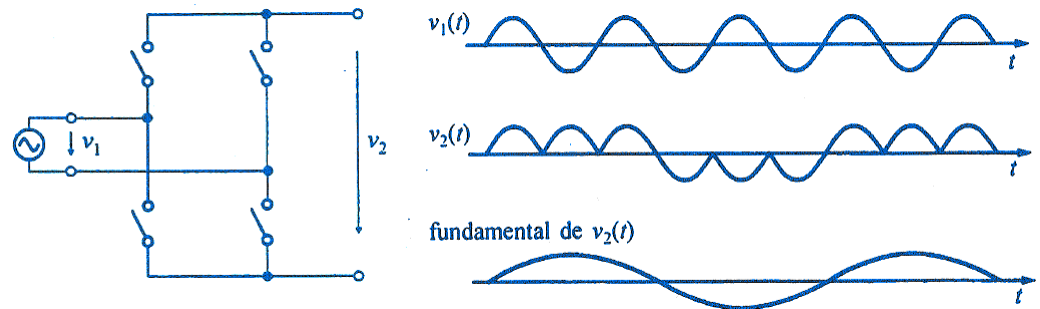
AC – Alternating Current  $\sim$

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

## 1.4. Conversores AC/AC (cont.)

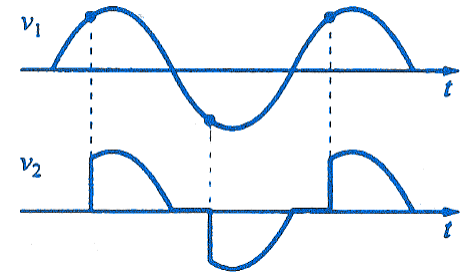
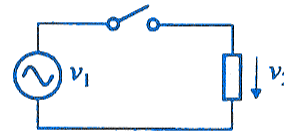
### Controlador AC

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*)





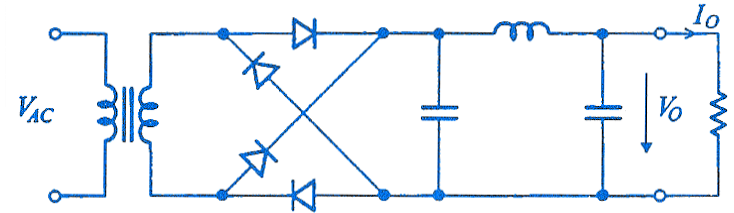
## 2. Regulador de tensão série

### 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  $V_0$  não é de muito boa qualidade:

- Contém tremor (*ripple*) que o filtro não consegue eliminar completamente
- $V_0$  varia com a amplitude da tensão alternada, com a corrente da carga  $I_0$  e com a temperatura



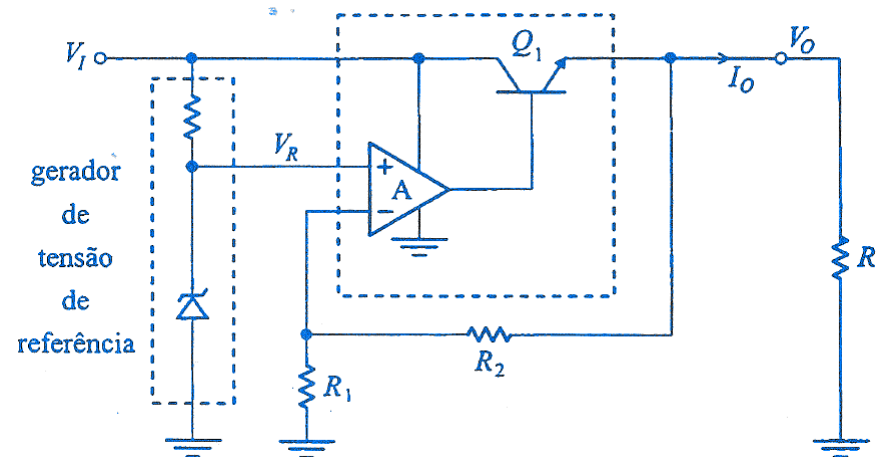
### 2.2. Regulador série ou regulador linear

O transístor 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%

- Coefficiente de temperatura:

