



Aulas 24-25

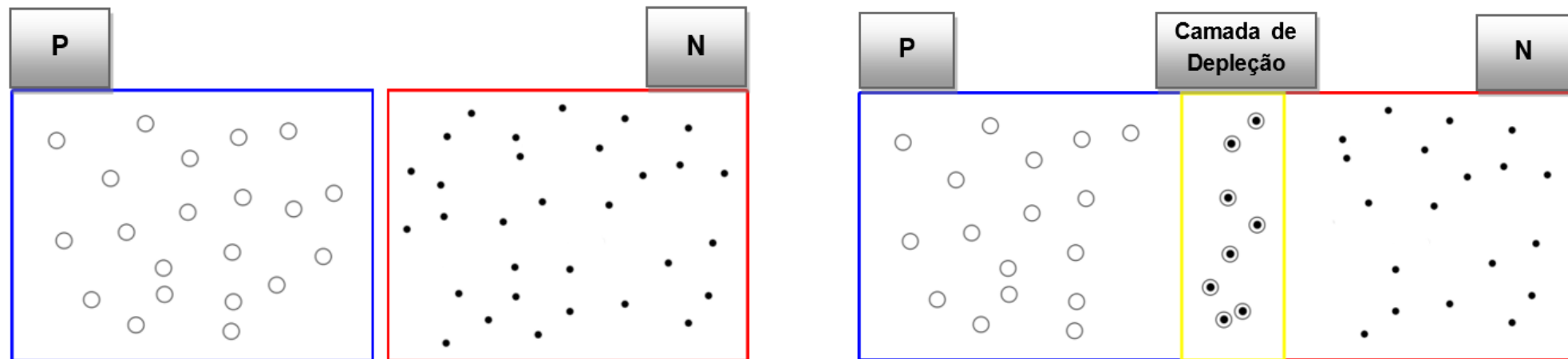
Revisão/Aplicações Diodos e Transistores 2

Circuitos Elétricos II

Prof. Henrique Amorim - UNIFESP - ICT

Revisão - Junção PN

Ao acoplar semicondutores extrínsecos do tipo P e do tipo N, criamos a junção PN, atribuída aos diodos. Imediatamente a esta "união" é formada uma camada de depleção. Os elétrons livres da região do semicondutor do tipo N que está em contato com a região do semicondutor do tipo P são atraídos pelas "lacunas elétricas" do semicondutor do tipo P, entretanto esse equilíbrio é observado apenas na porção próxima a junção.

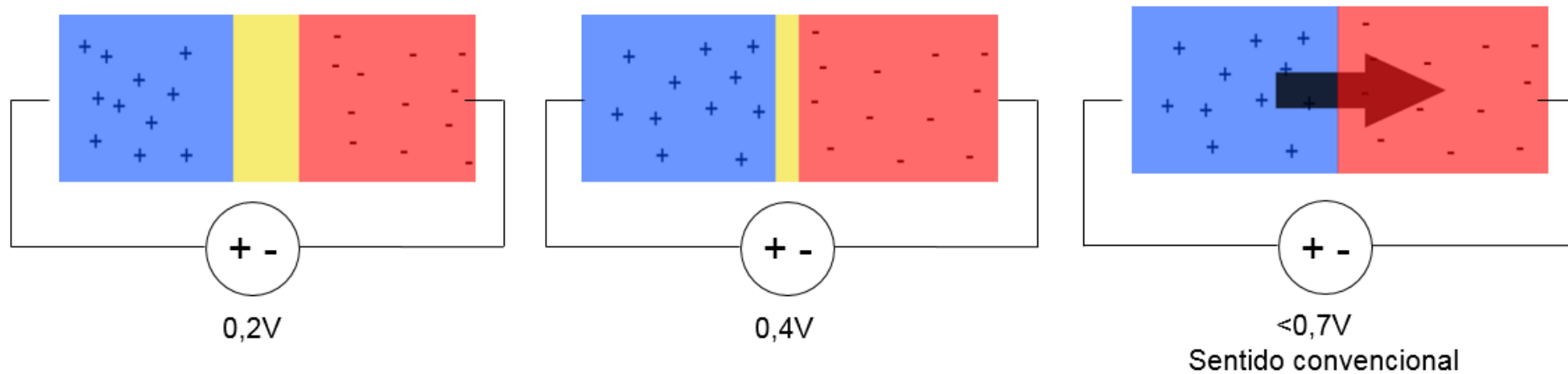


Podemos observar o comportamento característico da Junção PN através da **polarização reversa** e da **polarização direta**.

Revisão - Polarização da Junção PN

Polarização reversa

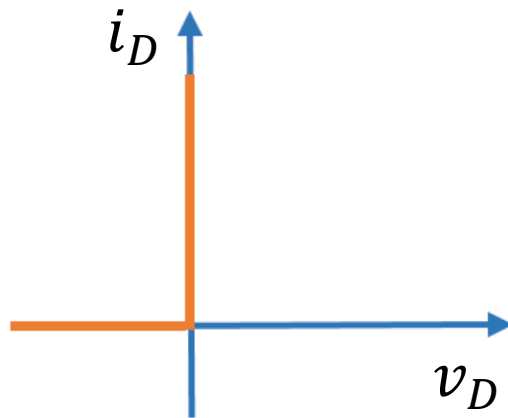
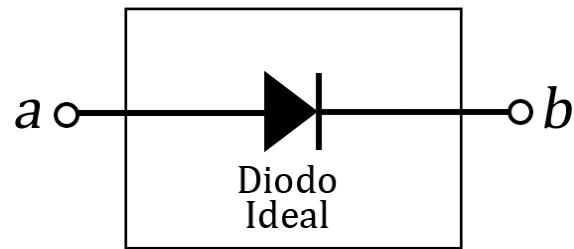
Se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna da junção (varia de acordo com o semicondutor), os portadores livres se repelirão a barreira depleção, em função da polaridade da fonte geradora, e ultrapassar a junção P-N, permitindo a passagem de corrente elétrica.



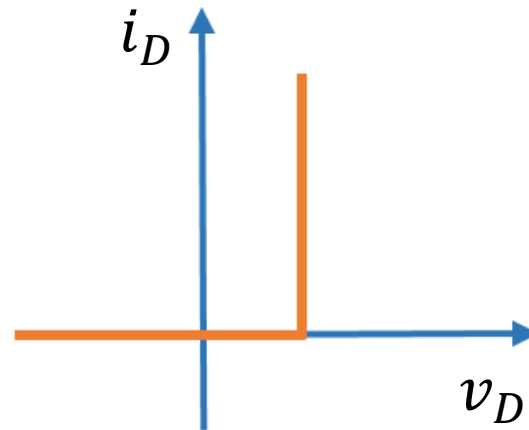
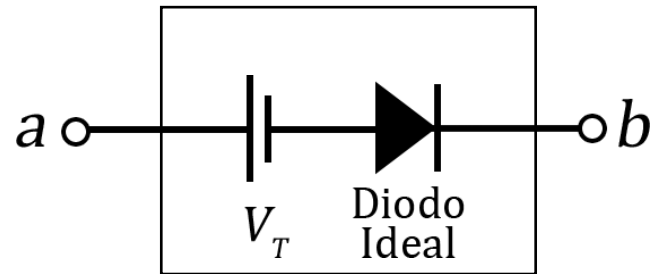
O exemplo acima ilustra didaticamente o comportamento de um semicondutor de Si. A passagem de cargas não ocorre de forma abrupta quando a tensão ultrapassa 0.7V, entretanto a passagem de cargas sobe exponencialmente a partir da tensão de aproximadamente 0.7V. A análise da resposta do diodo irá detalhar o comportamento.

Revisão - Aproximações

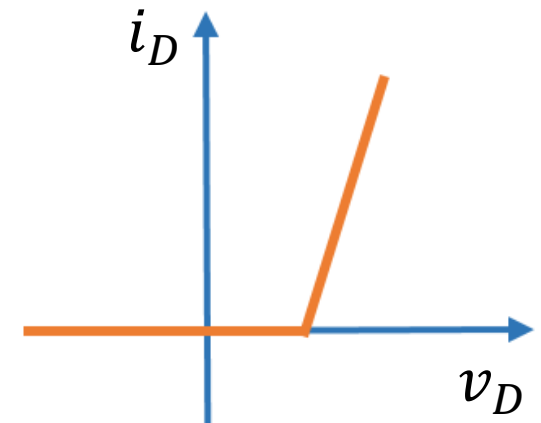
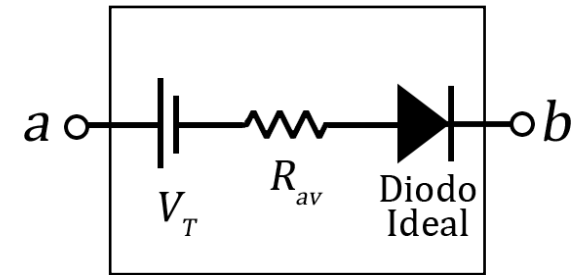
Modelo de diodo ideal:



Modelo de diodo simplificado:



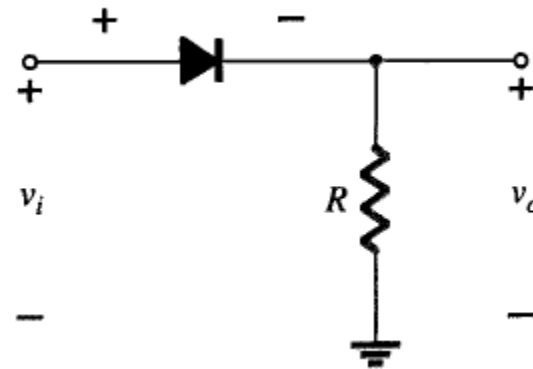
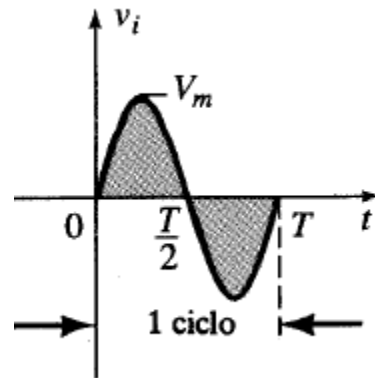
Modelo de diodo linear:



Aplicação 1 - Retificador de meia onda

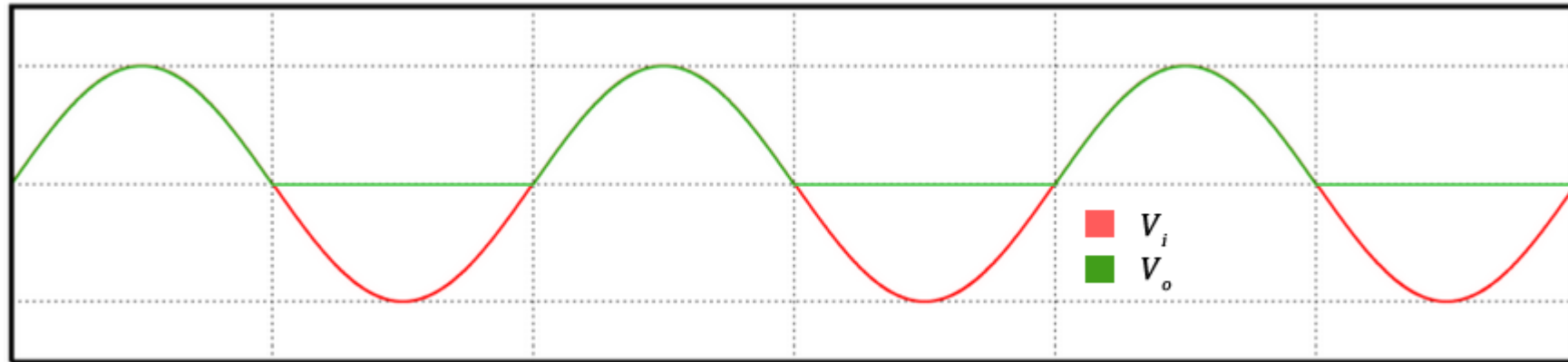
- Circuitos retificadores são projetados para inibirem as alternâncias na direção do fluxo de correntes.
- Quando o diodo é empregado no processo de retificação ele é denominado diodo retificador

Considere o regime permanente senoidal:

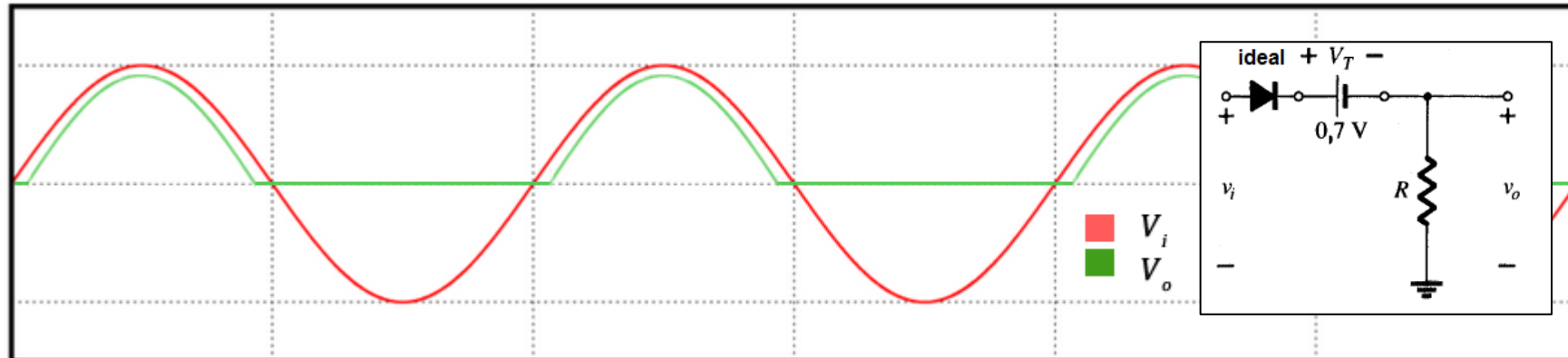


Aplicação 1 - Retificador de meia onda

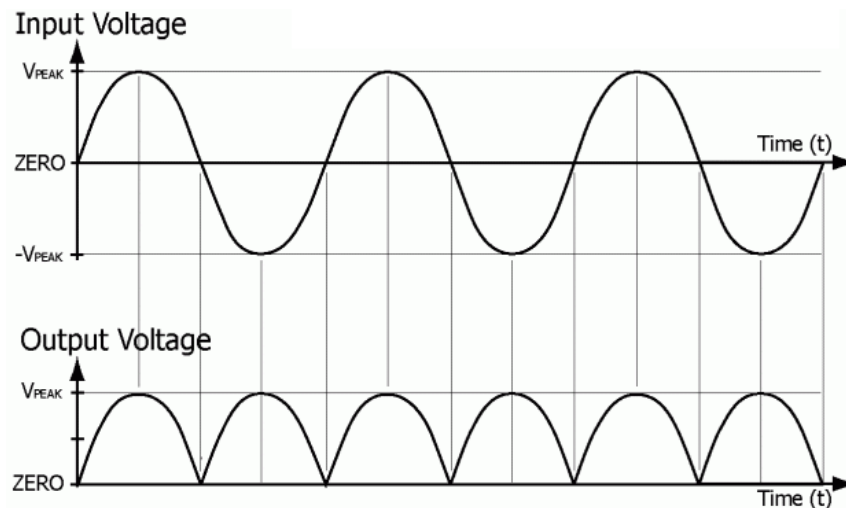
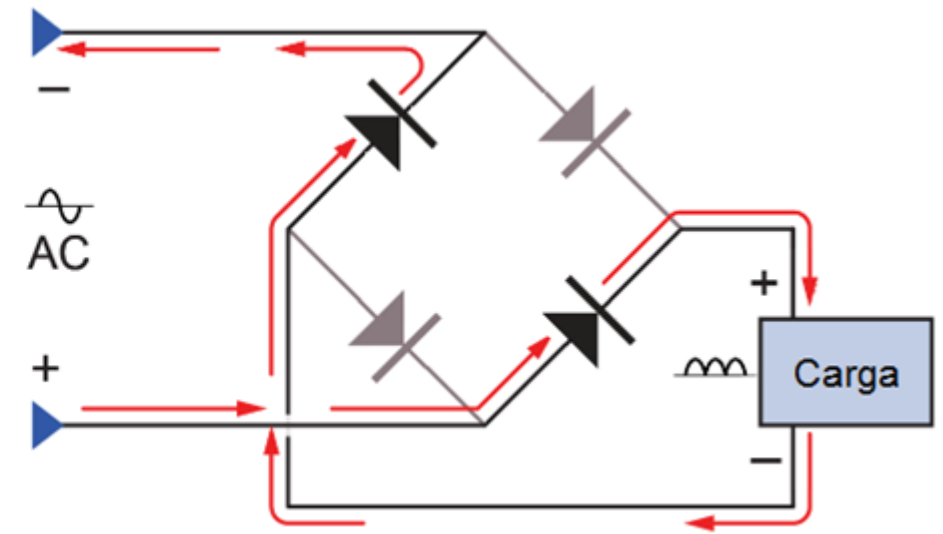
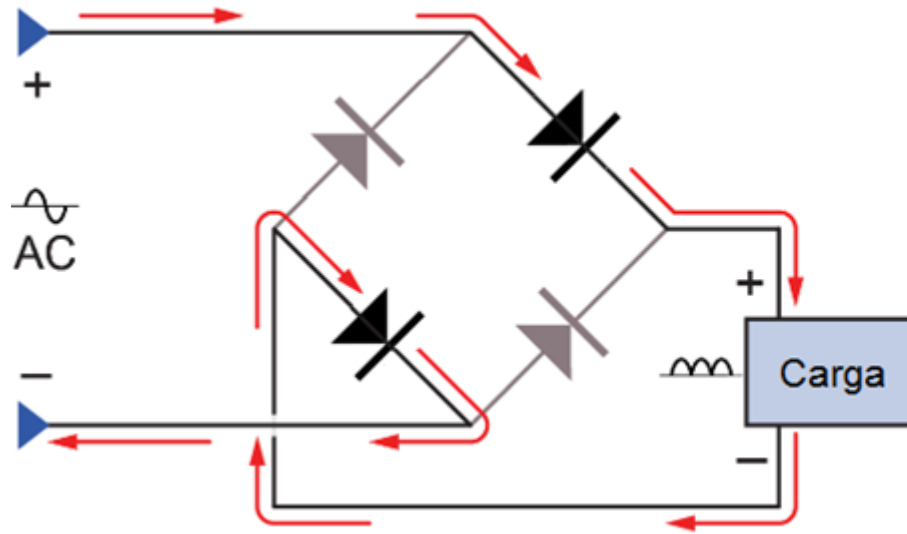
Resposta para o diodo ideal



Resposta para o diodo simplificado ($V_T = 0,7V$ para *Si* e $V_T = 0,3$ para *Ge*)

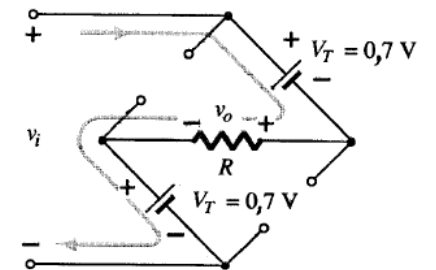


Aplicação 2 - Retificador de onda completa

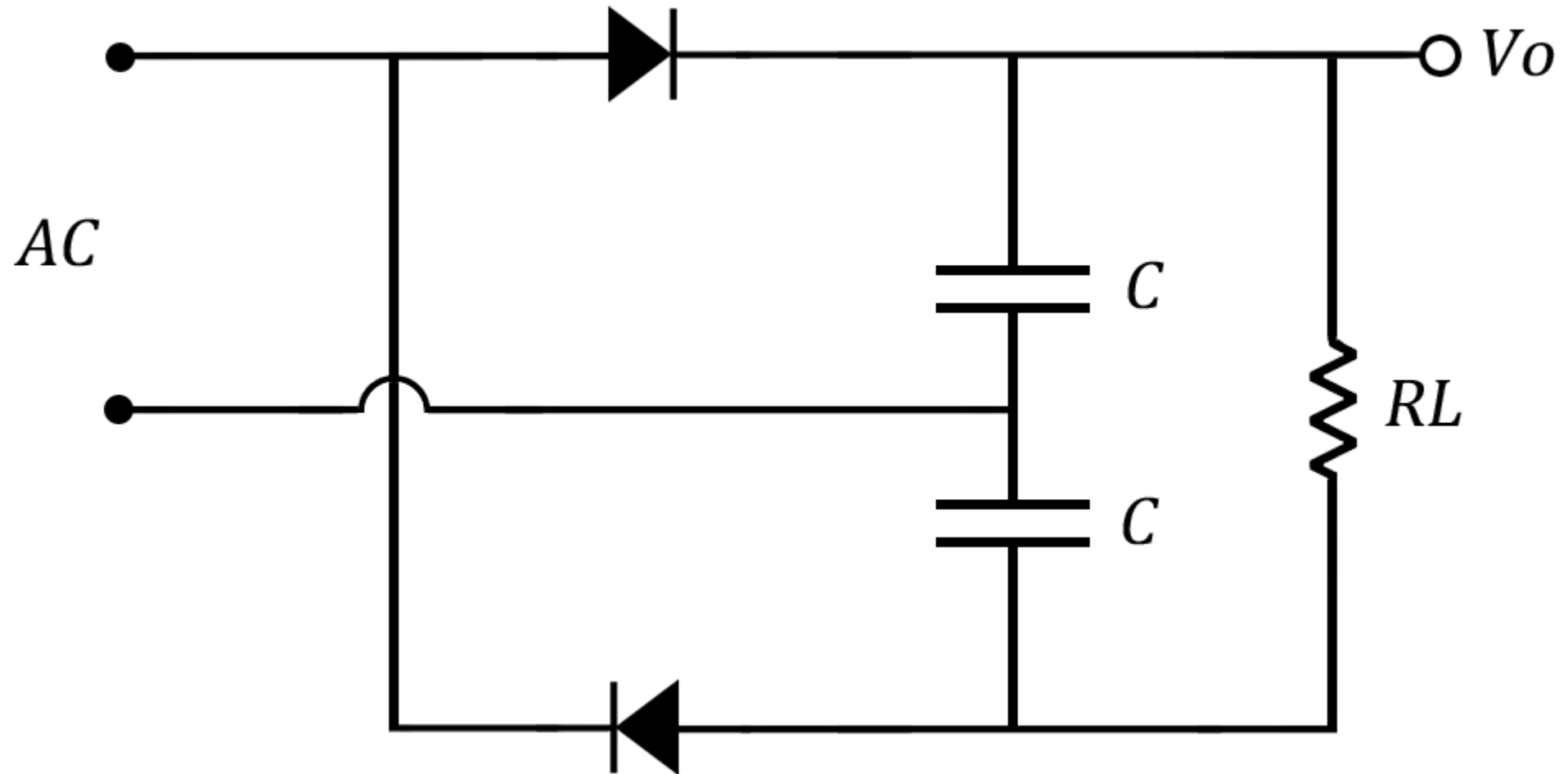


Considerando que a ponte retificador é composta por diodos de Si, o pico da saída será:

$$V_{out} = \frac{V_{ppi}}{2} - 0,7 \cdot 2$$

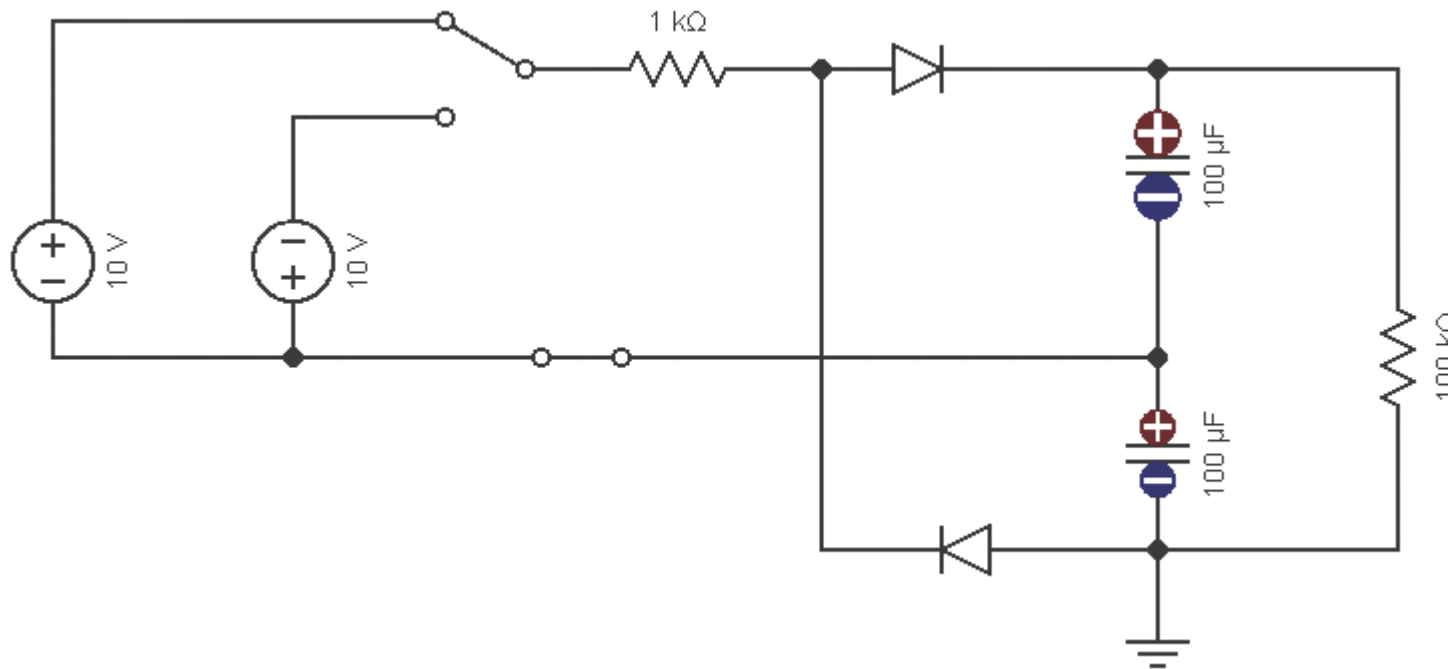


Qual a aplicação do circuito abaixo?



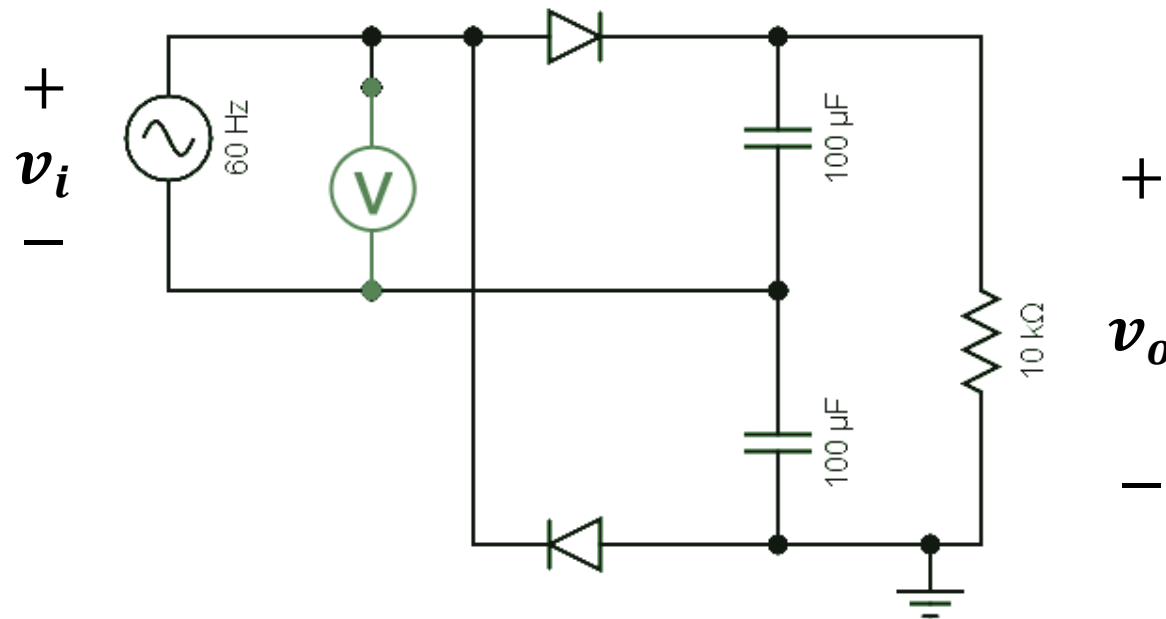
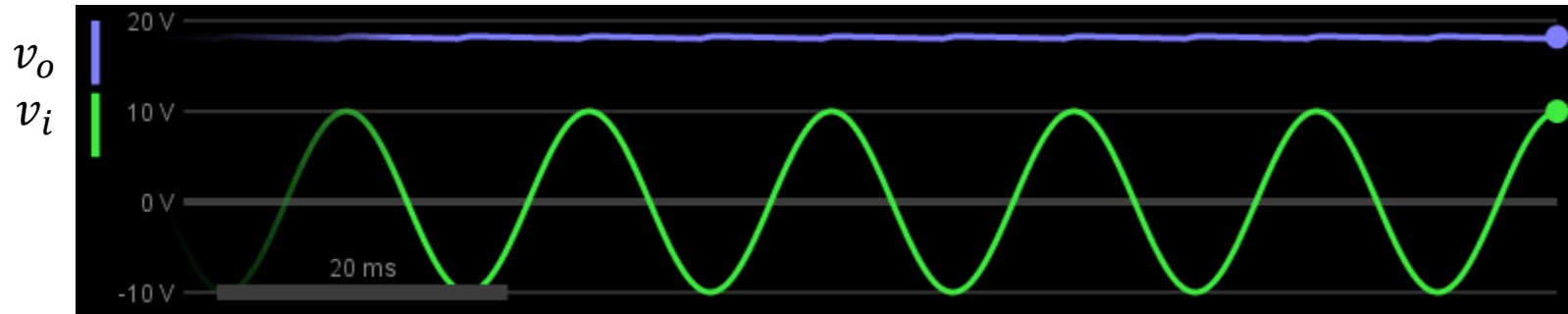
Considerando o chaveamento intermitente, analise o circuito abaixo:

- 1) Na primeira análise considere que os diodos são curto circuitos
- 2) Na segunda análise considere que os diodos



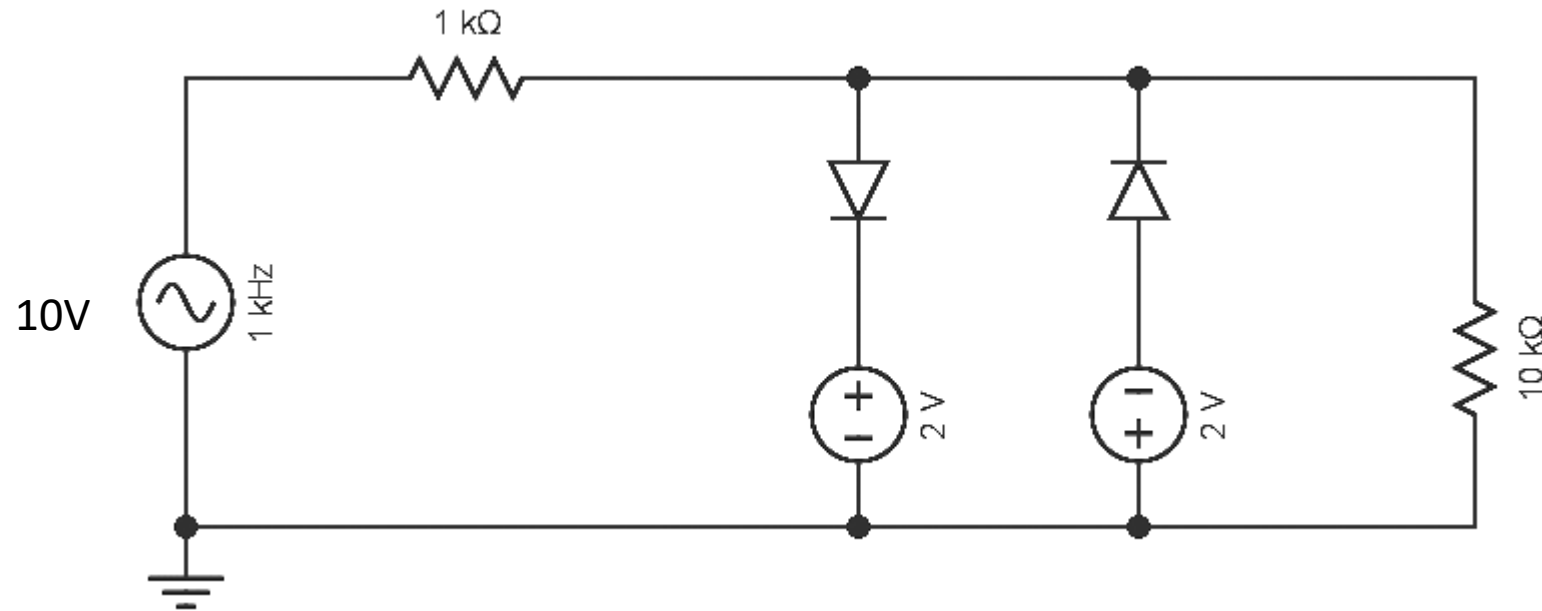
<http://everycircuit.com/circuit/6406089455435776>

Aplicações – Dobrador de tensão



Aplicações - Grampeador

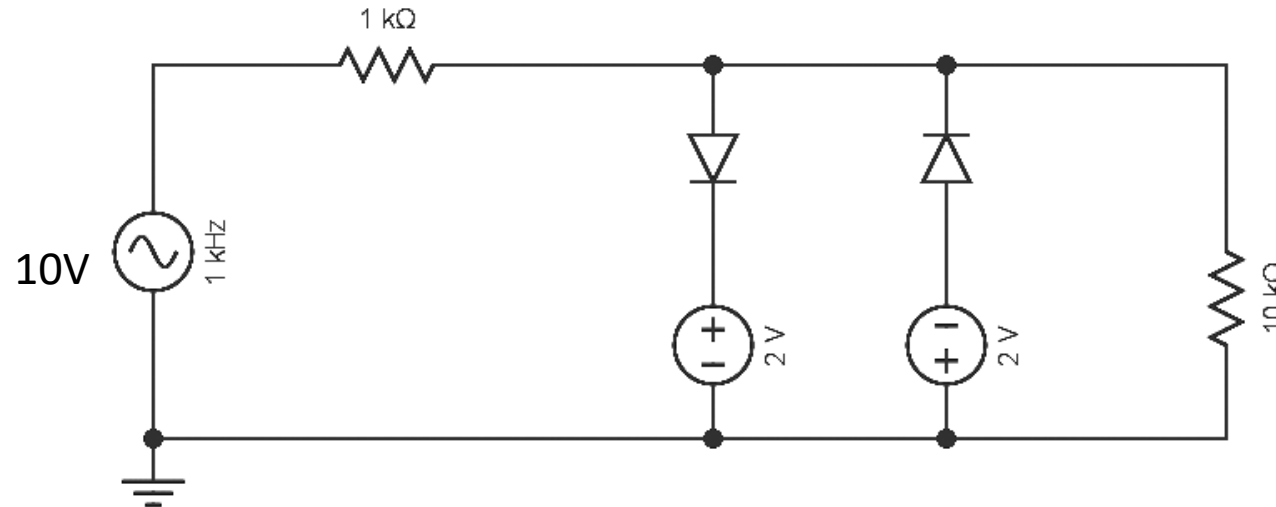
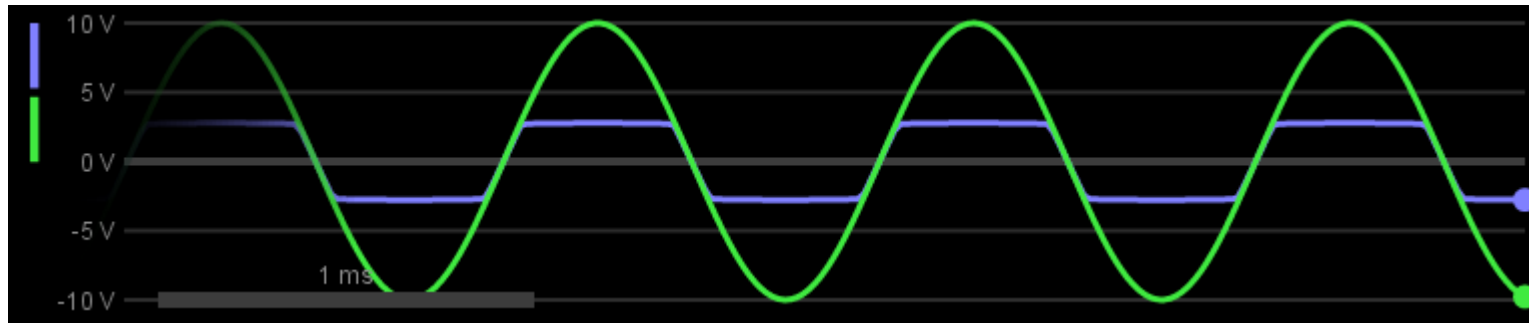
Exercício: Desenhe um gráfico relacionando a tensão de entrada com a tensão do resistor de 10K



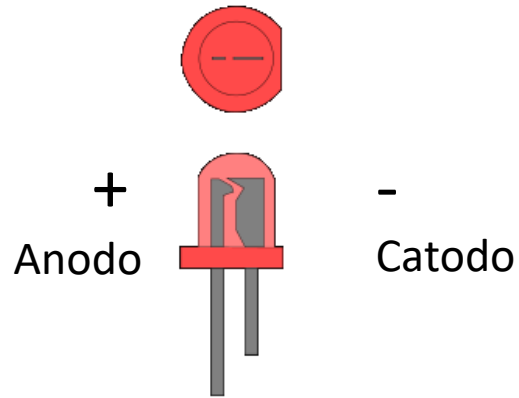
<http://everycircuit.com/circuit/6075032621285376>

Aplicações - Grampeador

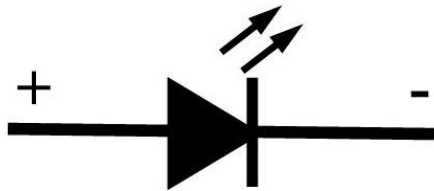
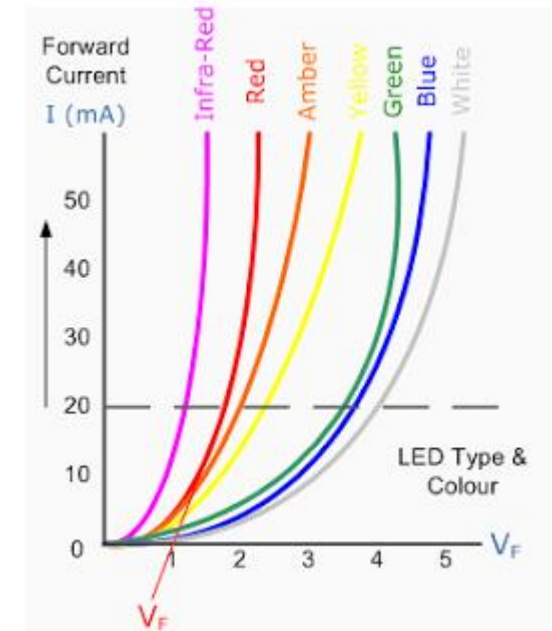
Exercício: Desenhe um gráfico relacionando a tensão de entrada com a tensão do resistor de 10K



Light emitter diode - LED

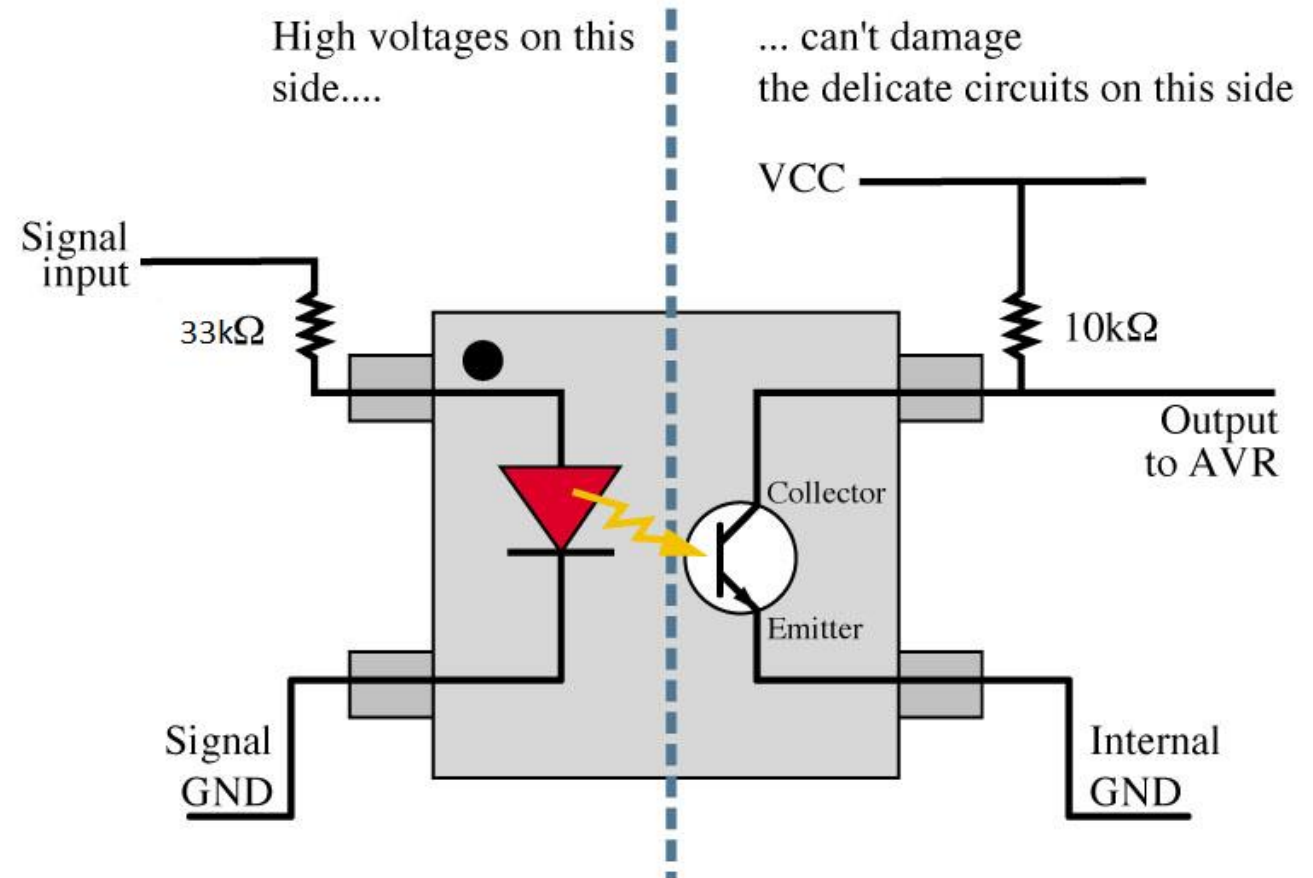


Color	Material	Longitud de Onda	V_F a 20mA
Rosa	GaAs	850-940nm	1,2
Rojo	GaAsP	630-660nm	1,8
Naranja	GaAsP	605-620nm	2
Amarillo	GaAsP:N	585-595nm	2,2
Verde	AlGaP	550-570nm	3,5
Azul	SiC	430-505nm	3,6
Blanco	GaInN	450nm	4



Optoacoplador

Led utilizado como optoacoplador
Circuito para isolamento



Diodes Zener

Os valores de potência dos diodos zeners mais comuns variam entre: ¼ W a 50W. E suas respectivas tensões (V_Z) entre 3,3V a 75V.

