

Eletrônica Aplicada (EAP60807)

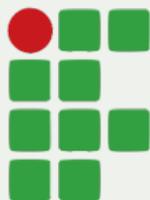
Curso Técnico Integrado em Telecomunicações

Fontes de tensão

Prof. Roberto Wanderley da Nóbrega

roberto.nobrega@ifsc.edu.br

docente.ifsc.edu.br/roberto.nobrega



**INSTITUTO
FEDERAL**
Santa Catarina

Câmpus
São José

Conceitos gerais

Diagrama típico

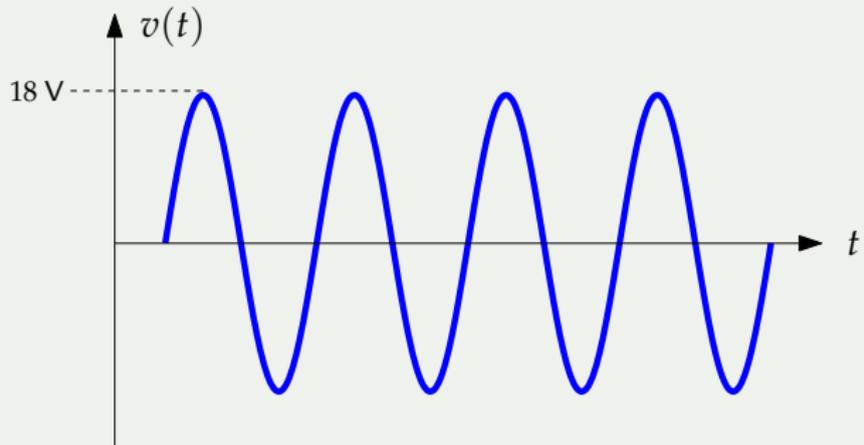
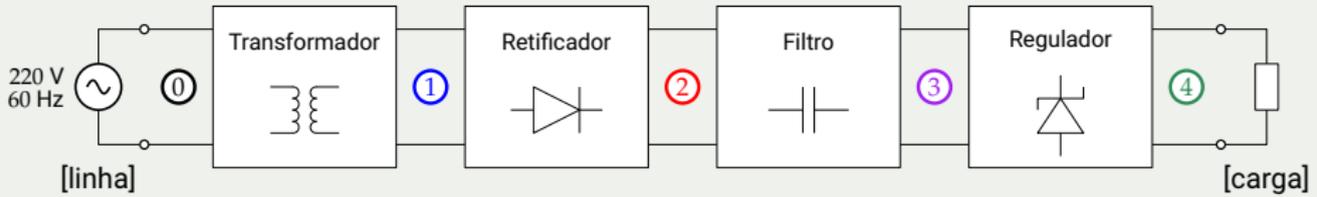


Diagrama típico

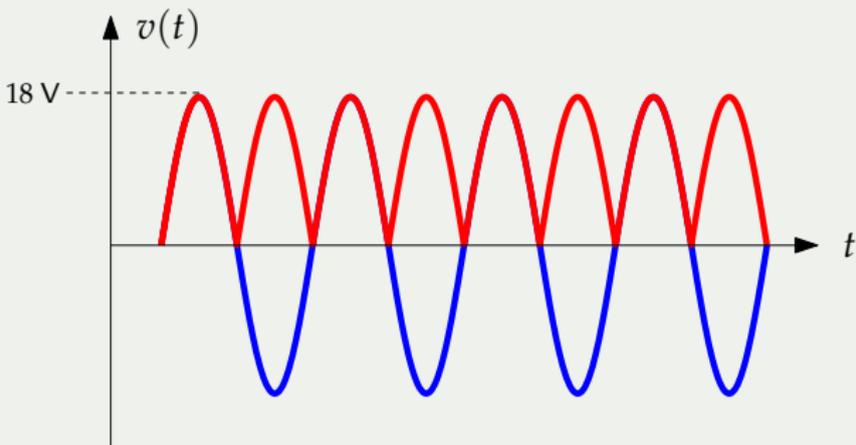
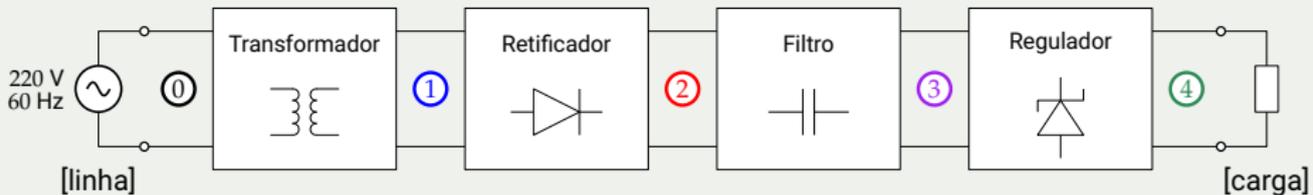


Diagrama típico

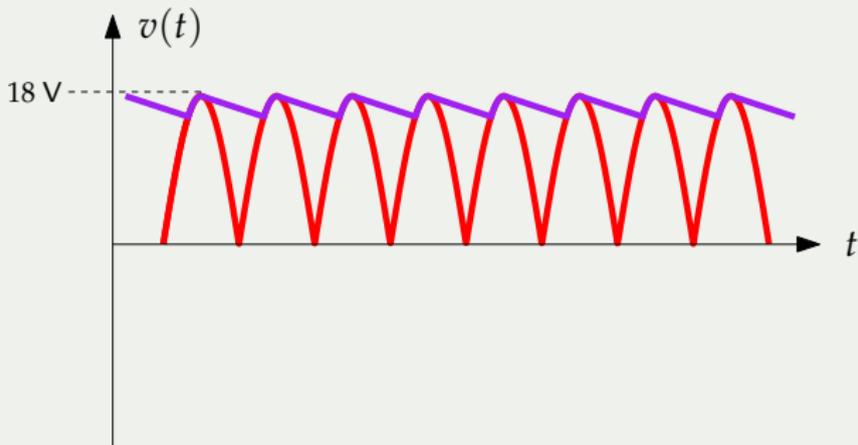
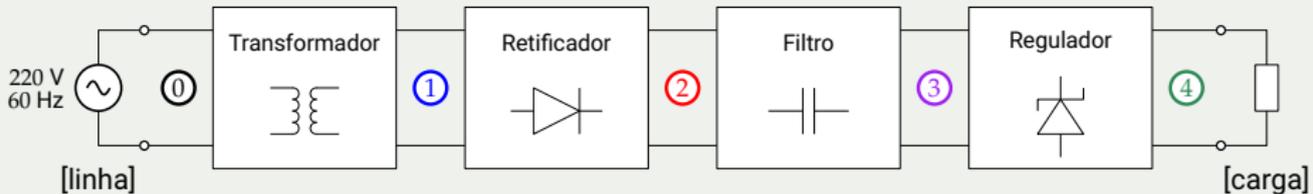
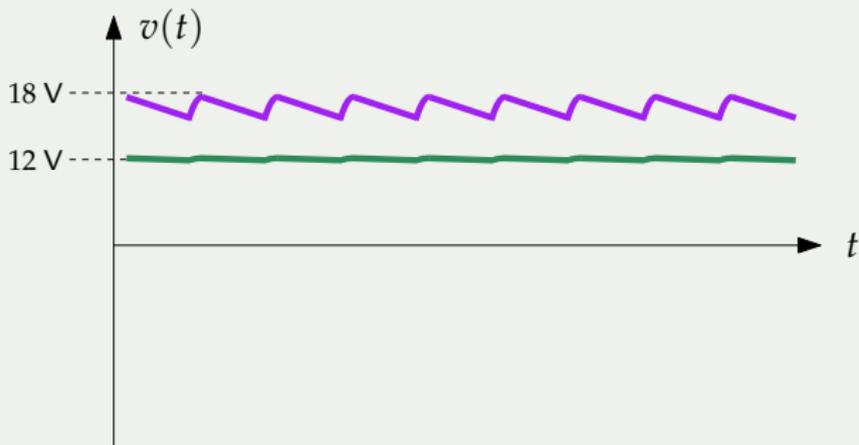
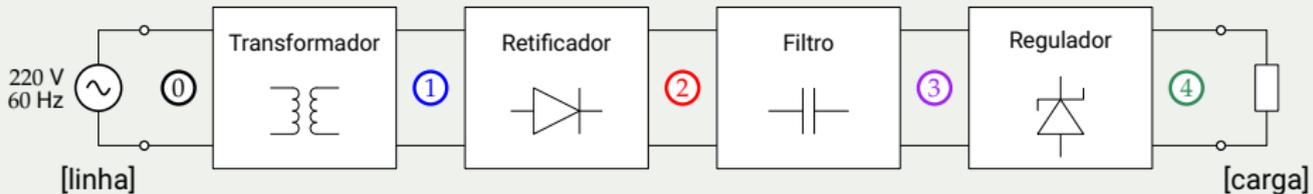


Diagrama típico



1 Regulação de carga.

$$\rho = \frac{V_{out}^{NL} - V_{out}^{FL}}{V_{out}^{FL}}.$$

NL: sem carga ('no load')

2 Regulação de linha.

$$\sigma = \frac{V_{out}^{HL} - V_{out}^{LL}}{V_{out}^{LL}}.$$

FL: plena carga ('full load')

HL: linha alta ('high line')

LL: linha baixa ('low line')

3 Eficiência.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

Outros: Regulação cruzada, regulação de temperatura, resistência de saída, ripple, etc.



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Regulação de carga
(@ linha nominal)



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Regulação de carga (@ linha nominal)

$$\begin{aligned}\rho &= \frac{V_{out}^{NL} - V_{out}^{FL}}{V_{out}^{FL}} \\ &= \frac{12,6\text{ V} - 11,8\text{ V}}{11,8\text{ V}} \\ &= 6,78\%.\end{aligned}$$



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Regulação de linha
(@ plena carga)



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Regulação de linha (@ plena carga)

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{V_{out}^{HL} - V_{out}^{LL}}{V_{out}^{LL}} \\ &= \frac{12,2\text{ V} - 11,5\text{ V}}{11,5\text{ V}} \\ &= 6,09\%.\end{aligned}$$



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Eficiência
(@ linha nominal, plena carga)



Exemplo

Uma fonte de tensão tem saída nominal de 12 V DC e potência máxima de 20 W. A fonte tem entrada nominal de 220 V rms, mas é capaz de operar na faixa de 205 a 240 V rms. Em testes de laboratório, foram obtidas as seguintes medições:

Entrada		Saída	
Tensão V rms	Corrente mA rms	Tensão V DC	Resistência Ω
220	0,05	12,6	∞
205	95,3	11,5	7,2
220	96,2	11,8	7,2
240	98,7	12,2	7,2

Eficiência

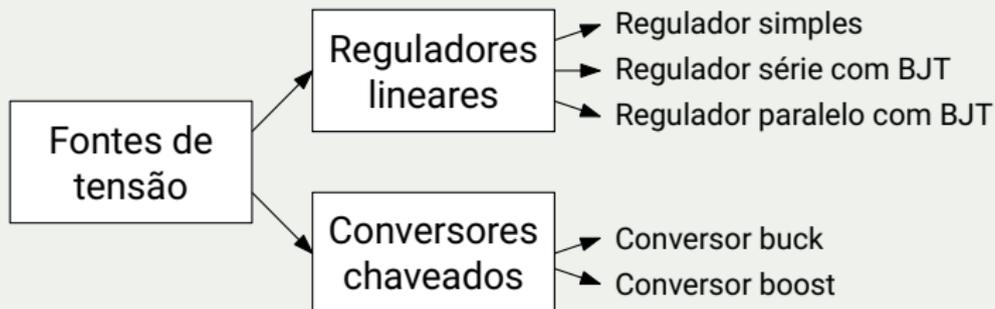
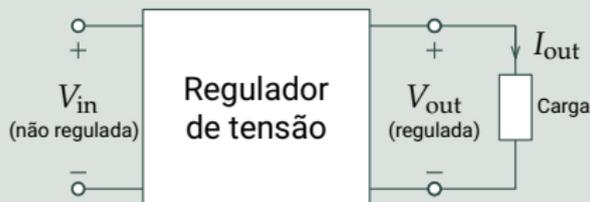
(@ linha nominal, plena carga)

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out}^2/R_L}{V_{in} I_{in}} \\ &= \frac{(11,8\text{ V})^2/(7,2\ \Omega)}{(220\text{ V})(96,2\text{ mA})} \\ &= 91,4\%.\end{aligned}$$

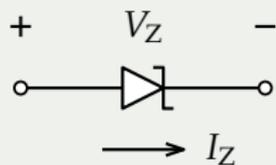


Regulador de tensão

Mantém o nível de tensão na carga o mais constante possível.



Reguladores lineares



Símbolo elétrico.

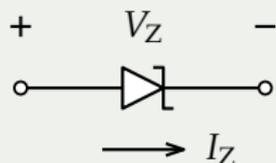


Clarence Zener (1905–1993).