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

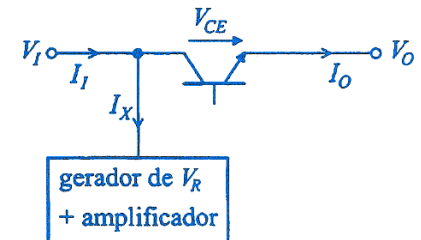
É proporcional ao coeficiente da tensão de referência (30 a 300ppm/°C)

- 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:

$$V_0 = V_i D$$

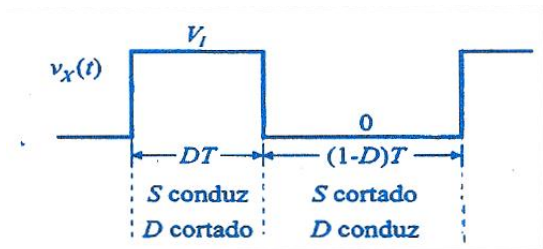
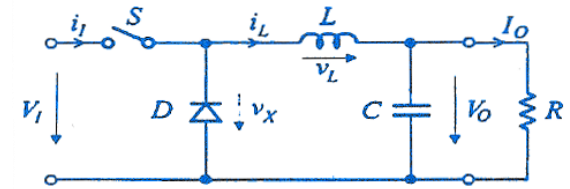
No estudo dos conversores comutados convém dar especial atenção à tensão e à corrente na bobine,  $v_L$  e  $i_L$ :

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

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

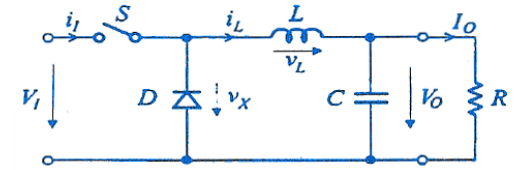


### 3. Conversor redutor (cont.)

#### 3.1.1. Regime de condução contínua

Considerando que:

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

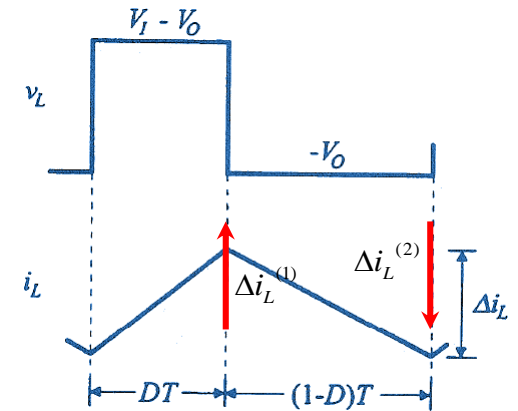


Quando o interruptor está fechado:

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:  $v_L = -V_0$       $\Delta i_L^{(2)} = \frac{-V_0}{L} (1-D)T$       $v_x = 0$



Regime de condução contínua

Dois métodos de cálculo de  $V_0$ :

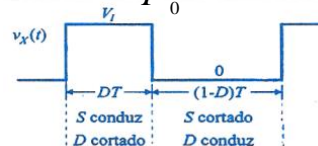
- Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

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

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

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

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



### 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 descontínua

Quando o interruptor está fechado:

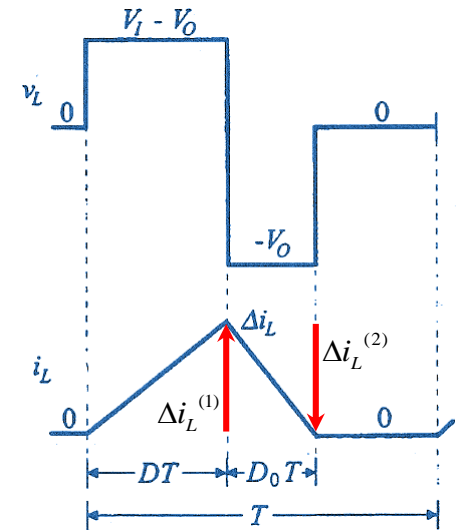
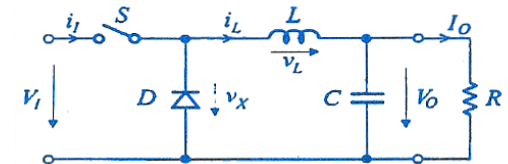
A tensão na bobina vale:  $v_L = V_I - V_0$       $\Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I - V_0}{L} DT$       $v_x = V_I$

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  $v_x$ :