V_Z : tensão zener nominal (depende do componente)

$I_{Z_{max}}$: corrente máxima

$I_{Z_{min}}$: corrente mínima

$P_{Z_{max}}$: potência máxima nominal

Modelo ideal:

$$P_{Z_{max}} = V_Z \cdot I_{Z_{max}}$$

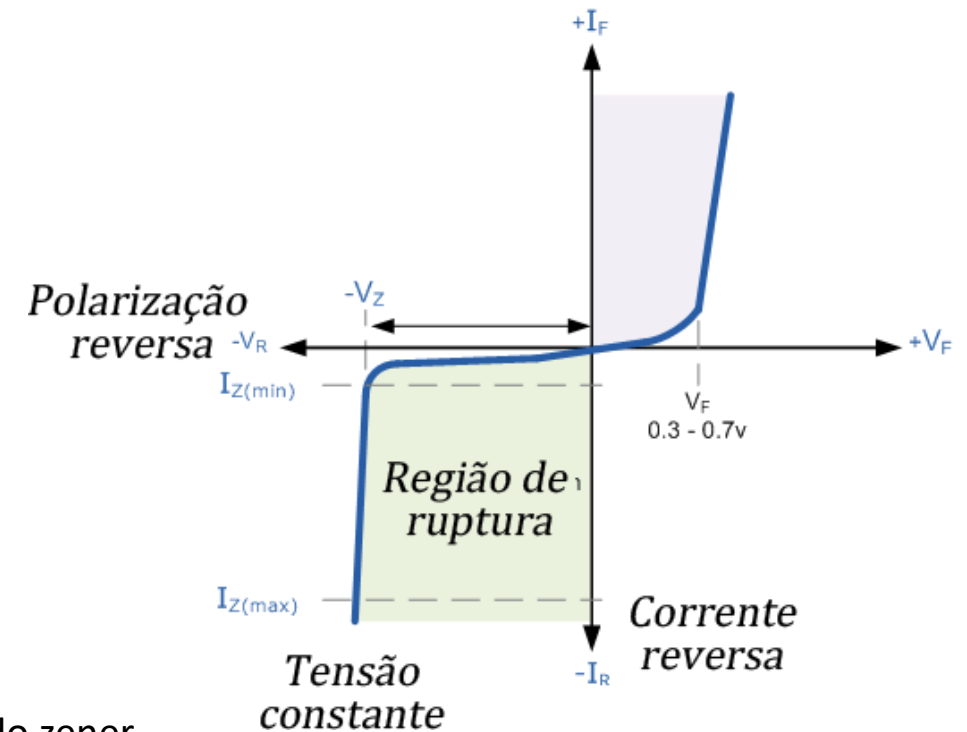
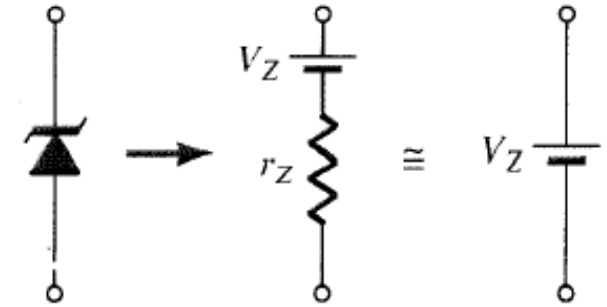
$$I_{Z_{min}} = 0$$

Modelo aproximado:

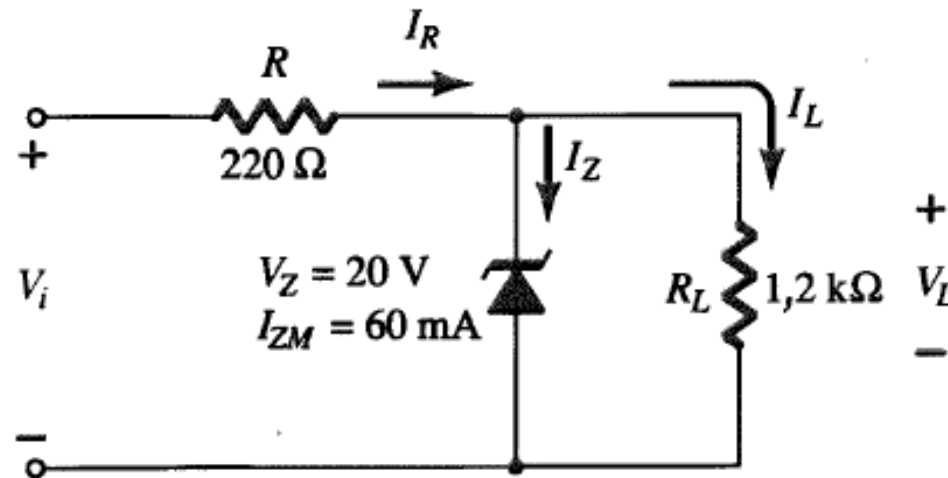
$$P_{Z_{max}} = V_Z \cdot I_{Z_{max}}$$

$$I_{Z_{min}} = \frac{I_{Z_{max}}}{10}$$

* A aproximação pode variar de acordo com o modelo do diodo zener



Exercício 3: Calcule a faixa de V_i para o diodo zener trabalhar na área de regulação. Utilize a aproximação de 10%.



Exercício 3: Calcule a faixa de V_i para o diodo zener trabalhar na área de regulação. Utilize a aproximação de 10%.

$$P_{Zmax} = V_Z \cdot I_{Zmax} = 20 \cdot 0,06 = 1,2W$$

$$I_{Zmin} = 6mA$$

$$I_L = \frac{20}{1200} = 16,67mA$$

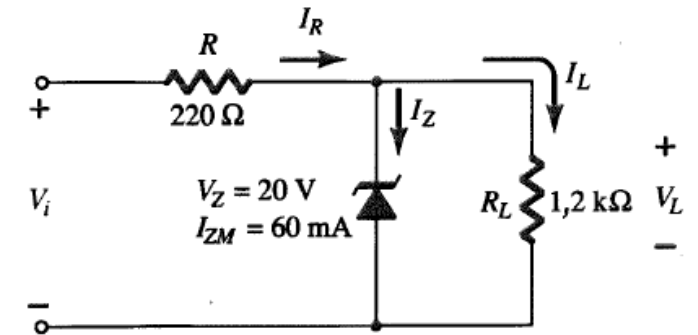
$$I_{Zmax} = 60mA$$

$$I_R = I_{Zmin} + I_L \quad \therefore \quad I_R = 6 \cdot 10^{-3} + 16,67 \cdot 10^{-3} = 22,67mA$$

$$I_R = I_{Zmax} + I_L \quad \therefore \quad I_R = 60 \cdot 10^{-3} + 16,67 \cdot 10^{-3} = 76,67mA$$

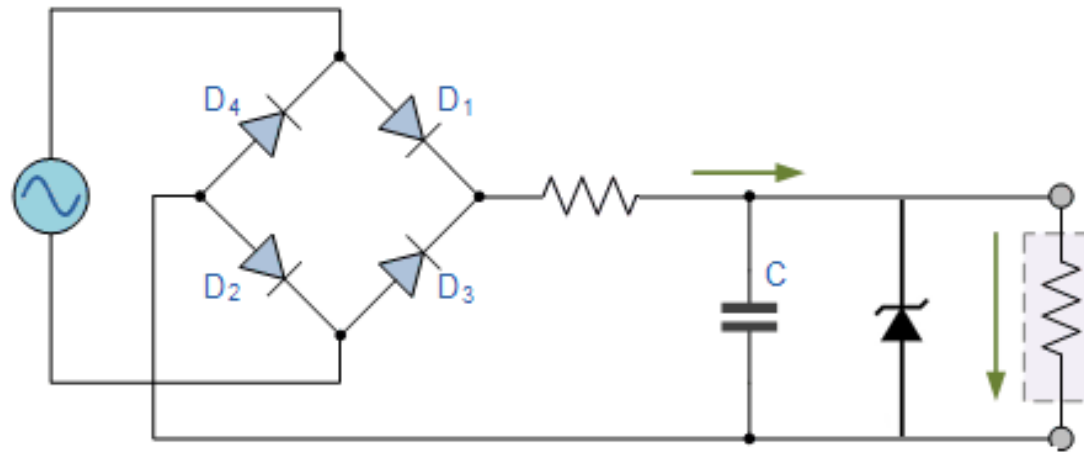
$$V_{imin} = 220 \cdot 22,67 \cdot 10^{-3} + 20 = 25V$$

$$V_{imax} = 220 \cdot 76,67 \cdot 10^{-3} + 20 = 36,87V$$



O diodo zener pode ser incorporado circuito retificador de onda completa, minimizando o efeito *Ripple* do capacitor.

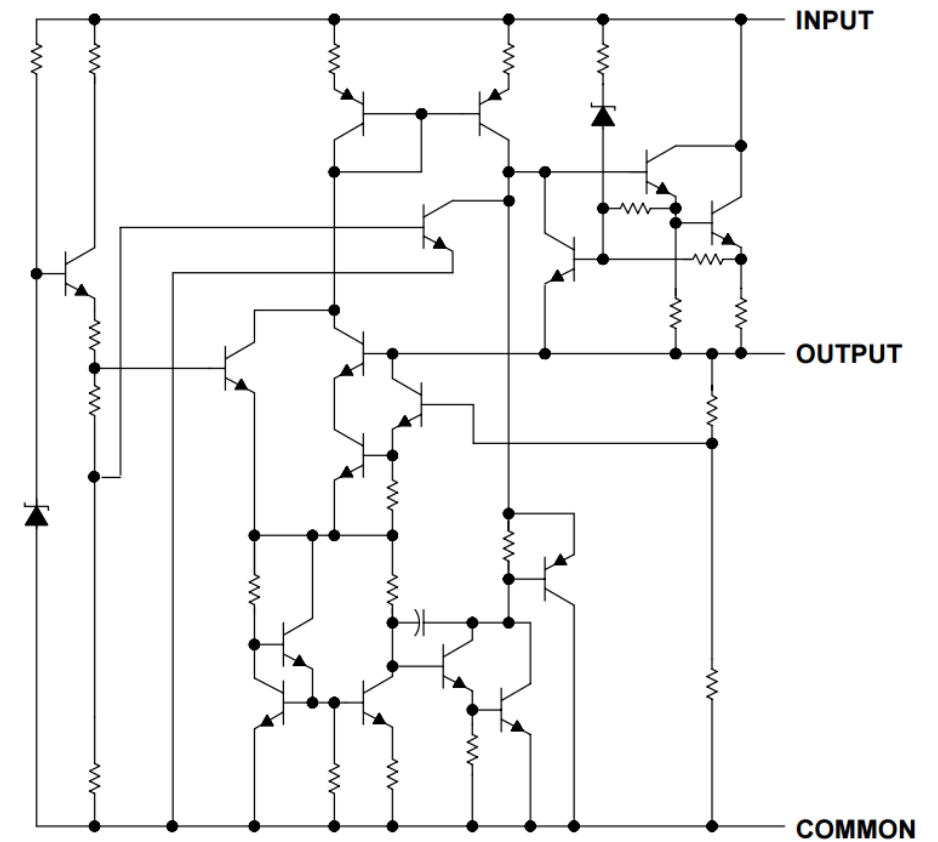
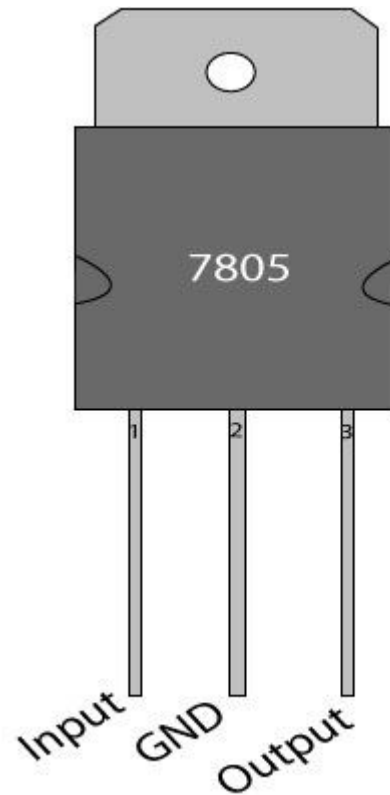
Abaixo um retificador de onda completa com filtro capacitivo e regulador de tensão zener



Reguladores 78XX

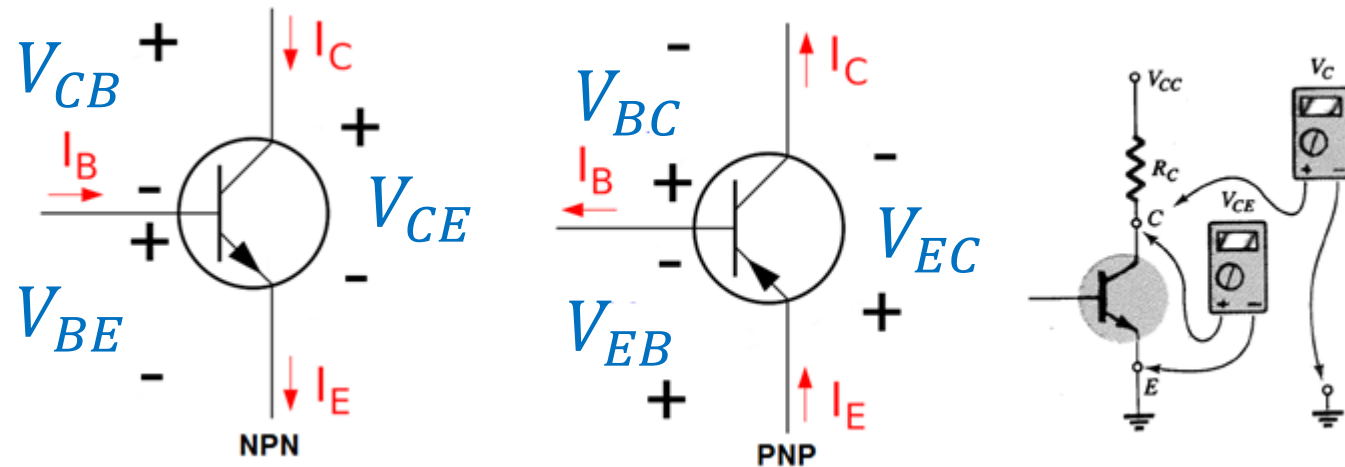
7805 (5 V)
7806 (6 V)
7808 (8 V)
7809 (9 V)
7810 (10 V)
7812 (12 V)
7815 (15 V)
7818 (18 V)
7824 (24 V)

7905 (-5V)
7912(-12V)



Transistores de Junção Bipolar

Relações de tensões:



$$NPN \rightarrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} \quad P = V_{CE} \times i_e$$

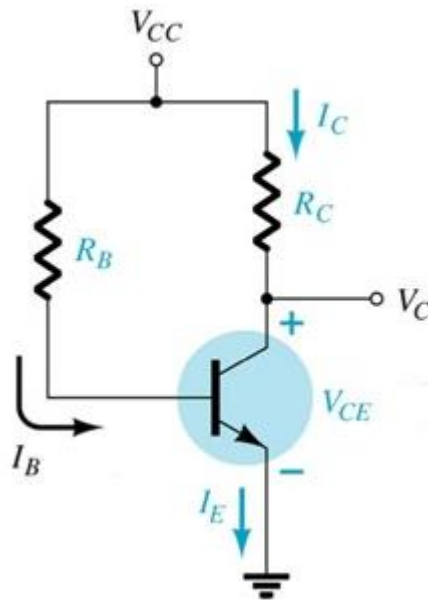
$$PNP \rightarrow V_{EC} = V_{CB} + V_{EB} \quad P = V_{EC} \times i_e$$

