

Condicionamento de Sinal

2.2. Circuitos com Díodos

2.2.1. Princípio de funcionamento numa junção PN

2.2.2. Díodo de Junção

2.2.2.1. Díodo Ideal

2.2.2.2. Díodo como elemento rectificador

2.2.2.3. Polarização e Representação simbólica

2.2.2.4. Regiões de Polarização: Directa, Inversa e Ruptura (Breakdown)

2.2.2.5. Análise de Circuitos com díodos

2.2.3. Circuitos Limitadores e Fixadores

2.2.3.1. Limitador de um nível c/ um díodo série polarizado/e não polarizado

2.2.3.2. Limitador de um nível c/ um díodo paralelo polarizado/e não polarizado

2.2.3.3. Limitador de 2 níveis

2.2.3.4. Fixador

2.2.3.5. Duplicador de Tensão

2.2.4. Circuitos Rectificadores

2.2.4.1. Rectificador de Meia Onda

2.2.4.2. Rectificador de Onda Completa com transformador

2.2.4.3. Rectificador de Onda Completa com ponte de díodos

2.2.4.4. Filtros com condensador em paralelo

2.2.4.5. Filtros LC e em pi

2.2.5. Estabilização de Tensão

2.2.5.1. Díodo Zener: curva característica e Parâmetros

2.2.5.2. Circuito de aplicação do díodo Zener como estabilizador de tensão

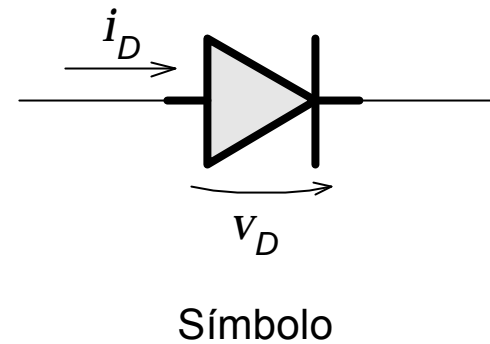
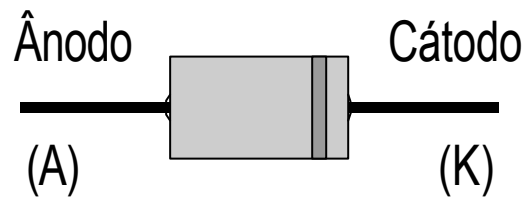
2.2.5.3. Reguladores integrados de tensão: terminais e parâmetros

O díodo

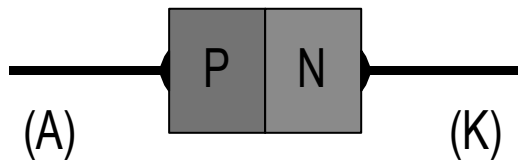


- Dispositivo de dois terminais
- Componente elementar não-linear utilizado em circuitos muito variados
- **Aplicações:** conversores de potência AC/DC – rectificadores, processamento de sinais, circuitos digitais, etc..
- **Tipos:** díodos de “galena” (primitivos receptores de rádio); díodos de vácuo (válvulas de vácuo); díodos de junção (materiais semicondutores: silício, germânio, etc..)

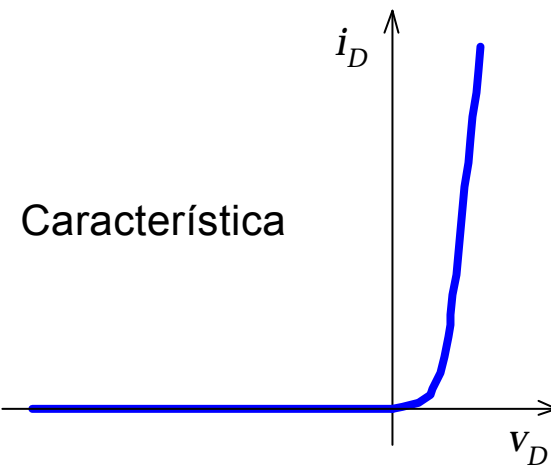
O díodo



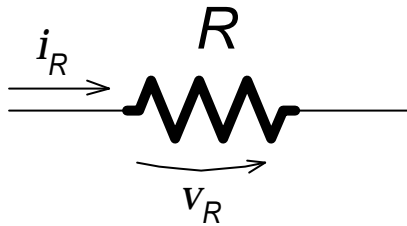
Díodo de utilização corrente



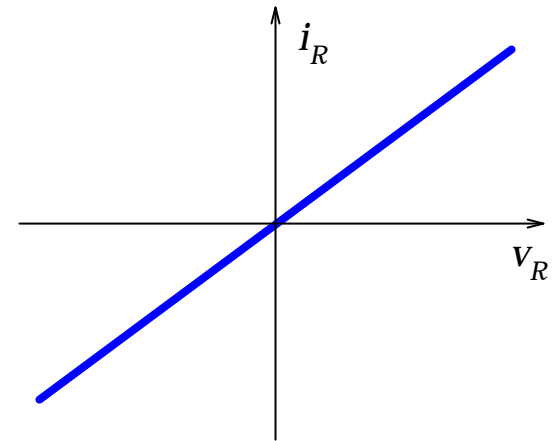
Junção *pn*



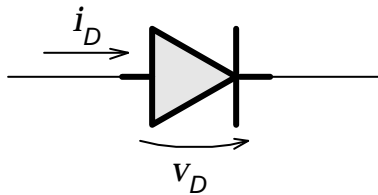
Resistência – dispositivo linear



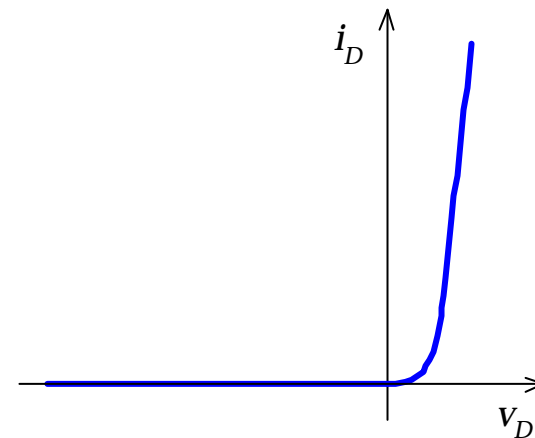
$$i_R = \frac{V_R}{R}$$



Díodo – dispositivo não linear

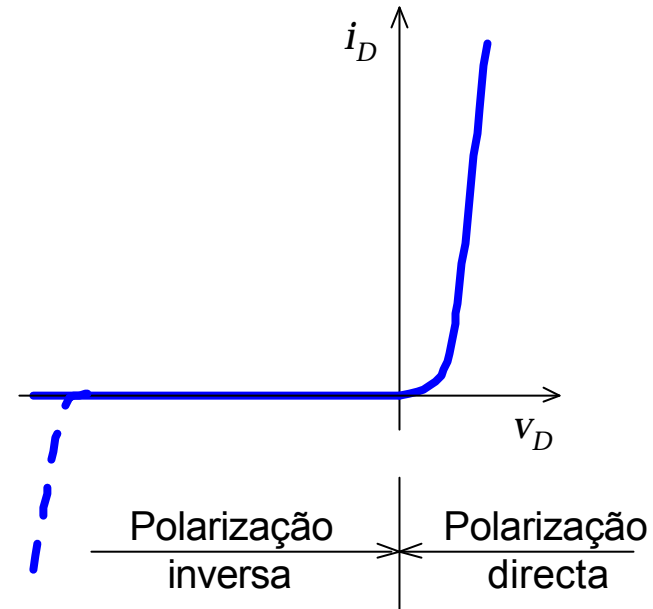


$$i_D = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1)$$



Característica do díodo

- relação entre a corrente e a tensão no díodo, $i_D(v_D)$
- se $v_D > 0$ – díodo polarizado directamente
- se $v_D < 0$ – díodo polarizado inversamente
- I_S – corrente de saturação inversa (10^{-9} @ 10^{-15})
- V_T – tensão térmica
- K – constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K)
- T – temperatura absoluta ($0^\circ\text{C} \approx 273^\circ\text{K}$)
- q – carga do electrão ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb)

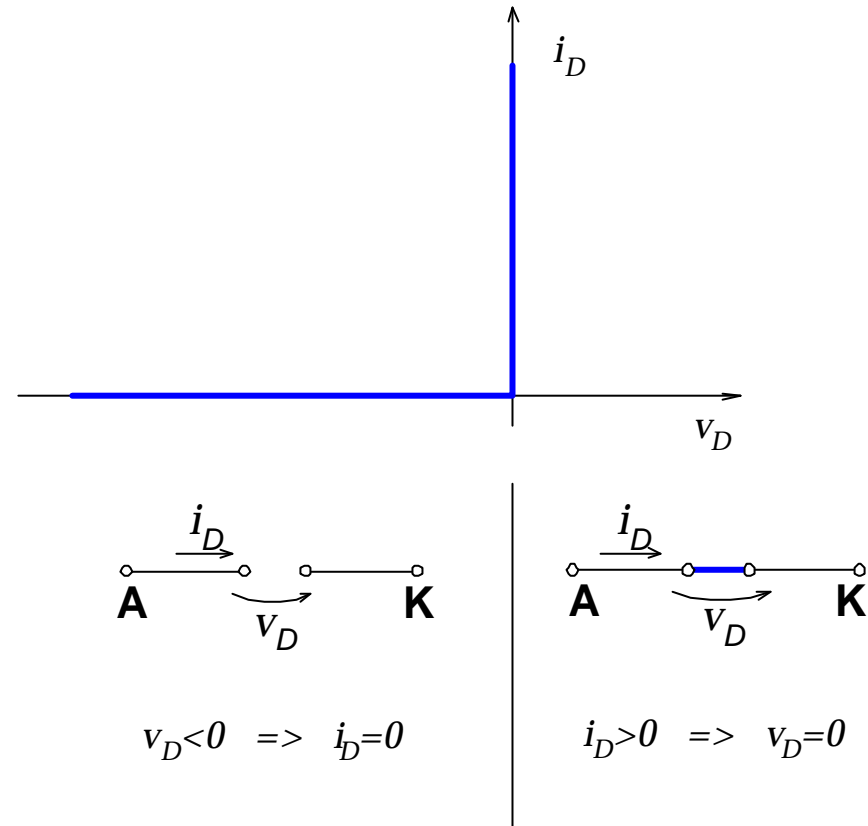


$$i_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{k \cdot T}{q}$$

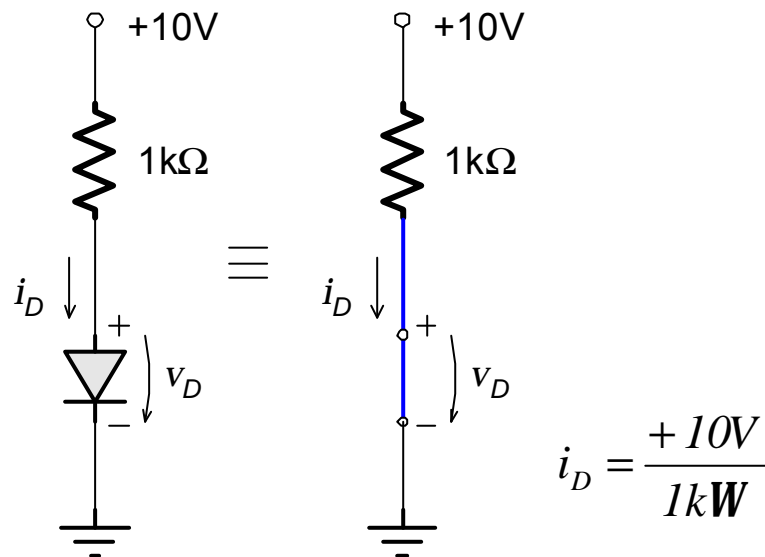
O díodo ideal

- Se aos terminais do díodo for aplicada uma tensão negativa não flui corrente no díodo; o díodo comporta-se como um **circuito em aberto**
- Se for “injectada” uma corrente positiva no díodo, do ânodo para o cátodo, obtém-se uma queda de tensão nula aos terminais do díodo; o díodo comporta-se como um **curto-circuito**.

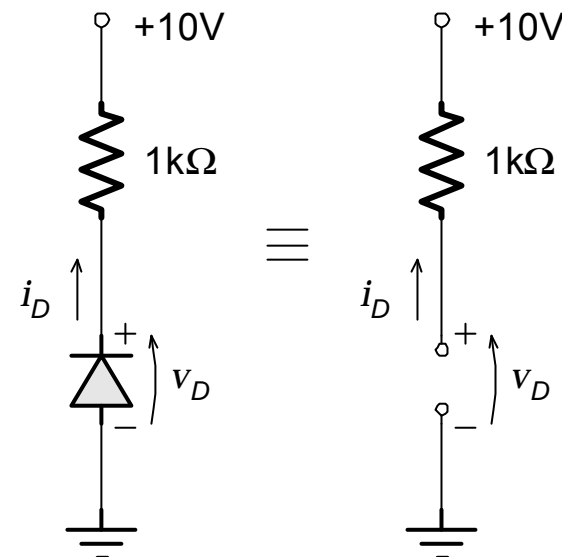


Circuitos com Diodos

Exemplo de operação dos dois modos de funcionamento do diodo ideal



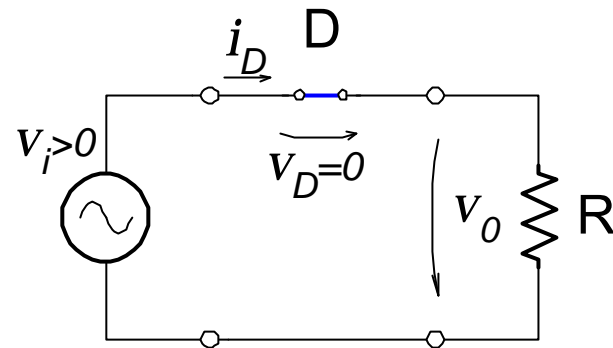
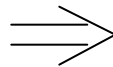
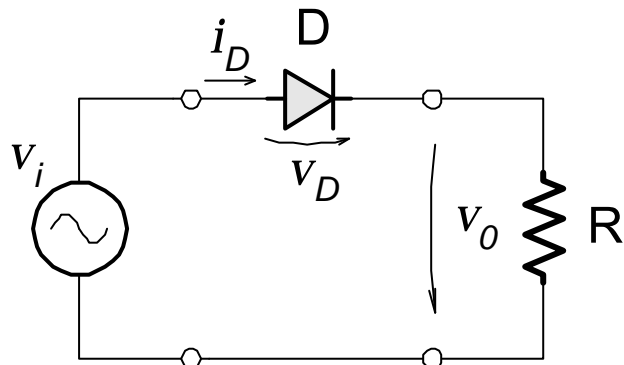
- Diodo polarizado directamente, equivalente a um **curto-circuito**



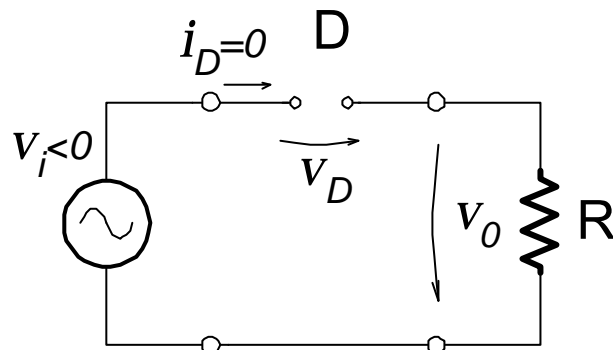
- Diodo polarizado inversamente, equivalente a um **circuito em aberto**.

Circuitos com Dodos

O rectificador de
meia-onda

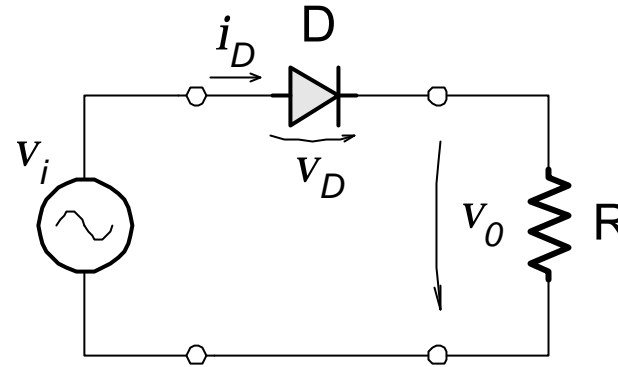
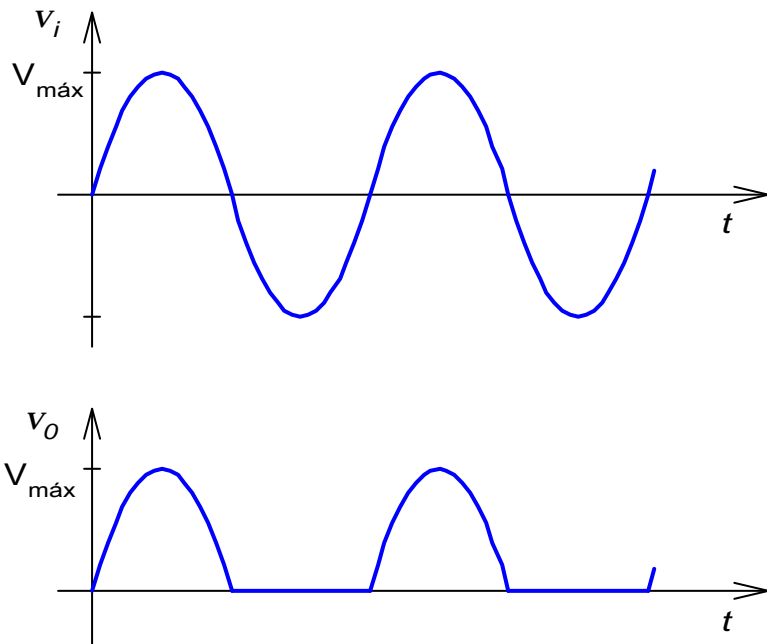


$$\begin{aligned} v_i > 0, D' \text{ ON}' \\ i_D > 0 \implies v_D = 0 \\ v_o &= v_i \\ i_D &= \frac{v_i}{R} \end{aligned}$$



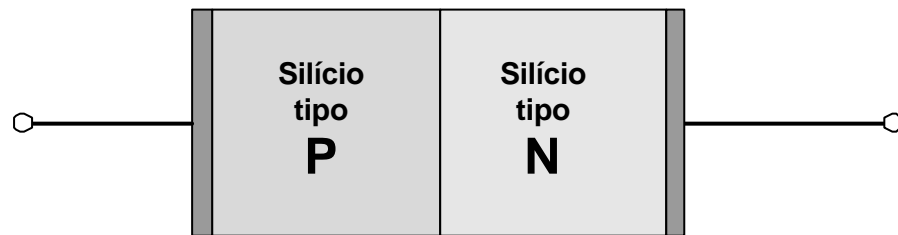
$$\begin{aligned} v_i < 0, D' \text{ OFF}' \\ v_D < 0 \implies i_D = 0 \\ v_o &= R \cdot i_D = 0 \end{aligned}$$

O rectificador de meia-onda



- Nos meios ciclos positivos o díodo está polarizado directamente, comporta-se como um curto-circuito, e a corrente flui sem restrições no díodo.
- Nos meios ciclos negativos, o díodo está polarizado inversamente, comporta-se como um circuito aberto, e por isso a corrente no díodo é nula.

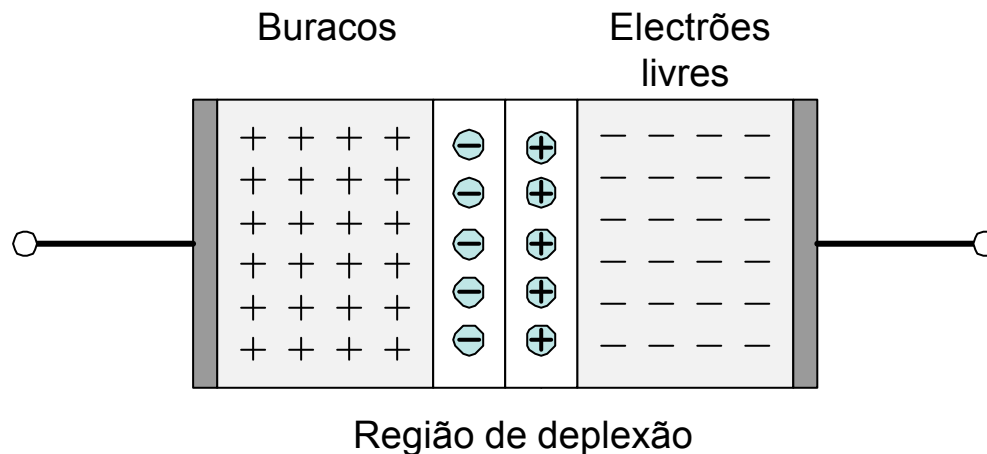
Estrutura física do díodo de silício



O díodo de junção pn consiste na junção de dois materiais, um semicondutor tipo p em contacto com um semicondutor tipo n

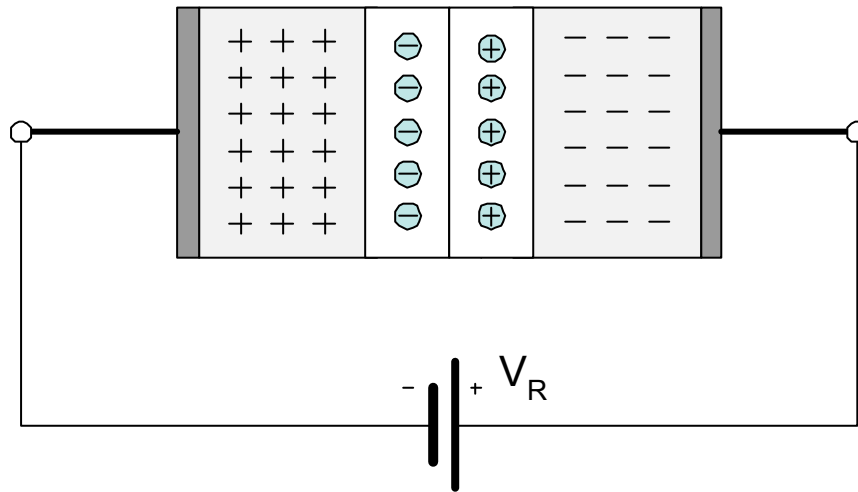
Os semicondutores tipo p e n consistem num substracto (silício puro, p.ex.) ao qual foram adicionadas impurezas tipo p (elementos com três electrões na última órbita) ou tipo n (elementos com cinco electrões na última órbita)

Junção pn não polarizada



- Junção pn sem qualquer tensão aplicada
- Formação de uma zona na junção dos materiais p e n , designada por *região de deplexão* ou *região de carga espacial*
- Formação de uma *barreira potencial*
- Correntes de difusão de buracos da região p para a região n e de electrões da região n para a região p

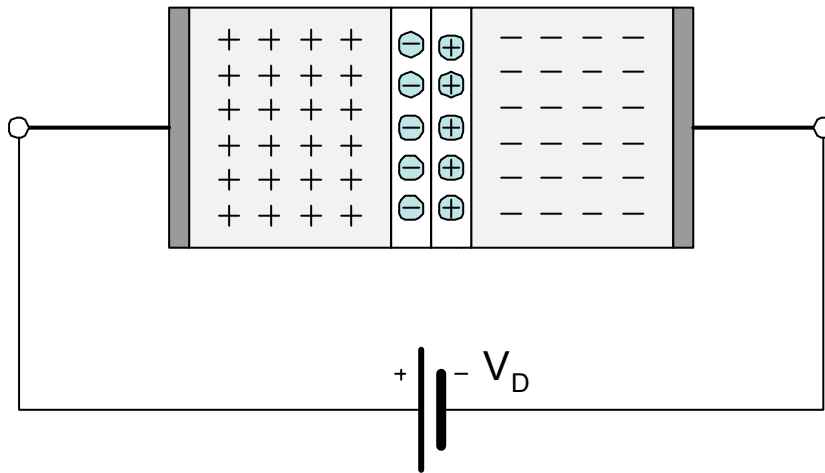
Junção *pn* polarizada inversamente



A tensão inversa aplicada (V_R) vai reforçar o campo eléctrico na *zona de carga espacial*, a largura desta vai aumentar e constitui-se como uma barreira forte à passagem de corrente.