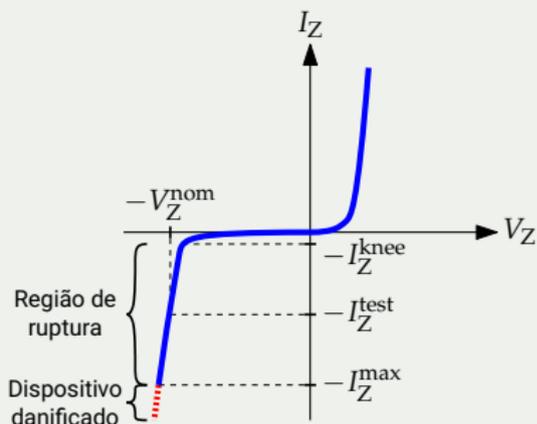
Principais especificações:

- V_Z^{nom} : **Tensão zener nominal.**
É especificada relativa a uma corrente de referência I_Z^{test} .
- I_Z^{knee} : **Corrente de joelho.**
Menor corrente para entrar na região de ruptura.
- I_Z^{max} : **Corrente máxima.**
Maior corrente antes de causar danos ao componente.
- r_Z : **Resistência diferencial.**
 $1/r_Z$ é a inclinação da curva na região de ruptura.





Símbolo elétrico.



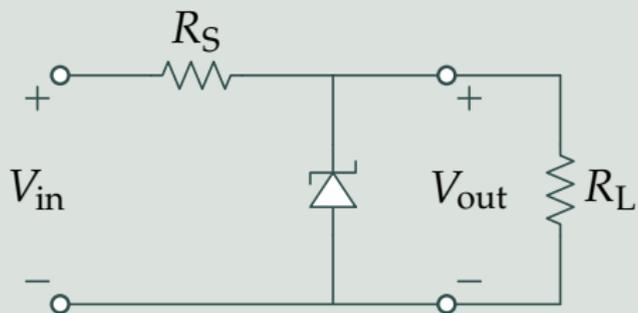
Curva tensão \times corrente.

Principais especificações:

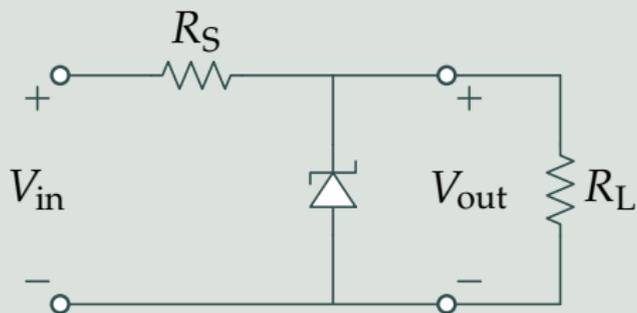
- V_Z^{nom} : **Tensão zener nominal.**
É especificada relativa a uma corrente de referência I_Z^{test} .
- I_Z^{knee} : **Corrente de joelho.**
Menor corrente para entrar na região de ruptura.
- I_Z^{max} : **Corrente máxima.**
Maior corrente antes de causar danos ao componente.
- r_Z : **Resistência diferencial.**
 $1/r_Z$ é a inclinação da curva na região de ruptura.



Circuito



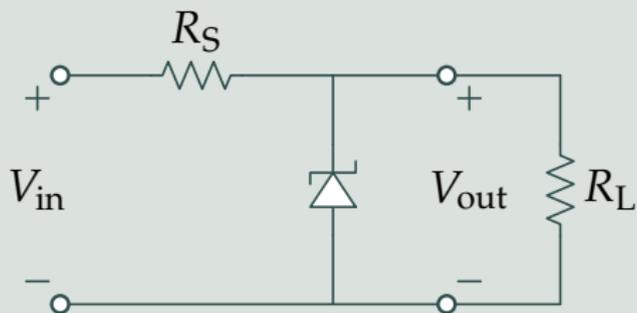
Circuito



É necessário garantir $I_Z^{knee} < I_Z < I_Z^{max}$.



Circuito



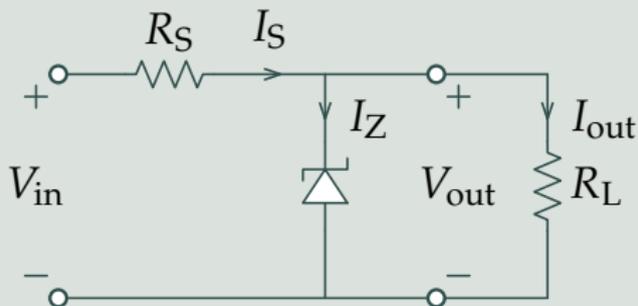
É necessário garantir $I_Z^{knee} < I_Z < I_Z^{max}$.



Na prática, evita-se operar muito perto de I_Z^{knee} ou I_Z^{max} .



Exemplo



Dados:

- $V_Z^{nom} = 10\text{ V}$.
- $R_S = 100\ \Omega$.
- $R_L = 500\ \Omega$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

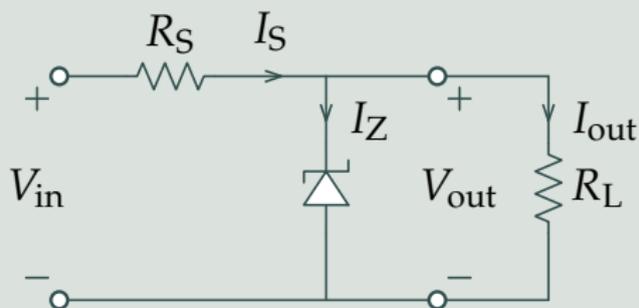
- a** Tensão e corrente na carga.

$$V_{out} = V_Z^{nom} = 10\text{ V}.$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{10\text{ V}}{500\ \Omega} = 20\text{ mA}.$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z^{nom} = 10\text{ V}$.
- $R_S = 100\ \Omega$.
- $R_L = 500\ \Omega$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

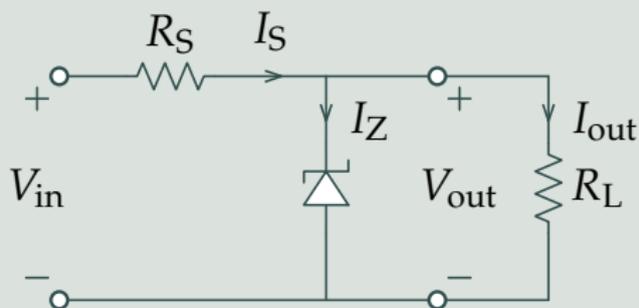
- b** Tensão e corrente em R_S .

$$V_S = V_{in} - V_{out} = 15\text{ V} - 10\text{ V} = 5\text{ V}$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{5\text{ V}}{100\ \Omega} = 50\text{ mA}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z^{nom} = 10\text{ V}$.
- $R_S = 100\ \Omega$.
- $R_L = 500\ \Omega$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

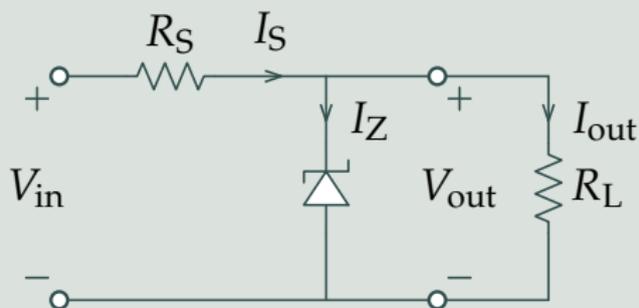
- c** Potência no zener.

$$I_Z = I_S - I_{out} = 50\text{ mA} - 20\text{ mA} = 30\text{ mA} \quad \checkmark$$

$$P_Z = V_Z I_Z = (10\text{ V})(30\text{ mA}) = 300\text{ mW} \quad \checkmark$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z^{nom} = 10\text{ V}$.
- $R_S = 100\ \Omega$.
- $R_L = 500\ \Omega$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

- d** Eficiência do regulador.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} = \frac{(10\text{ V})(20\text{ mA})}{(15\text{ V})(50\text{ mA})} = \frac{200\text{ mW}}{750\text{ mW}} = 26,7\%$$



- 1 Especificações:** V_{out} , V_{in}^{LL} , V_{in}^{HL} , I_{out}^{FL} .
- 2 Escolha do zener:** Escolher um zener com tensão nominal V_Z^{nom} mais próxima possível de V_{out} . Do datasheet, obter I_Z^{knee} e I_Z^{max} .
- 3 Determinação de R_S :**

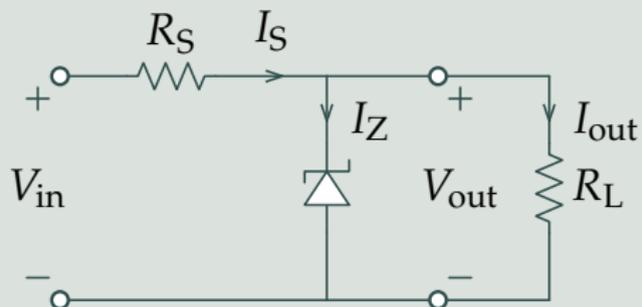
$$\frac{V_{in}^{HL} - V_Z^{nom}}{I_Z^{max}} \stackrel{(1)}{<} R_S \stackrel{(2)}{<} \frac{V_{in}^{LL} - V_Z^{nom}}{I_{out}^{FL} + I_Z^{knee}}.$$

- (1) Garante $I_Z < I_Z^{max}$ @ linha alta, sem carga.
- (2) Garante $I_Z > I_Z^{knee}$ @ linha baixa, plena carga.

Caso os valores calculados não forneçam um intervalo válido para R_S , um zener de maior potência deve ser escolhido (novos valores de I_Z^{knee} e I_Z^{max}).



Exemplo

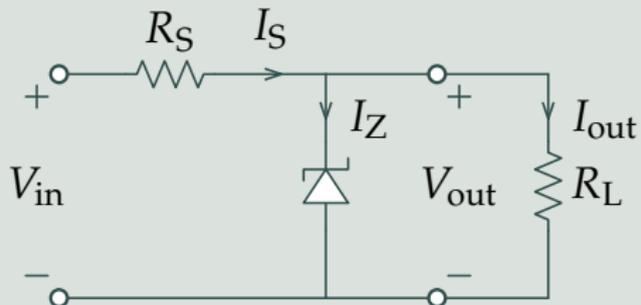


Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.



Exemplo



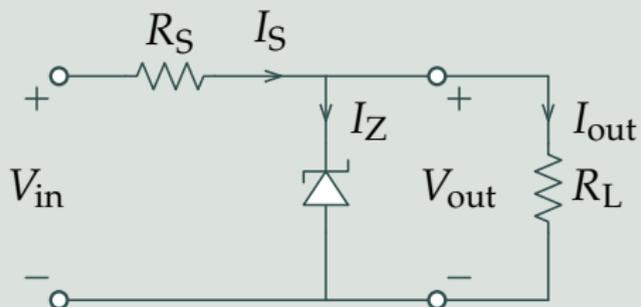
Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{nom} = 9,1\text{ V}$; $I_Z^{knee} = 0,5\text{ mA}$; $I_Z^{max} = 110\text{ mA}$.



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

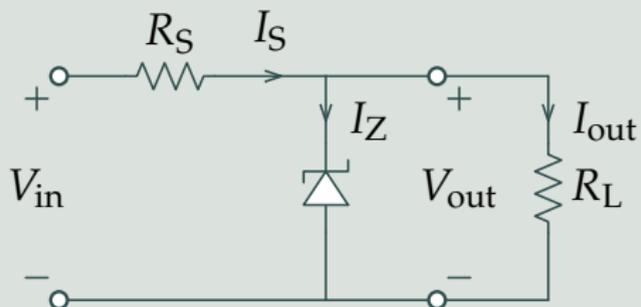
- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{nom} = 9,1\text{ V}$; $I_Z^{knee} = 0,5\text{ mA}$; $I_Z^{max} = 110\text{ mA}$.

Determinação do resistor:



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

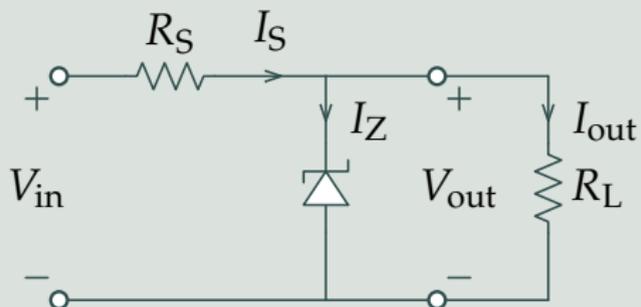
Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{\text{nom}} = 9,1 \text{ V}$; $I_Z^{\text{knee}} = 0,5 \text{ mA}$; $I_Z^{\text{max}} = 110 \text{ mA}$.