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

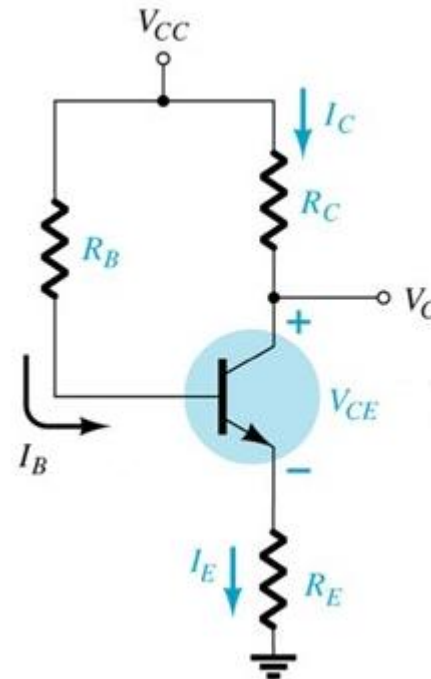
Tipos de polarização

Polarizações de emissor-comum que iremos analisar

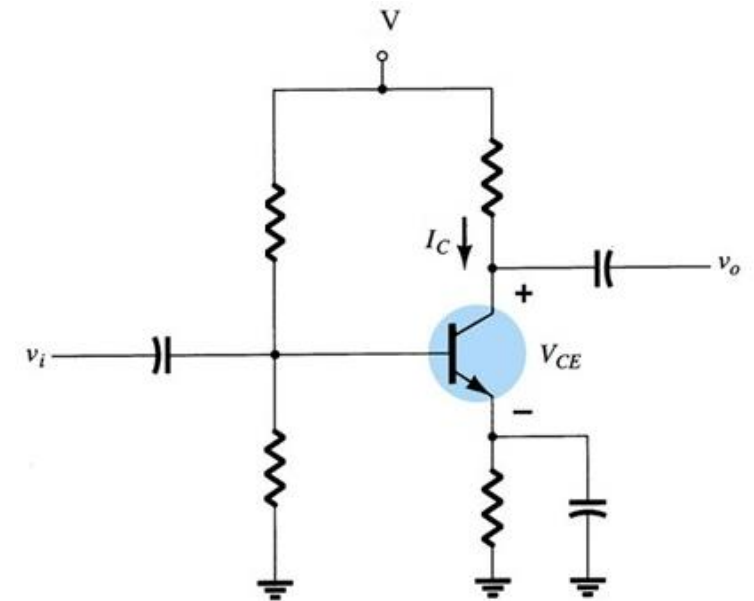
Polarização fixa



Polarização estável

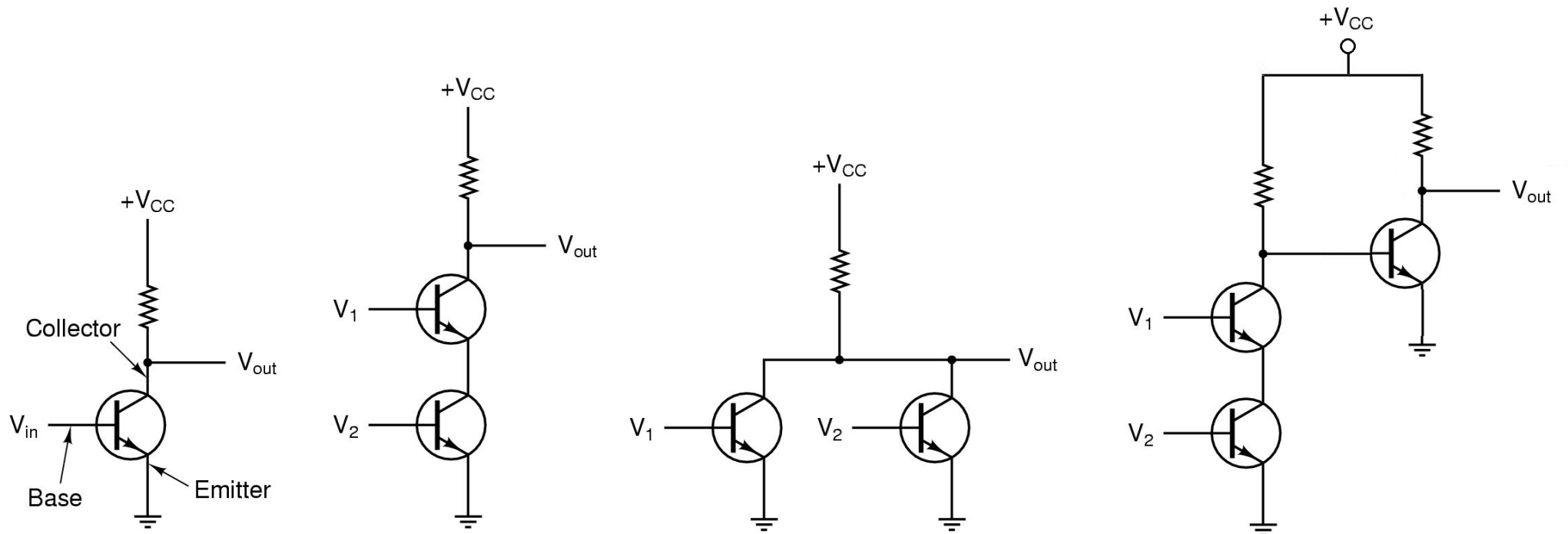


Polarização por divisor de tensão

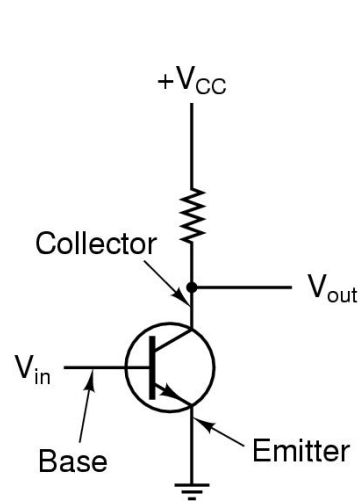


Transistores corte/saturação

Considerando que os transistores estão trabalhando na zona de corte ou na zona de saturação, explique cada um dos circuitos abaixo

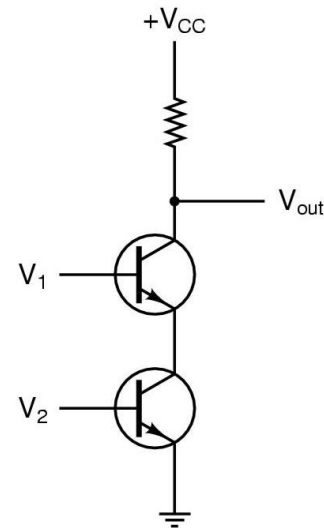


Transistores corte/saturação



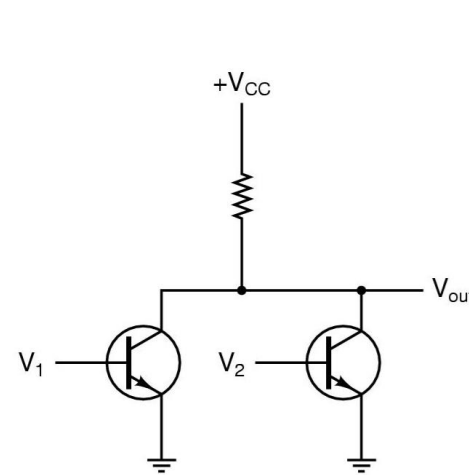
NOT

V_{in}	V_{out}
0	1
1	0



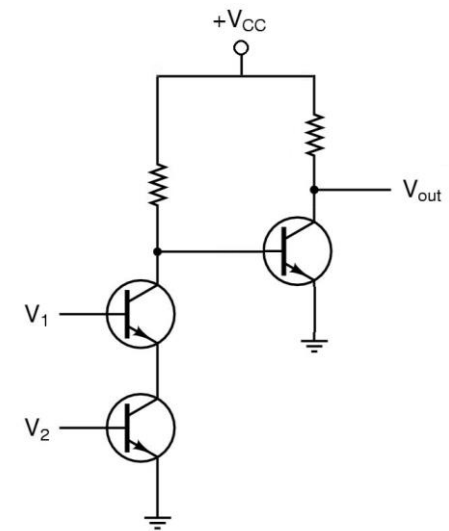
NAND

V_1	V_2	V_{out}
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0



NOR

V_1	V_2	V_{out}
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0



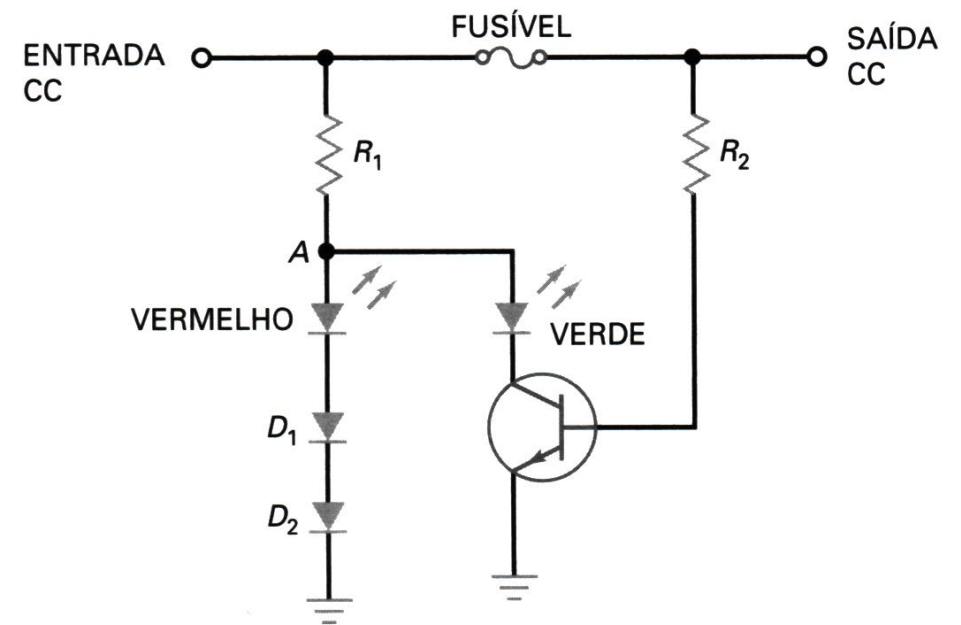
AND

V_1	V_2	V_{out}
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Transistores corte/saturação

Analise a funcionalidade do circuito ao lado.

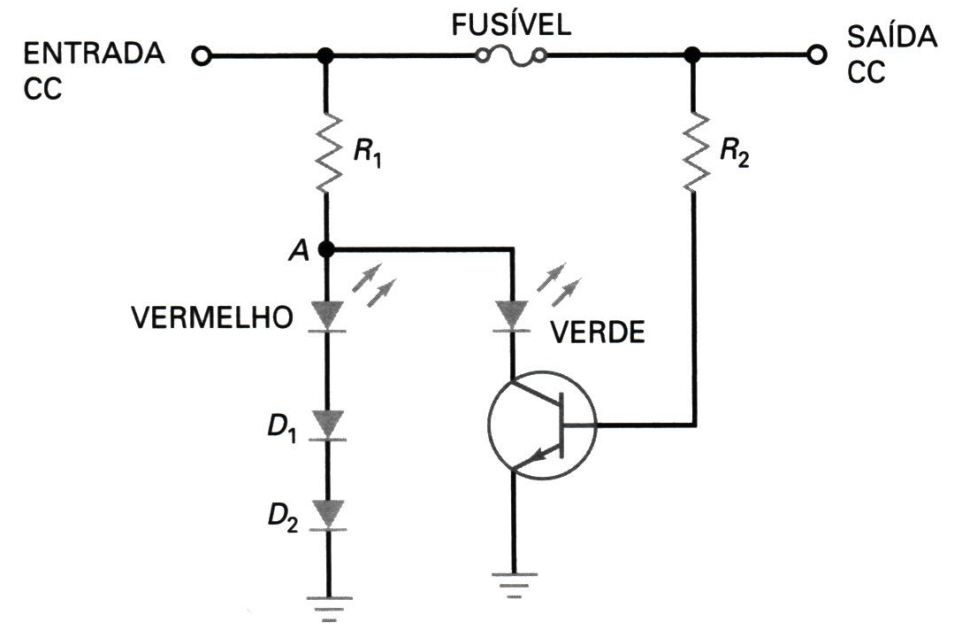
Considere que o circuito está saturado se o fusível estive funcionando correntemente, resultando em uma tensão entre o ponto A e o comum de 2V .



<https://everycircuit.com/circuit/5081008575348736>

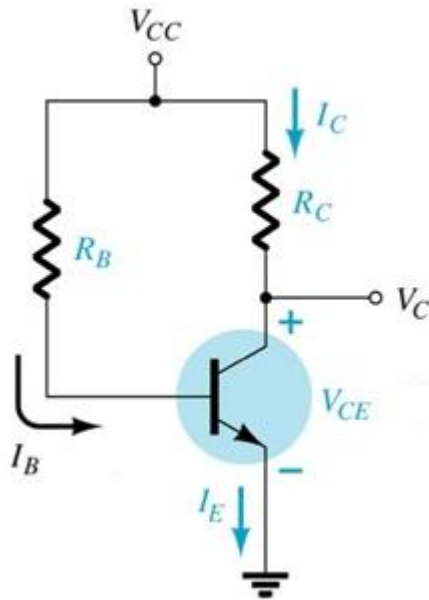
Transistores corte/saturação

Este circuito verifica o funcionamento do fusível. Se o fusível estiver operando normalmente, o transistor estará saturado e o LED verde será aceso. Como a relação de tensão entre o ponto A e comum será de 2V, não será capaz de acender o LED vermelho, uma vez que cada diodo resulta em uma queda de tensão de 0,7V. Caso o fusível esteja danificado (circuito aberto) o transistor irá operar na zona de corte, consequentemente o LED verde permanecerá desligado e a queda de tensão entre o ponto A e comum será superior a 2V, suficiente para acender o LED vermelho.