As correntes de difusão são nulas

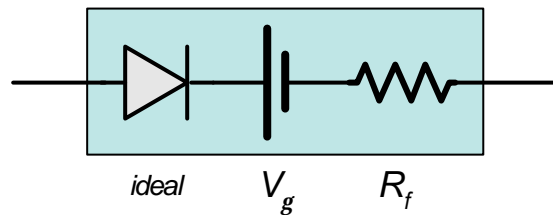
Junção *pn* polarizada directamente



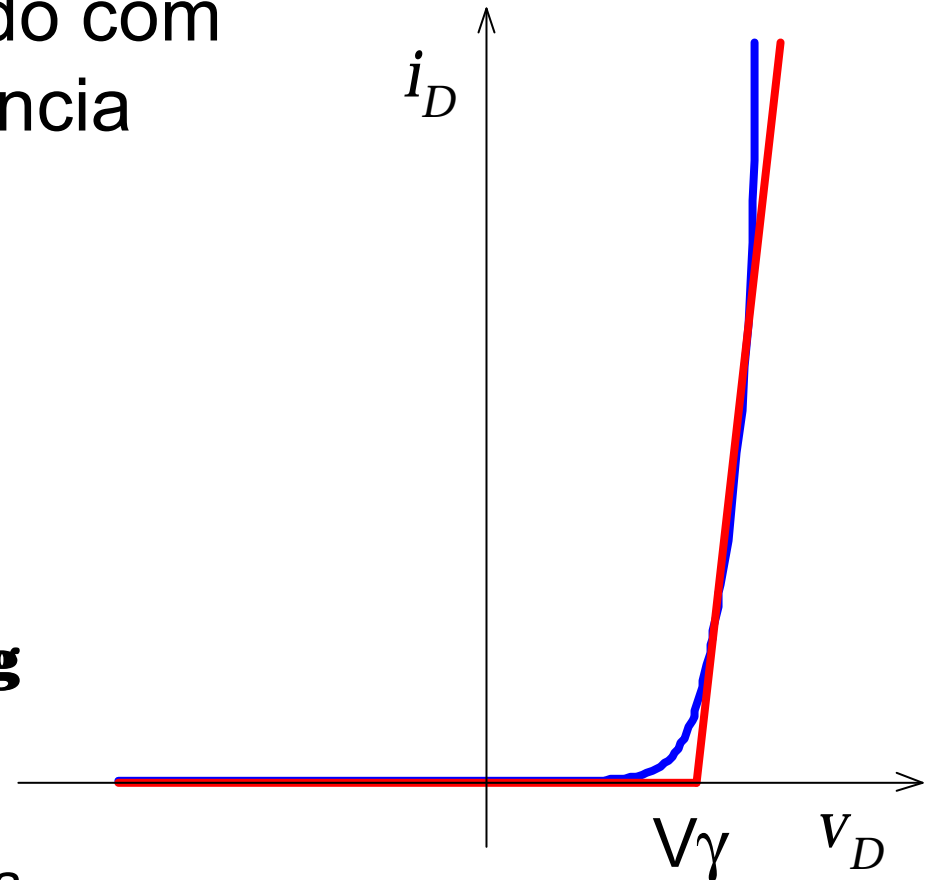
A tensão directa aplicada (V_D) vai reduzir, ou mesmo eliminar, o campo eléctrico na *zona de carga espacial*, a largura desta vai diminuir e a barreira de potencial desaparece facilitando a passagem de corrente.

As correntes de difusão são importantes

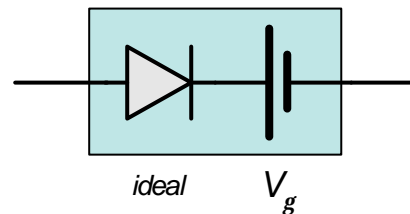
Modelo do díodo aproximado com fonte de tensão e resistência



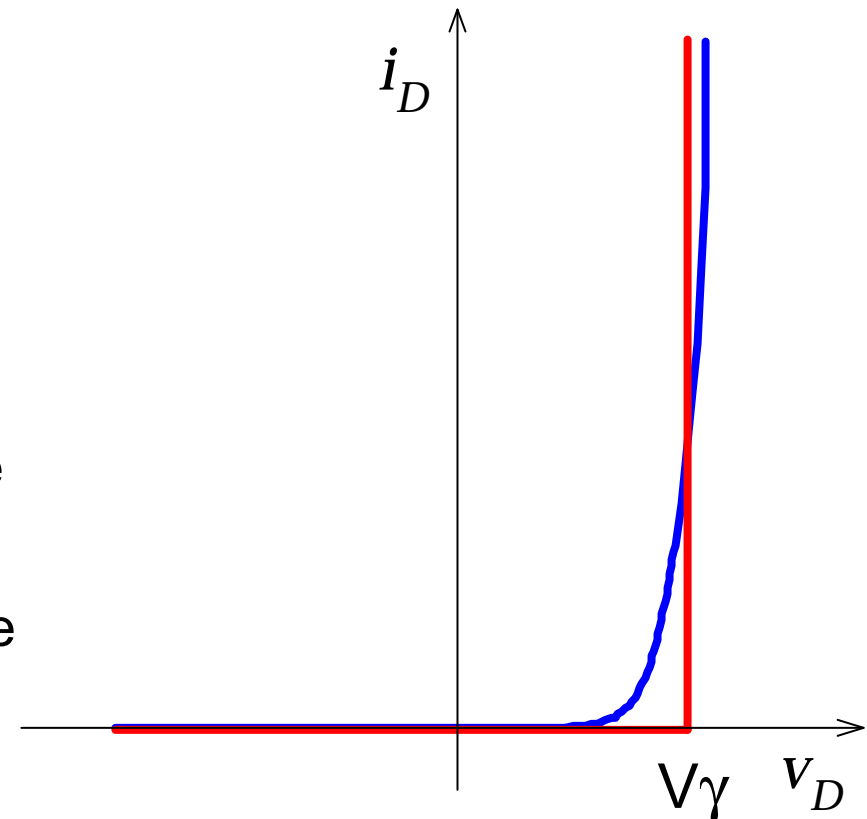
- **Polarização directa** – díodo equivalente a uma fonte de tensão V_g em série com uma resistência R_f
- **Polarização inversa** – díodo equivalente a uma resistência elevada, $R_r \gg R_f$



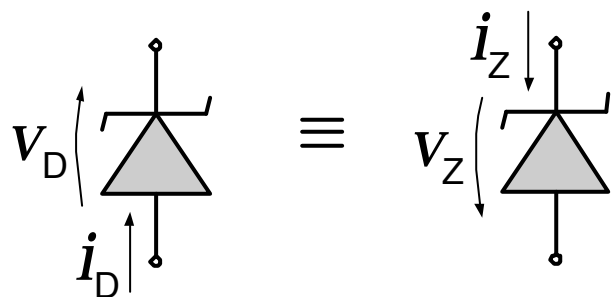
Modelo do díodo aproximado com fonte de tensão constante



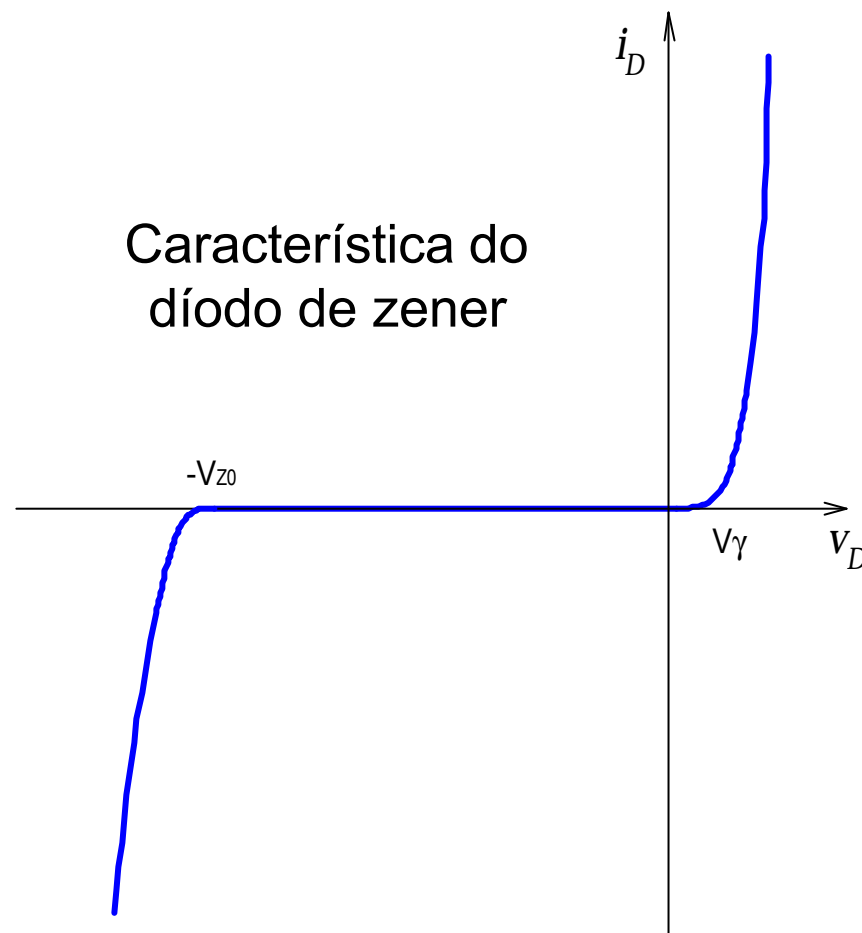
- **Polarização directa** – díodo equivalente a uma fonte de tensão constante **V_g**
- **Polarização inversa** – díodo equivalente a uma resistência elevada, **$R_r \gg \infty$**



O díodo de zener

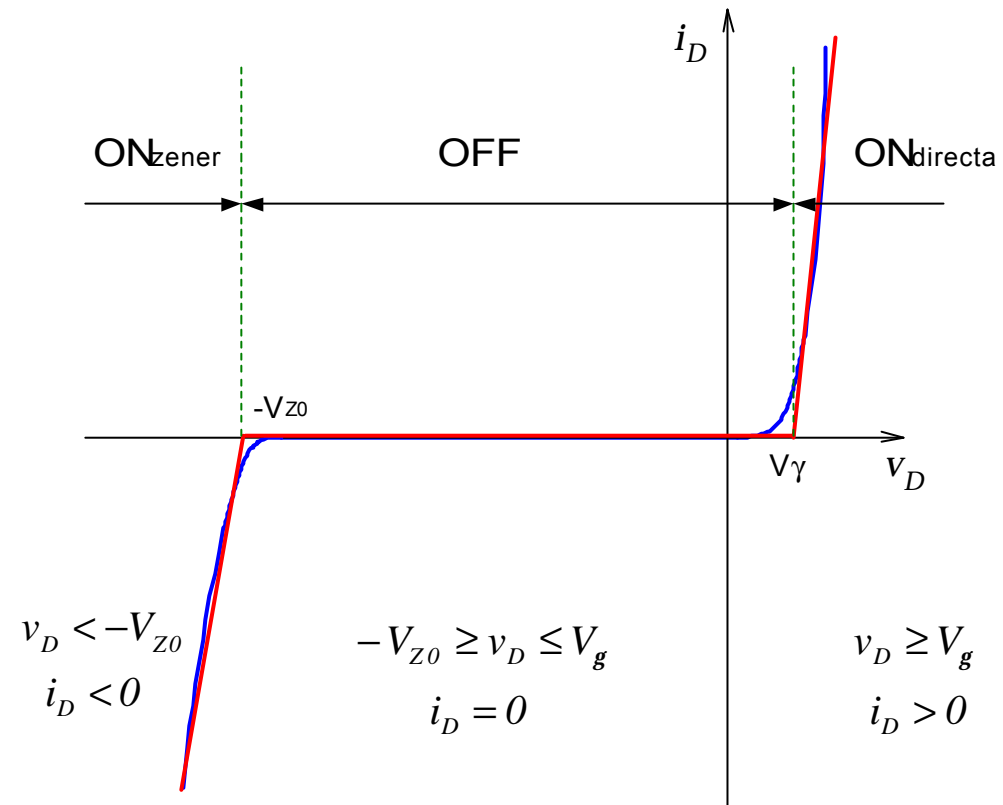
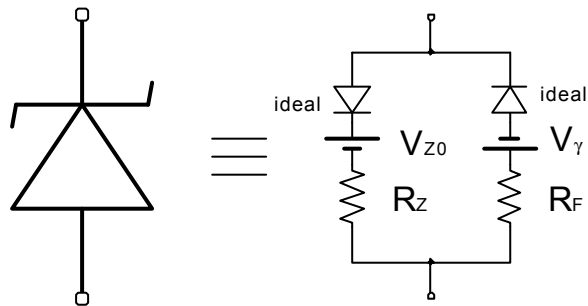


Característica do
díodo de zener

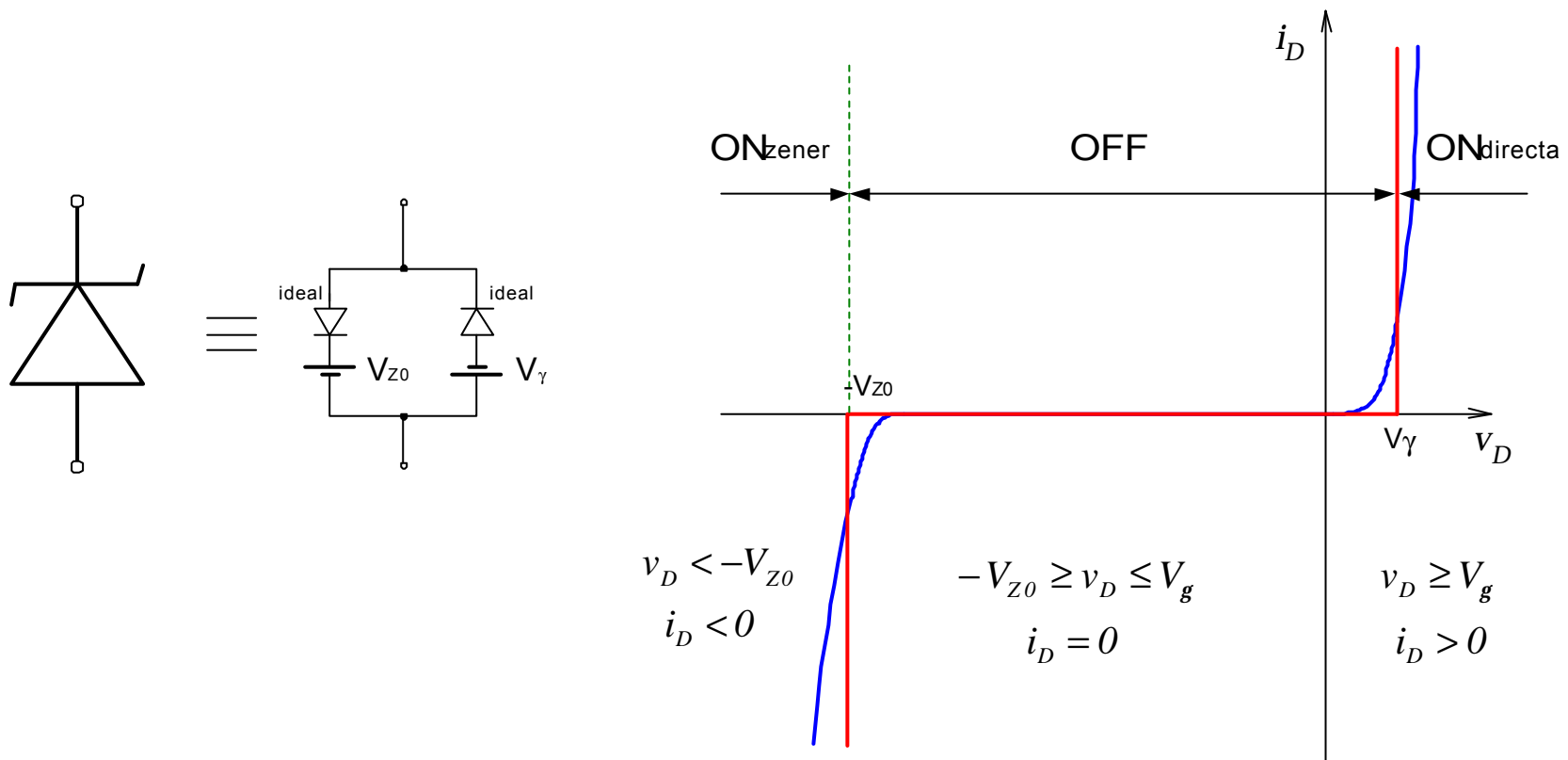


Circuitos com Dodos

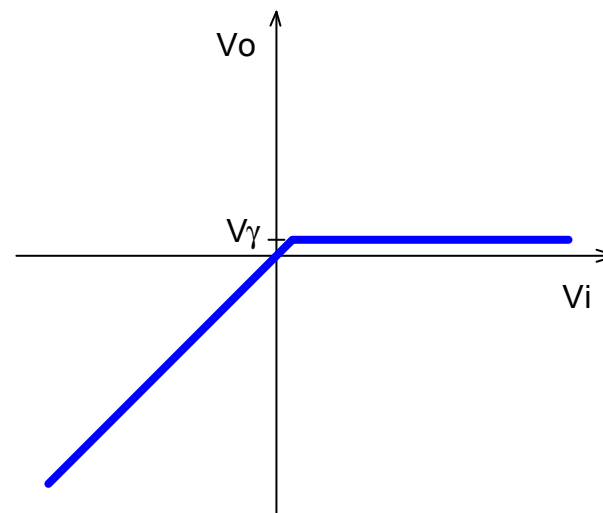
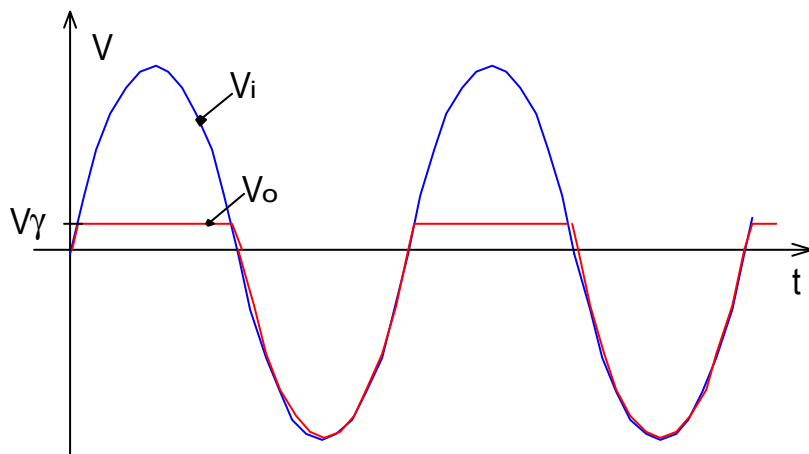
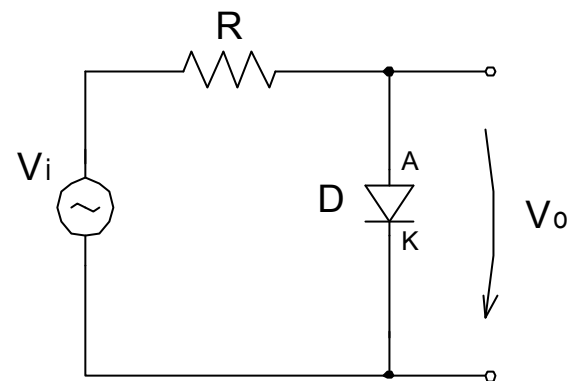
Modelo linear do díodo de zener com fonte de tensão constante e resistêcia