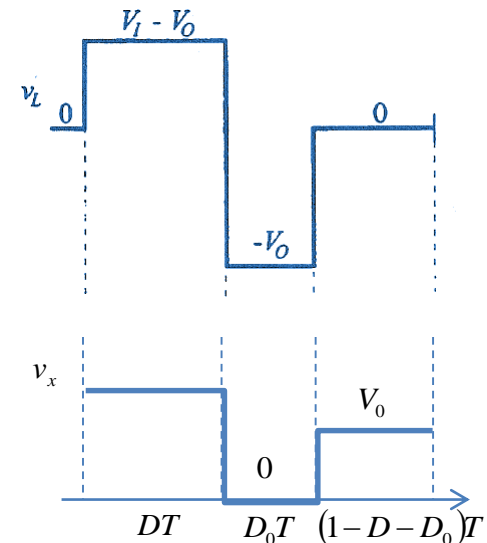
$$V_0 = (v_x)_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T v_x(t) dT \Rightarrow$$

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

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

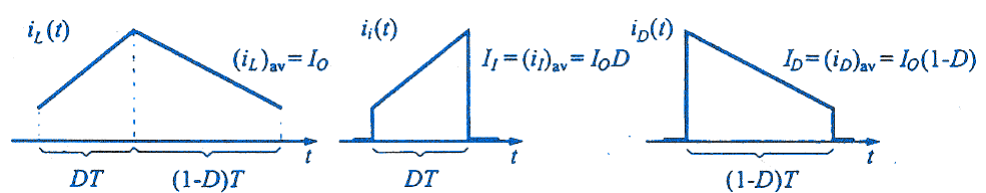
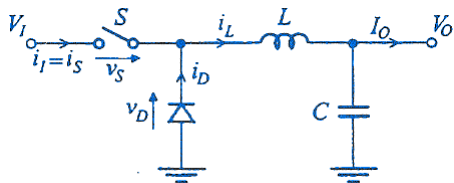
O rendimento dos conversores comutados é elevado (teoricamente 100%)

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

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

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

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



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

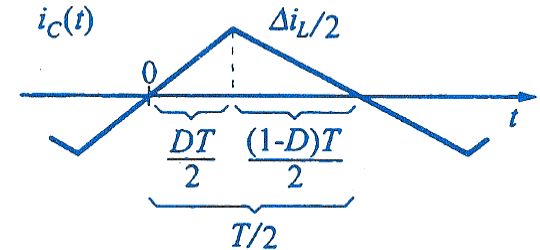
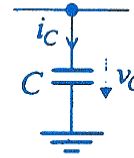
### 3. Conversor redutor (cont.)

#### 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)

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



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

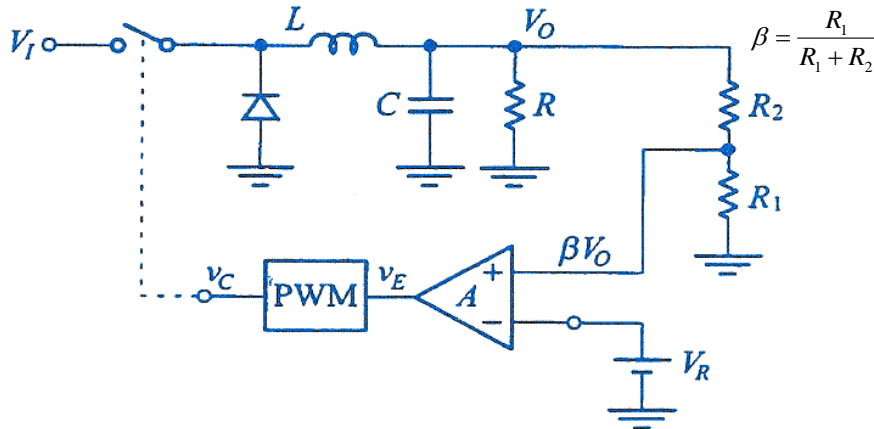
em que  $f_0$  é a frequência de ressonância de L e C:  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$

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:

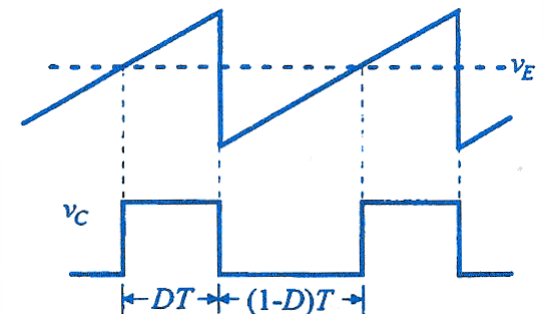
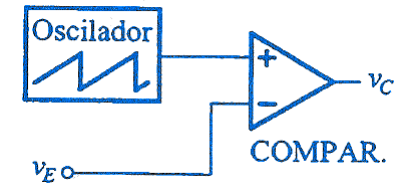
$$\beta V_O = V_R \quad \text{ou} \quad V_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_R$$

#### 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:

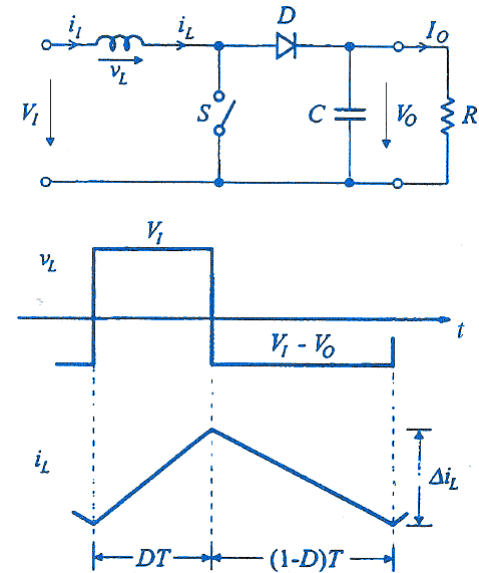
$$RC \gg T$$

Em consequência a tensão de saída é aproximadamente constante

Considera-se em primeiro lugar que o interruptor e o díodo 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:

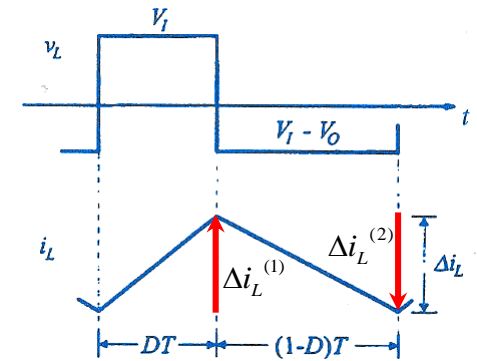
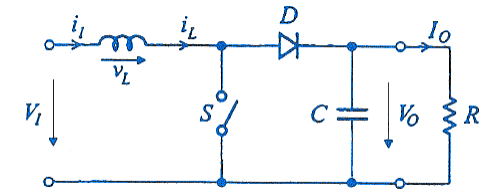
- O interruptor e o diódo são ideais (despreza-se a tensão quando conduzem)

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:

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

$$V_I I_I = V_0 I_0 + V_S I_S + V_D I_D$$

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

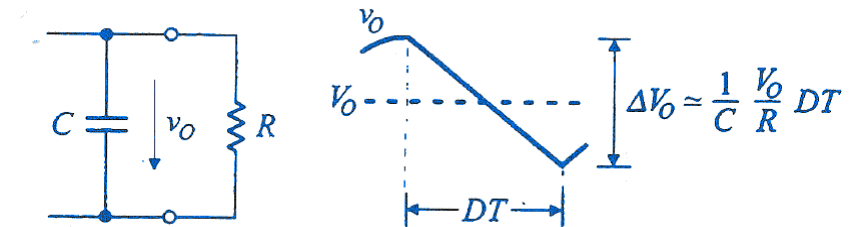
$$I_S = I_I D \quad I_D = I_I (1-D)$$

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

## 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:

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

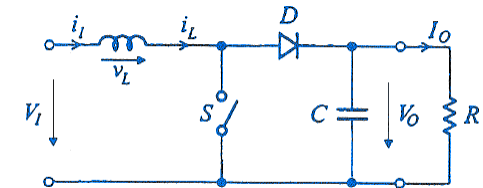


O regime de condução contínua mantém-se enquanto:

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

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

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



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

### 4.1.2. Regime de condução 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:  $v_L = V_I - V_0$   $\Delta i_L^{(2)} = \frac{V_I - V_0}{L} D_0 T$