Circuito com polarização fixa

Polarização fixa



Equações

$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad i_C = \beta \cdot i_B$$
$$i_E = i_B + i_C$$

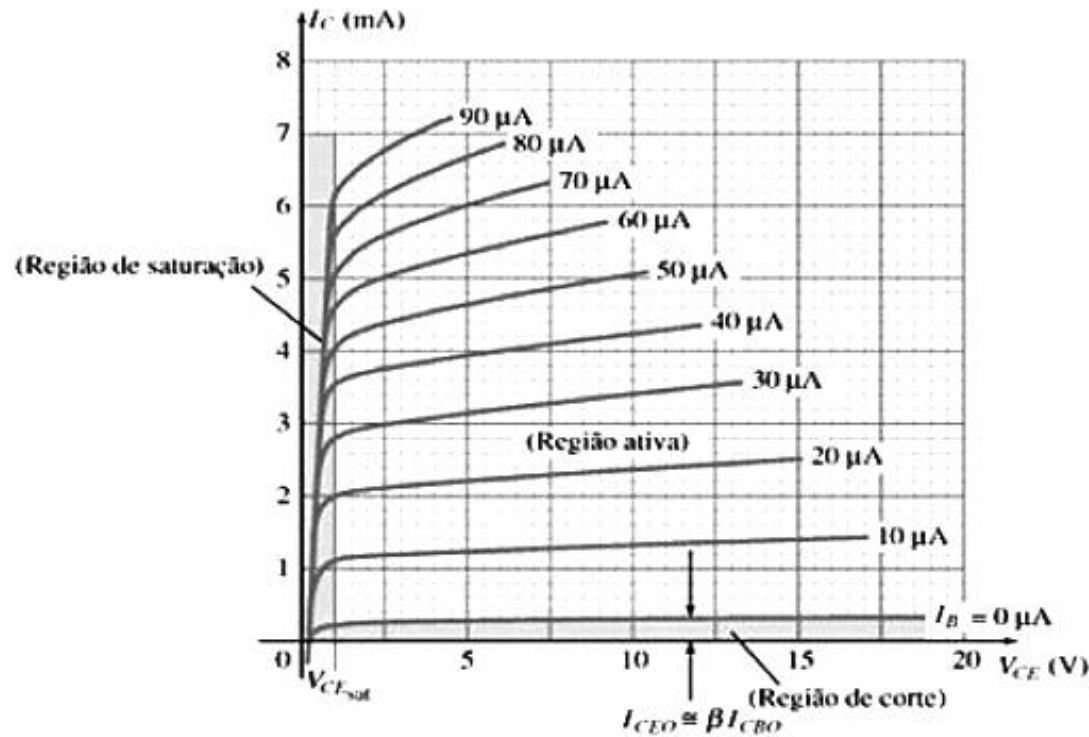
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C \cdot i_C$$

$$P = V_{CE} \cdot i_E$$

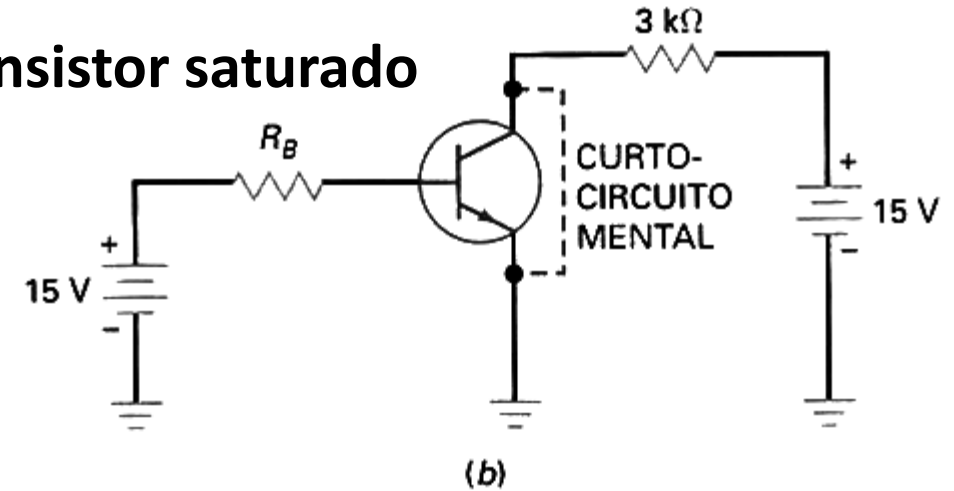
Esta configuração é usualmente utilizada em circuitos de chaveamento ou circuitos digitais, como o ganho β é muito sensível a variação de temperatura e normalmente elevado, manter o transistor na área ativa com a polarização fixa, torna-se complicado.

Circuito com polarização fixa

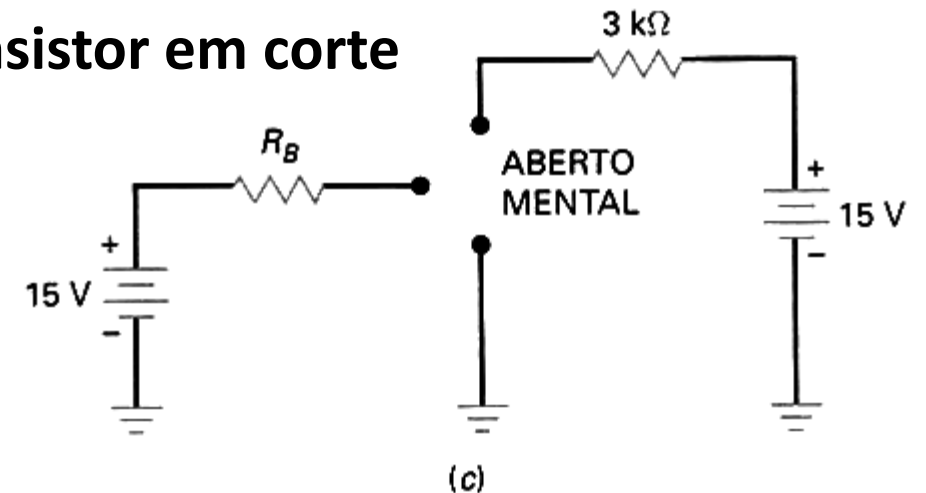
Comportamento $i_C \times V_{CE}$



Transistor saturado

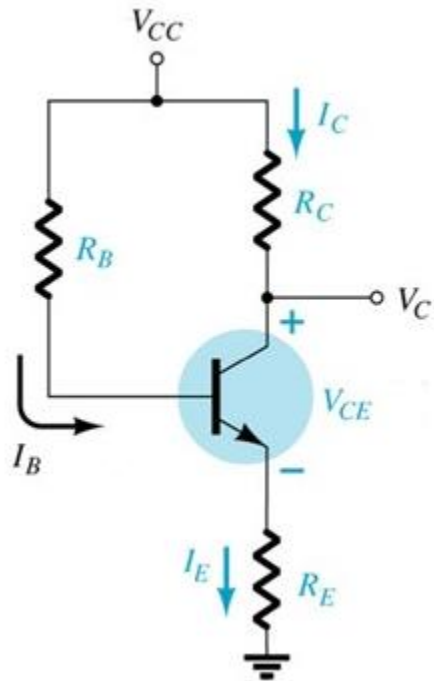


Transistor em corte

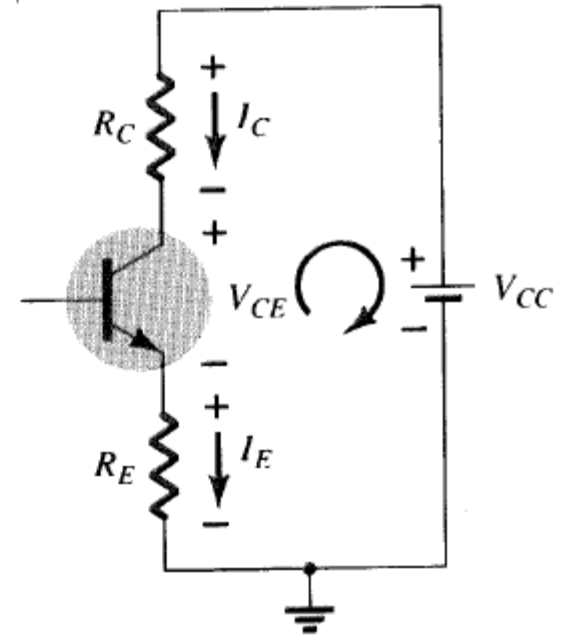
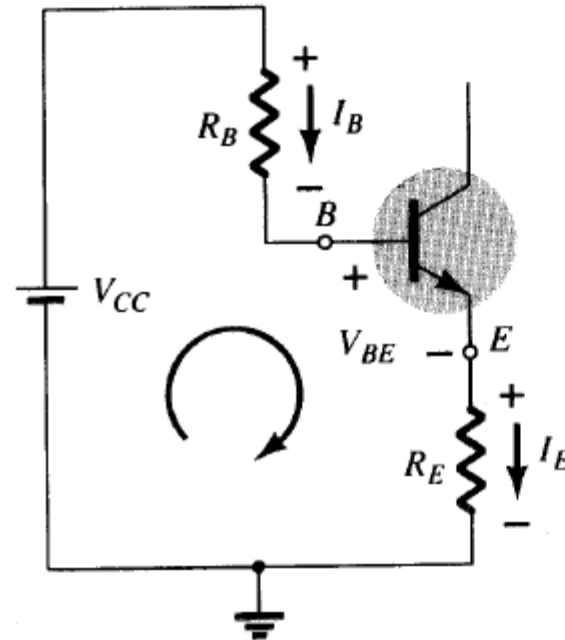


Circuito com polarização estável

Polarização Estável

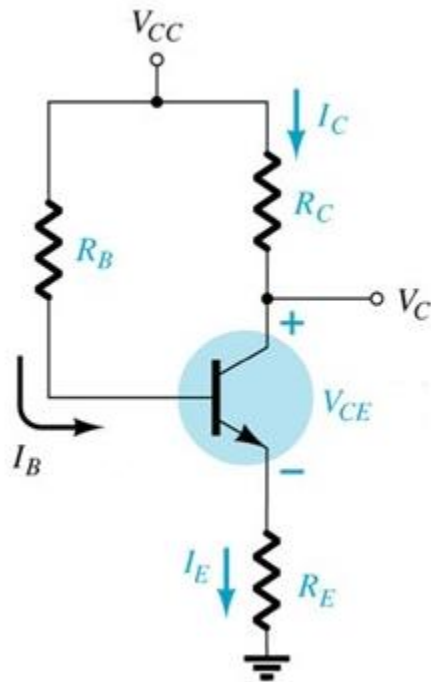


Equações ($i_C \cong i_E$)



Circuito com polarização estável

Polarização Estável



Equações ($i_E \cong i_C$) Assumindo que $\beta \gg 1$

$$-V_{CC} + R_B \cdot i_B + V_{BE} + i_E \cdot R_E = 0$$

$$i_E \cong i_C = i_B \cdot \beta$$

$$-V_{CC} + R_B \cdot i_B + V_{BE} + i_B \cdot \beta \cdot R_E = 0$$

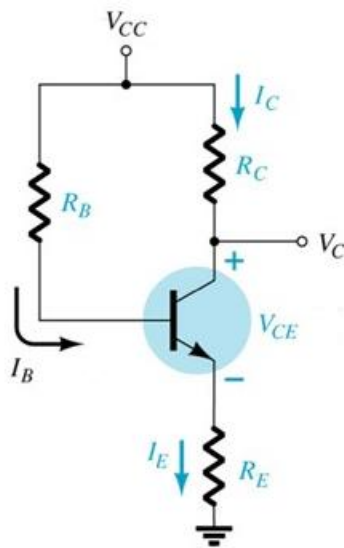
$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta \cdot R_E}$$

$$i_C = \beta \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta \cdot R_E} \right)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - i_C(R_E + R_C)$$

Circuito com polarização estável

Polarização Estável



$$i_E = i_B + i_C$$

$$i_E = i_B + \beta i_B$$

$$i_E = i_B(\beta + 1)$$

Equações ($i_E = i_C + i_b$)

$$-V_{CC} + R_B \cdot i_B + V_{BE} + i_E \cdot R_E = 0$$

$$i_E = i_B(\beta + 1)$$

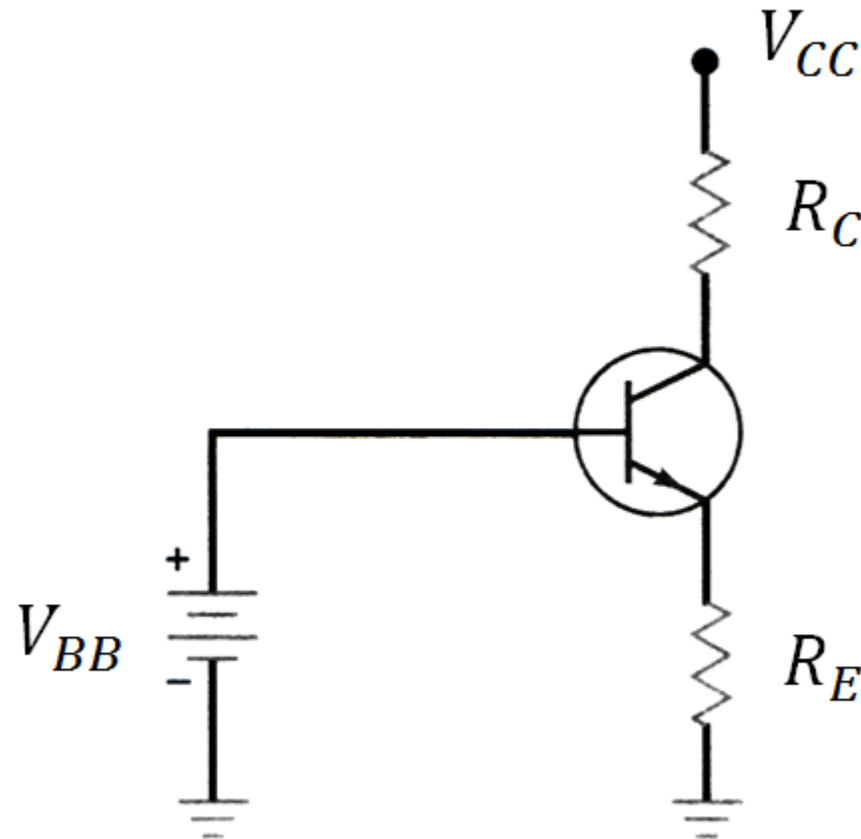
$$-V_{CC} + R_B \cdot i_B + V_{BE} + i_B(\beta + 1) \cdot R_E = 0$$

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

$$V_{CE} = V_{CC} - i_B \cdot (\beta R_C + (\beta + 1)R_C)$$

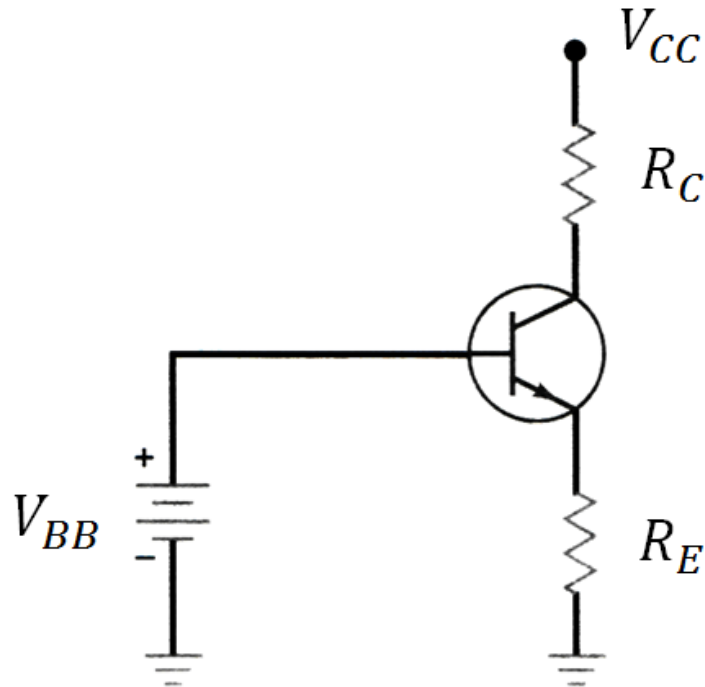
Circuito com polarização estável

Exercício: Explique porque a corrente do coletor independe do ganho β



Circuito com polarização estável

Exercício: Explique porque a corrente do coletor independe do ganho β



$$i_B = \frac{V_{BB} - 0,7}{\beta \cdot R_E}$$

$$i_C \cong i_E = i_B \cdot \beta = \frac{V_{BB} - 0,7}{\beta \cdot R_E} \beta = \frac{V_{BB} - 0,7}{R_E}$$