Modelo linear do díodo de zener com fonte de tensão constante

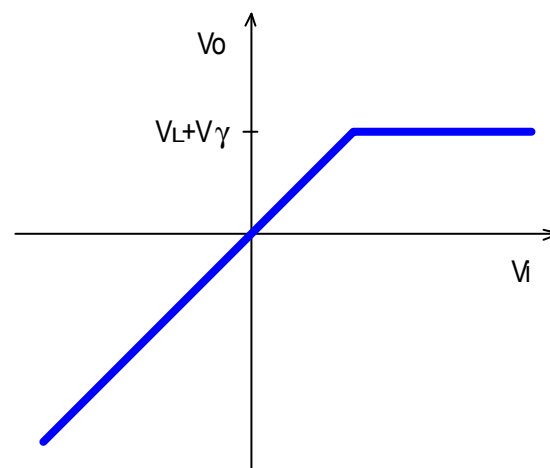
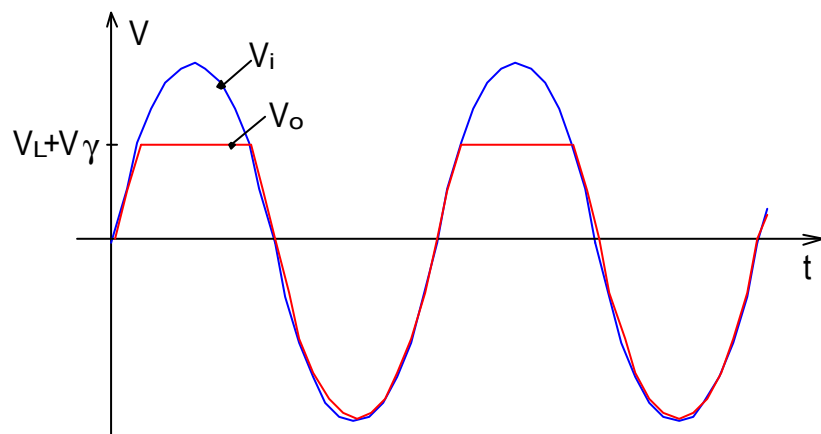
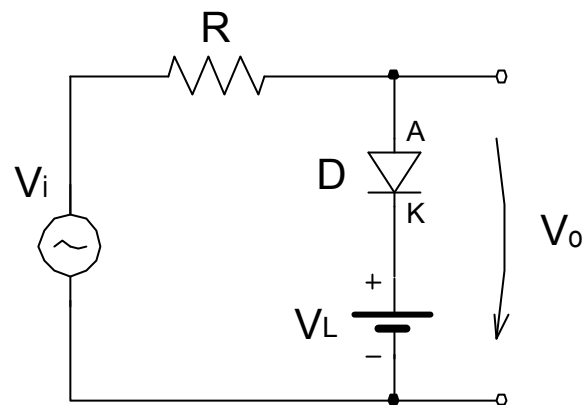


Circuitos limitadores



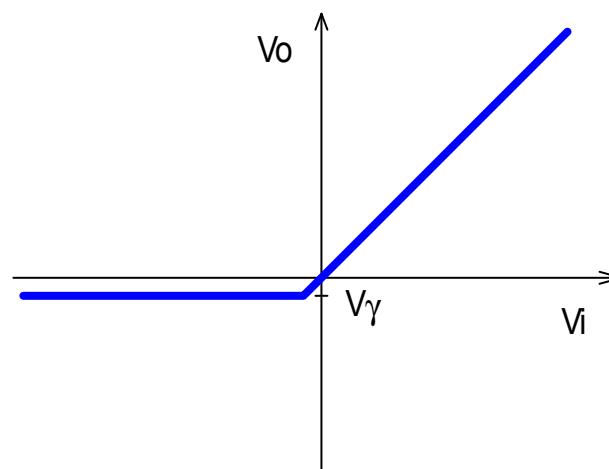
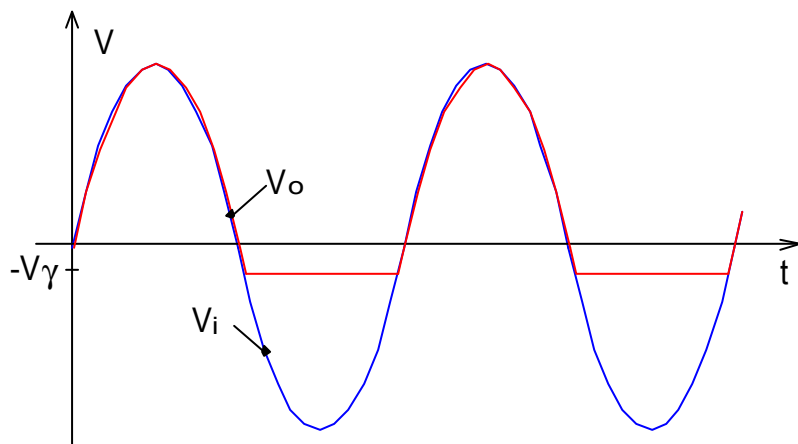
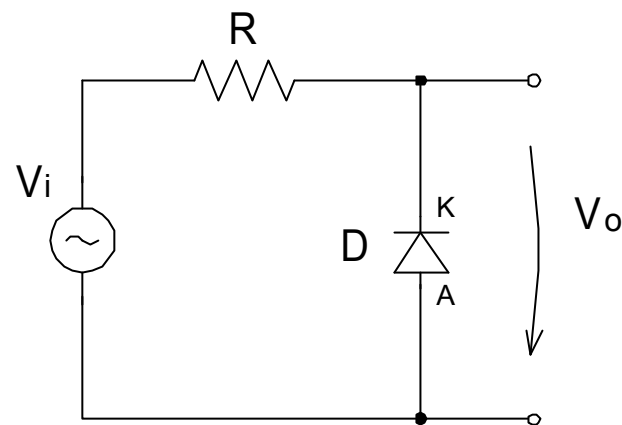
Circuitos com Diodos

Circuitos limitadores



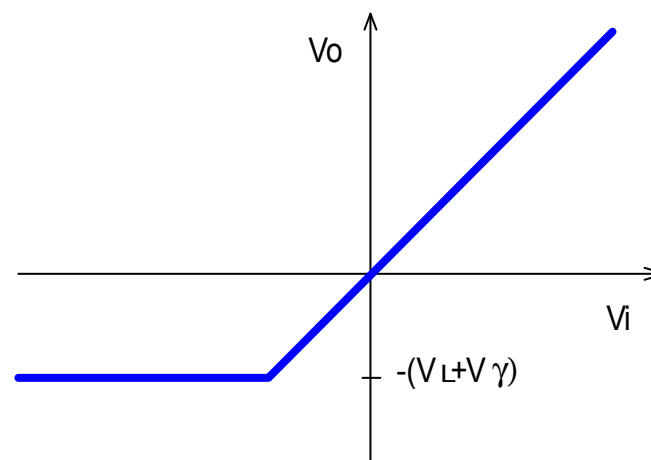
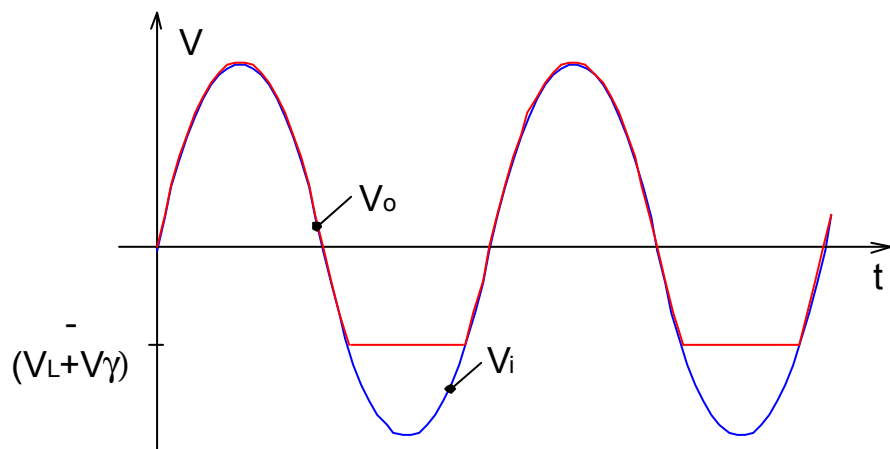
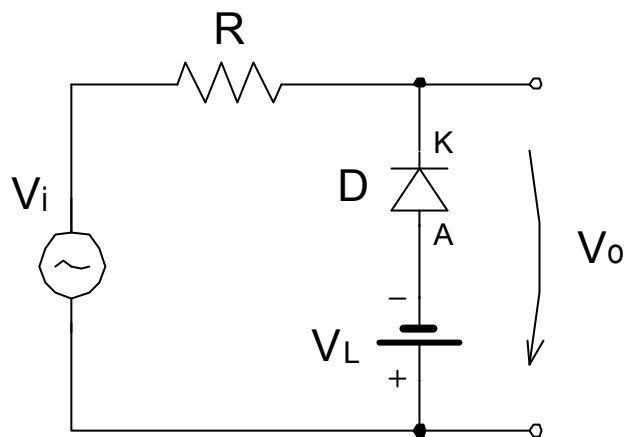
Circuitos com Díodos

Circuitos limitadores



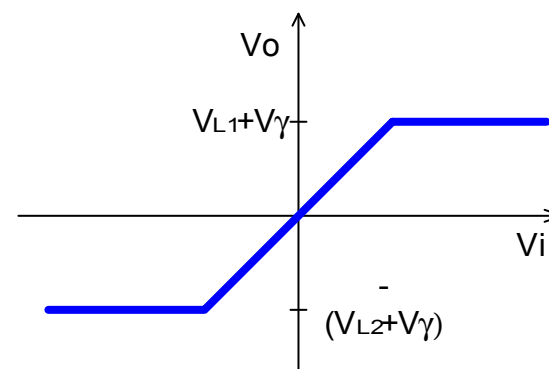
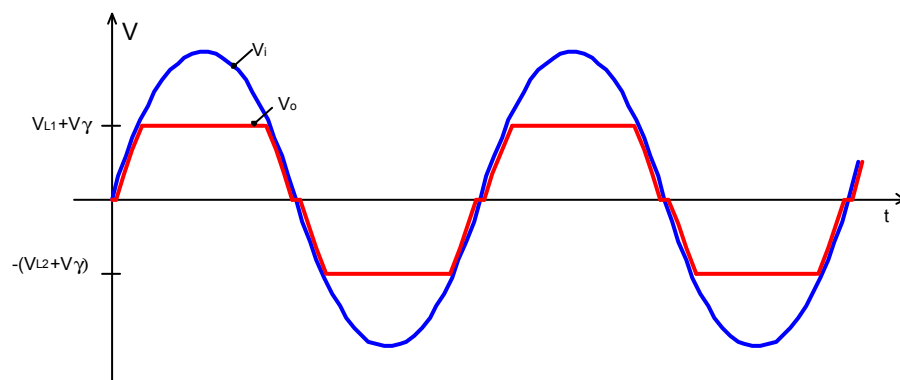
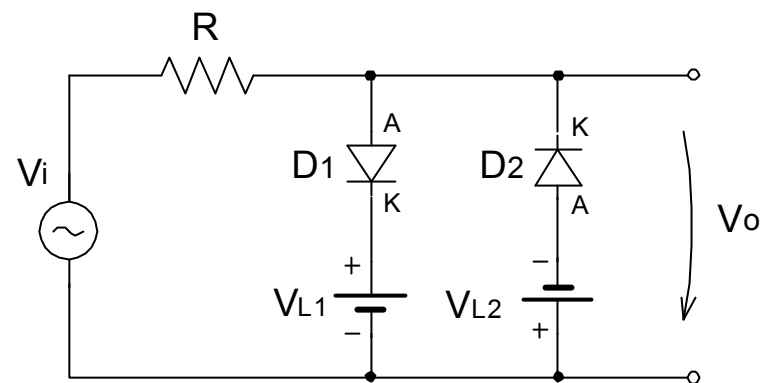
Circuitos com Diodos

Circuitos limitadores



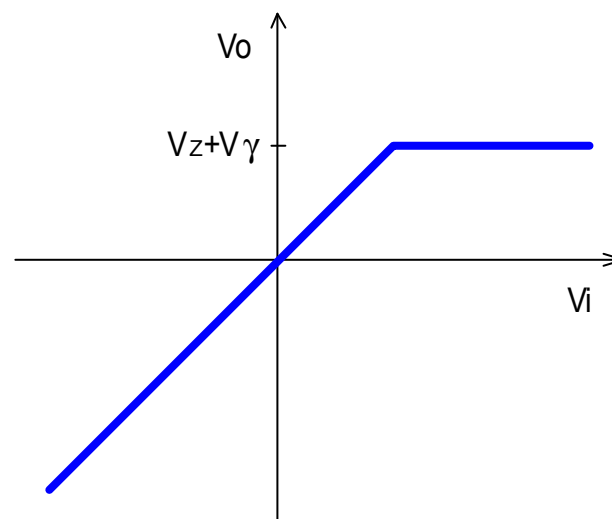
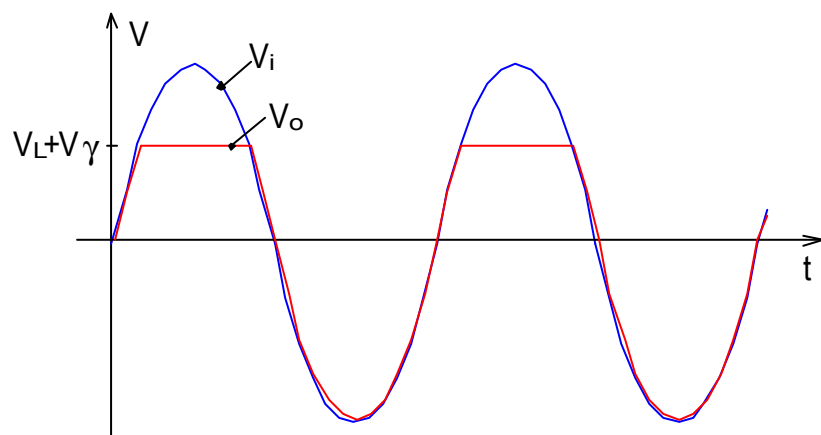
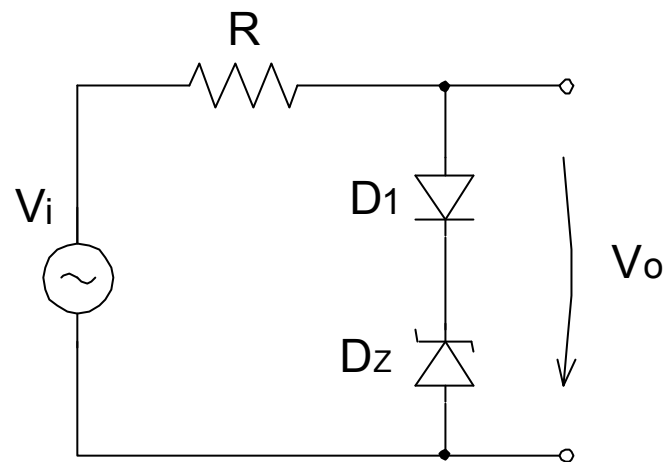
Circuitos com Dodos

Circuitos limitadores



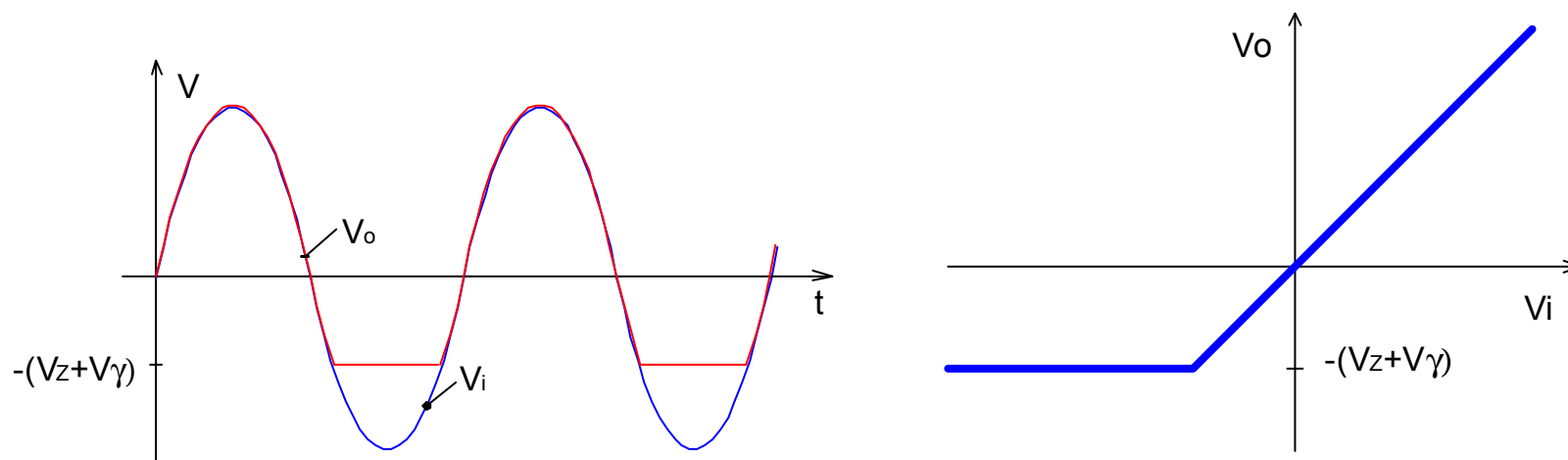
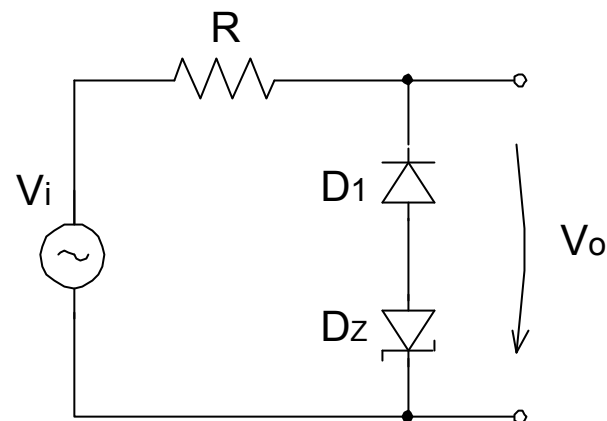
Circuitos com Diodos

Circuitos limitadores



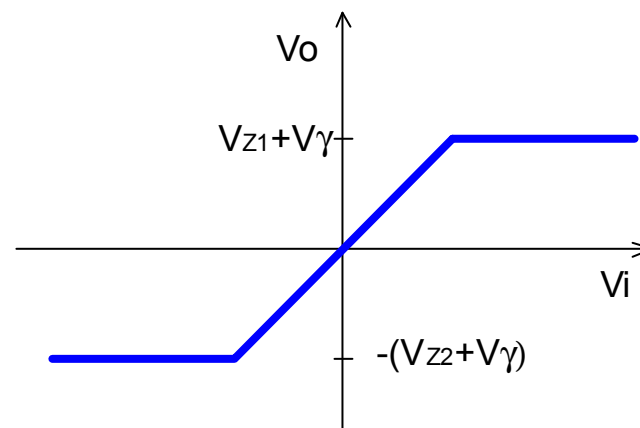
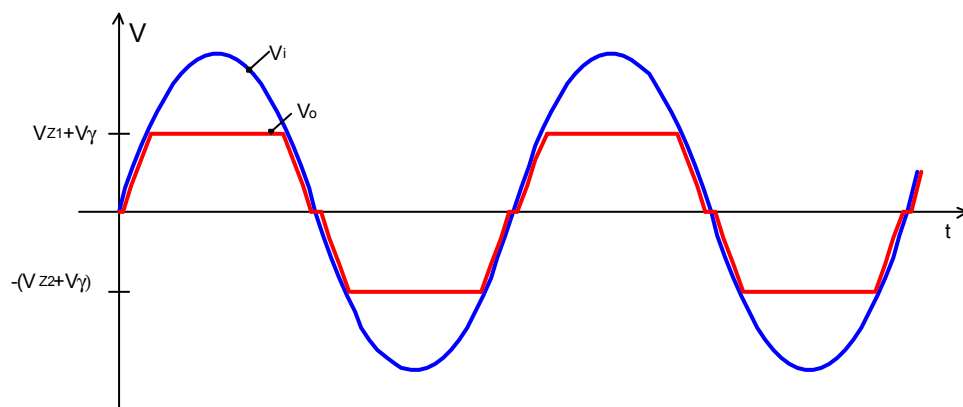
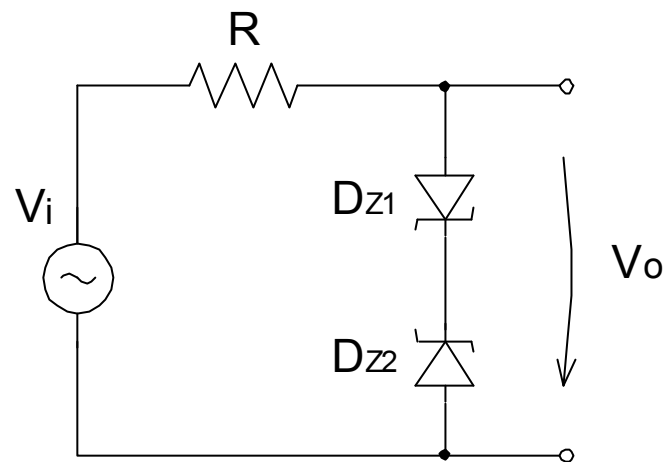
Circuitos com Dodos