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

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

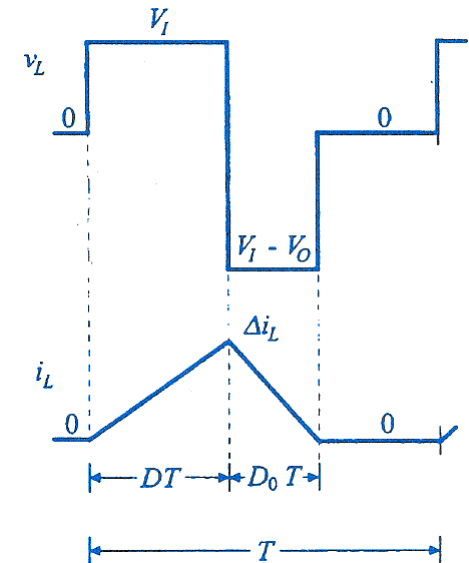
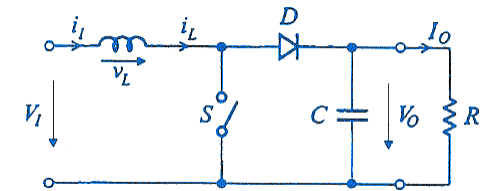
Conjugando as duas equações de variação da corrente na bobine:

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

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

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:

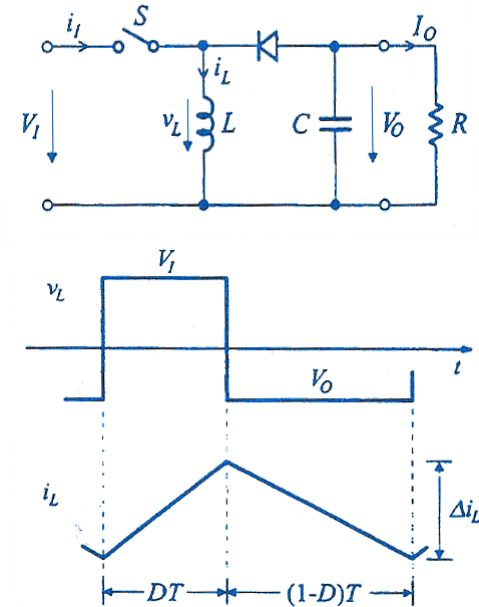
$$RC \gg T$$

Em consequência a tensão de saída é aproximadamente constante

Considera-se em primeiro lugar que o interruptor e o díodo 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 descontinua



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

### 4.2.1. Regime de condução contínua

Considerando que:

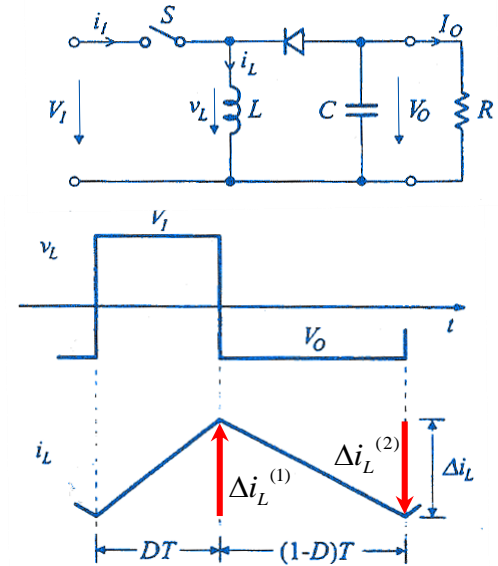
- O interruptor e o diodo são ideais (despreza-se a tensão quando conduzem)

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 diodo valem  $V_S$  e  $V_D$ , respectivamente, o rendimento vale:

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

$$V_I I_I = V_O I_0 + V_S I_S + V_D I_D$$

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

$$I_I = I_S = I_L D \quad I_0 = -I_D = -I_L (1-D)$$

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

## 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:

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

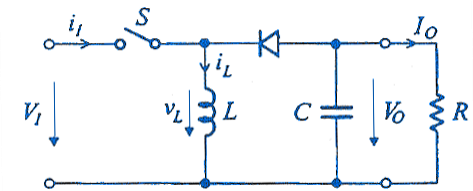
O regime de condução contínua mantém-se enquanto:

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

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

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

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





## 4. Conversor ampliador e redutor-ampliador (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  $D_0$  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:

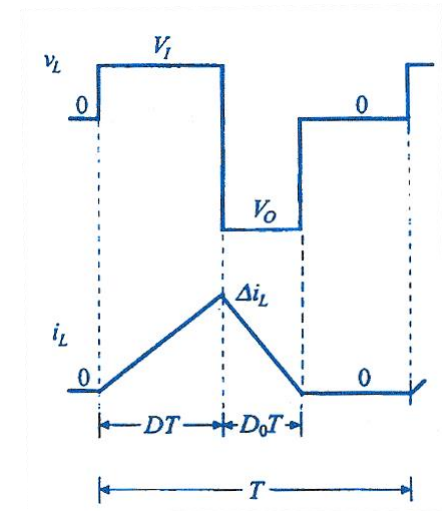
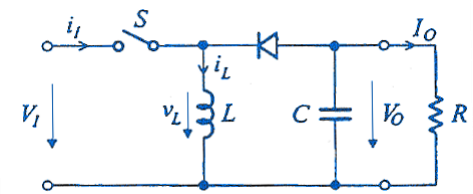
$$\Delta i_L^{(1)} + \Delta i_L^{(2)} = 0 \Rightarrow$$

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

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

Para determinar  $D_0$ :

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



# 5. Conversor em ponte

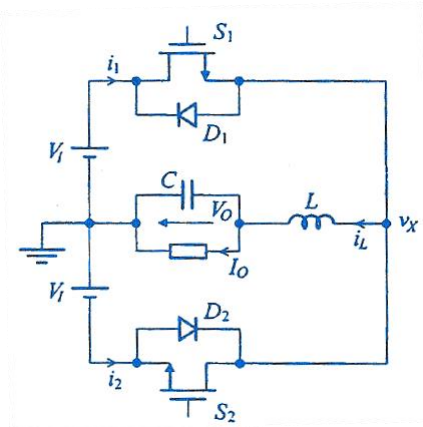
## 5.1. Definições

Os conversores anteriores (reductor, ampliador e reductor-ampliador) são de um quadrante porque a tensão e a corrente de saída só podem ter um sentido: O ponto de funcionamento no plano  $(V_o, I_o)$  situa-se sempre no mesmo quadrante

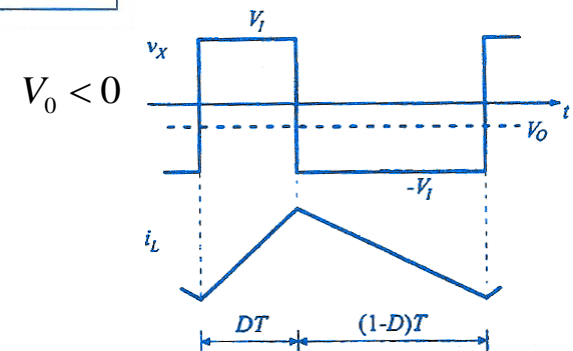
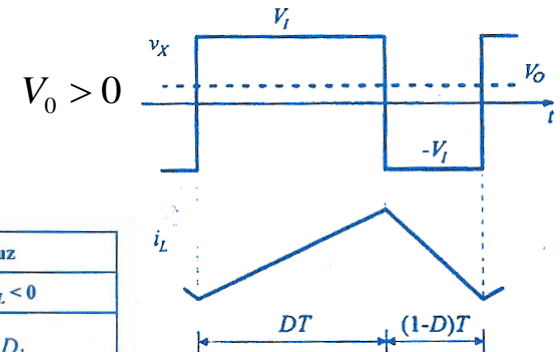
Os conversores de meia ponte e de ponte completa são de dois quadrantes ou de quatro quadrantes

## 5.2. Conversor em meia ponte

Os transístores que realizam os interruptores  $S_1$  e  $S_2$  são comandados por tensões complementares, de modo que num período  $S_1$  conduz durante  $DT$  e  $S_2$  durante  $(1-D)T$



Intervalo de tempo	Interruptor fechado	Dispositivo que conduz	
		$i_L > 0$	$i_L < 0$
$DT$	$S_1$	$S_1$	$D_1$
$(1-D)T$	$S_2$	$D_2$	$S_2$



$$S_1 \text{ ligado: } v_L = V_I - V_0 \quad \Delta i_L^{(1)} = \frac{V_I - V_0}{L} DT$$