Determinação do resistor:

$$R_S < \frac{V_{in}^{LL} - V_Z^{\text{nom}}}{I_{out}^{FL} + I_Z^{\text{knee}}} = \frac{12 \text{ V} - 9,1 \text{ V}}{20 \text{ mA} + 0,5 \text{ mA}} = 141 \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

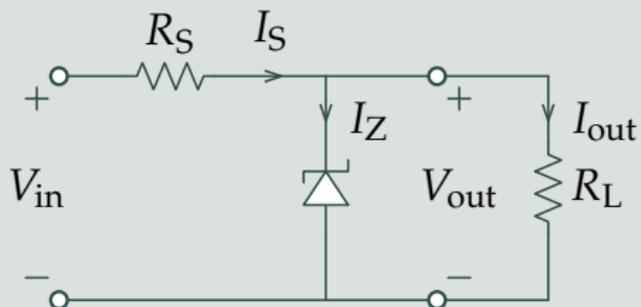
Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{nom} = 9,1\text{ V}$; $I_Z^{knee} = 0,5\text{ mA}$; $I_Z^{max} = 110\text{ mA}$.

Determinação do resistor:

$$R_S > \frac{V_{in}^{HL} - V_Z^{nom}}{I_Z^{max}} = \frac{15\text{ V} - 9,1\text{ V}}{110\text{ mA}} = 54\ \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

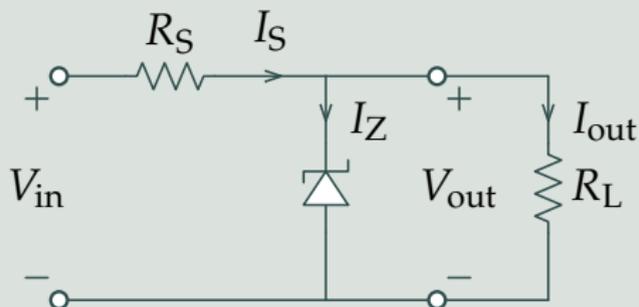
Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{\text{nom}} = 9,1 \text{ V}$; $I_Z^{\text{knee}} = 0,5 \text{ mA}$; $I_Z^{\text{max}} = 110 \text{ mA}$.

Determinação do resistor:

$$54 \Omega < R_S < 141 \Omega; \quad \text{Ex: } R_S = 100 \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{nom} = 9,1\text{ V}$; $I_Z^{knee} = 0,5\text{ mA}$; $I_Z^{max} = 110\text{ mA}$.

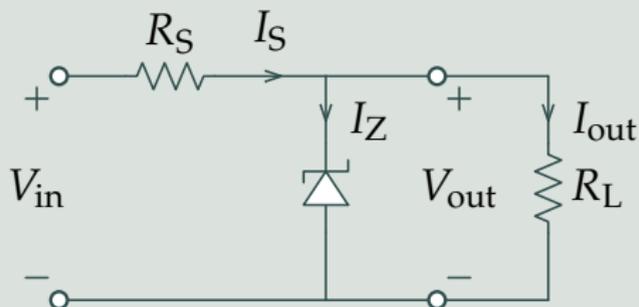
Determinação do resistor: $R_S = 100\ \Omega$.

- Mínima corrente no zener (@ LL e FL):

$$I_Z = I_S - I_{out}^{FL} = \frac{V_{in}^{LL} - V_Z^{nom}}{R_S} - I_{out}^{FL} = \frac{12\text{ V} - 9,1\text{ V}}{100\ \Omega} - 20\text{ mA} = 9\text{ mA}. \quad \checkmark$$



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{\text{nom}} = 9,1 \text{ V}$; $I_Z^{\text{knee}} = 0,5 \text{ mA}$; $I_Z^{\text{max}} = 110 \text{ mA}$.

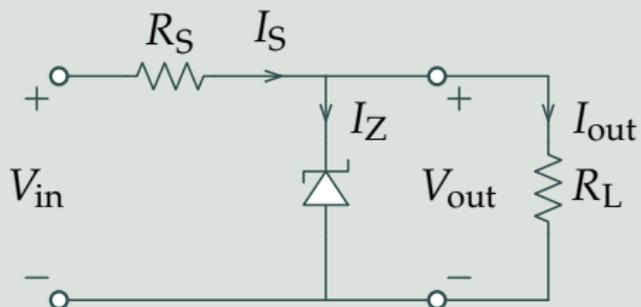
Determinação do resistor: $R_S = 100 \Omega$.

- Máxima corrente no zener (@ HL e NL):

$$I_Z = I_S = \frac{V_{in}^{\text{HL}} - V_Z^{\text{nom}}}{R_S} = \frac{15 \text{ V} - 9,1 \text{ V}}{100 \Omega} = 59 \text{ mA.} \quad \checkmark$$



Exemplo



Projete um regulador simples com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 20 mA.

Escolha do zener: 1N4739: $V_Z^{\text{nom}} = 9,1 \text{ V}$; $I_Z^{\text{knee}} = 0,5 \text{ mA}$; $I_Z^{\text{max}} = 110 \text{ mA}$.

Determinação do resistor: $R_S = 100 \Omega$.

• Eficiência do regulador @ LL e FL:

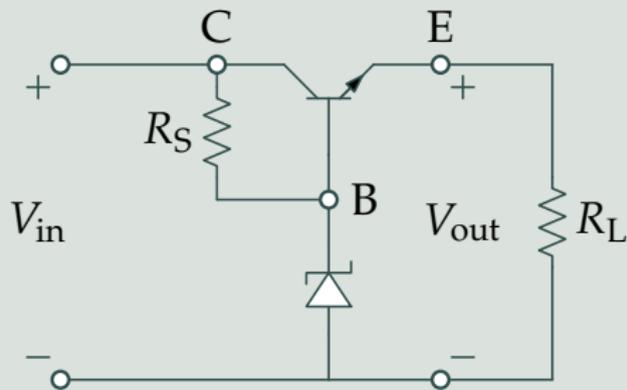
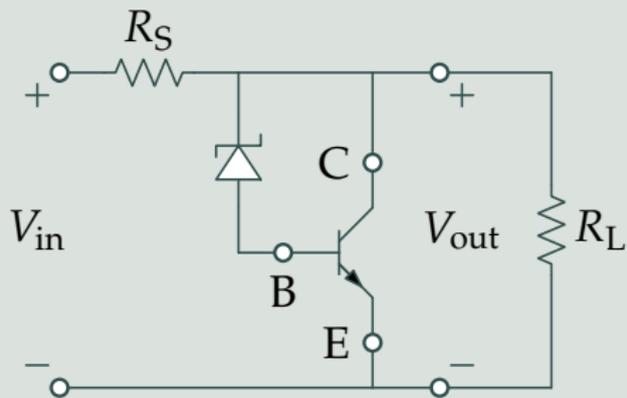
$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{out}} I_{\text{out}}}{V_{\text{in}} I_{\text{in}}} = \frac{(9,1 \text{ V})(20 \text{ mA})}{(12 \text{ V})(29 \text{ mA})} = 52,3 \%$$



Reguladores com BJT: Paralelo e série

Adequados para cargas de maior potência (na prática, $> 1\text{ W}$).

Circuitos



Transistor de junção bipolar (BJT) – Tipo NPN

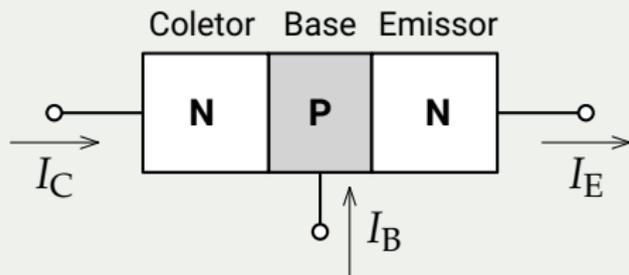
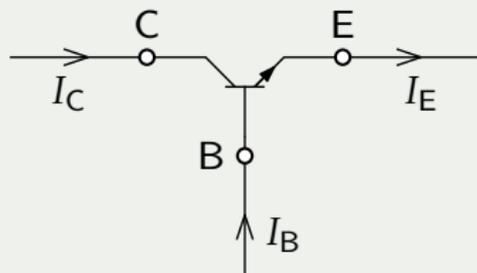
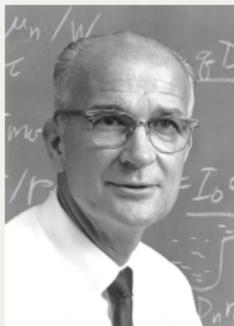


Diagrama físico.



Símbolo elétrico.



William Shockley (1910–1989), Nobel de Física.



Transistor de junção bipolar (BJT) – Tipo NPN

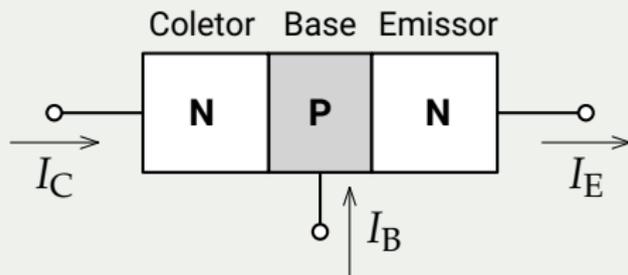
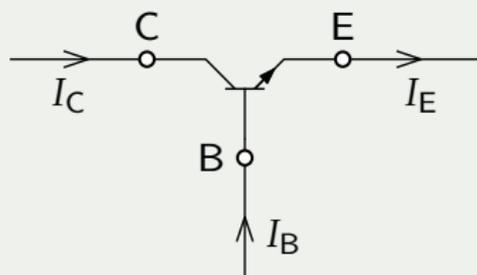


Diagrama físico.



Símbolo elétrico.

Amplificador de corrente.

$$I_C = h_{FE} I_B$$

h_{FE} : ganho de corrente

Tensão base-emissor.

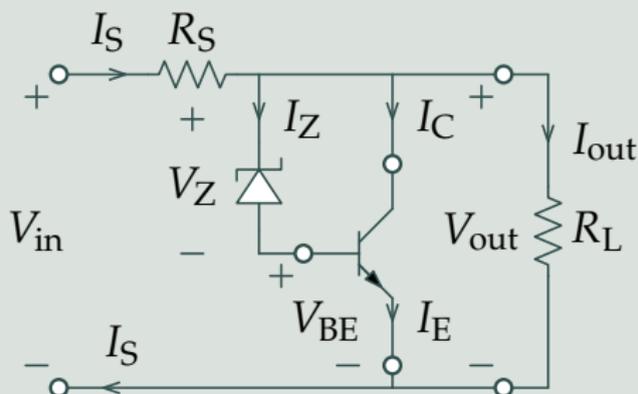
V_{BE} se mantém constante (ex.: 0,7 V).

Potência dissipada.

$$P_{BJT} = V_{CE} I_C + V_{BE} I_B \approx V_{CE} I_E$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3\text{ V.}$
- $R_L = 50\ \Omega.$
- $V_{BE} = 0,7\text{ V.}$
- $R_S = 10\ \Omega.$
- $h_{FE} = 49.$
- $V_{in} = 15\text{ V.}$

Determine:

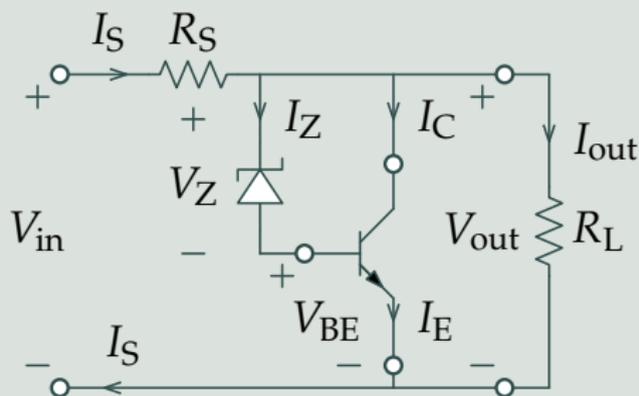
- a** Tensão e corrente na carga.

$$V_{out} = V_Z + V_{BE} = 9,3\text{ V} + 0,7\text{ V} = 10\text{ V.}$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{10\text{ V}}{50\ \Omega} = 200\text{ mA.}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3\text{ V}$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $h_{FE} = 49$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $R_S = 10\ \Omega$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

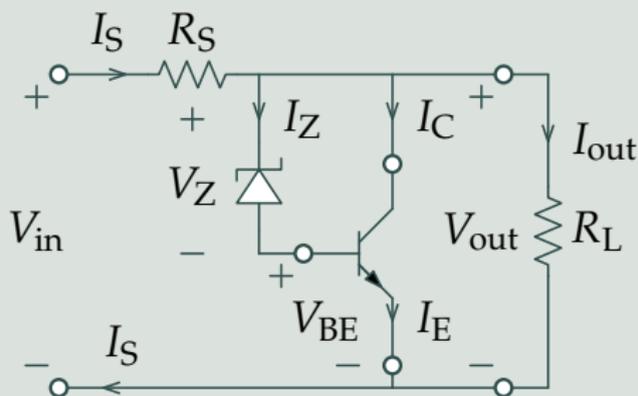
- b** Tensão e corrente em R_S .

$$V_S = V_{in} - V_{out} = 15\text{ V} - 10\text{ V} = 5\text{ V}.$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{5\text{ V}}{10\ \Omega} = 500\text{ mA}.$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3 \text{ V.}$
- $R_L = 50 \Omega.$
- $V_{BE} = 0,7 \text{ V.}$
- $R_S = 10 \Omega.$
- $h_{FE} = 49.$
- $V_{in} = 15 \text{ V.}$

Determine:

- c** Correntes no BJT.