Circuitos limitadores



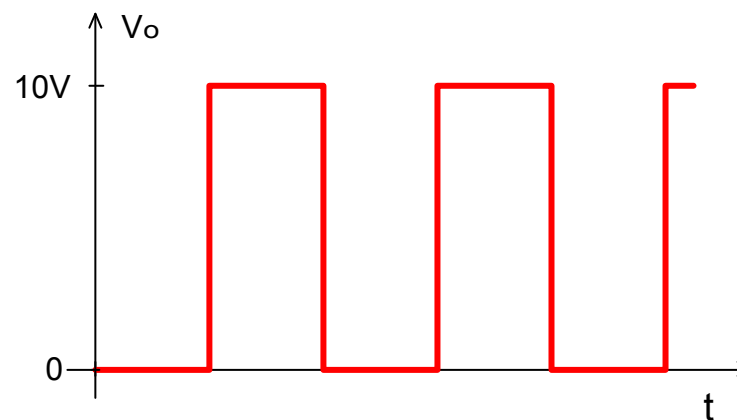
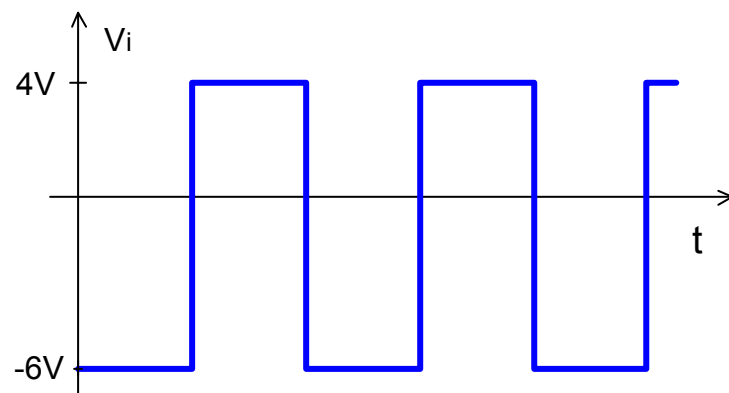
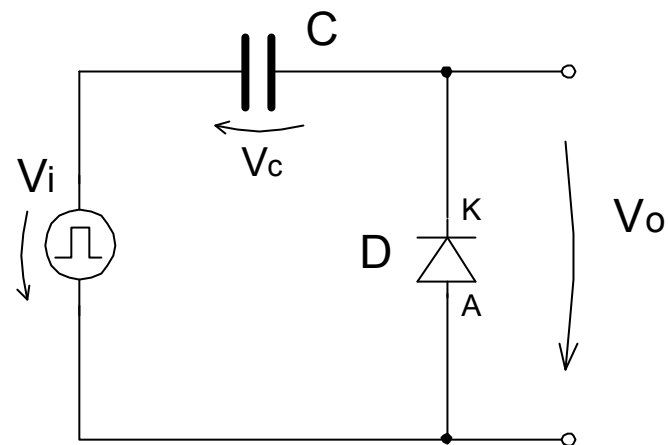
Circuitos com Dodos

Circuitos limitadores



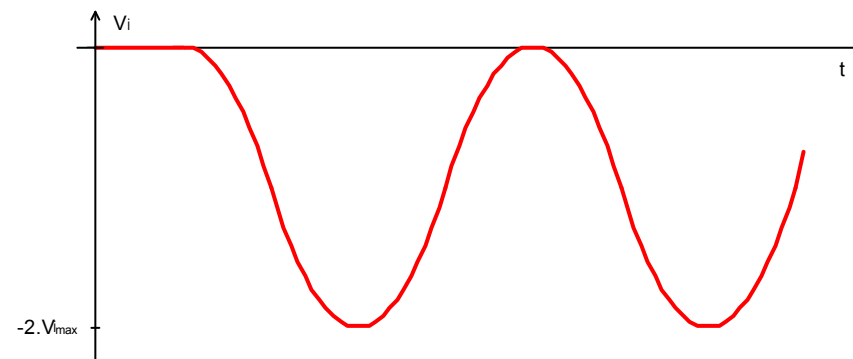
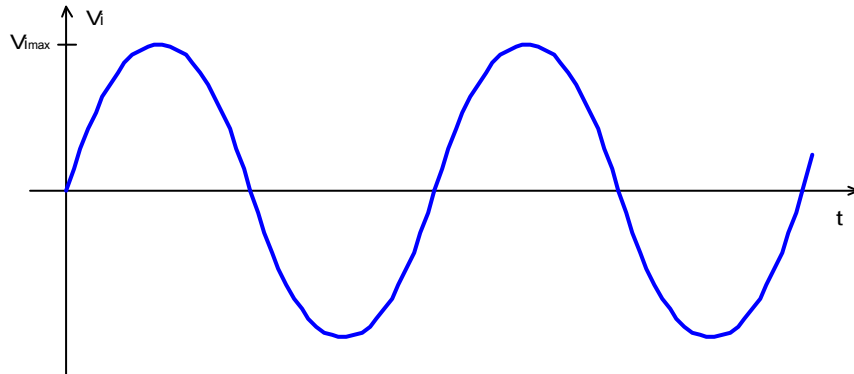
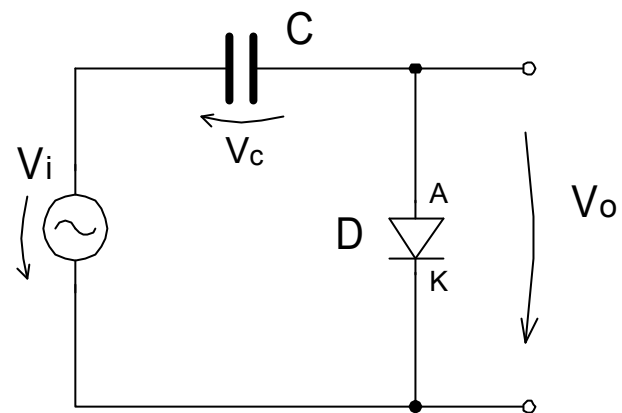
Circuitos com Díodos

Circuito fixador

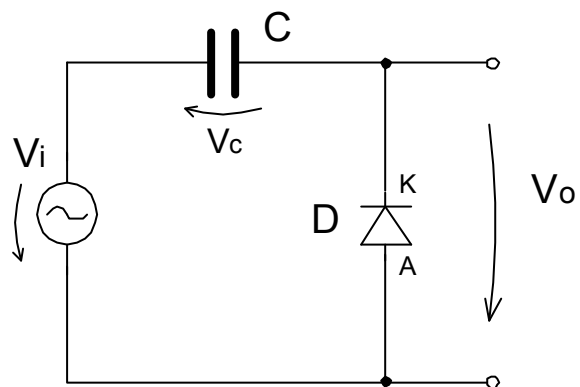


Circuitos com Diodos

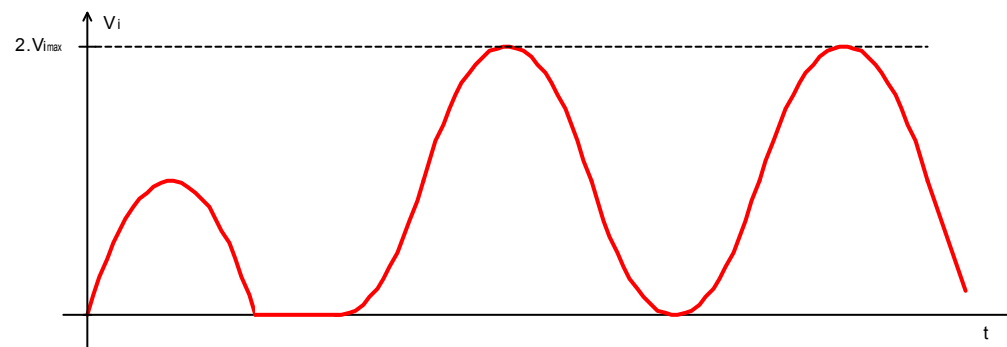
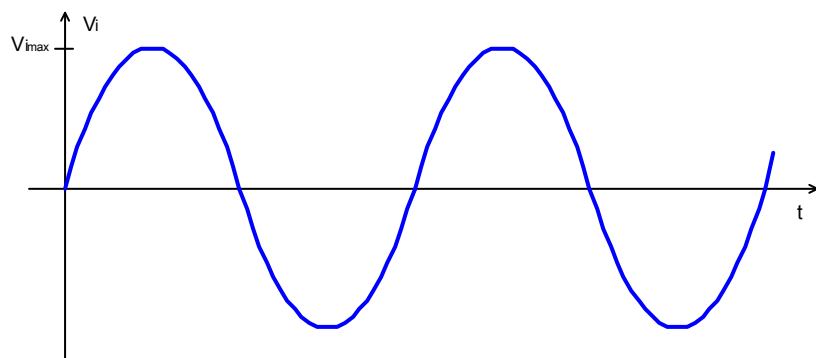
Circuito fixador



Circuitos com Diodos



Circuito fixador



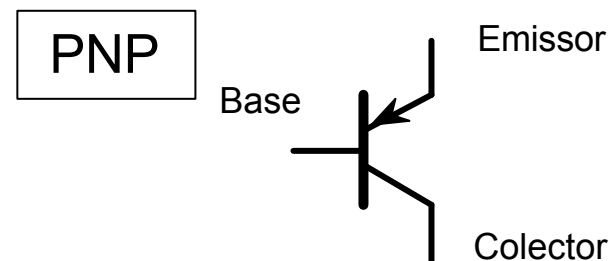
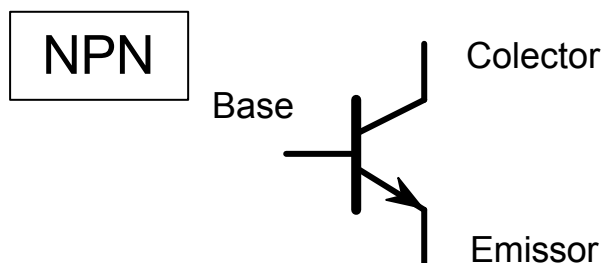
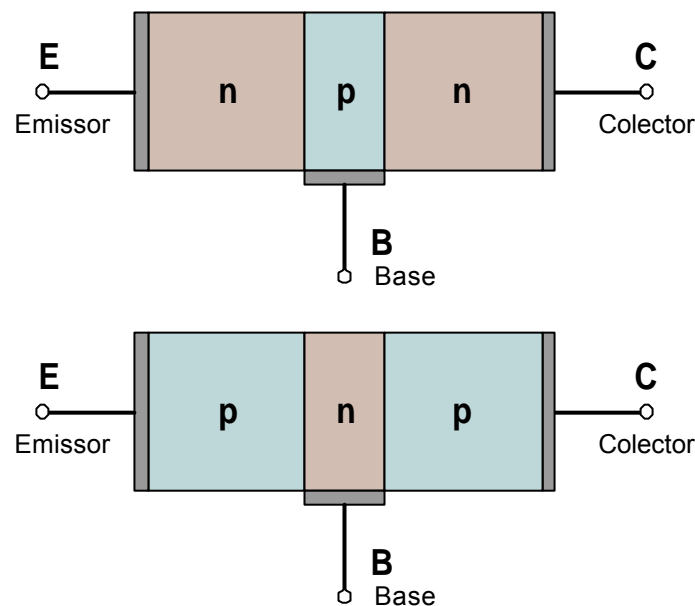
Condicionamento de Sinal

- 2.3. Circuitos com Transístores Bipolares (BJT)
 - 2.3.1. Transístor bipolar
 - 2.3.1.1. Estrutura Física e zonas de funcionamento
 - 2.3.1.2. Funcionamento do transístor NPN na zona activa: Correntes (colector, base e emissor), Modelo equivalente e Corrente ICBO
 - 2.3.2. Transístor PNP
 - 2.3.3. Convenções e Simbologia
 - 2.3.4. Representação gráfica das características dos transístores
 - 2.3.5. Análise de circuitos com transístores em CC: Exemplos
 - 2.3.6. Características estáticas completas
 - 2.3.6.1. Base comum
 - 2.3.6.2. Emissor comum
 - 2.3.5.3. hFE
 - 2.3.7. O transístor como amplificador
 - 2.3.6.1. Condições de corrente contínua
 - 2.3.6.2. Corrente no colector e transcondutância
 - 2.3.6.3. Corrente na base e resistência de entrada na base
 - 2.3.6.4. Corrente no emissor e resistência de entrada no emissor
 - 2.3.6.5. Ganho de tensão
 - 2.3.8. Modelos equivalentes para pequenos sinais
 - 2.3.8.1. O modelo híbrido
 - 2.3.8.2. Aplicação dos modelos para pequenos sinais: Exemplos
 - 2.3.9. Análise gráfica
 - 2.3.10. Polarização
 - 2.3.10.1. Fonte de alimentação única
 - 2.3.10.2. Duas fontes de alimentação
 - 2.3.10.3. Resistência base-colector
 - 2.3.11. Configurações amplificadoras básicas
 - 2.3.11.1. Banda de médias frequências
 - 2.3.11.2. Configuração em Emissor Comum (EC): Resistência de emissor
 - 2.3.10.3. Configuração em Base Comum (BC)
 - 2.3.10.4. Configuração em Colector Comum (CC)
 - 2.3.10.5. Comparação das várias configurações
 - 2.3.12. Transístor como interruptor: corte e saturação
 - 2.3.12.1. Região de Corte
 - 2.3.12.2. Região Activa
 - 2.3.12.3. Região de Saturação: modelo e exemplos

Circuitos com Transístores Bipolares

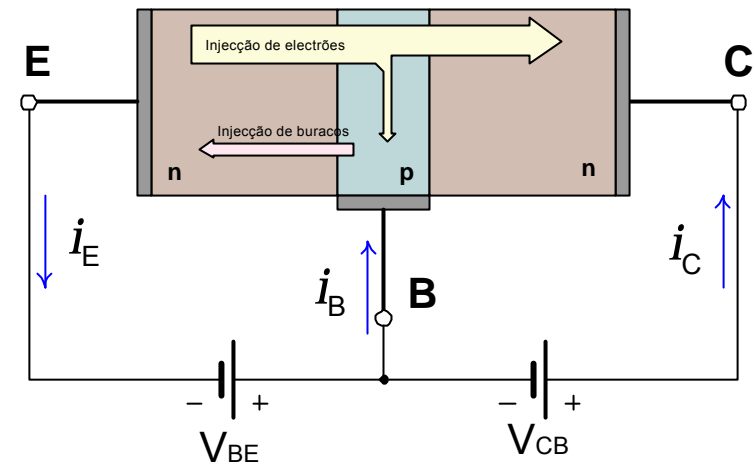
O transistor de junção bipolar (BJT)

- **Bipolar** – dois tipos de cargas, electrões e buracos, envolvidos nos fluxos de corrente
- **Junção** – duas junções *pn*. Junção base/emissor e junção base/colector
- **Tipos** – tipos NPN e PNP.
- **Terminais** – Base, Emissor e Colector
- **Símbolos** -



Fluxos de corrente num transistor *npn* operando na ZAD

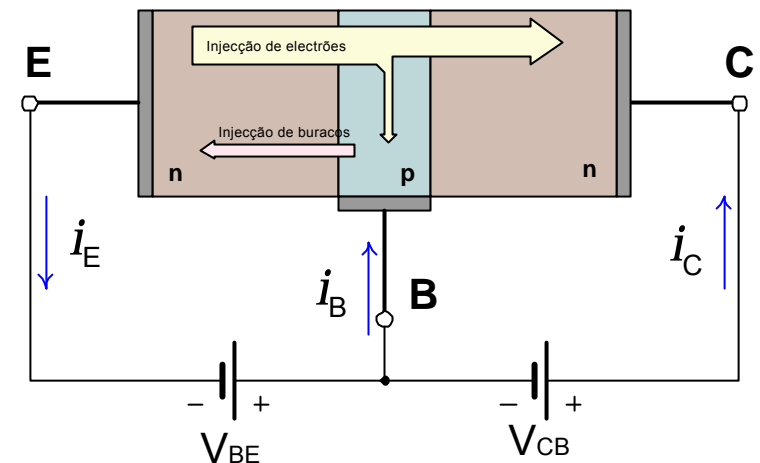
- A junção Emissor/Base é directamente polarizada
- A junção Base/Colector é inversamente polarizada
- A espessura da região da base é tipicamente 150 vezes inferior à espessura do dispositivo.
- A polarização directa da junção base/emissor causa um fluxo de portadores maioritários (electrões) da região n para a região p.



- E de portadores minoritários (buracos) da base para o emissor
- A soma destes dois fluxos conduz à corrente de emissor I_E .

Fluxos de corrente num transistor *npn* operando na ZAD

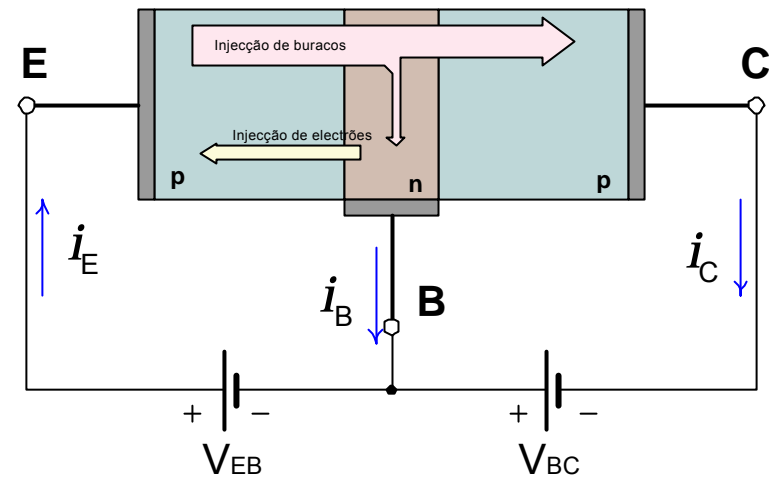
- O transistor é construído de tal forma que praticamente toda a corrente é constituída pelo fluxo de electrões do emissor para a base. A região do emissor é muito mais fortemente dopada do que a região da base.
- A região da base é muito fina comparada com a espessura das regiões do emissor e do colector. Os electrões que fluem do emissor para a base, atravessam esta região e são atraídos para o colector,



antes de haver tempo para a recombinação com os buracos na base. A corrente no colector é da mesma ordem de grandeza da corrente no emissor.

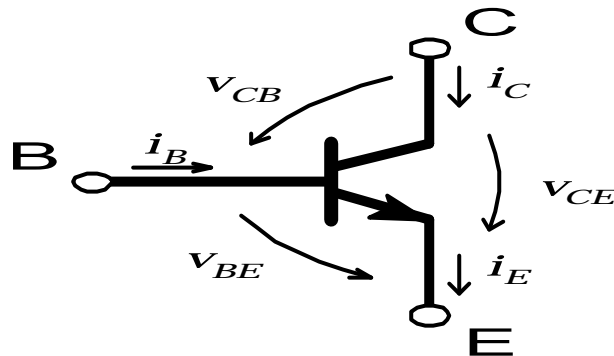
Fluxos de corrente num transistor **pn**p operando na ZAD

- O transistor PNP opera de forma semelhante ao descrito para o transistor NPN
- A tensão V_{EB} polariza directamente a junção EB. A tensão V_{BC} polariza inversamente a junção CB.
- No transistor PNP as correntes são sobretudo devidas a correntes de buracos.
- As correntes de difusão de electrões livres da base para o emissor são muito pequenas em comparação com as correntes de buracos em sentido contrário.
- A região do emissor, tal como no transistor NPN, é muito mais fortemente dopada do que a região da base. A espessura da base é muita pequena em comparação com as dimensões do dispositivo.

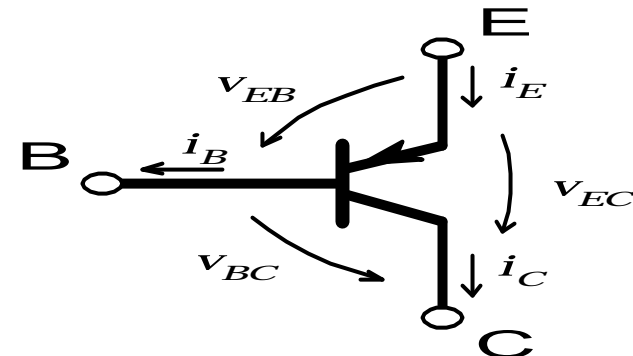


Transistor de junção bipolar (BJT)

(convenções)



NPN



PNP

- Os sentidos de referência adoptados para tensões e correntes aos terminais do transistor são escolhidos de tal modo que, para o funcionamento na *zona activa directa*, as correntes são positivas.
- O funcionamento dos dois tipos de transistores é muito semelhante; quando se passa de um para outro, todos os resultados se mantêm se se trocarem os sentidos das tensões e correntes.