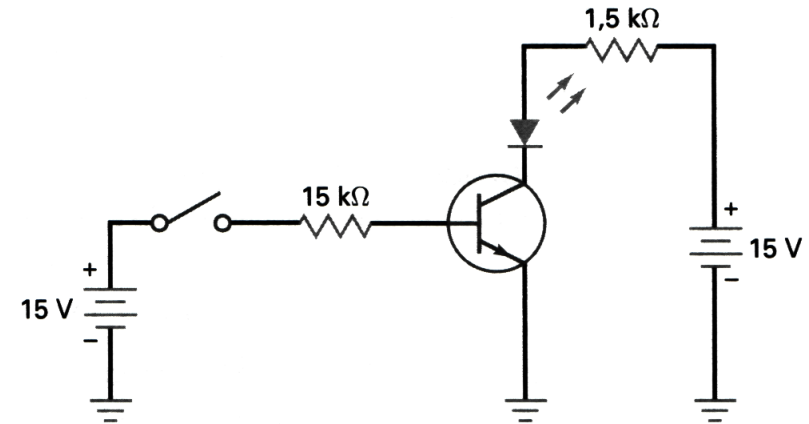
$$V_{CE} = V_{CC} - \left(\frac{V_{BB} - 0,7}{R_E} \right) (R_E + R_C)$$

Circuito com polarização estável

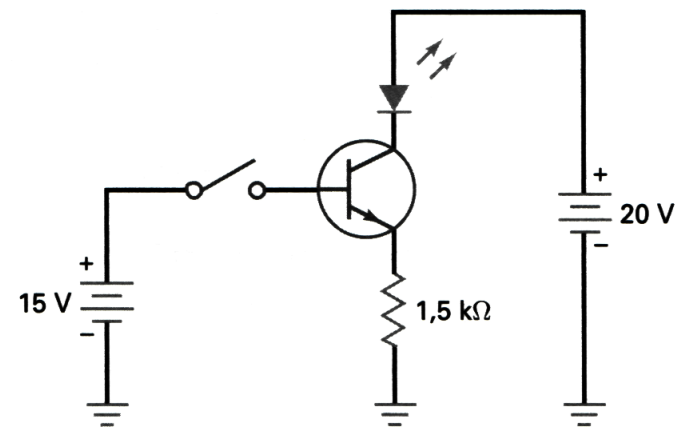
Com a chave aberta a corrente da base é igual a zero, o que representa o transistor na região de corte. Quando a chave é fechada, o transistor atinge a saturação forte (10:1). Considerando que o circuito está saturado, **qual a corrente que aciona o LED (queda de tensão de 2V)**

**** Ps. a queda de tensão no LED depende da corrente, e o mesmo possui uma potência máxima, parâmetros estes, desconsiderados**

No circuito ao lado, temos o mesmo efeitos do anterior, com a vantagem de possuir um único resistor no circuito. Assim as relações de tensão e corrente podemos ser manipuladas apenas modificando o valor da resistência e da fonte do coletor



(a)

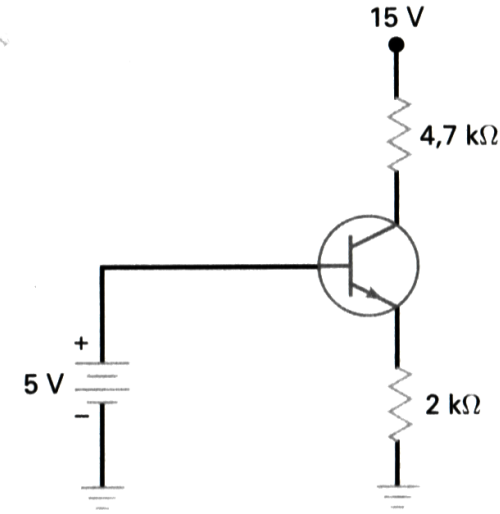
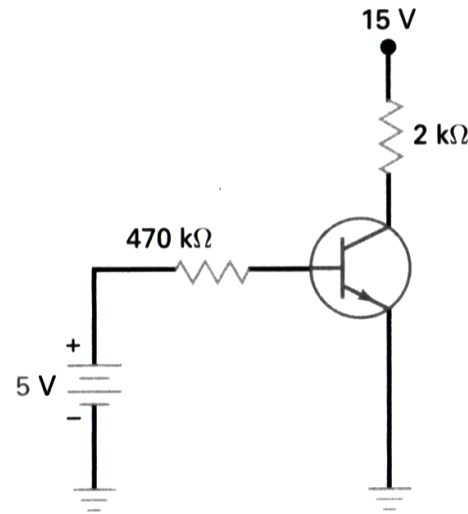


(b)

$$R: 8,67mA$$

Circuito com polarização estável

Tabela comparativa



Característica

Corrente da base fixa

Corrente do emissor fixa

$\beta_{cc}=100$

$$I_B = 9,5 \mu A$$
$$I_E = 915 \mu A$$

$$I_B = 2,15 \mu A$$
$$I_E = 2,15 mA$$

$\beta_{cc}=300$

$$I_B = 9,15 \mu A$$
$$I_E = 2,74 mA$$

$$I_B = 7,17 \mu A$$
$$I_E = 2,15 mA$$

Modo de funcionameto

Corte e saturação

Ativa ou linear

Aplicações

Chaveamento/circuitos digitais

Amplificadores e acionadores com I_C controlada

A tensão necessária para superar o potencial da barreira depletores é dependente da temperatura da junção. Uma alta temperatura gera mais elétrons livres e lacunas (portadores minoritários). Esses elétrons e lacunas reduzem a largura da camada de depleção, consequentemente reduzem a barreira de potencial. Podemos estimar uma queda de 2mV para cada grau Celsius de aumento de temperatura. Além disso o próprio ganho β é muito sensível a variação de temperatura.

TABLE 4.2

*Variation of Silicon Transistor Parameters
with Temperature*

T (°C)	I_{CO} (nA)	β	V_{BE} (V)
-65	0.2×10^{-3}	20	0.85
25	0.1	50	0.65
100	20	80	0.48
175	3.3×10^3	120	0.3

Ao adicionar o uma resistência no emissor do coletor, reduzimos o efeito da variação de β , pois:

Em uma polarização fixa, o aumento de β induz um aumento de i_C , enquanto i_B permanece constante

$$i_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$\uparrow i_C = \uparrow \beta i_B$$

Em uma polarização estável, o aumento de β induz um aumento de i_C , que por sua vez reduz i_B . A resistência R_E atua como um mecanismo de estabilização

$$\downarrow i_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\uparrow \beta + 1) \cdot R_E}$$

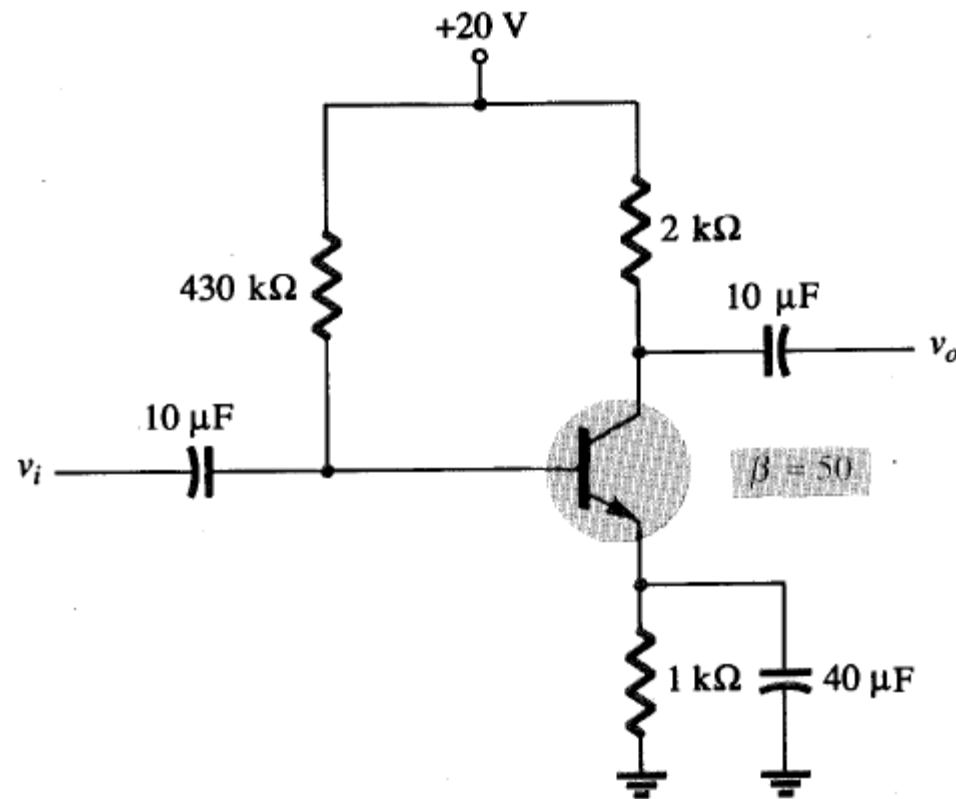
$$\uparrow i_C = \uparrow \beta i_B$$

**Desconsiderando a corrente de fuga*

Circuito com polarização estável

Exercício: Calcule V_{CE} , V_E a corrente de corte e a tensão de saturação.

Assuma que $\beta \gg 1$



Circuito com polarização estável

Exercício: Calcule V_{CE} , V_E a corrente de saturação i_C e a tensão de corte.

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + \beta \cdot R_E}$$

$$I_B = \frac{20 - 0,7}{430 \cdot 10^3 + 50 \cdot 1 \cdot 10^3} = \frac{19,3}{480000} = 40,2 \mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 50 \cdot 40,2 \cdot 10^{-6} = 2,01 mA$$

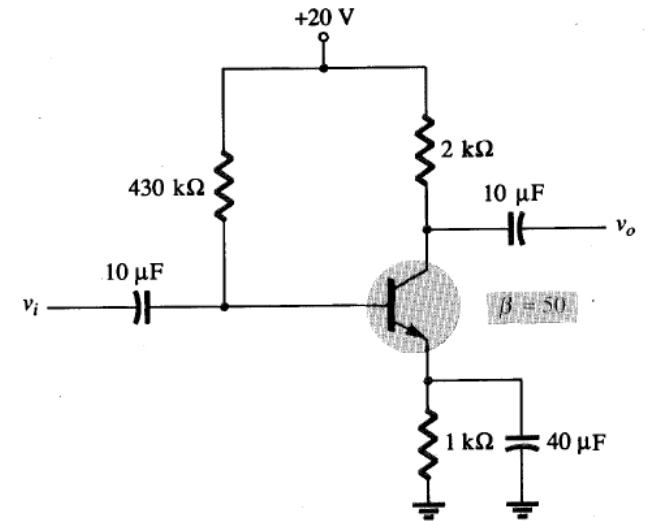
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_E + R_C)$$

$$V_{CE} = 20 - 2,01 \cdot 10^{-3}(1000 + 2000)$$

$$V_{CE} = 13,98V$$

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

$$V_E = 20 - 2 \cdot 10^3 \cdot 2,01 \cdot 10^{-3} - 13,98 = 2V$$



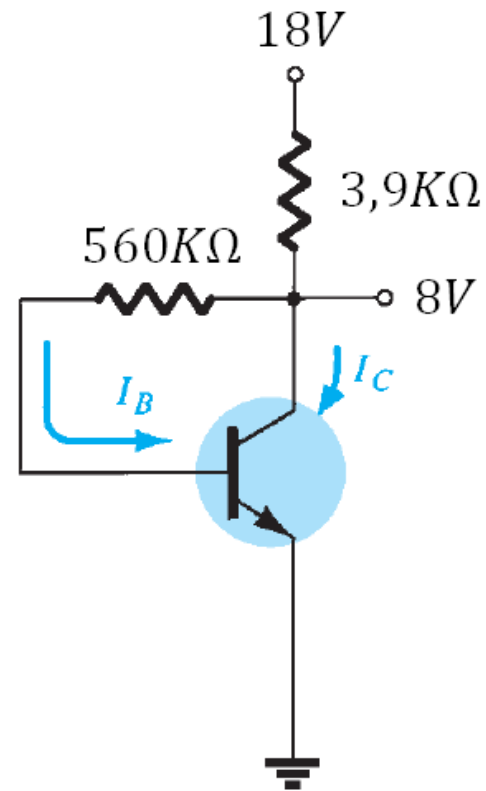
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_E + R_C) \Big|_{V_{CE}=0}$$

$$I_{CSat} = \frac{V_{CC}}{R_E + R_C} = \frac{20}{1K + 2K} = 6,67mA$$

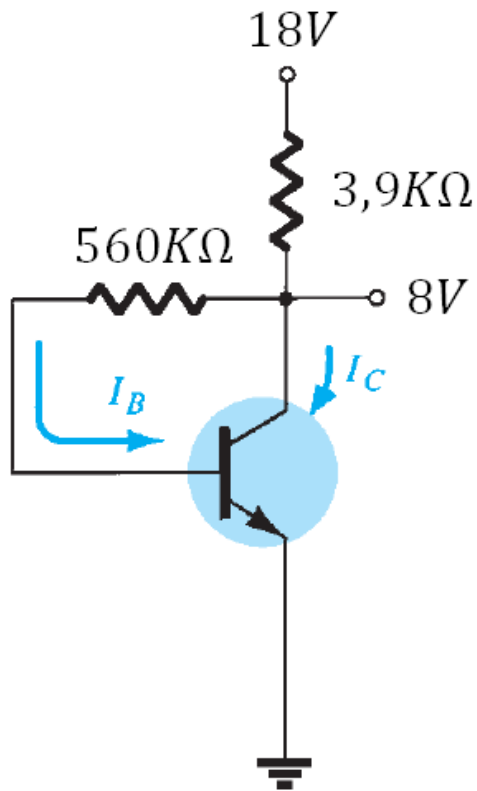
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_E + R_C) \Big|_{I_C=0}$$