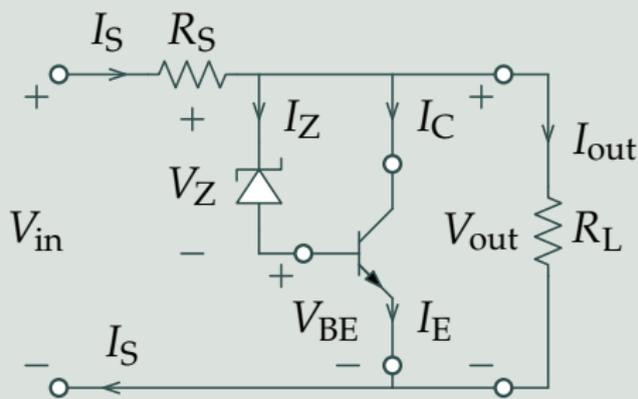
$$\begin{aligned} I_E &= I_S - I_{out} \\ &= 500 \text{ mA} - 200 \text{ mA} \\ &= 300 \text{ mA.} \end{aligned}$$

$$I_B = \frac{1}{h_{FE}+1} I_E = \frac{1}{50} (300 \text{ mA}) = 6 \text{ mA.}$$

$$I_C = \frac{h_{FE}}{h_{FE}+1} I_E = \frac{49}{50} (300 \text{ mA}) = 294 \text{ mA.}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3\text{ V.}$
- $R_L = 50\ \Omega.$
- $V_{BE} = 0,7\text{ V.}$
- $R_S = 10\ \Omega.$
- $h_{FE} = 49.$
- $V_{in} = 15\text{ V.}$

Determine:

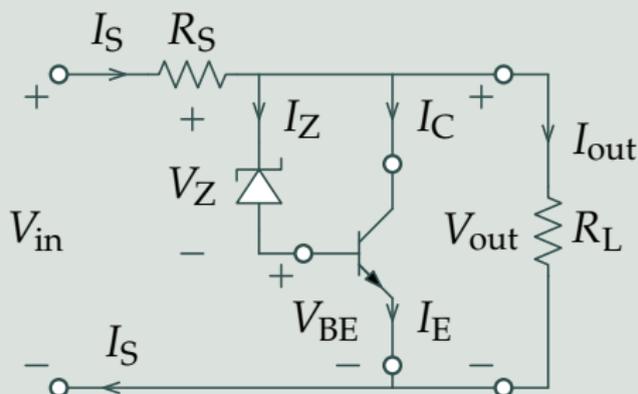
- d** Potência no zener.

$$I_Z = I_B = 6\text{ mA.} \quad \checkmark$$

$$P_Z = V_Z I_Z = (9,3\text{ V})(6\text{ mA}) = 55,8\text{ mW.} \quad \checkmark$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3 \text{ V.}$
- $V_{BE} = 0,7 \text{ V.}$
- $h_{FE} = 49.$
- $R_L = 50 \Omega.$
- $R_S = 10 \Omega.$
- $V_{in} = 15 \text{ V.}$

Determine:

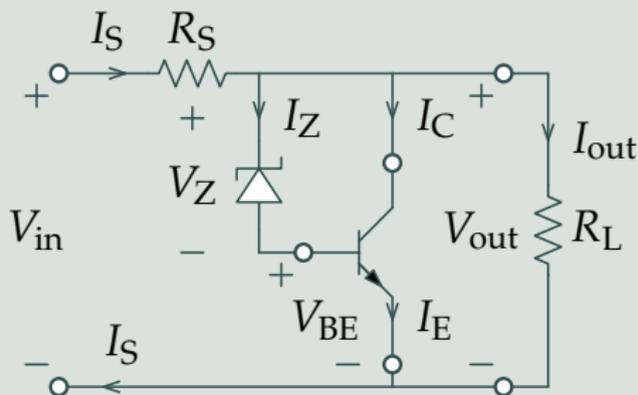
- e** Potência no BJT.

$$V_{CE} = V_{out} = 10 \text{ V.}$$

$$P_{BJT} \approx V_{CE} I_E = (10 \text{ V})(300 \text{ mA}) = 3 \text{ W.}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 9,3\text{ V}$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $R_S = 10\ \Omega$.
- $h_{FE} = 49$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

- f** Eficiência do regulador.

$$I_{in} = I_S = 500\text{ mA}.$$

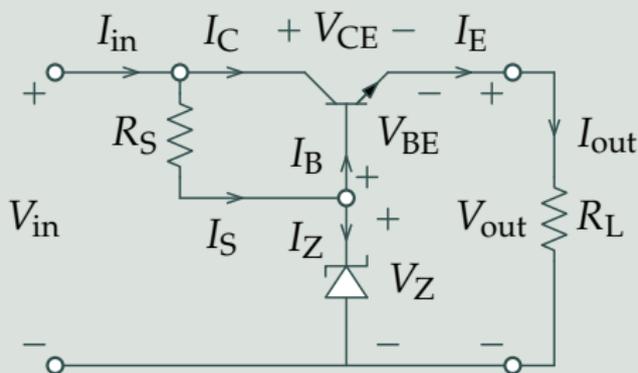
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} = \frac{(10\text{ V})(200\text{ mA})}{(15\text{ V})(500\text{ mA})} = \frac{2\text{ W}}{7,5\text{ W}} = 26,7\%.$$



Não abordado nesta disciplina.



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 10,7\text{ V}$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $R_S = 430\ \Omega$.
- $h_{FE} = 49$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

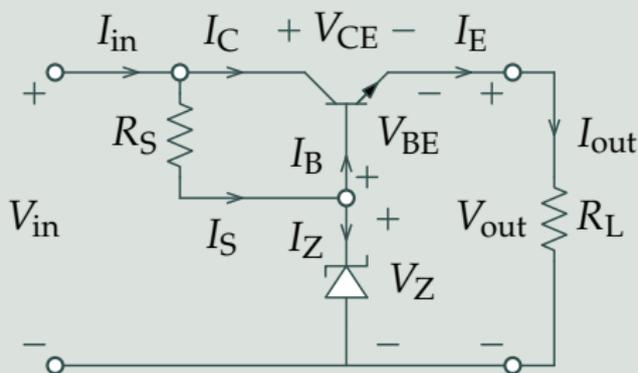
- a** Tensão e corrente na carga.

$$V_{out} = V_Z - V_{BE} = 10,7\text{ V} - 0,7\text{ V} = 10\text{ V}.$$

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{10\text{ V}}{50\ \Omega} = 200\text{ mA}.$$



Exemplo



Dados:

■ $V_Z = 10,7\text{ V.}$

■ $R_L = 50\ \Omega.$

■ $V_{BE} = 0,7\text{ V.}$

■ $R_S = 430\ \Omega.$

■ $h_{FE} = 49.$

■ $V_{in} = 15\text{ V.}$

Determine:

b Correntes no BJT.

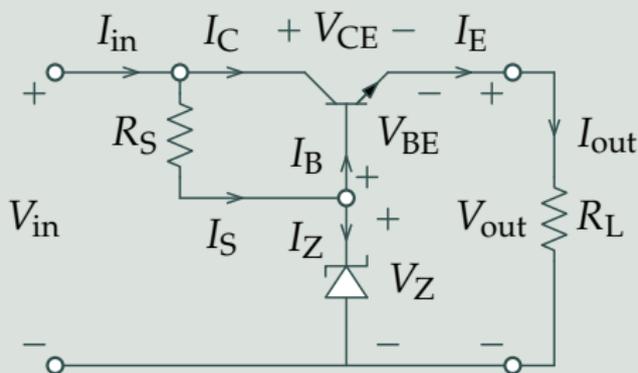
$$I_E = I_{out} = 200\text{ mA.}$$

$$I_B = \frac{1}{h_{FE}+1} I_E = \frac{1}{50} (200\text{ mA}) = 4\text{ mA.}$$

$$I_C = \frac{h_{FE}}{h_{FE}+1} I_E = \frac{49}{50} (200\text{ mA}) = 196\text{ mA.}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 10,7\text{ V}$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $R_S = 430\ \Omega$.
- $h_{FE} = 49$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

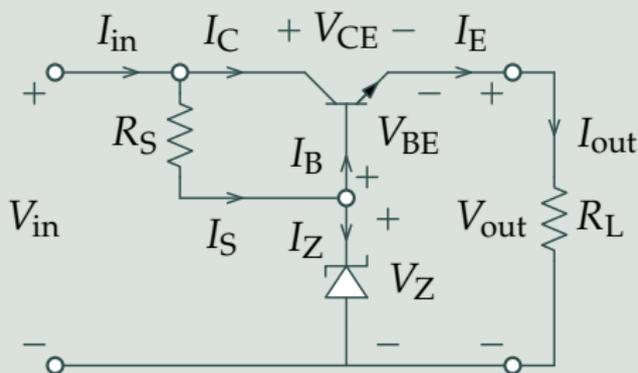
- c** Tensão e corrente em R_S .

$$V_S = V_{in} - V_Z = 15\text{ V} - 10,7\text{ V} = 4,3\text{ V}.$$

$$I_S = \frac{V_S}{R_S} = \frac{4,3\text{ V}}{430\ \Omega} = 10\text{ mA}.$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 10,7\text{ V}$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $R_S = 430\ \Omega$.
- $h_{FE} = 49$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

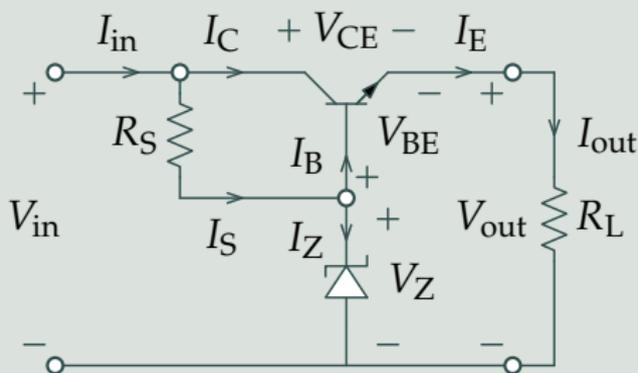
- d** Potência no zener.

$$I_Z = I_S - I_B = 10\text{ mA} - 4\text{ mA} = 6\text{ mA} \quad \checkmark$$

$$P_Z = V_Z I_Z = (10,7\text{ V})(6\text{ mA}) = 64,2\text{ mW} \quad \checkmark$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 10,7\text{ V.}$
- $R_L = 50\ \Omega.$
- $V_{BE} = 0,7\text{ V.}$
- $R_S = 430\ \Omega.$
- $h_{FE} = 49.$
- $V_{in} = 15\text{ V.}$

Determine:

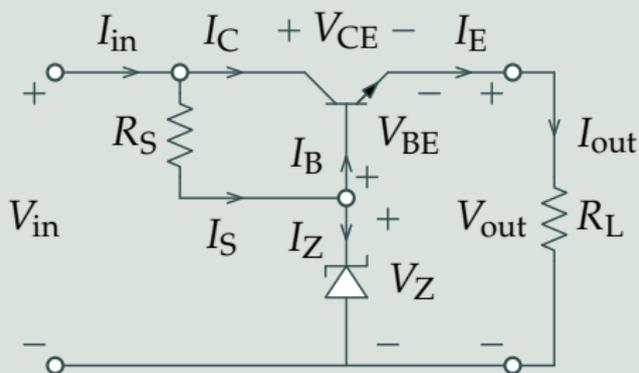
- e** Potência no BJT.

$$V_{CE} = V_{in} - V_{out} = 15\text{ V} - 10\text{ V} = 5\text{ V.}$$

$$P_{BJT} \approx V_{CE} I_E = (5\text{ V})(200\text{ mA}) = 1\text{ W.}$$



Exemplo



Dados:

- $V_Z = 10,7\text{ V}$.
- $R_L = 50\ \Omega$.
- $V_{BE} = 0,7\text{ V}$.
- $R_S = 430\ \Omega$.
- $h_{FE} = 49$.
- $V_{in} = 15\text{ V}$.