Circuitos com Transístores Bipolares

Transistor de junção bipolar (BJT) (modos de operação)

Modo de operação	Junção EB	Junção CB	Aplicações
Zona Activa Directa (ZAD)	Polarizada directamente	Polarizada inversamente	Amplificadores
Zona de Corte (ZC)	Polarizada inversamente	Polarizada inversamente	Interruptores Portas lógicas Circuitos TTL Etc..
Zona de Saturação (ZS)	Polarizada directamente	Polarizada directamente	

Transistor de junção bipolar (NPN)

(Equações - resumo)

- Zona Activa Directa (ZAD)

$$\begin{aligned}i_C &= \hat{a} \cdot i_B & e & & i_E &= (\hat{a} + 1) \cdot i_B \\i_C &= \hat{a} \cdot i_E & e & & i_C &= \frac{\hat{a}}{\hat{a} + 1} \cdot i_E \\v_{BE} &\cong v_{BE_{on}} = 0,7V \\v_{CE} &> V_{CE_{sat}}\end{aligned}$$

- Zona de Saturação (ZS)

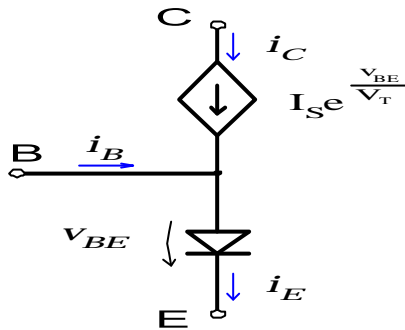
$$\begin{aligned}i_C &< \hat{a} \cdot i_B \\v_{BE} &\cong v_{BE_{on}} = 0,7V \\v_{CE} &= V_{CE_{sat}} \cong 0,2V\end{aligned}$$

- Zona de Corte (ZC)

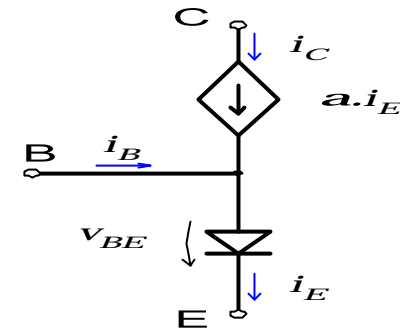
$$\begin{aligned}i_B &= i_C = i_E = 0 \\v_{BE} &< 0,7V\end{aligned}$$

Transistor de junção bipolar (NPN)

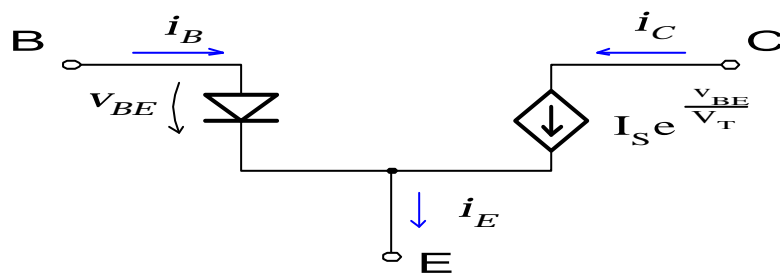
Modelos para sinais fortes



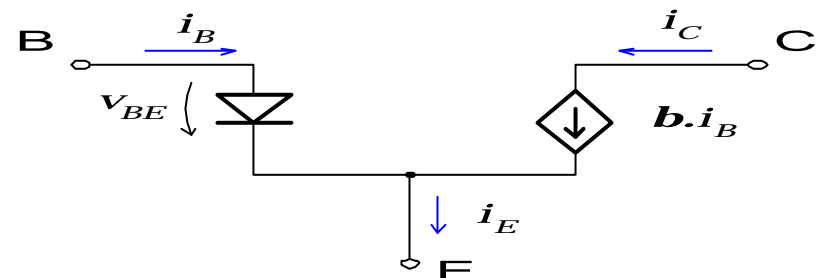
a) Fonte de corrente controlada por tensão



b) Fonte de corrente controlada por corrente



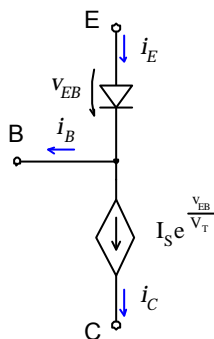
c) Fonte de corrente controlada por tensão



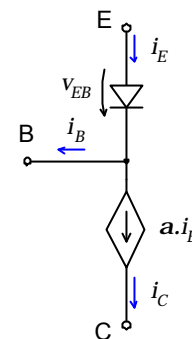
d) Fonte de corrente controlada por corrente

Transistor de junção bipolar (PNP)

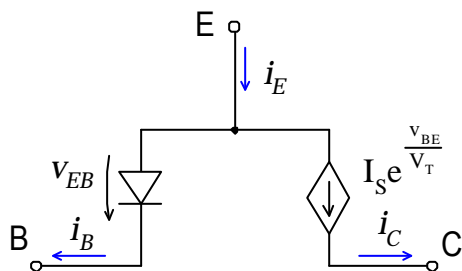
Modelos para sinais fortes



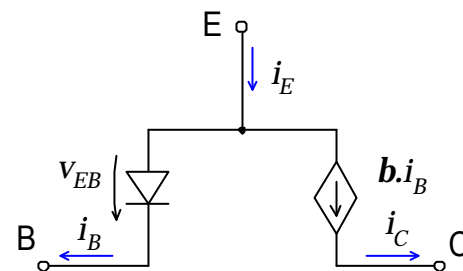
a) Fonte de corrente controlada por tensão



b) Fonte de corrente controlada por corrente



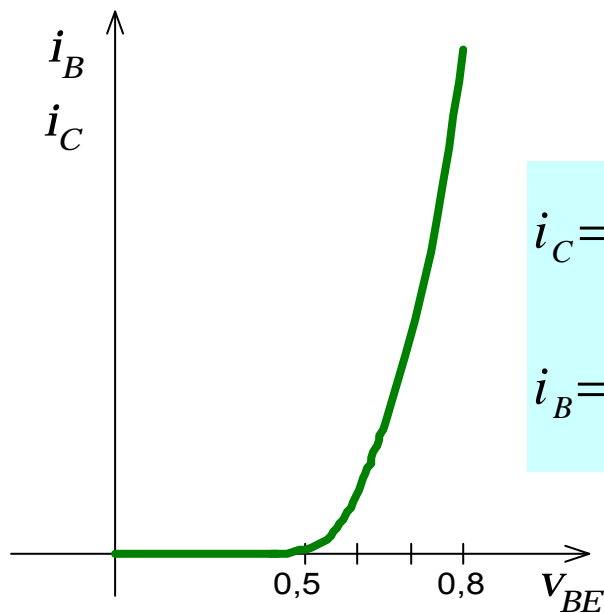
c) Fonte de corrente controlada por tensão



d) Fonte de corrente controlada por corrente

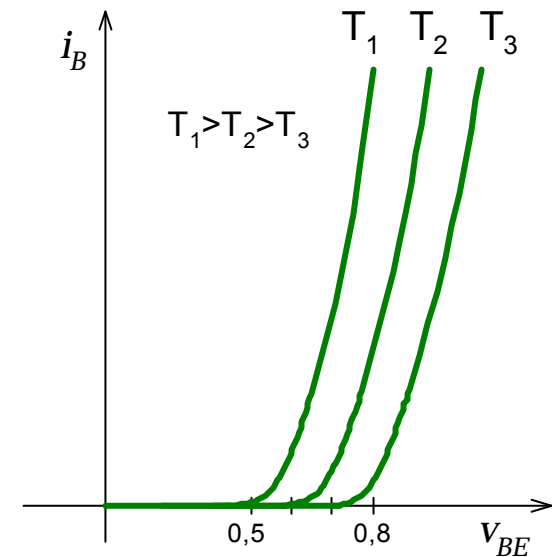
Curvas características do BJT (*npn*)

$i_B = f(v_{BE})$ para v_{CE} constante



$$i_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$
$$i_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

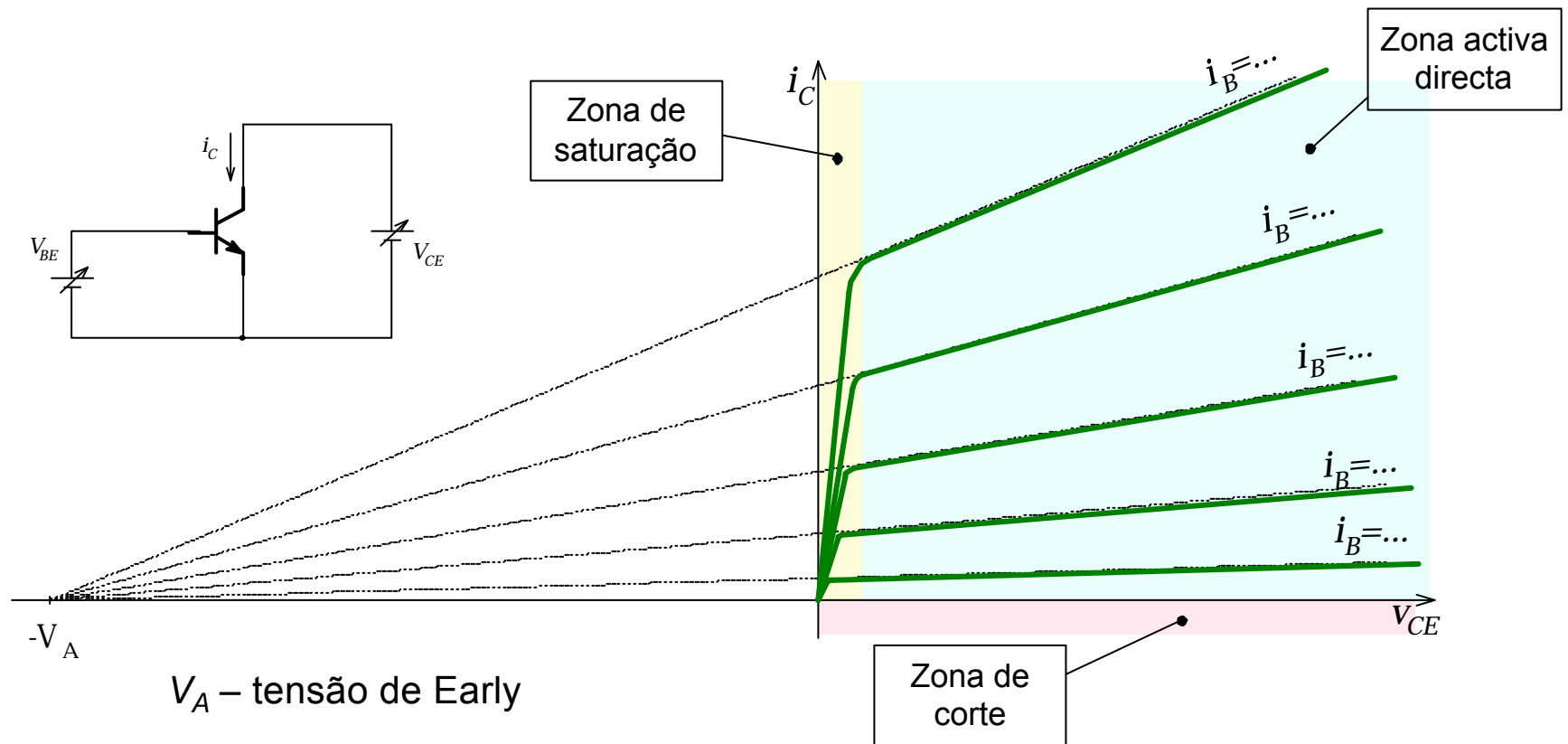
Habitualmente considera-se
 $V_{BE} = V_{BEon} \cong 0,7V$



Efeito da temperatura na característica
 $i_B - v_{BE}$ de um transistor *npn*.
 v_{BE} decresce aproximadamente $2mV/^{\circ}C$.

Curvas características do BJT (*n*pn)

$$i_C = f(v_{CE}) \text{ para } i_B \text{ constante}$$



Circuitos com Transístores Bipolares

Análise de circuitos *dc* com o BJT (npn) - (Recta de carga estática)

Da malha de saída tem-se:

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} = 0$$
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad \text{ou} \quad I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

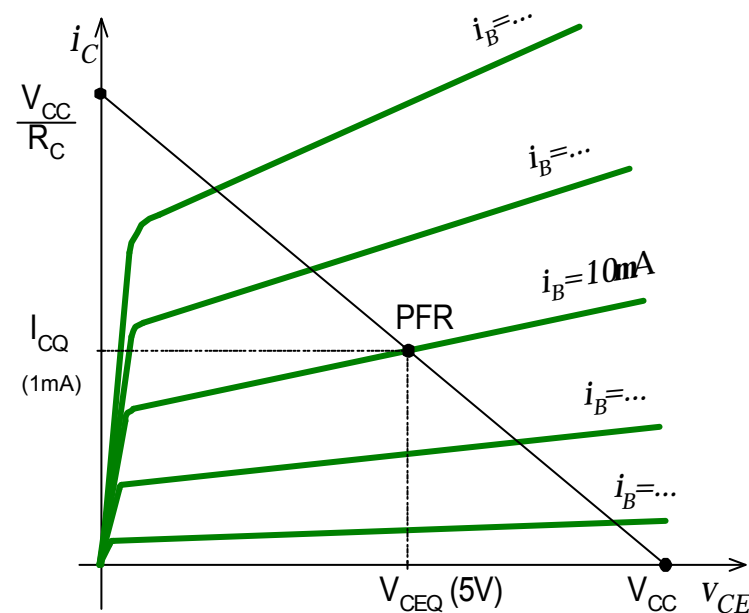
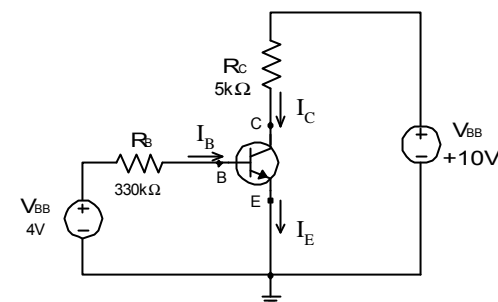
Equação de uma recta, em que:

$$\text{para } I_C = 0 \implies V_{CE} = V_{CC}$$

$$\text{para } V_{CE} = 0 \implies I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

PFR - ponto de funcionamento em repouso

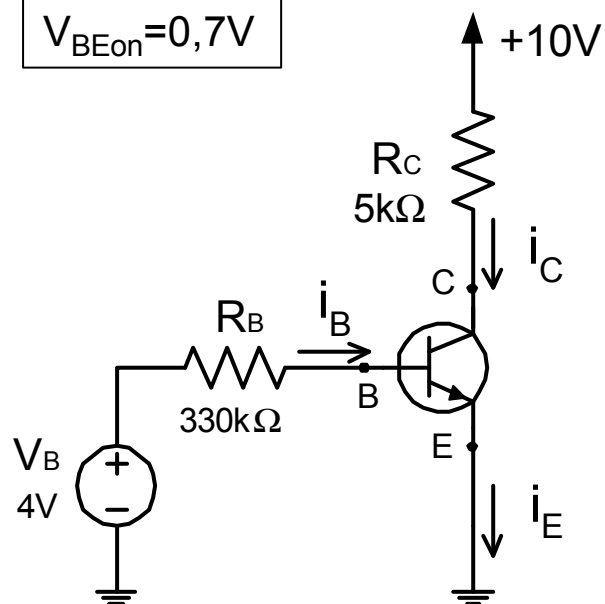
$$\text{PFR}(V_{CEQ}, I_{CQ})$$



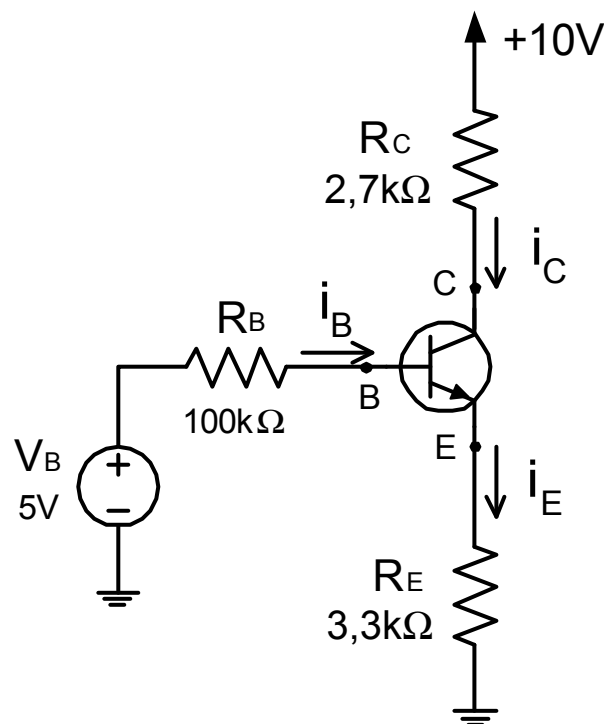
Circuitos com Transístores Bipolares

Transistor de junção bipolar (NPN) (Exemplos)

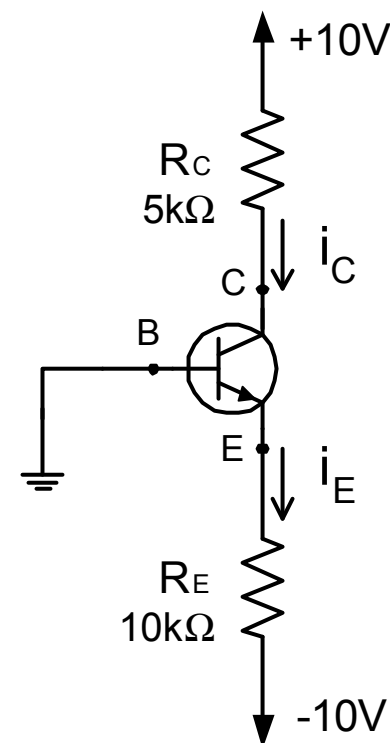
$$\beta = 100$$
$$V_{BEon} = 0,7V$$



a)



b)



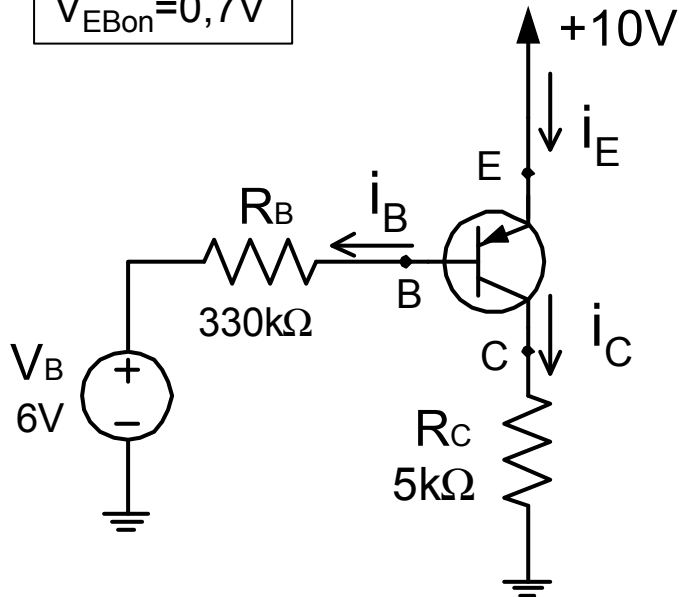
c)

Circuitos com Transístores Bipolares

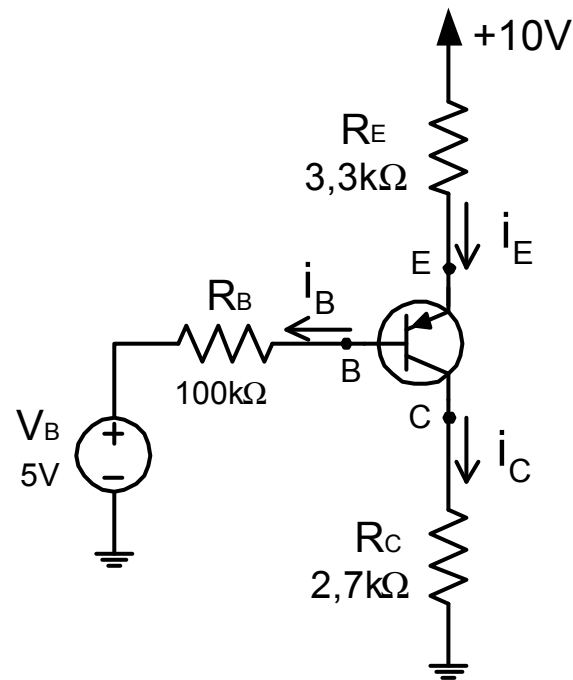
Transistor de junção bipolar (PNP) (Exemplos)

$$\beta = 100$$

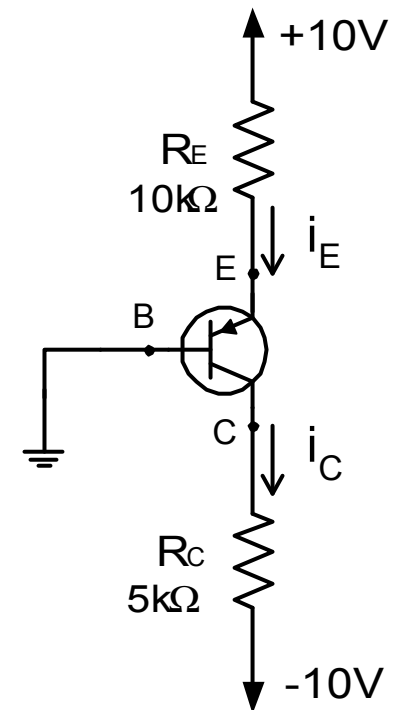
$$V_{EBon} = 0,7V$$



a)



b)



c)

Circuitos com Transístores Bipolares

Análise de circuitos *dc* com o transistor de junção bipolar (npn) - (Exemplo)

1. Malha de entrada

$$-V_{BB} + R_B \cdot I_B + V_{BEon} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BEon}}{R_B}$$

$$I_B = \frac{4 - 0,7}{330 \text{ k}} = 10 \mu\text{A}$$

2. Equações do BJT

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_C = 100 \cdot 10 \mu\text{A} = 1 \text{mA}$$

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1) \cdot I_B$$

$$I_E = 101 \cdot 10 \mu\text{A} = 1,01 \text{mA}$$

$$I_E \cong 1 \text{mA}$$

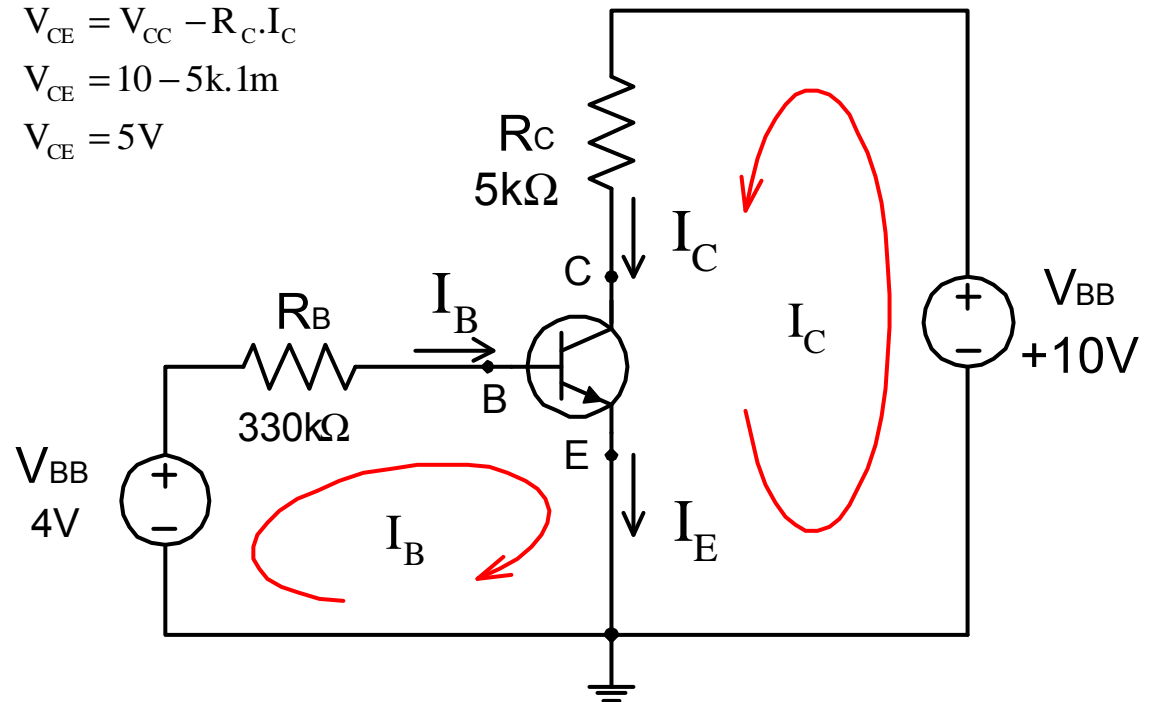
3. Malha de saída

$$-V_{CC} + R_C \cdot I_C + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot I_C$$