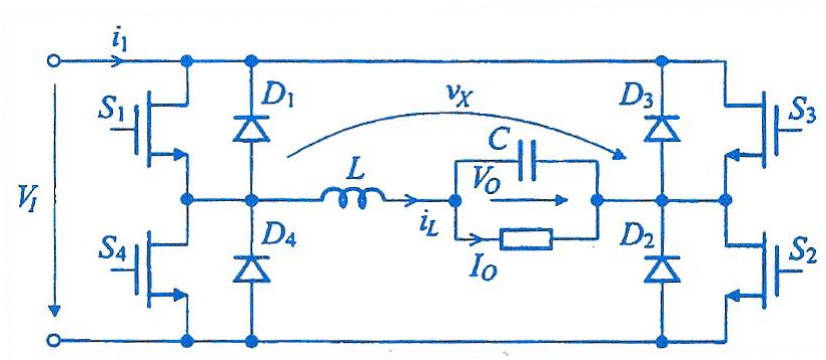
$$S_2 \text{ ligado: } v_L = -V_I - V_0 \quad \Delta i_L^{(2)} = \frac{-V_I - V_0}{L} (1-D)T$$

$$\Rightarrow V_0 = (2D-1)V_I$$

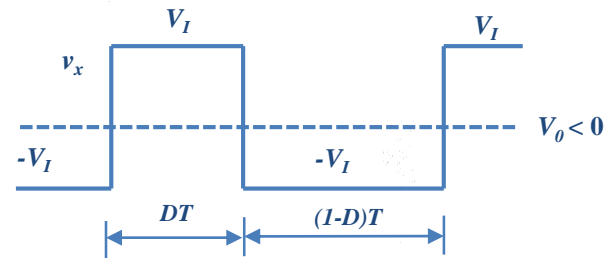
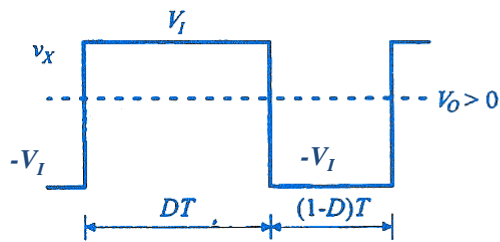
## 5. Conversor em ponte (cont.)

### 5.3. Conversor em ponte

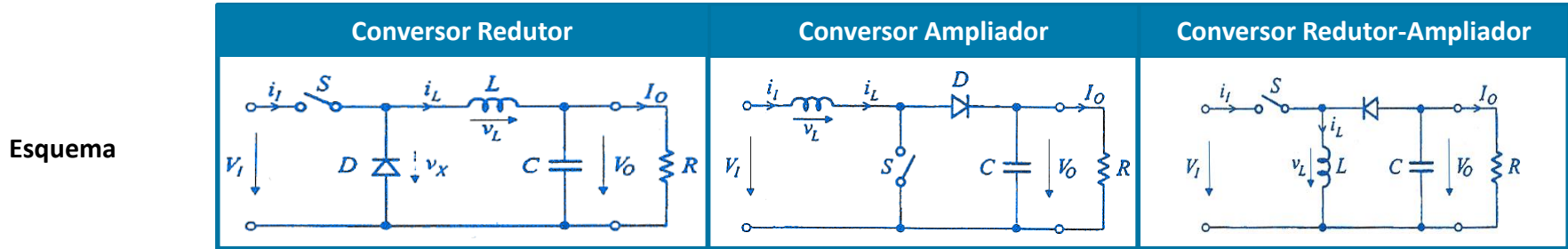
A duplicação do número de interruptores, em relação ao circuito em meia ponte, permite que se use apenas uma fonte de tensão  $V_I$



Intervalo de tempo	Interruptores fechados	$v_X$	Dispositivos que conduzem	
			$i_L > 0$	$i_L < 0$
$DT$	$S_1, S_2$	$+V_I$	$S_1, S_2$	$D_1, D_2$
$(1-D)T$	$S_3, S_4$	$-V_I$	$D_3, D_4$	$S_3, S_4$



## 6. Resumo dos conversores



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

### 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 $D_0$	$D_0^2 + D D_0 - \frac{2L}{RT} = 0$	$\frac{D+D_0}{D D_0^2} = \frac{RT}{2L}$	$D_0 = \sqrt{\frac{2L}{RT}}$