Determine:

- f** Eficiência do regulador.

$$I_{in} = I_C + I_S = 196\text{ mA} + 10\text{ mA} = 206\text{ mA}.$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} = \frac{(10\text{ V})(200\text{ mA})}{(15\text{ V})(206\text{ mA})} = \frac{2\text{ W}}{3,09\text{ W}} = 64,7\%.$$



1 **Especificações:** V_{out} , V_{in}^{LL} , V_{in}^{HL} , I_{out}^{FL} .

2 **Escolha do BJT:**

- Máxima corrente do coletor: $I_C^{max} > I_{out}^{FL}$.
- Máxima tensão coletor-emissor: $V_{CE}^{max} > V_{in}^{HL} - V_{out}$.
- Máxima dissipação de potência: $P_{BJT}^{max} > (V_{in}^{HL} - V_{out}) I_{out}^{FL}$.
- Obter também h_{FE} (valor mínimo), V_{BE} (valor típico).

3 **Escolha do zener:**

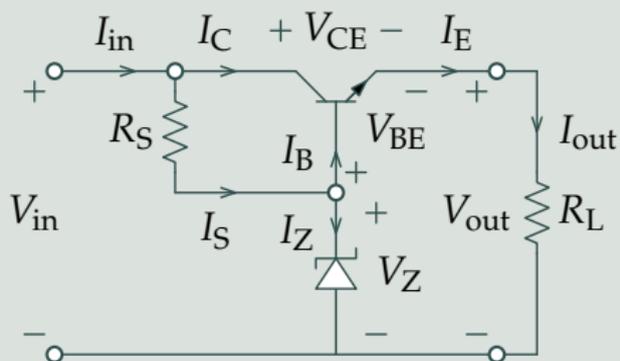
- Tensão zener nominal: $V_Z^{nom} \approx V_{out} + V_{BE}$.
- Obter também I_Z^{knee} , I_Z^{max} .

4 **Determinação de R_S :**

$$\frac{V_{in}^{HL} - V_Z^{nom}}{I_Z^{max}} < R_S < \frac{V_{in}^{LL} - V_Z^{nom}}{I_{out}^{FL}/(h_{FE} + 1) + I_Z^{knee}}$$



Exemplo

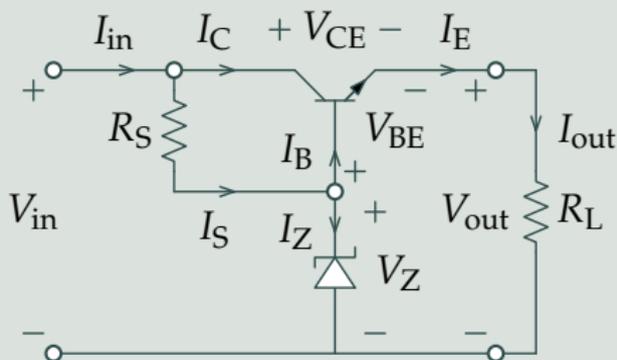


Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

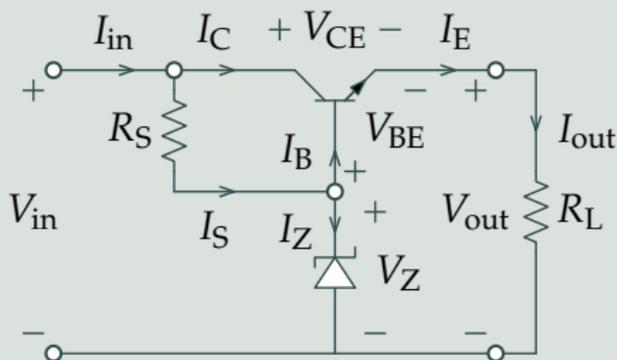
- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

Escolha do BJT: BD135. Do datasheet, assumindo $T_c = 25^\circ\text{C}$:

- $I_C^{\max} = 1,5\text{ A}$.
- $V_{CE}^{\max} = 45\text{ V}$.
- $P_{\text{BJT}}^{\max} = 12,5\text{ W}$.
- $h_{FE} = 25$ (mínimo).
- $V_{BE} = 0,8\text{ V}$ (típico).



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

Escolha do zener: 1N4740. Do datasheet:

- $V_Z^{nom} = 10 \text{ V.}$

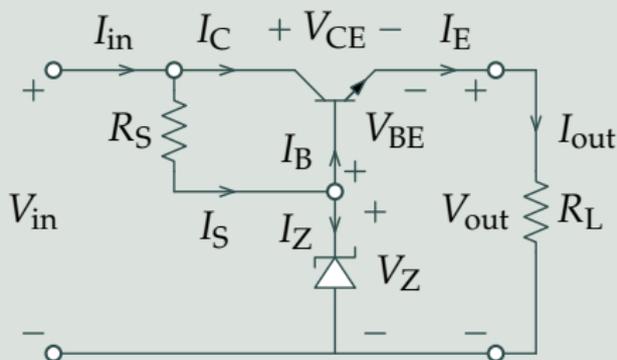
- $P_Z^{max} = 1 \text{ W.}$

- $I_Z^{max} = P_Z^{max} / V_Z^{nom} = 100 \text{ mA.}$

- $I_Z^{knee} = 0,25 \text{ mA.}$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

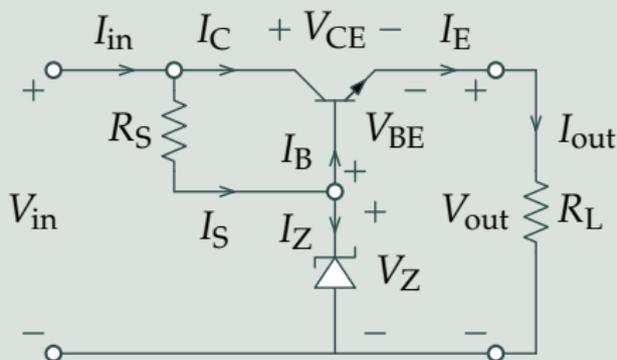
- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

Determinação do resistor:

$$R_S > \frac{V_{in}^{HL} - V_Z^{nom}}{I_Z^{max}} = \frac{15\text{ V} - 10\text{ V}}{100\text{ mA}} = 50\ \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

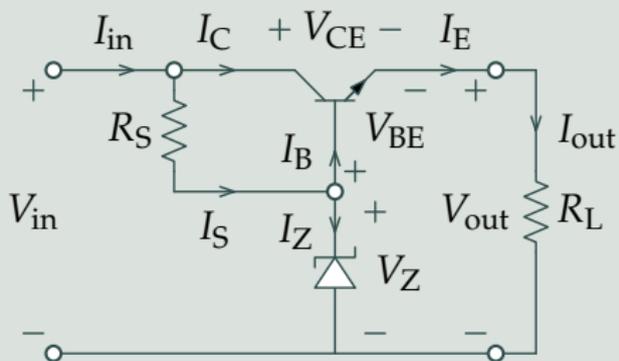
- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

Determinação do resistor:

$$R_S < \frac{V_{in}^{LL} - V_Z^{nom}}{I_{out}^{FL}/(h_{FE} + 1) + I_Z^{knee}} = \frac{12\text{ V} - 10\text{ V}}{(500\text{ mA})/(26) + 0,25\text{ mA}} = 102\ \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

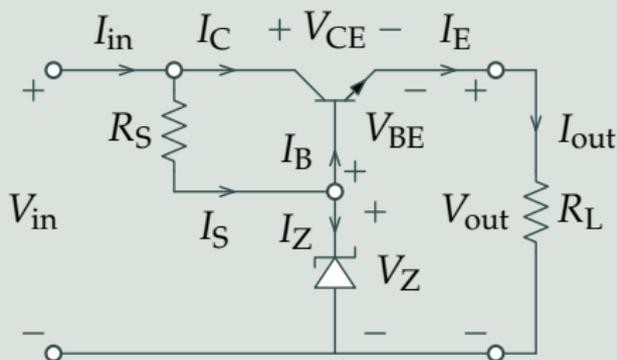
- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

Determinação do resistor:

$$50 \Omega < R_S < 102 \Omega; \quad \text{Ex: } R_S = 82 \Omega.$$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

• Mínima corrente no zener (@ LL e FL):

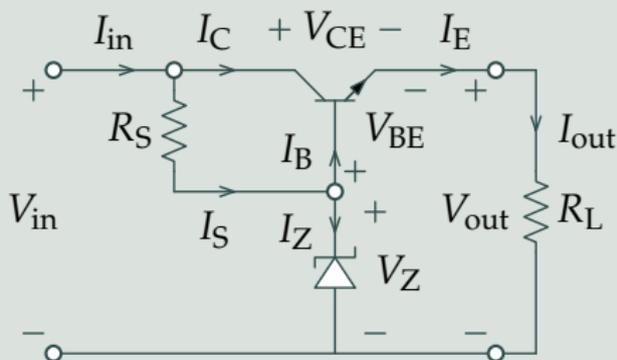
$$I_S = (V_{in}^{LL} - V_Z^{nom}) / R_S = (12V - 10V) / (82\Omega) = 24,4\text{ mA.}$$

$$I_B = I_{out}^{FL} / (h_{FE} + 1) = (500\text{ mA}) / 26 = 19,2\text{ mA.}$$

$$I_Z = I_S - I_B = 24,4\text{ mA} - 19,2\text{ mA} = 5,2\text{ mA.} \quad \checkmark$$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

• Máxima corrente no zener (@ HL e NL):

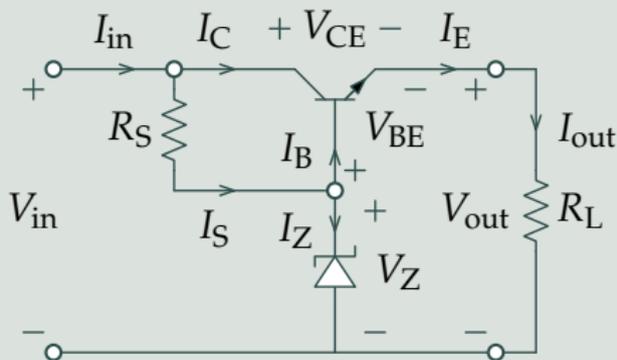
$$I_S = (V_{in}^{HL} - V_Z^{nom}) / R_S = (15\text{ V} - 10\text{ V}) / (82\ \Omega) = 61\text{ mA}.$$

$$I_B = I_{out}^{LL} / (h_{FE} + 1) = 0.$$

$$I_Z = I_S - I_B = 61\text{ mA}. \quad \checkmark$$



Exemplo



Projete um regulador série com BJT com as seguintes especificações:

- Tensão de entrada de 12 a 15 V.
- Tensão de saída de 9 V.
- Carga de até 4,5 W.

• Eficiência do regulador @ LL e FL:

$$I_{in} = I_{out} + I_Z = 500 \text{ mA} + 5,2 \text{ mA} = 505,2 \text{ mA}.$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} I_{in}} = \frac{(9,2 \text{ V})(500 \text{ mA})}{(12 \text{ V})(505,2 \text{ mA})} = \frac{4,6 \text{ W}}{6,06 \text{ W}} = 75,9\%.$$



- 1 Inúmeras variações dos circuitos.
- 2 Reguladores em malha fechada.
- 3 Variação com a temperatura.
- 4 Proteção contra curto-circuito e limitação da corrente de saída.
- 5 CIs reguladores de tensão (ex: LM78XX).
- 6 Reguladores com tensão de saída ajustável.



Não vimos nem a ponta do iceberg!



Conversores DC-DC chaveados

Utilizam transistores que operam como **chaves** controladas.

Vantagens:

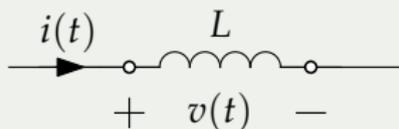
- Alta eficiência (na teoria: 100%).
- Baixo peso e volume.

Desvantagens:

- Alto ripple (ondulação) de saída.
- Transitórios mais lentos.
- Produz interferência eletromagnética (ou mesmo ruído audível).



O **indutor** é um elemento que armazena energia na forma de campo magnético. O indutor se opõe à variação da corrente.



Símbolo elétrico.

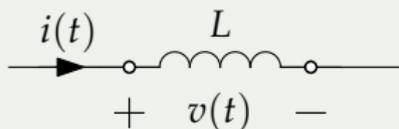
Relação tensão–corrente.

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v(t)}{L}.$$

L é a **indutância** em Henry (H).



O **indutor** é um elemento que armazena energia na forma de campo magnético. O indutor se opõe à variação da corrente.



Símbolo elétrico.

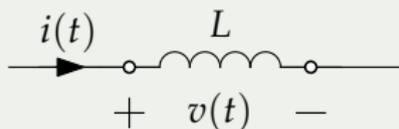
Relação tensão–corrente.

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{v}{L}$$

L é a **indutância** em Henry (H).