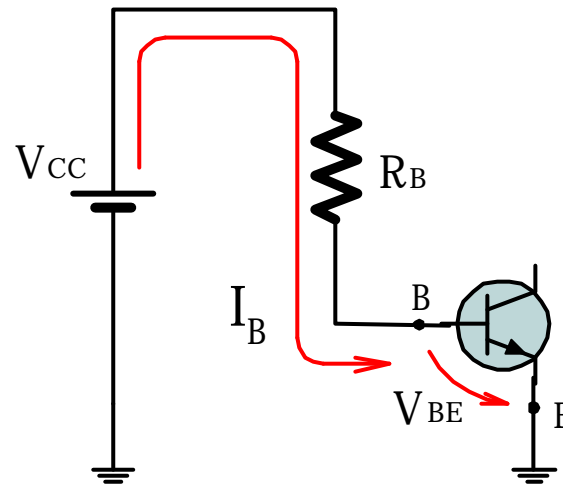
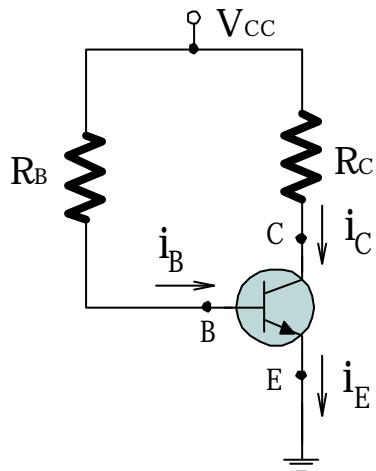
$$V_{CE} = 10 - 5 \text{ k} \cdot 1 \text{m}$$

$$V_{CE} = 5 \text{V}$$



Circuitos com Transístores Bipolares

Exemplos de polarização *dc* de circuitos com BJT's

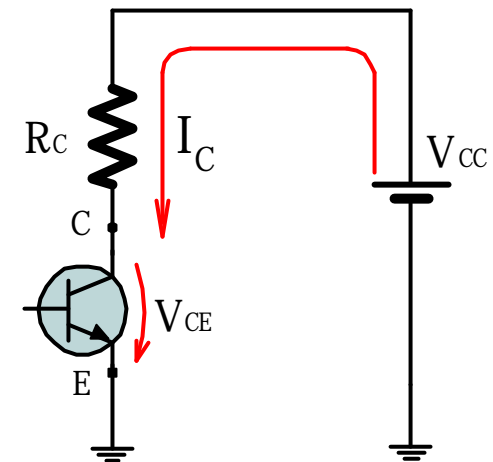


Malha Base-Emissor

$$-V_{CC} + I_B R_B + V_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$



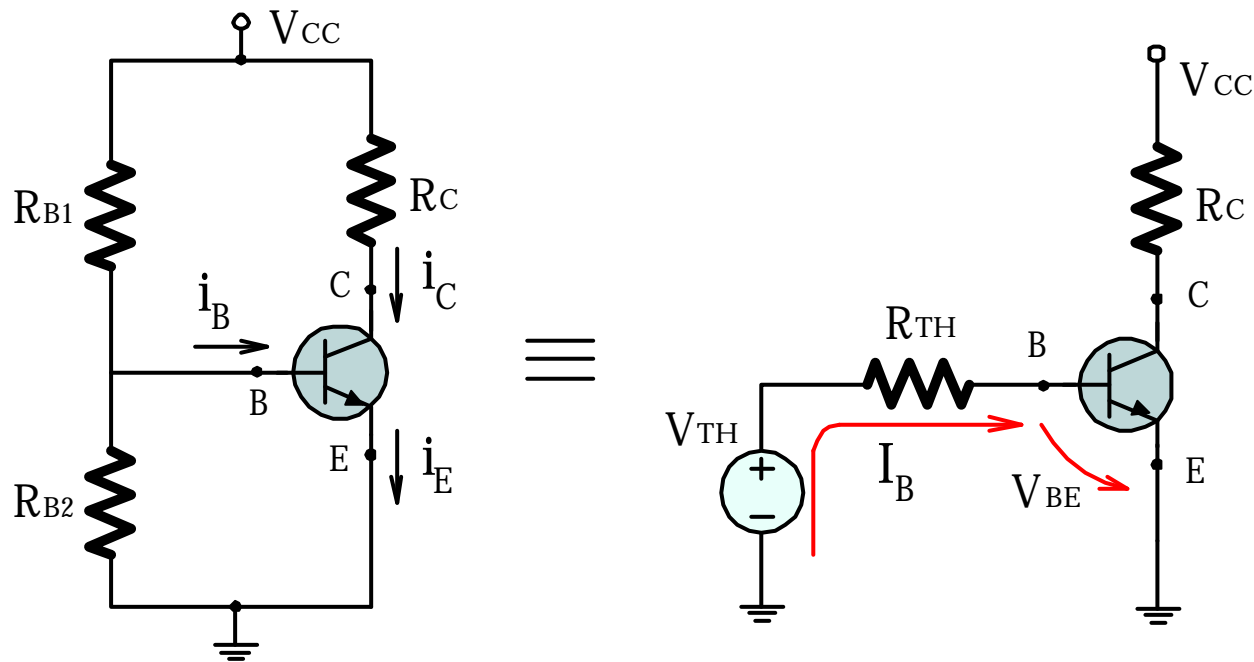
Malha Colector-Emissor

$$-V_{CC} + I_C R_C + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

Circuitos com Transístores Bipolares

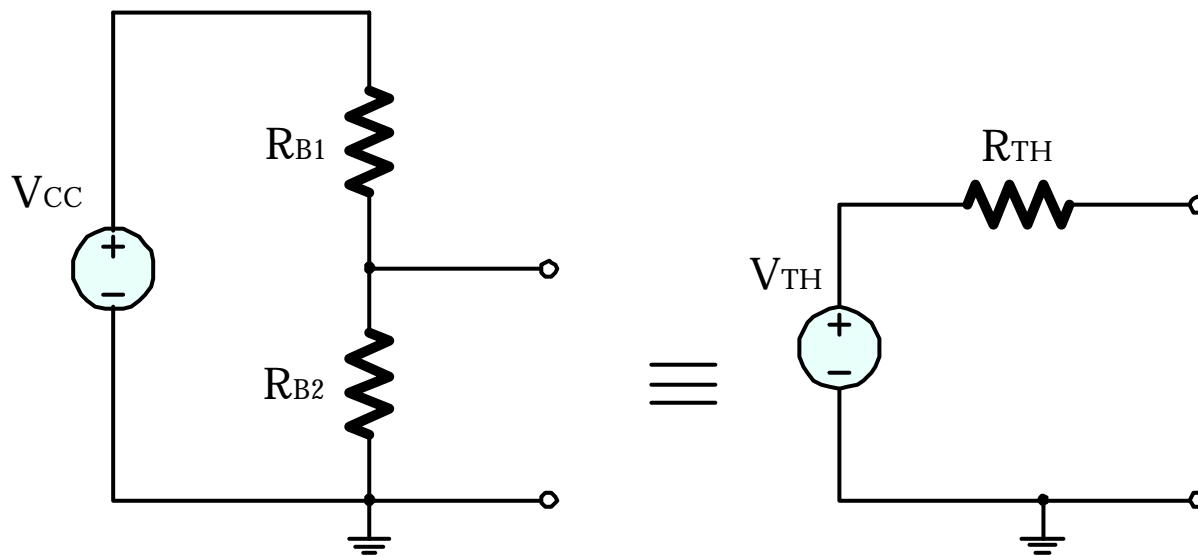
Exemplos de polarização *dc* de circuitos com BJT's
(polarização por divisor de tensão)



$$R_{TH} = R_{B1} // R_{B2}$$

$$V_{TH} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC}$$

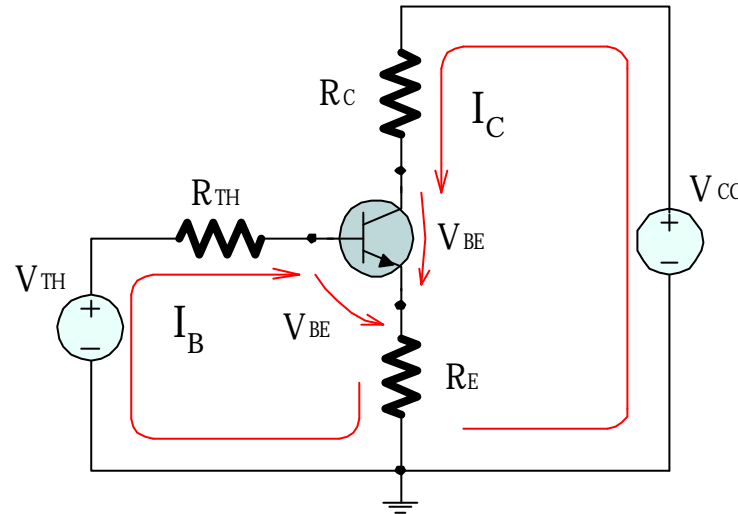
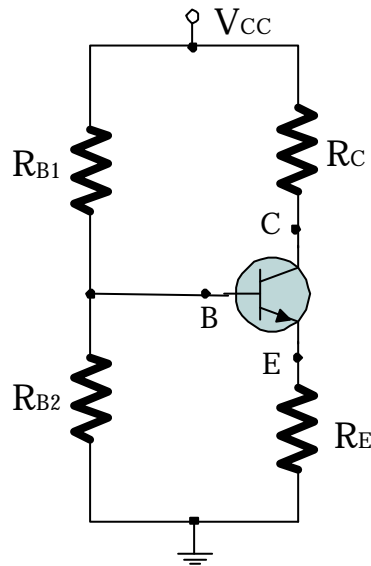
Polarização por divisor de tensão (equivalente de Thévenin da malha Base-Emissor)



$$V_{TH} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{CC} \quad \wedge \quad R_{TH} = R_{B1} // R_{B2}$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Polarização por divisor de tensão e resistência no Emissor



A introdução de uma resistência no emissor traduz-se em circuitos com boa estabilidade do seu ponto de funcionamento em repouso (PFR) e faz com que a corrente I_C seja praticamente independente do valor de β e a corrente I_B praticamente independente de R_B .

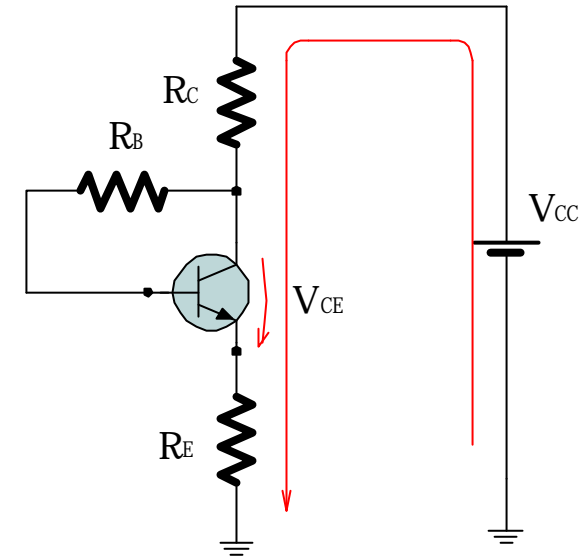
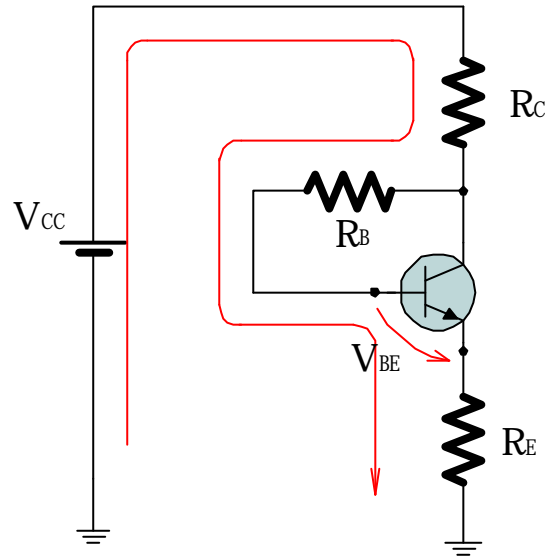
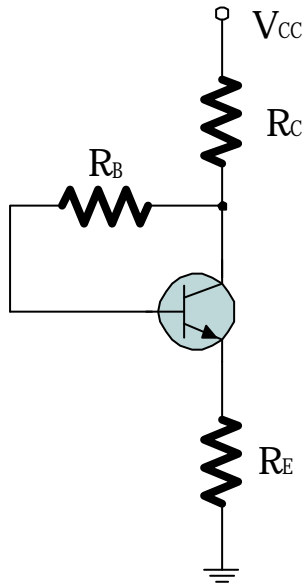
$$\begin{aligned} -V_{TH} + R_{TH}I_B + V_{BEon} + R_E I_E &= 0 \\ -V_{TH} + R_{TH}I_B + V_{BEon} + (\beta + 1)R_E I_B &= 0 \\ I_B &= \frac{V_{TH} - V_{BEon}}{R_{TH} + (\beta + 1)R_E} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= \beta \cdot I_B \\ I_E &= (\beta + 1) \cdot I_B \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E &= 0 \\ V_{CE} &= V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E \\ V_{CE} &\cong V_{CC} - (R_C + R_E) \cdot I_C \end{aligned}$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Polarização com resistência de rectroacção
colector-base e resistência no emissor



$$\begin{aligned} -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E &= 0 \\ -V_{CC} + (\beta + 1)R_C I_B + R_B I_B + V_{BE} + (\beta + 1)R_E I_B &= 0 \end{aligned}$$

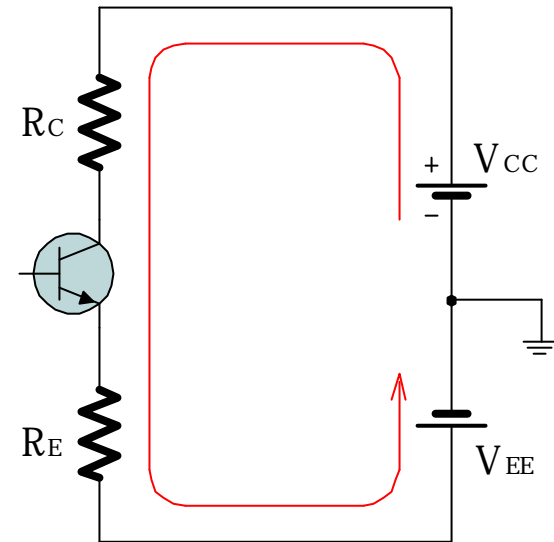
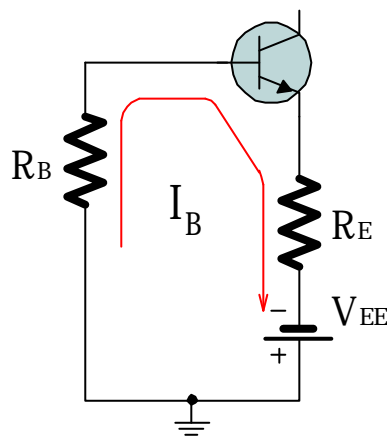
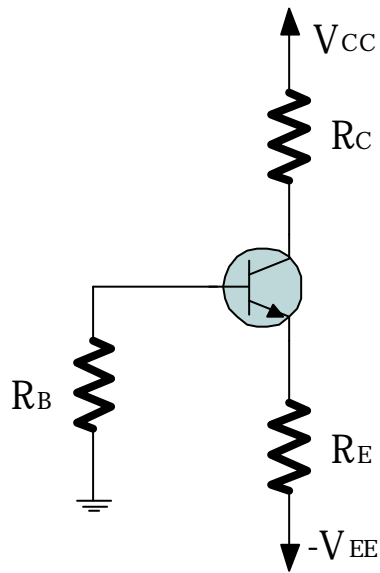
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_C + (\beta + 1)R_E}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$\begin{aligned} -V_{CC} + R_C(I_C + I_B) + V_{CE} + R_E I_E &= 0 \\ -V_{CC} + R_C I_E + V_{CE} + R_E I_E &= 0 \\ V_{CE} &= V_{CC} - (R_C + R_E)I_E \end{aligned}$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Polarização com duas fontes de tensão



$$R_B I_B + V_{BEon} + (\beta + 1) R_E I_B - V_{EE} = 0$$

$$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BEon}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

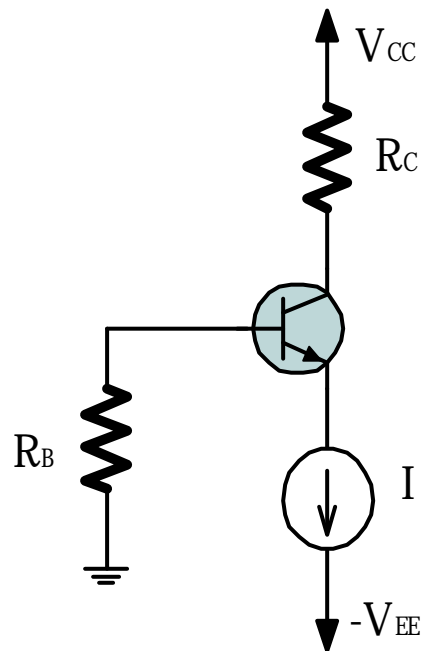
$$I_C = \beta I_B$$

$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E - V_{EE} = 0$$

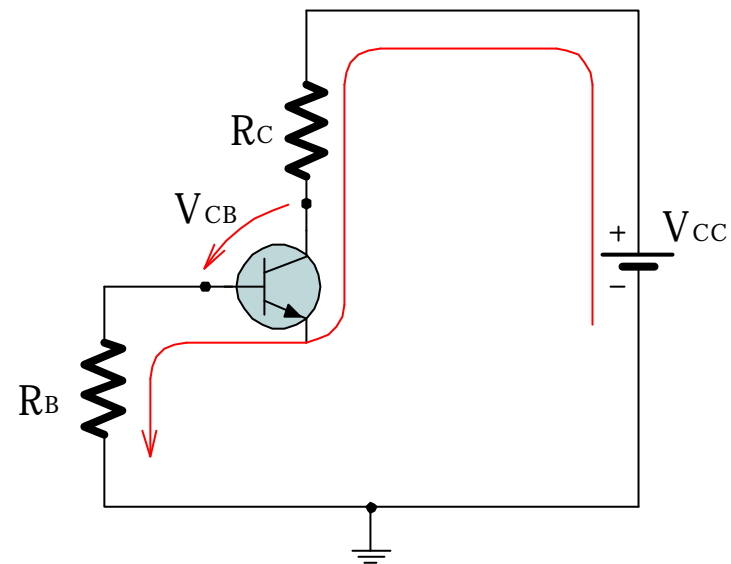
$$V_{CE} = V_{CC} + V_{EE} - R_C I_C - R_E I_E$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Polarização com fonte de corrente



$$\begin{aligned}I_E &= I \\I_C &= \alpha \cdot I_E \cong I_E \\I_B &= \frac{I_E}{\beta + 1}\end{aligned}$$



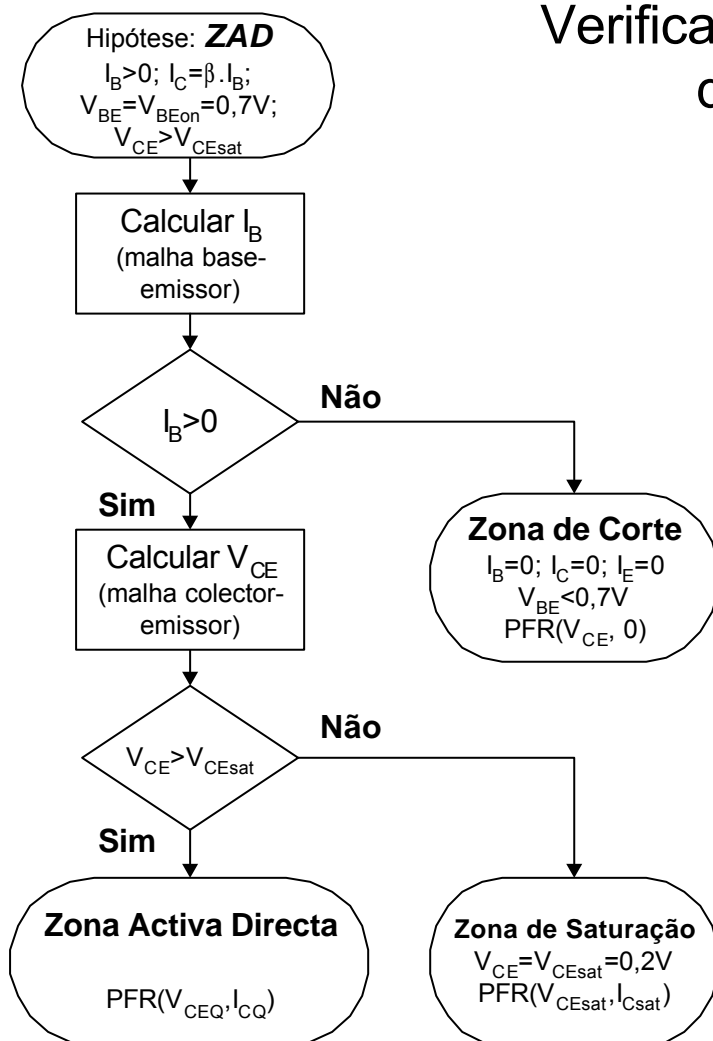
$$-V_{CC} + R_C I_C + V_{CB} + R_B I_B = 0$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_B I_B + V_{BE}$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Verificação da zona de funcionamento de um circuito com BJT's



- Parte-se da hipótese que o BJT está na ZAD;
- Calcula-se I_B a partir da malha de entrada, ou base-emissor;
- Se o valor obtido para I_B for nulo ou negativo conclui-se que o BJT está na ZC - Zona de Corte; $I_B = 0$; $I_C = 0$ e $I_E = 0$; o V_{BE} é inferior a $0,7V$.
- Se o valor de I_B for positivo calculamos $I_C = \beta I_B$ e calculamos V_{CE} a partir da malha colector-emissor.
- Se o valor obtido para V_{CE} for inferior ou igual a V_{CEsat} , concluímos que o BJT está na ZS- Zona de saturação. $V_{CE} = V_{CEsat}$ e há que calcular I_{Csat} da malha de saída ($I_C \neq \beta I_B$).
- Se o valor de V_{CE} for superior a V_{CEsat} , então o BJT encontra-se mesmo na ZAD e V_{CEQ} e I_{CQ} são os obtidos nos cálculos anteriores.