O **indutor** é um elemento que armazena energia na forma de campo magnético. O indutor se opõe à variação da corrente.



Símbolo elétrico.

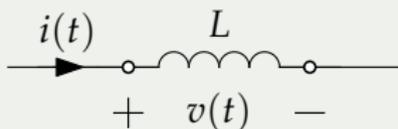
Relação tensão–corrente.

$$\Delta i = \frac{v}{L} \Delta t.$$

L é a **indutância** em Henry (H).

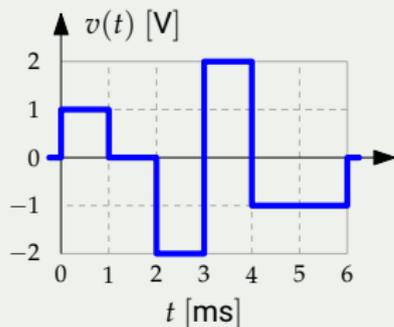


O **indutor** é um elemento que armazena energia na forma de campo magnético. O indutor se opõe à variação da corrente.



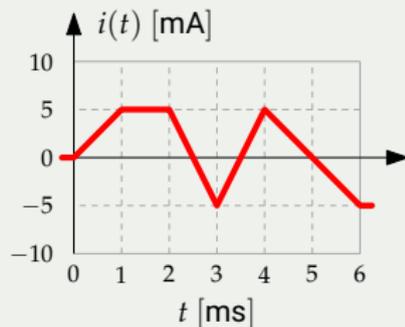
Símbolo elétrico.

Exemplo.

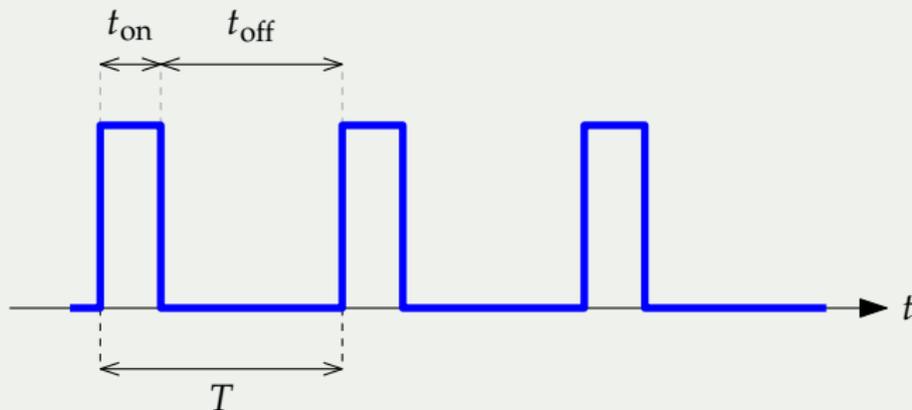


$$L = 200 \text{ mH.}$$

$$\Delta i = \frac{v}{L} \Delta t.$$



Modulação PWM



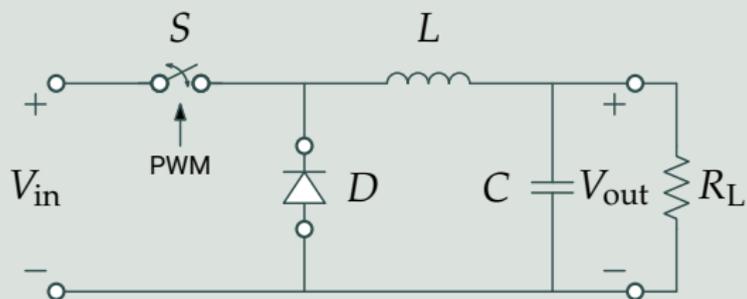
Frequência	f	Hz
Período	T	s
Tempo ligado	t_{on}	s
Tempo desligado	t_{off}	s
Razão cíclica	D	%

$$T = \frac{1}{f} \quad T = t_{on} + t_{off}$$

$$D = \frac{t_{on}}{T}$$



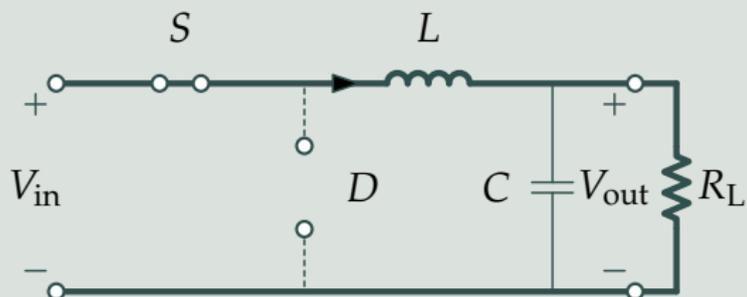
Circuito



Conversor DC-DC abaixador.



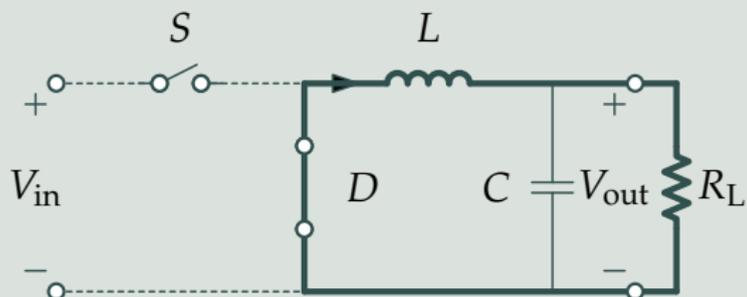
Circuito



Durante t_{on} : Chave S fecha e diodo D abre.



Circuito

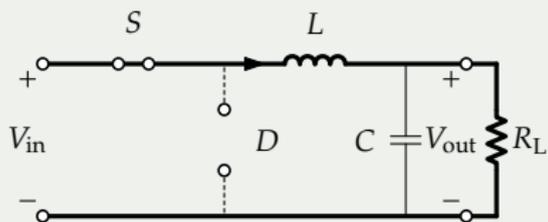


Durante t_{off} : Chave S abre e diodo D fecha.

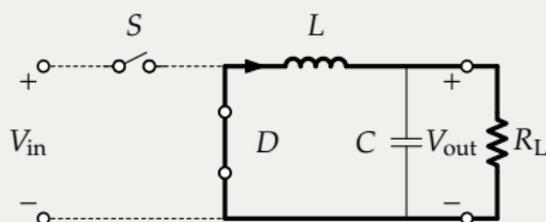


Conversor buck: Análise em regime permanente

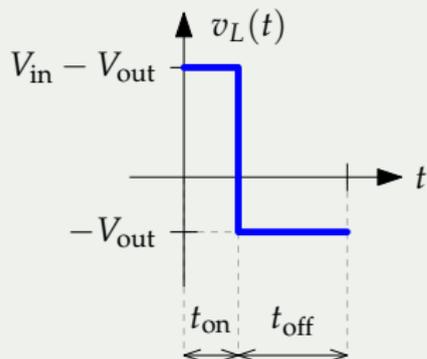
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :

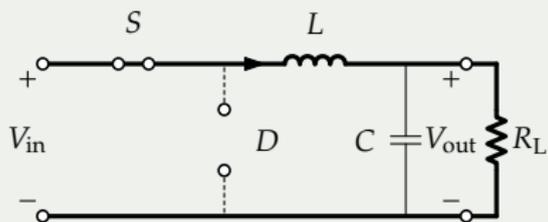


Relação entre as tensões de entrada e saída.

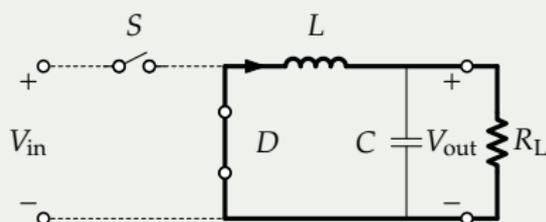


Conversor buck: Análise em regime permanente

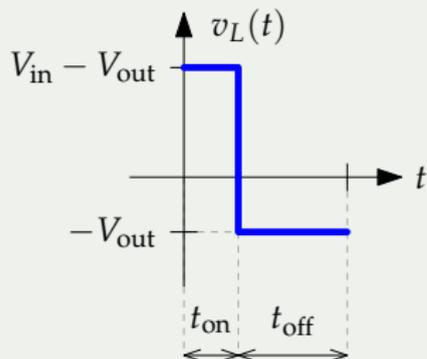
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Relação entre as tensões de entrada e saída.



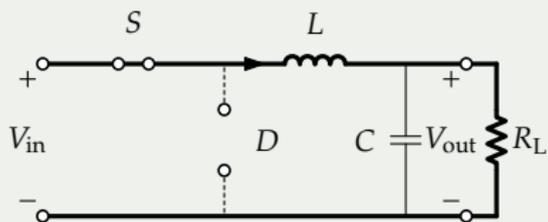
Tensão média no indutor é nula:

$$t_{on}(V_{in} - V_{out}) + t_{off}(-V_{out}) = 0.$$

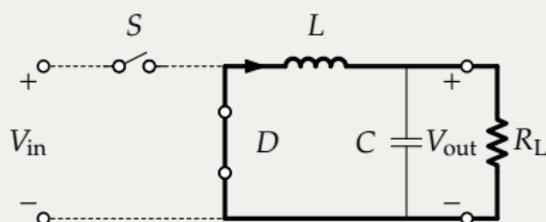


Conversor buck: Análise em regime permanente

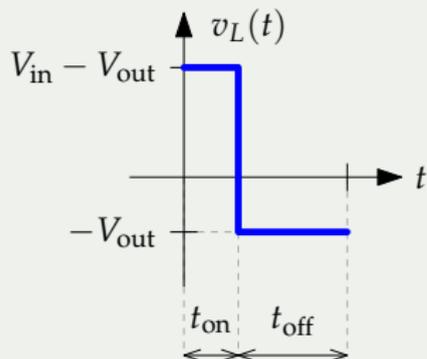
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Relação entre as tensões de entrada e saída.



Tensão média no indutor é nula:

$$t_{on}(V_{in} - V_{out}) + t_{off}(-V_{out}) = 0.$$

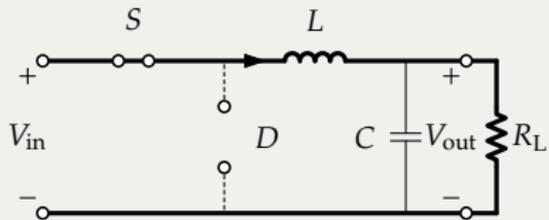
Após manipulações algébricas:

$$V_{out} = DV_{in}.$$

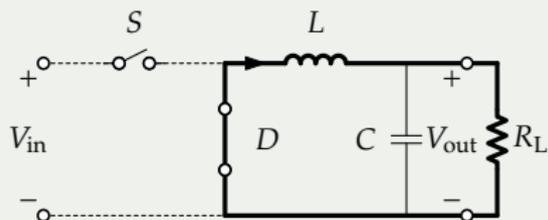


Conversor buck: Análise em regime permanente

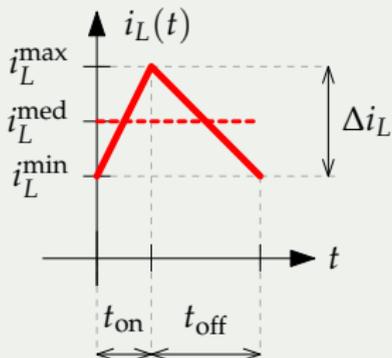
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :

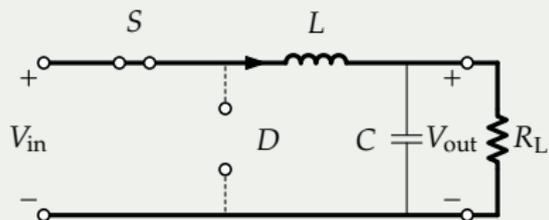


Corrente no indutor.

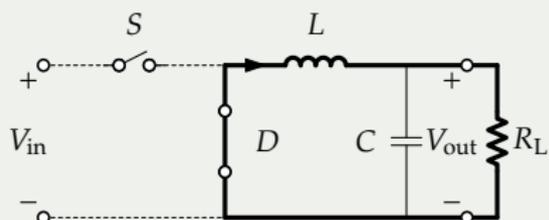


Conversor buck: Análise em regime permanente

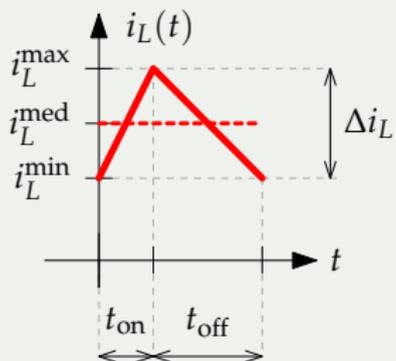
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Corrente no indutor.



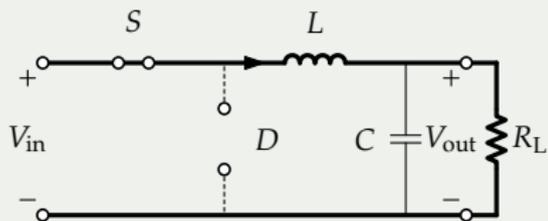
Corrente média no indutor:

$$i_L^{\text{med}} = I_{\text{out}} + i_C^{\text{med}} = I_{\text{out}}$$

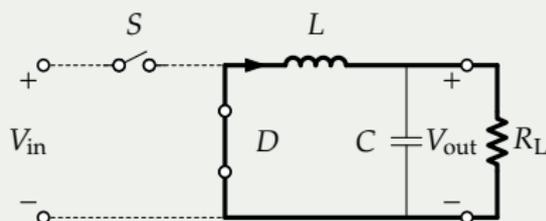


Conversor buck: Análise em regime permanente

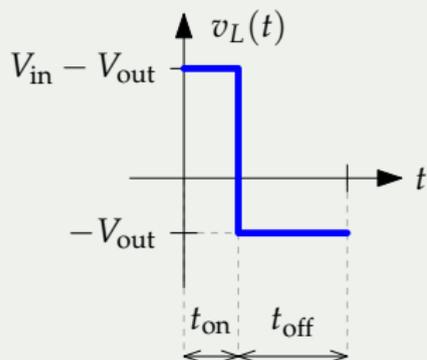
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Corrente no indutor.



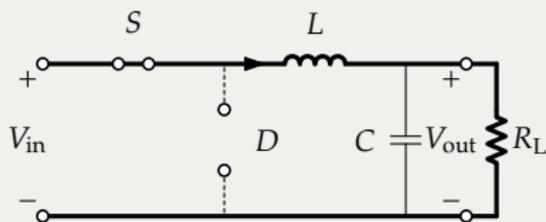
Variaç o da corrente no indutor:

$$\Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{(V_{in} - V_{out})t_{on}}{L} = \frac{V_{out}t_{off}}{L}.$$

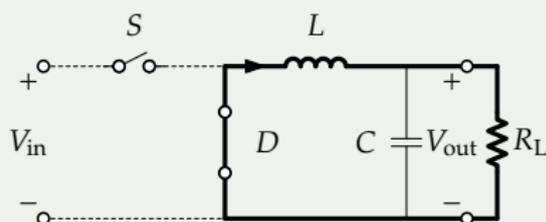


Conversor buck: Análise em regime permanente

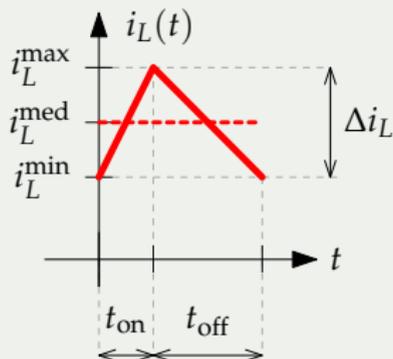
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Corrente no indutor.



Variação da corrente no indutor:

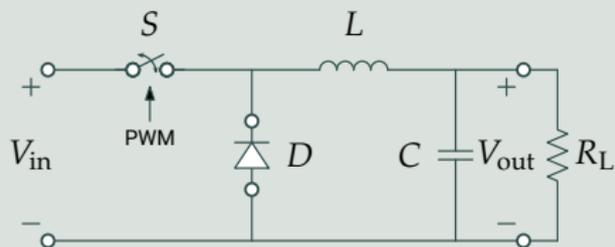
$$\Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{(V_{in} - V_{out}) t_{on}}{L} = \frac{V_{out} t_{off}}{L}.$$

Correntes mínima e máxima:

$$i_L^{\min} = i_L^{\text{med}} - \frac{\Delta i_L}{2} \quad \text{e} \quad i_L^{\max} = i_L^{\text{med}} + \frac{\Delta i_L}{2}.$$



Exemplo



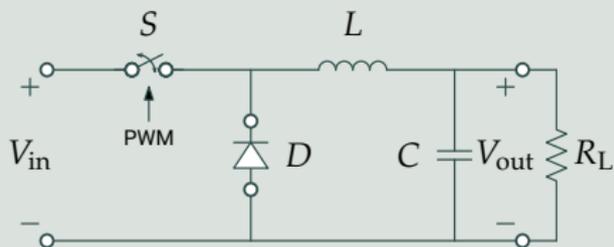
- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 10$ kHz e $D = 25$ %.
- Indutância: 1 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 10 Ω .
- Chave e diodo ideais.

a Determine a tensão de saída.

$$V_{out} = DV_{in} = (0,25)(20\text{ V}) = 5\text{ V}.$$



Exemplo



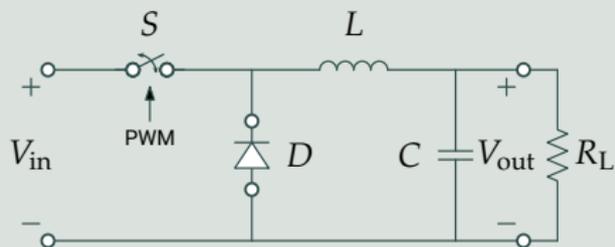
- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 10$ kHz e $D = 25\%$.
- Indutância: 1 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 10 Ω .
- Chave e diodo ideais.

b Determine a corrente de saída.

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{5\text{ V}}{10\ \Omega} = 500\text{ mA.}$$



Exemplo



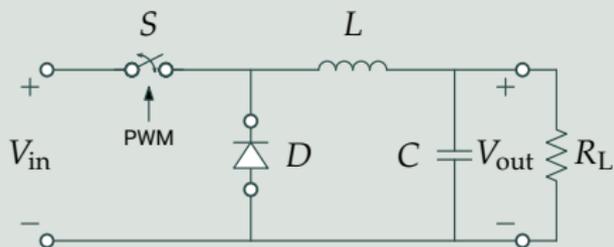
- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 10 \text{ kHz}$ e $D = 25 \%$.
- Indutância: 1 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 10Ω .
- Chave e diodo ideais.

c Determine as correntes média, mínima e máxima no indutor.

$$i_L^{\text{med}} = I_{\text{out}} = 500 \text{ mA.}$$



Exemplo



- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 10 \text{ kHz}$ e $D = 25 \%$.
- Indutância: 1 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 10 Ω .
- Chave e diodo ideais.

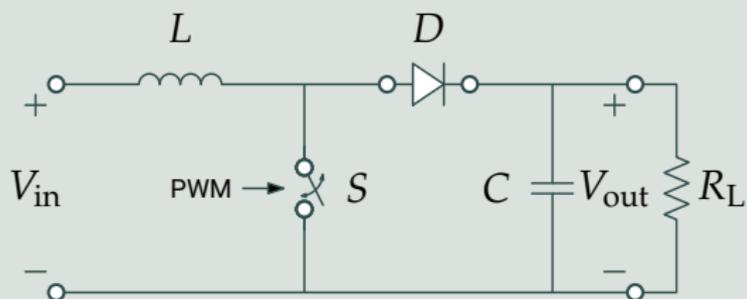
c Determine as correntes média, mínima e máxima no indutor.

$$\Delta i_L = \frac{V_{\text{out}} t_{\text{off}}}{L} = \frac{(5 \text{ V})(75 \mu\text{s})}{1 \text{ mH}} = 375 \text{ mA.}$$

$$i_L^{\text{min}} = i_L^{\text{med}} - \frac{\Delta i_L}{2} = 312,5 \text{ mA.} \quad i_L^{\text{max}} = i_L^{\text{med}} + \frac{\Delta i_L}{2} = 687,5 \text{ mA.}$$



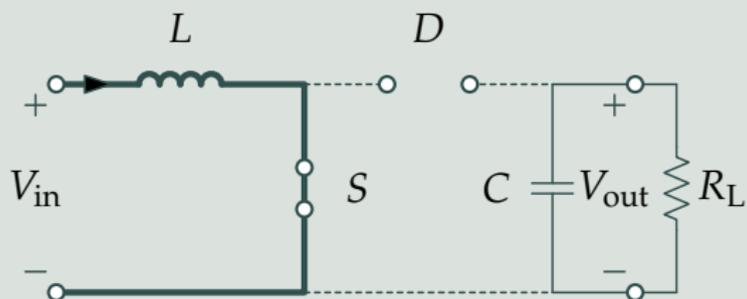
Circuito



Conversor DC-DC elevador.



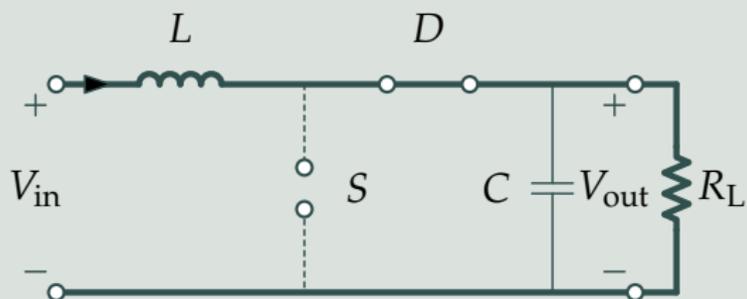
Circuito



Durante t_{on} : Chave S fecha e diodo D abre.



Circuito

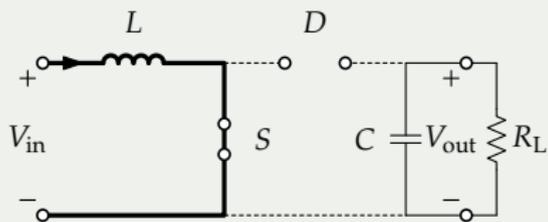


Durante t_{off} : Chave S abre e diodo D fecha.

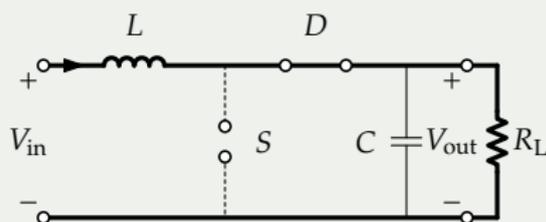


Conversor boost: Análise em regime permanente

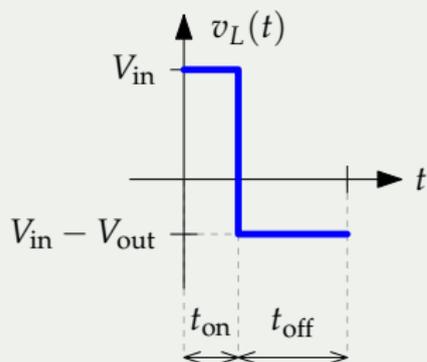
Durante t_{on} :



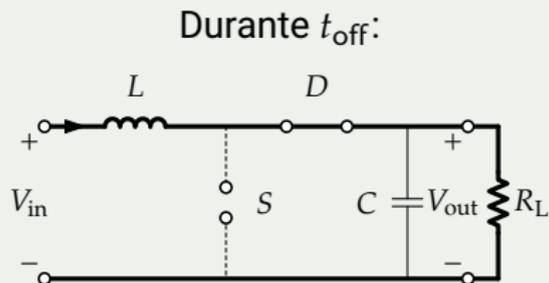
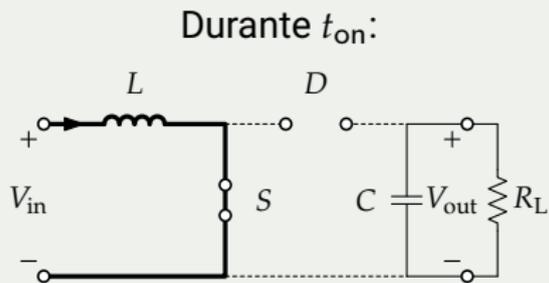
Durante t_{off} :



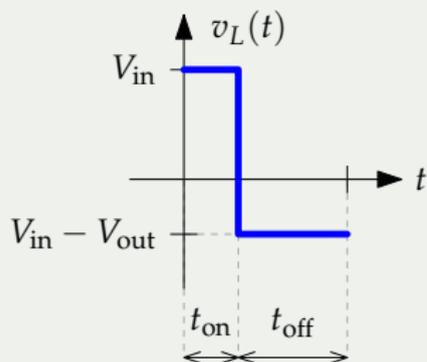
Relação entre as tensões de entrada e saída.



Conversor boost: Análise em regime permanente



Relação entre as tensões de entrada e saída.