Circuitos com Transístores Bipolares

Funcionamento do BJT no corte e saturação

Zona de Corte : $V_i < 0,7V$

$$I_B = \frac{V_i - V_{BEon}}{R_B} < 0 \Leftrightarrow V_i - 0,7 < 0$$

$$I_B = 0 \wedge I_C = 0$$

Zona de Saturação : $V_i > 1,9V$

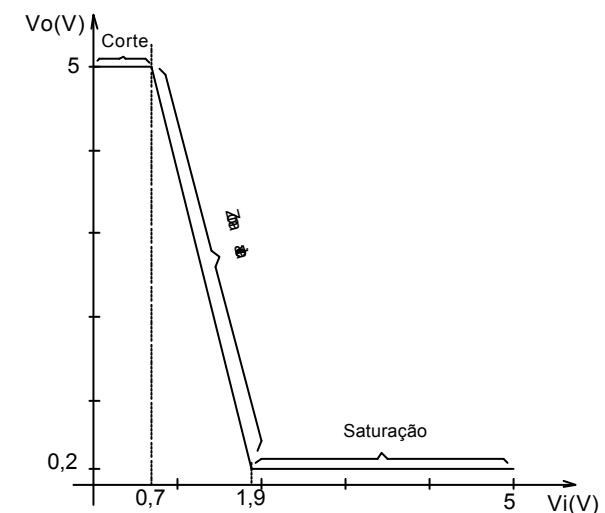
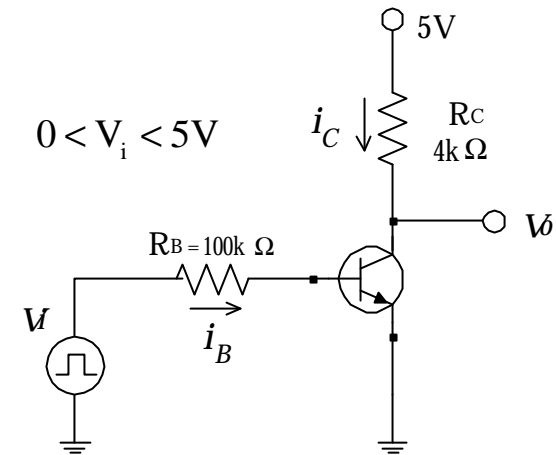
$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} = \frac{5 - 0,2}{4k} = 1,2mA$$

$$I_{Csat} < \beta I_{Bsat} \Rightarrow I_{Bsat} > \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{1,2mA}{100} = 12\mu A$$

$$I_{Bsat} = \frac{V_i - V_{BEon}}{R_B} = \frac{V_i - 0,7}{100k} > 12\mu A$$

$$V_i > 100k \cdot 12\mu + 0,7 = 1,9V$$

Zona Activa Directa : $0,7 < V_i < 1,9V$



Circuitos com Transístores Bipolares

Funcionamento do BJT no corte e saturação

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BEon}}{(\beta + 1)R_E} = \frac{6 - 0,7}{101 \times 3,3k} = 16\mu A$$

$$I_C = 100 \cdot 16\mu A = 1,6mA$$

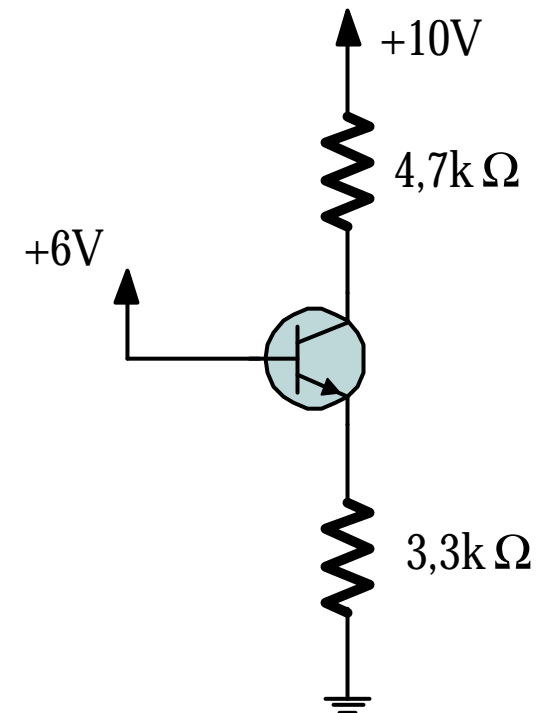
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C - R_E I_E$$

$$V_{CE} = 10 - 4,7k \cdot 1,6m - 3,3 \cdot 1,6m$$

$$V_{CE} = -2,8V < V_{CEsat} = 0,2V \Rightarrow ZS$$

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat} - V_{RE}}{R_C} = \frac{10 - 0,2 - 5,3}{4,7k} = 0,96mA$$

$$I_{Bsat} = I_{Esat} - I_{Csat} = 1,6m - 0,96m = 0,64mA$$



O BJT como amplificador

- Condições DC

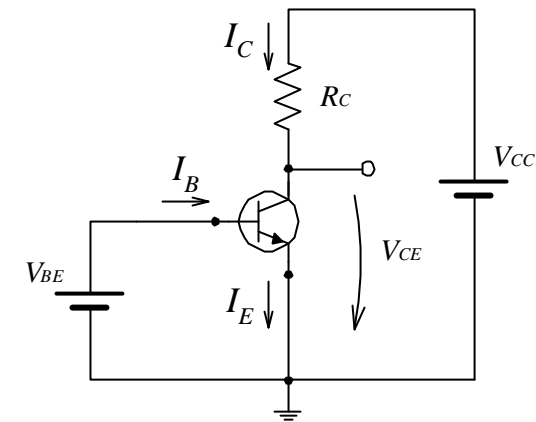
As condições de polarização DC obtêm-se considerando $v_{be}=0$

$$I_C = I_S \exp(v_{BE} / V_T)$$

$$I_B = I_C / \beta$$

$$I_E = I_C / \alpha$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$



Condições DC; $v_{be}=0$

- Sobreposição de um sinal AC à tensão DC

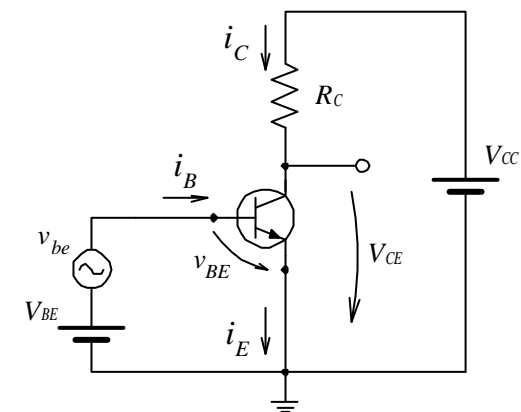
Se for aplicada uma tensão AC de valor v_{be} , a tensão v_{BE} , valor total instantâneo, é:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

Da mesma forma tem-se para a corrente i_C :

$$i_C = I_S \exp(v_{BE} / V_T) = I_S \exp[(V_{BE} + v_{be}) / V_T] =$$

$$I_S \exp(V_{BE} / V_T) \cdot \exp(v_{be} / V_T) = I_C \exp(v_{be} / V_T)$$



Condições AC; $v_{be} \neq 0$

O BJT como amplificador

Utilizando a aproximação $e^x \cong 1 + x$ se $x \ll 1$

Se $v_{be} \ll V_T$ tem-se $\exp(\frac{v_{be}}{V_T}) \cong 1 + \frac{v_{be}}{V_T}$

$$i_C = I_C (1 + v_{be}/V_T) = I_C + \frac{I_C}{V_T} v_{be} = I_C + g_m v_{be}$$

como $i_C = I_C + i_c$ tem-se $i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$

Define-se $g_m = \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$

g_m é designado por **transcondutância**

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_C}{\beta} + \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

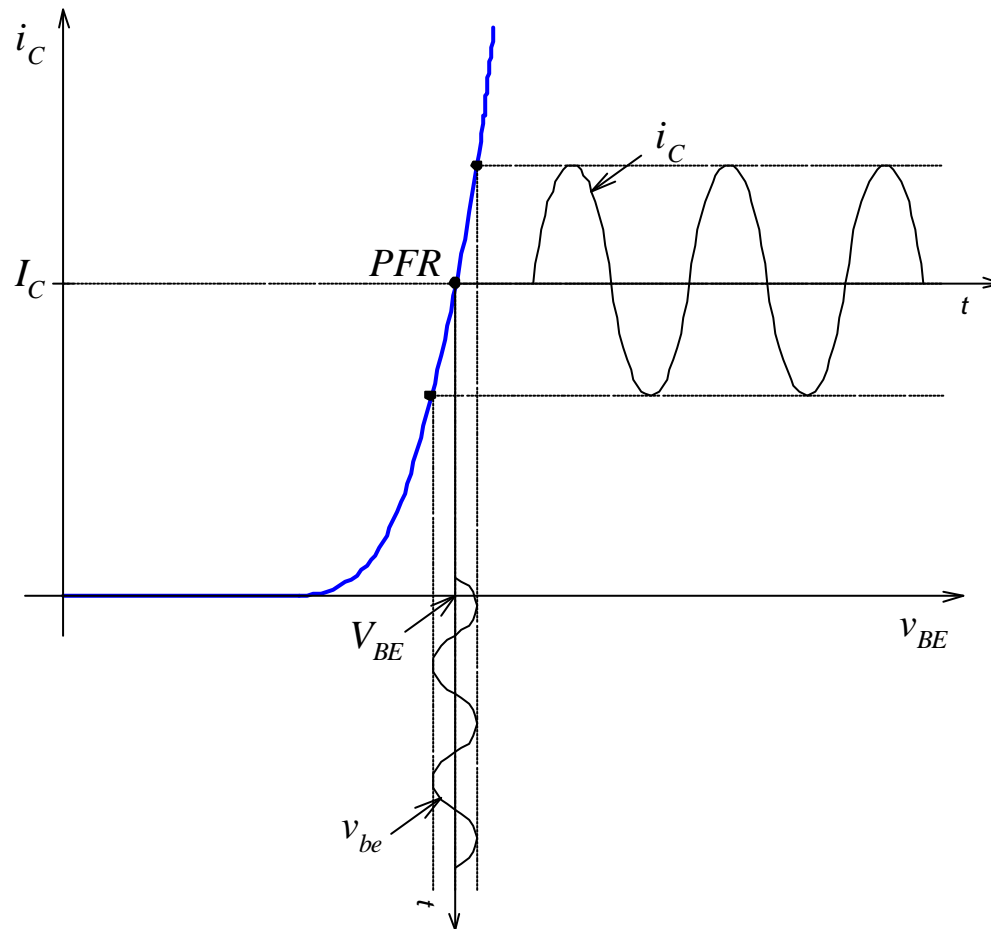
$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

$$r_\pi = \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m}$$

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

ou $r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$

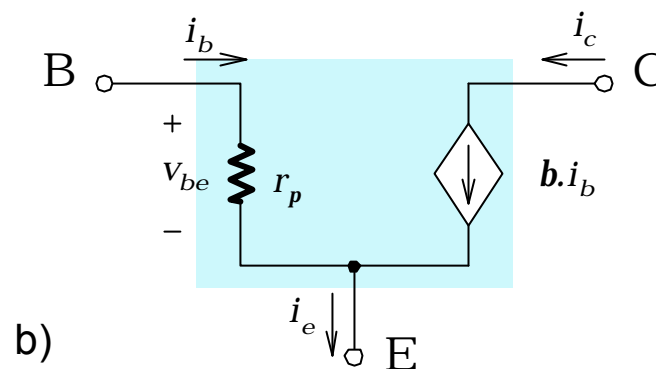
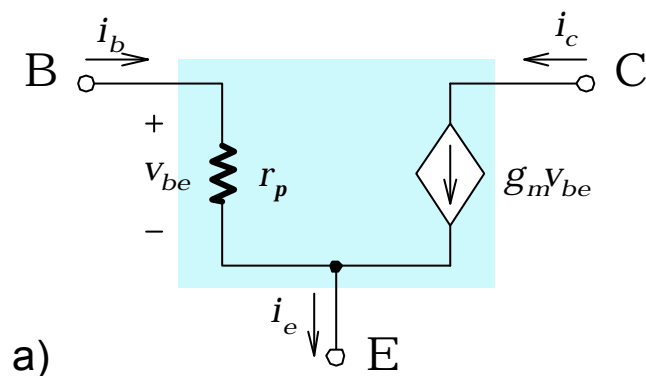
O BJT como amplificador



Operação de um transistor em sinais fracos: um sinal fraco v_{be} com a forma sinusoidal sobrepõe-se à tensão V_{BE} , o que dá origem a uma corrente no colector em AC, i_c , também de forma sinusoidal que se sobrepõe à corrente DC, I_C ; $i_c = g_m \cdot v_{be}$.

O BJT como amplificador – modelos para sinais pequenos

- O modelo *p-híbrido*



$$i_c = g_m v_{be} \quad \text{com} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad \text{ou} \quad i_c = \beta i_b \quad \text{e} \quad i_b = \frac{v_{be}}{r_\pi} \quad \text{com} \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

As figuras a) e b) representam duas versões ligeiramente diferentes do modelo π -híbrido simplificado do transistor de junção bipolar operando com sinais pequenos:

- Em a) o BJT é representado por uma fonte de corrente controlada por tensão [amplificador de transcondutância]
- Em b) o BJT é representado por uma fonte de corrente controlada por corrente [amplificador de corrente]

O BJT como amplificador – modelos para sinais pequenos

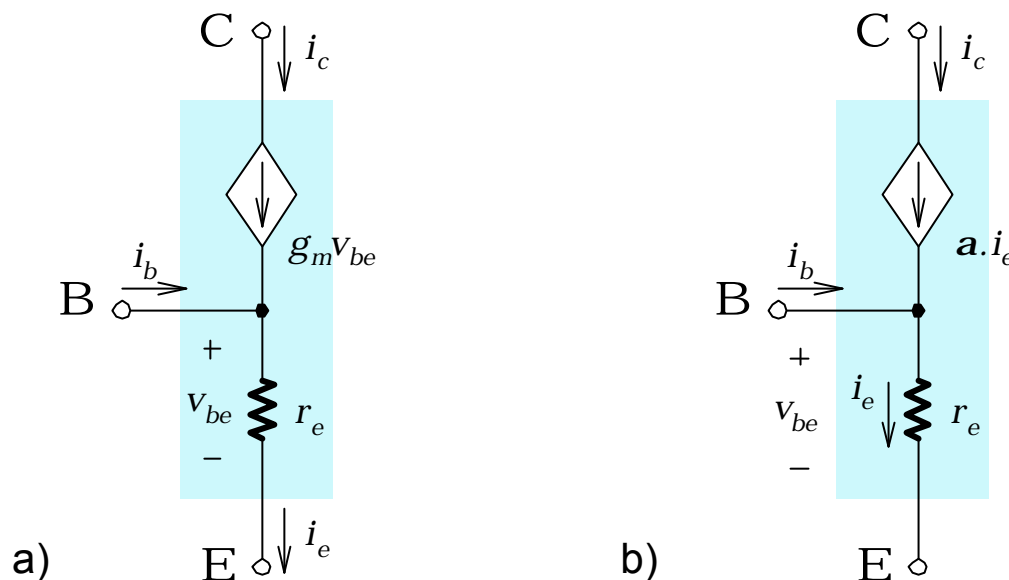
- O modelo em T

$$i_c = g_m v_{be} \quad \text{com} \quad g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

ou

$$i_c = \alpha i_e \quad \text{e} \quad i_e = \frac{v_{be}}{r_e}$$

com $r_e = \frac{V_T}{I_E}$

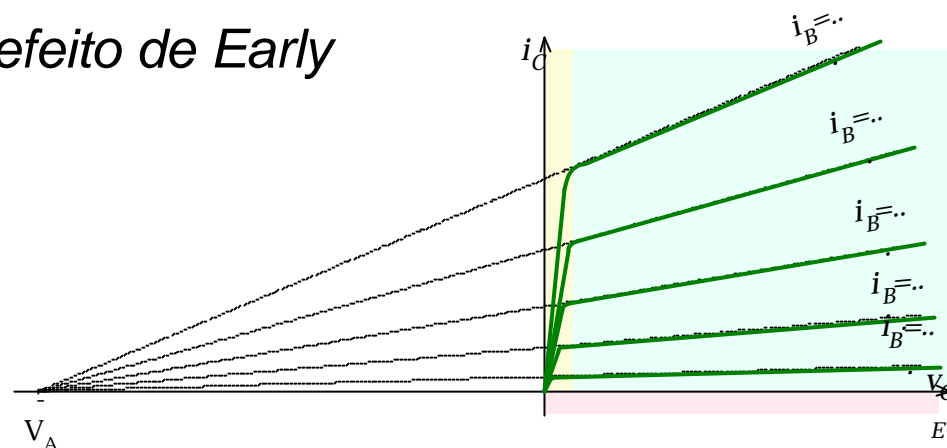
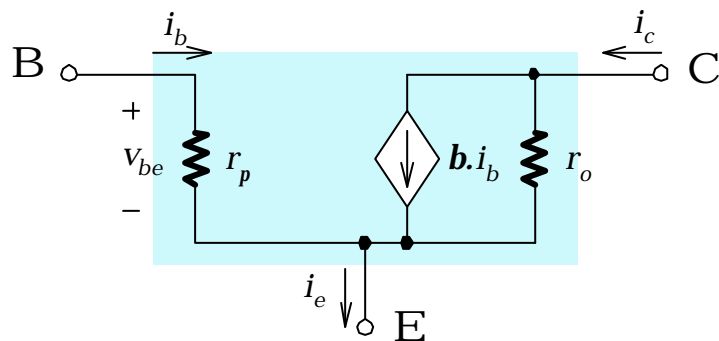
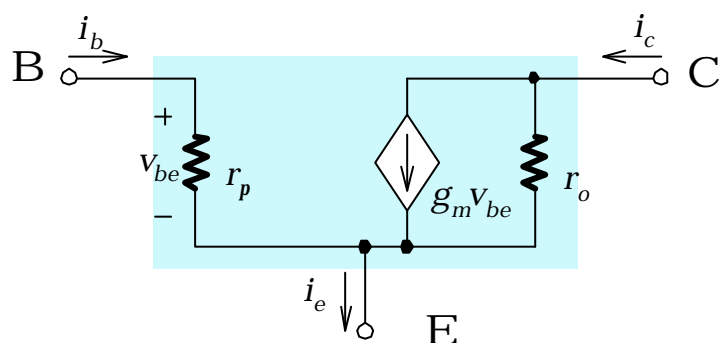


As figuras a) e b) representam duas versões ligeiramente diferentes do modelo em T simplificado do transistor de junção bipolar operando com sinais pequenos:

- Em a) o BJT é representado por uma fonte de corrente controlada por tensão [amplificador de transcondutância]
- Em b) o BJT é representado por uma fonte de corrente controlada por corrente [amplificador de corrente]
- Estes modelos explicitam a resistência de emissor r_e em vez da resistência de base r_p tal como aparecia nos modelos π -híbrido

O BJT como amplificador – modelos para sinais pequenos

- Modelo π -híbrido incluindo o efeito de Early



Fazendo incluir o efeito de Early nos modelos π -híbrido, ele traduz-se pela inclusão de uma resistência r_o , de valor aproximado V_A/I_C , entre o colector e o emissor.

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_C}$$

O BJT como amplificador – Parâmetros dos modelos para sinais pequenos

- Em termos das condições **DC**

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \frac{\beta V_T}{I_C} \quad r_e = \frac{V_T}{I_E} \quad r_o = \frac{V_A}{I_C}$$

- Em termos do parâmetro **g_m**

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m} \cong \frac{I}{g_m} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

- Em termos do parâmetro **r_e**

$$g_m = \frac{\alpha}{r_e} \cong \frac{I}{r_e} \quad r_\pi = (\beta + 1)r_e \quad g_m + \frac{I}{r_\pi} = \frac{I}{r_e}$$

- Relação entre os parâmetros **α** e **β**

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \beta + 1 = \frac{I}{1 - \alpha}$$

O BJT como amplificador – ganho de tensão

A tensão total instantânea no colector do transistor, v_{CE} , é:

$$\begin{aligned} v_{CE} &= V_{CC} - i_C R_C = V_{CC} - (I_C + i_c) R_C = \\ &= (V_{CC} - I_C R_C) - i_c R_C = \\ &= V_{CE} + v_{ce} \end{aligned}$$

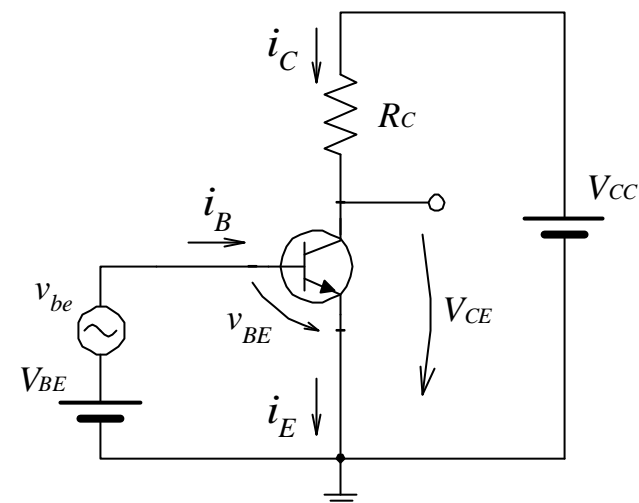
Donde se conclui $v_{ce} = -i_c R_C$

Como $i_c = g_m v_{be}$ tem-se:

$$v_{ce} = -g_m R_C v_{be}$$

$$\text{ou} \quad \frac{v_{ce}}{v_{be}} = -g_m R_C$$

Ganho de tensão $A_v = -g_m R_C$



Como $i_c = \beta i_b$ e $i_b = \frac{v_{be}}{r_\pi}$ tem-se:

$$v_{ce} = -\beta R_C i_b = \frac{-\beta R_C}{r_\pi} v_{be}$$

$$\text{ou} \quad \frac{v_{ce}}{v_{be}} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi}$$

Ganho de tensão $A_v = -\frac{\beta R_C}{r_\pi}$

O BJT como amplificador – análise de circuitos em *ac*

- Determinar o ponto de funcionamento em repouso do transistor e, em particular, o valor da corrente de colector, I_C . Esta análise é feita considerando apenas as fontes de tensão e corrente *dc* e substituindo os condensadores por circuitos em aberto.
- Calcular o valor dos parâmetros necessários para os modelos incrementais, para pequenos sinais:

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \quad r_\pi = \frac{V_T}{I_B}, \quad r_e = \frac{V_T}{I_E}, \quad \text{etc.}$$

- Representar o esquema incremental equivalente do circuito amplificador, substituindo as fontes de tensão *dc* independentes por curto-circuitos e as fontes de corrente *dc* independentes por circuitos em aberto.
- Substituir cada um dos condensadores de bloqueamento e contorno por um curto-circuito.
- Substituir o transistor por um dos modelos equivalentes para pequenos sinais. Utilizar-se-á o modelo que se entenda por mais conveniente para a análise da configuração em questão.
- Analisar o circuito resultante de acordo com as leis e regras da teoria dos circuitos, por forma a obter o ganho de tensão, o ganho de corrente, a resistência de entrada, etc..