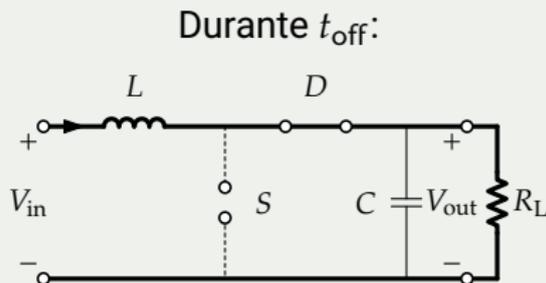
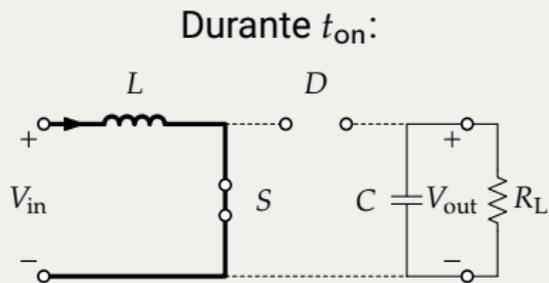


Tensão média no indutor é nula:

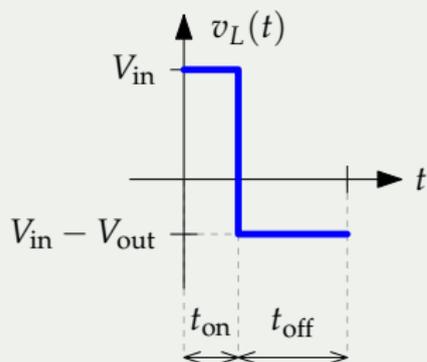
$$t_{on} V_{in} + t_{off} (V_{in} - V_{out}) = 0.$$



Conversor boost: Análise em regime permanente



Relação entre as tensões de entrada e saída.



Tensão média no indutor é nula:

$$t_{on} V_{in} + t_{off} (V_{in} - V_{out}) = 0.$$

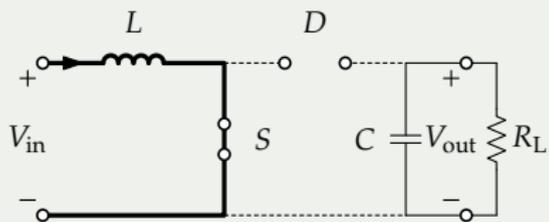
Após manipulações algébricas:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}.$$

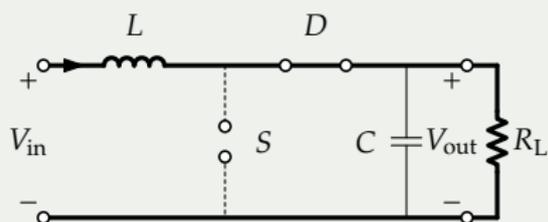


Conversor boost: Análise em regime permanente

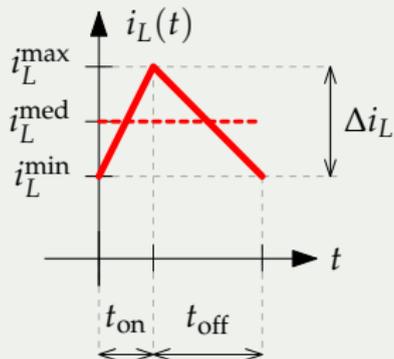
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :

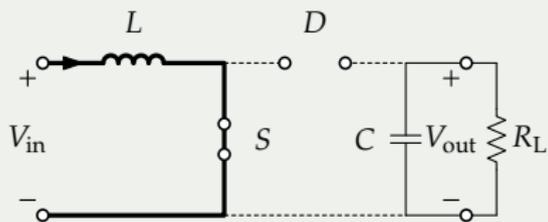


Corrente no indutor.

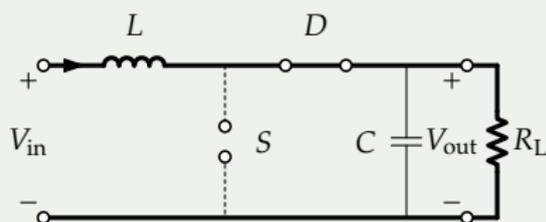


Conversor boost: Análise em regime permanente

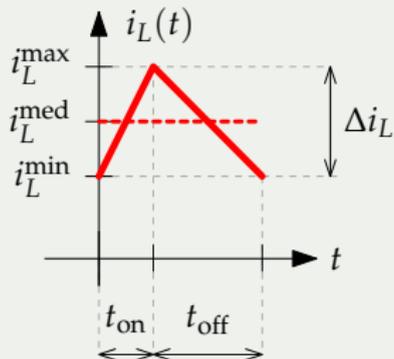
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Corrente no indutor.



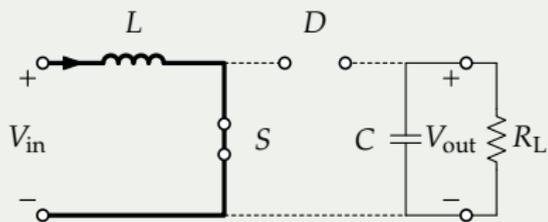
Corrente média no indutor:

$$i_L^{\text{med}} = I_{in} = \frac{I_{out}}{1 - D}.$$

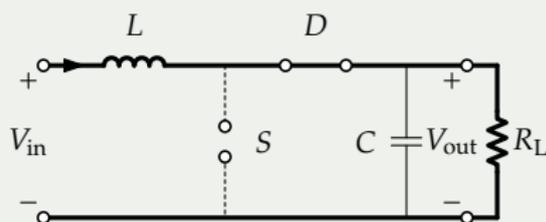


Conversor boost: Análise em regime permanente

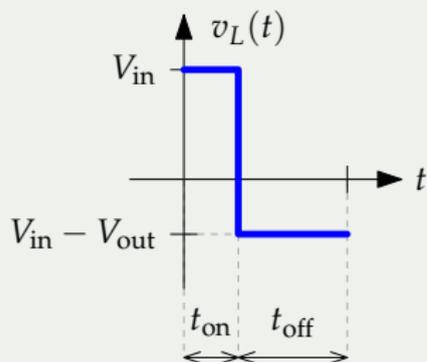
Durante t_{on} :



Durante t_{off} :



Corrente no indutor.

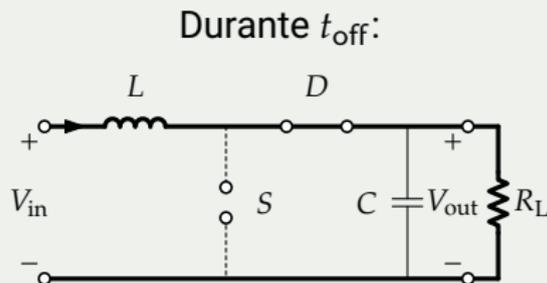
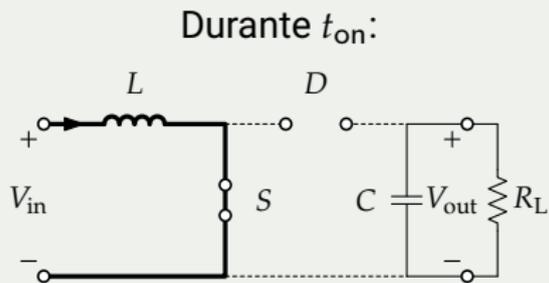


Variação da corrente no indutor:

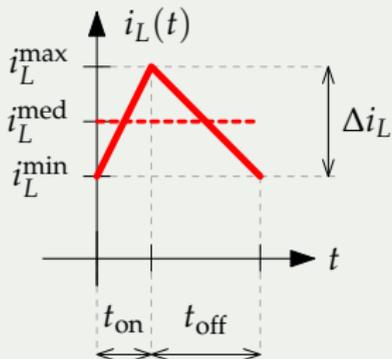
$$\Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{V_{in} t_{on}}{L} = \frac{(V_{out} - V_{in}) t_{off}}{L}.$$



Conversor boost: Análise em regime permanente



Corrente no indutor.



Variação da corrente no indutor:

$$\Delta i_L = \frac{v_L \Delta t}{L} = \frac{V_{in} t_{on}}{L} = \frac{(V_{out} - V_{in}) t_{off}}{L}.$$

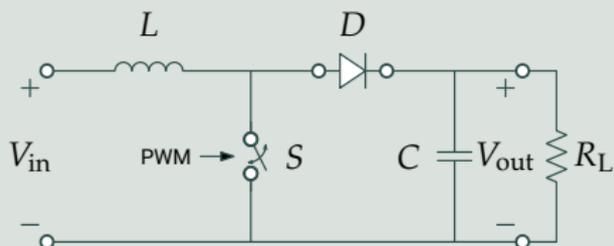
Correntes mínima e máxima:

$$i_L^{\min} = i_L^{\text{med}} - \frac{\Delta i_L}{2} \quad \text{e} \quad i_L^{\max} = i_L^{\text{med}} + \frac{\Delta i_L}{2}.$$



Conversor boost: Exemplo

Exemplo



- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 1 \text{ kHz}$ e $D = 60 \%$.
- Indutância: 240 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 1 k Ω .
- Chave e diodo ideais.

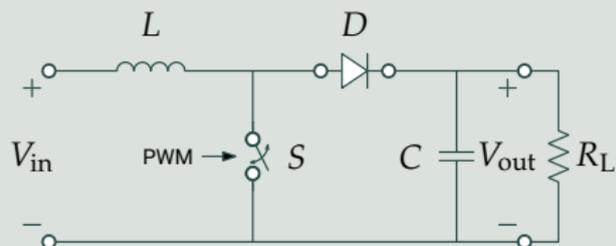
a Determine a tensão de saída.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D} = \frac{20 \text{ V}}{0,4} = 50 \text{ V}.$$



Conversor boost: Exemplo

Exemplo



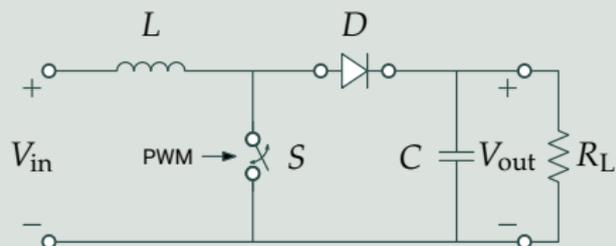
- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 1$ kHz e $D = 60\%$.
- Indutância: 240 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 1 k Ω .
- Chave e diodo ideais.

b Determine a corrente de saída.

$$I_{out} = \frac{V_{out}}{R_L} = \frac{50\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 50\text{ mA.}$$



Exemplo



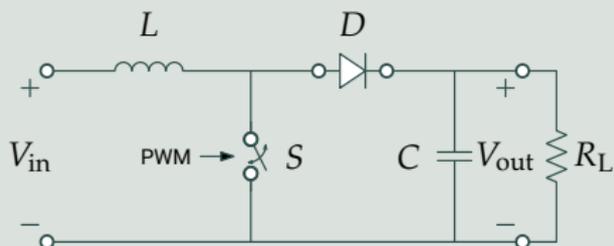
- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 1 \text{ kHz}$ e $D = 60 \%$.
- Indutância: 240 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 1 k Ω .
- Chave e diodo ideais.

c Determine as correntes média, mínima e máxima no indutor.

$$i_L^{\text{med}} = \frac{I_{\text{out}}}{1 - D} = \frac{50 \text{ mA}}{0,4} = 125 \text{ mA}.$$



Exemplo



- Tensão de entrada de 20 V.
- PWM com $f = 1 \text{ kHz}$ e $D = 60 \%$.
- Indutância: 240 mH; Capacitância: alta.
- Resistência de carga de 1 k Ω .
- Chave e diodo ideais.

c Determine as correntes média, mínima e máxima no indutor.

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} t_{on}}{L} = \frac{(20 \text{ V})(0,6 \text{ ms})}{240 \text{ mH}} = 50 \text{ mA}.$$

$$i_L^{\min} = i_L^{\text{med}} - \frac{\Delta i_L}{2} = 100 \text{ mA}. \quad i_L^{\max} = i_L^{\text{med}} + \frac{\Delta i_L}{2} = 150 \text{ mA}.$$



1 Qual frequência utilizar?

- Frequências maiores: componentes passivos menores.
- Frequências maiores: menos eficiente (perda de comutação).

2 Qual chave utilizar?

- MOSFET.
- IGBT.
- BJT.

3 Como obter regulação?

- Malha fechada.



Não vimos nem a ponta do iceberg!



Referências

-  IVO BARBI AND DENIZAR CRUZ MARTINS.
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA: CONVERSORES CC-CC BÁSICOS NÃO ISOLADOS.
Edição dos Autores, 2000.
-  EDUARDO CESAR ALVES CRUZ AND SALOMÃO CHOUERI-JÚNIOR.
ELETRÔNICA APLICADA.
Editora Érica, 2008.
-  ALBERT MALVINO AND DAVID BATES.
ELECTRONIC PRINCIPLES.
McGraw-Hill, 7th edition, 2006.
-  ADEL S. SEDRA AND KENNETH C. SMITH.
MICROELECTRONIC CIRCUITS.
Oxford University Press, 6th edition, 2010.