O BJT como amplificador – exemplo

Pretende-se determinar o ganho de tensão do amplificador representado na figura; $\beta=100$.

- Determinemos em primeiro lugar o ponto de funcionamento em repouso, fazendo $v_i=0$.

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BEon}}{R_B} = \frac{3 - 0,7}{100k} = 0,023mA$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 100 \cdot 0,023m = 2,3mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 15 - 5k \cdot 2,3m = 3,5V$$

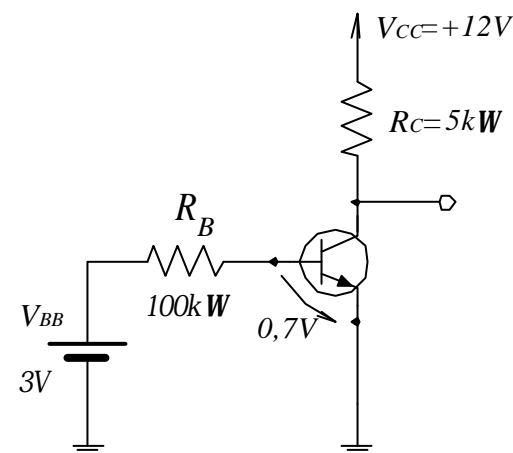
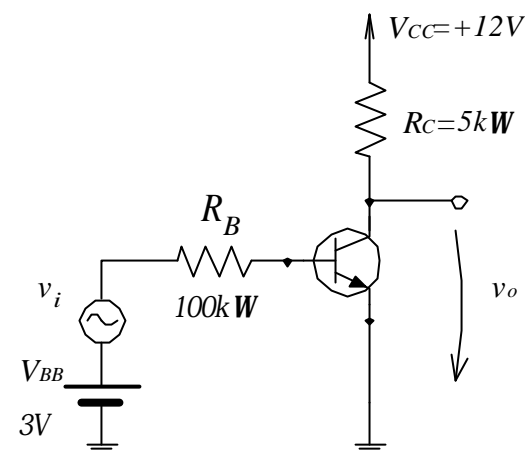
Transistor na ZAD: PFR(3,5V;2,3mA)

- Calculemos agora os parâmetros para os modelos para sinais pequenos

$$r_\pi = \frac{V_T}{I_B} = \frac{25m}{0,023m} = 1087\Omega$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{25m}{2,32m} = 10,8\Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{2,3m}{25m} = 92mA/V$$



Circuitos com Transístores Bipolares

O BJT como amplificador – exemplo (cont.)

- Utilizemos o modelo π -híbrido do transistor, utilizando o parâmetro β , mas sem r_o , e substituamos o circuito pelo seu equivalente incremental.

Da análise do circuito temos:

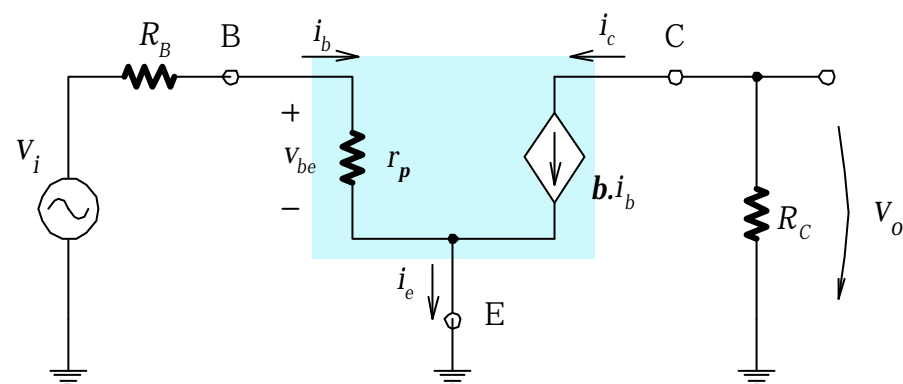
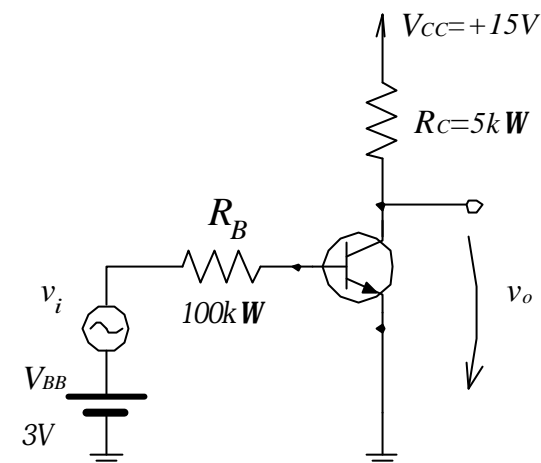
$$v_o = -R_C i_c = -R_C \beta i_b$$

$$i_b = \frac{v_i}{r_\pi + R_B} \Rightarrow v_o = -\beta R_C \frac{v_i}{r_\pi + R_B}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta R_C}{r_\pi + R_B}$$

$$A_v = -\frac{100 \times 5k}{1,087k + 100k} = -4,95$$

O sinal (–) no ganho de tensão representa a inversão de fase do sinal na saída em relação ao sinal na entrada



Circuito equivalente incremental

O BJT como amplificador – configurações base

Consideram-se três configurações base para circuitos amplificadores com o transistor de junção bipolar:

- Configuração em emissor comum
 - Emissor à massa em AC
 - Sinal de entrada entre a base e o emissor
 - Sinal de saída entre o colector e o emisor (massa)
- Configuração em colector comum
 - Colecotr à massa em AC
 - Sinal de entrada entre a base e o emissor
 - Sinal de saída entre o emissor e a massa
- Configuração em base comum
 - Base à massa em AC
 - Sinal de entrada entre o emissor e a base
 - Sinal de saída entre o colector e a base (massa)

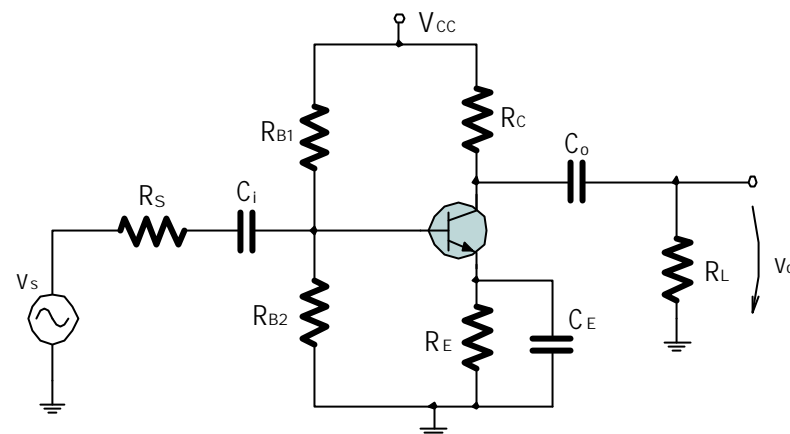
Circuitos com Transístores Bipolares

Amplificador em Emissor-Comum

C_i , C_o – condensadores de acoplamento (bloqueiam as componentes contínuas na entrada e na saída)

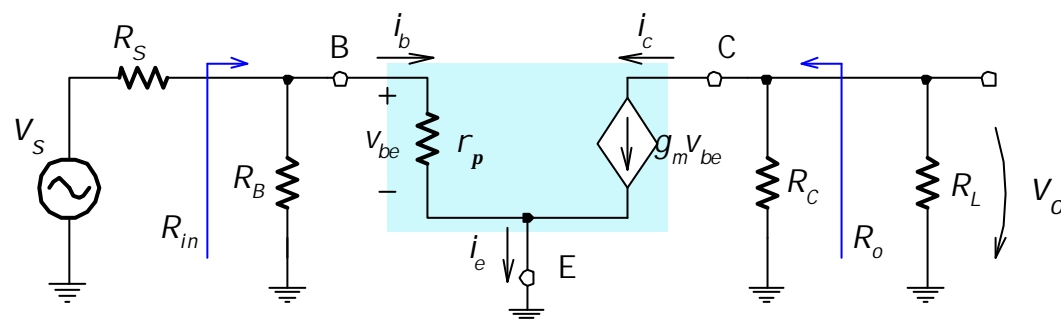
C_E – condensador de contorno (*bypass*)

A capacidade dos condensadores de acoplamento e de contorno é suficientemente elevada para que a sua reactância se possa considerar como um curto-circuito perante as restantes impedâncias do circuito para as frequências de interesse.



a) Configuração típica do amplificador monoestágio em Emissor – Comum com componentes discretos

O circuito equivalente para pequenos sinais obtém-se substituindo o BJT pelo seu modelo equivalente π -híbrido, eliminando as fontes de tensão *DC* e curtocircuitando os condensadores C_i , C_o e C_E .



b) Circuito equivalente para pequenos sinais do amplificador em Emissor – Comum do circuito a)

Amplificador em Emissor-Comum (cont.)

- Ganho de tensão (com g_m)

$$v_o = -g_m v_{be} R_C // R_L$$

$$v_{be} = \frac{r_\pi // R_B}{r_\pi // R_B + R_S} v_S$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -g_m R_C // R_L \cdot \frac{r_\pi // R_B}{r_\pi // R_B + R_S}$$

- Ganho de tensão (com β)

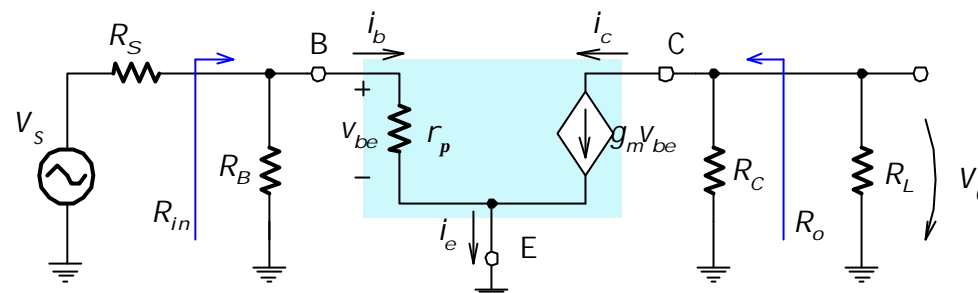
$$v_o = -\beta i_b R_C // R_L$$

$$i_b = \frac{1}{r_\pi} \cdot \frac{r_\pi // R_B}{r_\pi // R_B + R_S} v_S$$

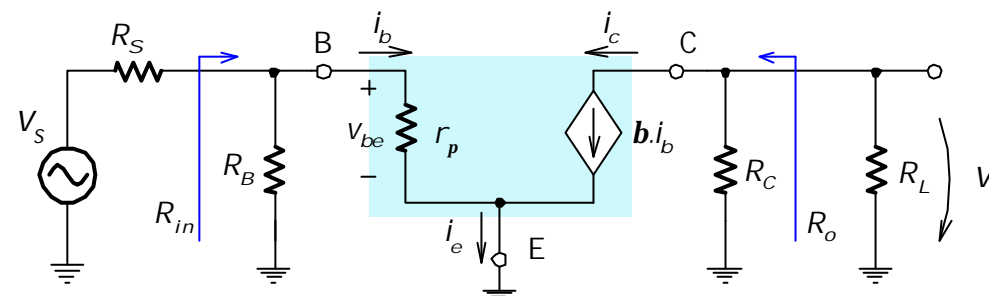
$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta R_C // R_L}{r_\pi} \cdot \frac{r_\pi // R_B}{r_\pi // R_B + R_S}$$

- Resistência de entrada

$$R_i = r_\pi // R_B = r_\pi // R_{B1} // R_{B2}$$



a) Circuito equivalente incremental – modelo π -híbrido com g_m , desprezando r_o face a R_C e R_L



b) Circuito equivalente incremental – modelo π -híbrido com β , desprezando r_o face a R_C e R_L

- Resistência de saída

$$R_o = R_C \quad \text{ou} \quad R_o = r_o // R_C$$

Circuitos com Transístores Bipolares

Amplificador em Emissor-Comum (cont.)

- Ganho de tensão quando se substitui a malha constituída por v_s , R_s e R_B pelo seu equivalente de Thévenin

$$R_{th} = R_B // R_s \quad \wedge \quad v_{th} = \frac{R_B}{R_B + R_s} \cdot v_s$$

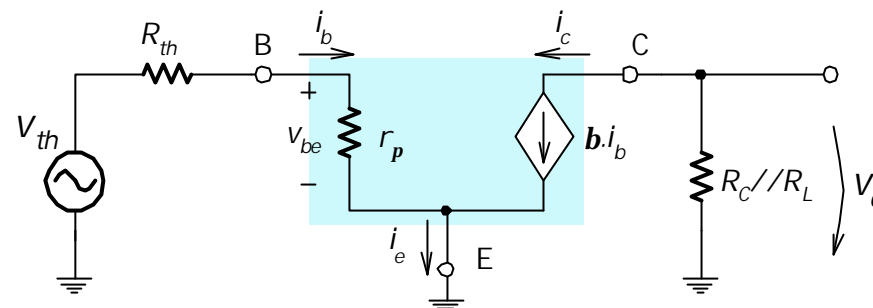
$$v_o = -\beta i_b R_C // R_L \quad \wedge \quad i_b = \frac{v_{th}}{r_\pi + R_{th}}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta R_C // R_L}{r_\pi + R_{th}} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_s}$$

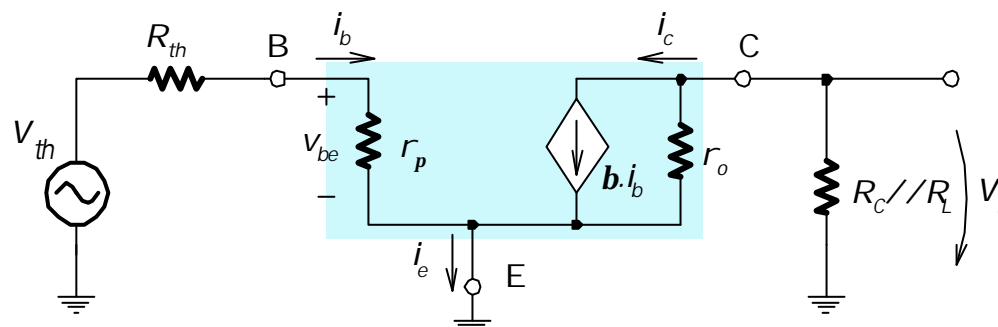
- Ganho de tensão quando se considera o efeito de Early (r_o)

$$v_o = -\beta i_b (r_o // R_C // R_L) \quad \wedge \quad i_b = \frac{v_{th}}{r_\pi + R_{th}}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta (r_o // R_C // R_L)}{r_\pi + R_{th}} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_s}$$



a) Circuito equivalente para pequenos sinais substituindo a malha constituída por v_s , R_s e R_B pelo seu equivalente de Thévenin



a) Circuito equivalente para pequenos sinais quando se considera o modelo π -híbrido com o parâmetro r_o .

Circuitos com Transístores Bipolares

Amplificador em colector comum (ou seguidor de emissor)

- Ganho de tensão

$$v_o = i_e (R_E // R_L) = (\beta + 1) i_b (R_E // R_L)$$

$$i_b = \frac{v_b}{r_\pi + (\beta + 1)(R_E // R_L)}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = \frac{(\beta + 1)(R_E // R_L)}{r_\pi + (\beta + 1)(R_E // R_L)}$$

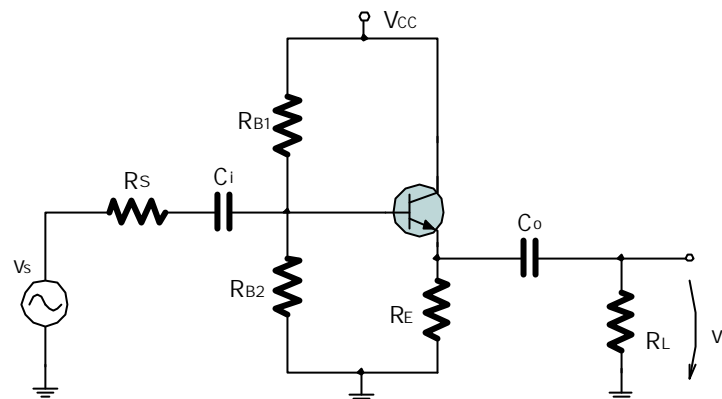
$$\text{Se } r_\pi \ll (\beta + 1)(R_E // R_L)$$

$$\text{então } A_v = \frac{v_o}{v_s} \cong 1$$

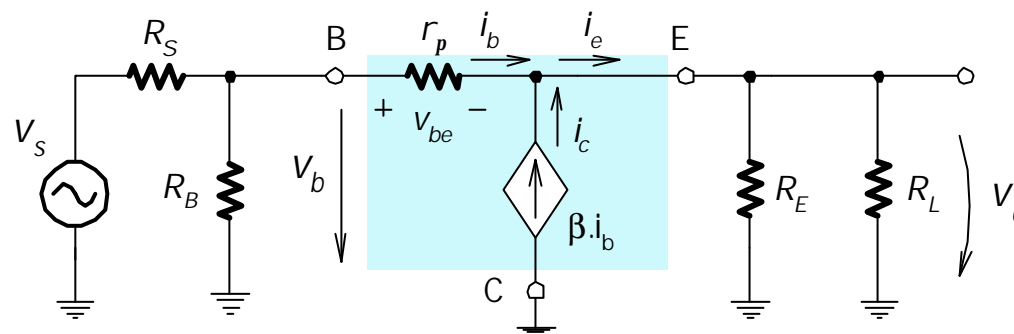
E daqui o nome de seguidor de emissor

- Resistência de entrada

$$R_i = r_\pi + (\beta + 1)(R_E // R_L)$$



a) Configuração típica do amplificador em Colector-Comum ou Seguidor de Emissor com componentes discretos



b) Circuito equivalente para pequenos sinais do amplificador em Colector-Comum do circuito a)

Circuitos com Transístores Bipolares

Amplificador em Emissor-Comum degenerado

- Ganho de tensão

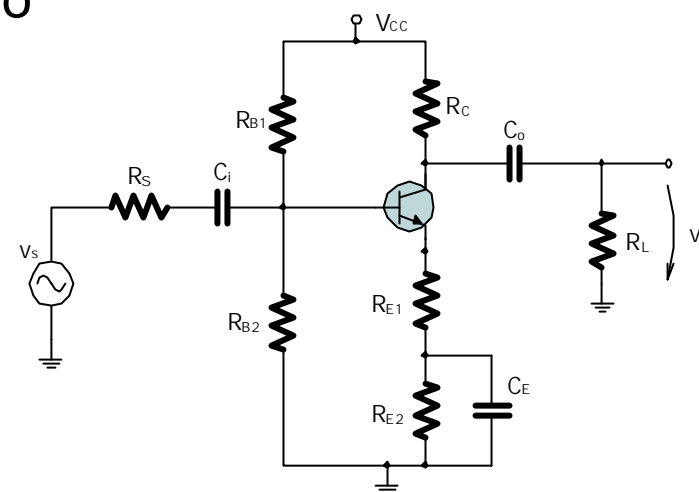
$$v_o = -\beta i_b R_C // R_L \quad \wedge \quad i_b = \frac{v_{th}}{R_{th} + r_\pi + (\beta + 1)R_{E1}}$$

$$v_o = -\beta R_C // R_L \cdot \frac{v_{th}}{R_{th} + r_\pi + (\beta + 1)R_{E1}}$$

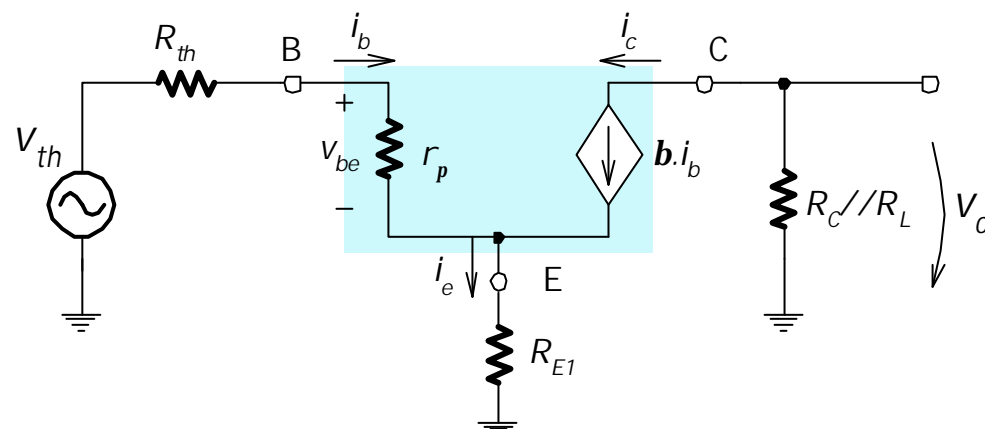
$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{\beta R_C // R_L}{R_{th} + r_\pi + (\beta + 1)R_{E1}} \cdot \frac{R_B}{R_B + R_S}$$

- Resistência de entrada

$$R_i = (r_\pi + (\beta + 1)R_{E1}) // R_B$$



a) Amplificador em Emissor-Comum degenerado



b) Circuito equivalente para pequenos sinais do amplificador em Emissor-Comum degenerado do circuito a)

Circuito duplicador de tensão