$$V_{CECorte} = V_{CC} = 20V$$

Exercício: Considerando o circuito abaixo calcule: i_b , i_c , V_{CE} e β



Exercício: Considerando o circuito abaixo calcule: i_b , i_c , V_{CE} e β



$$V_E = 8V$$

$$V_{3,9K} = 10V$$

$$-18 + 10 + 560 \cdot 10^3 \cdot i_b + V_{BE} = 0$$

$$i_b = \frac{18 - 10 - 0,7}{560 \cdot 10^{-3}} = 13,04\mu A$$

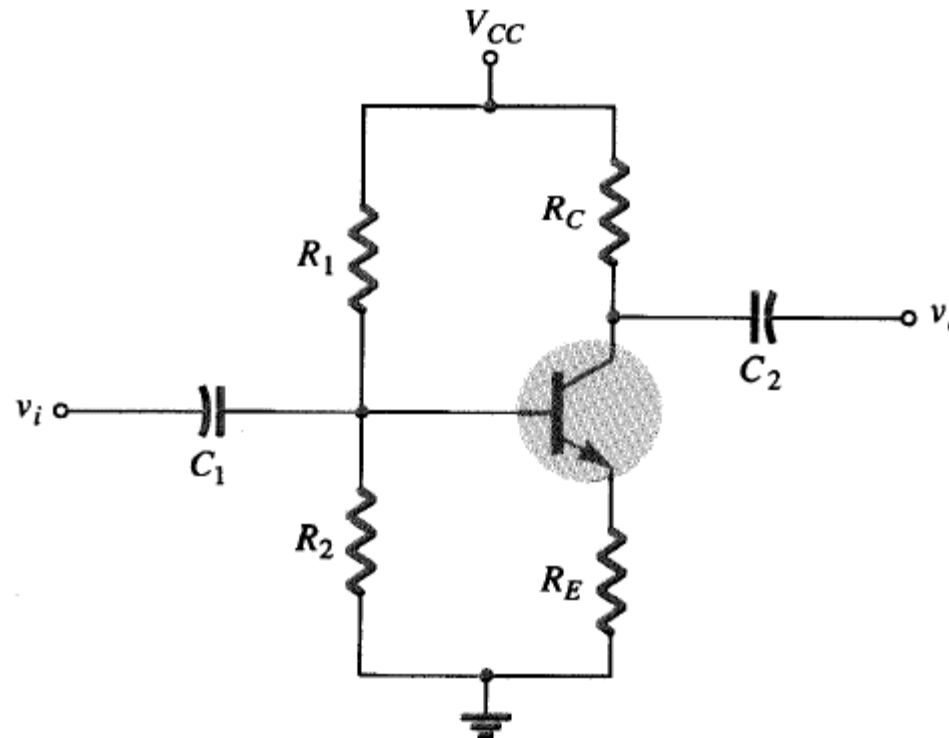
$$i_c = \frac{10}{3,9 \cdot 10^{-3}} = 2,56mA$$

$$\beta = \frac{2,56 \cdot 10^{-3}}{13,04 \cdot 10^{-6}} = 196,38$$

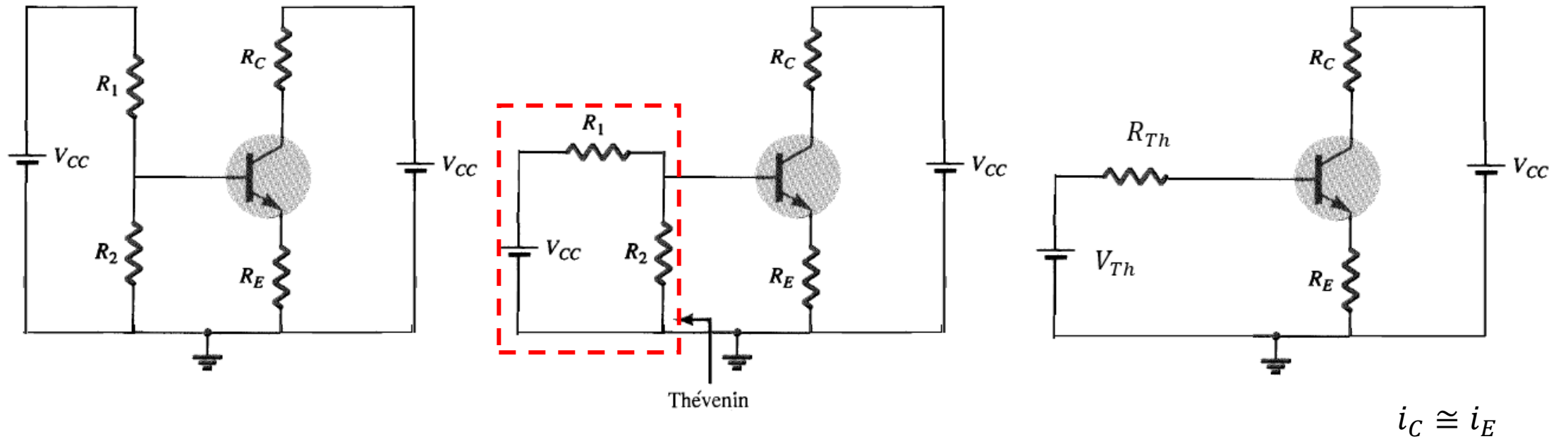
$$V_{CE} = V_E = 8V$$

Circuito com polarização por divisor de tensão

As configurações vistas anteriormente possuem características específicas, polarização fixa – Circuitos chaveadores (área de saturação) e polarização estável (ou corrente do emissor fixa) – circuitos de amplificação (área ativa). A polarização por divisor de tensão (PDT) é uma “polarização estável camuflada” que visa reduzir significativamente a influência do ganho β no circuito. Normalmente as configurações anteriores apresentam erros quando comparados os dados teóricos e dados experimentais. Um transistor com uma boa PDT ($\beta R_e \gg 10R_2$) atenua significativamente os erros, garantindo mais confiabilidade.



Circuito com polarização por divisor de tensão



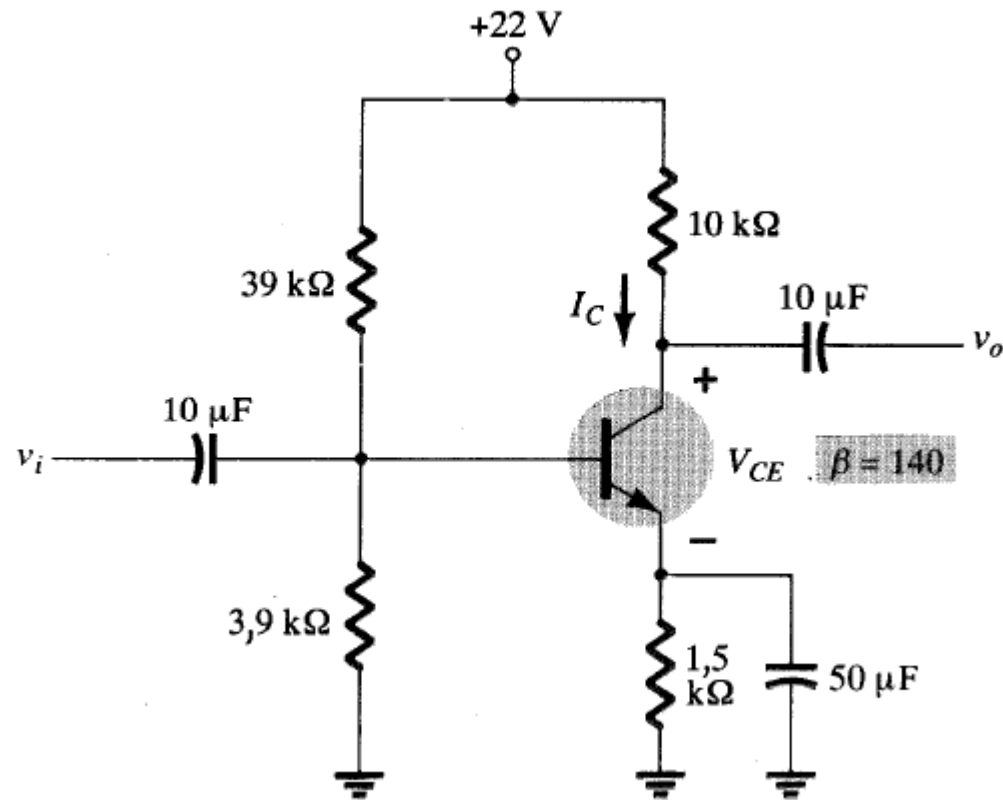
$$V_{Th} = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad e \quad R_{Th} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + \beta \cdot R_E}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_E + R_C)$$

Circuito com polarização por divisor de tensão

Exemplo: Determine a tensão V_{CE} e a corrente de polarização I_C dc para a configuração de divisor de tensão abaixo.



Circuito com polarização por divisor de tensão

Exemplo: Determine a tensão V_{CE} e a corrente de polarização I_C dc para a configuração de divisor de tensão abaixo.

$$R_{Th} = R_1 || R_2$$

$$R_{Th} = \frac{39K \cdot 3,9K}{39K + 3,9} = 3,55K\Omega$$

$$V_{Th} = \frac{R_2 \cdot V_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{Th} = \frac{3,9K \cdot 22}{39K + 3,9K} = 2V$$

$$I_B = \frac{V_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

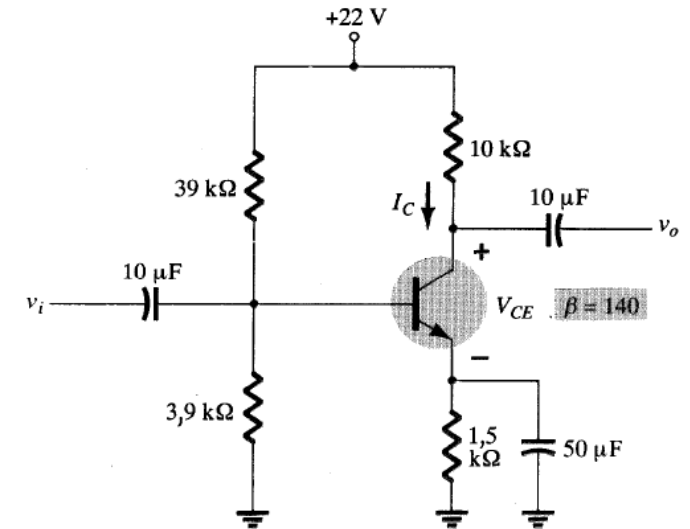
$$I_B = \frac{2 - 0,7}{3,55K + 141 \cdot 1,5K} = 6,05\mu A$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_C = 140 \cdot 6,05\mu = 0,85mA$$

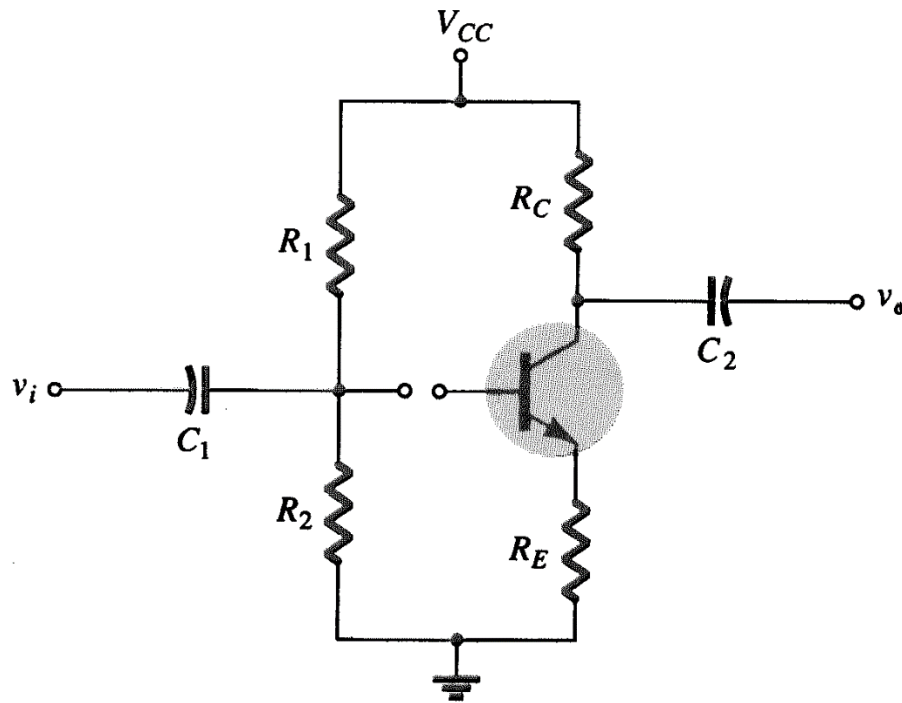
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 22 - 0,85m(10K + 1,5K) = 12,22V$$



Circuito com polarização por divisor de tensão

Método aproximado para calcular a polarização por divisor de tensão:



$$V_B = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_C \cong I_E$$

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

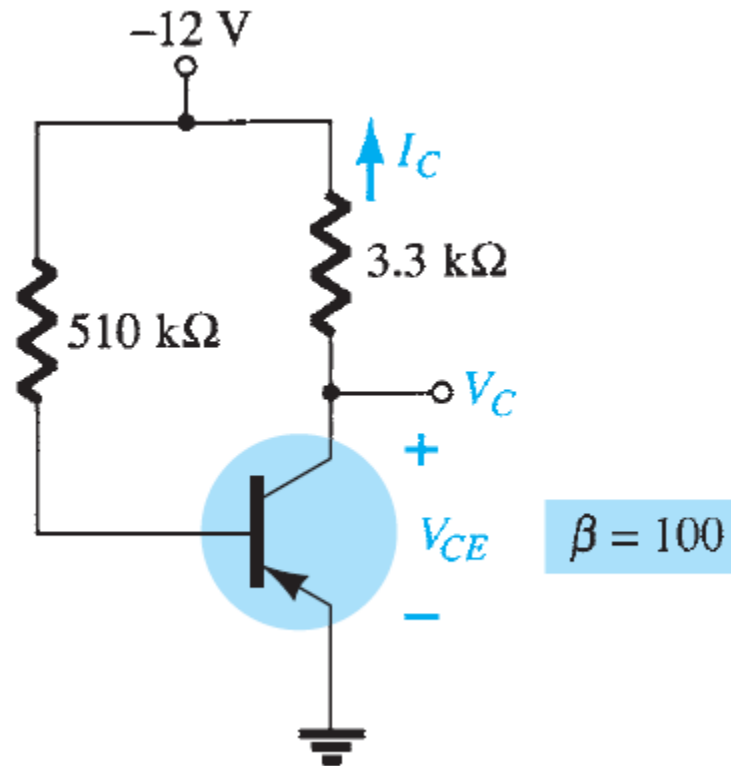
$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

O método só pode ser aplicado se a condição abaixo for satisfeita

$$\beta \cdot R_E \geq 10 \cdot R_2$$

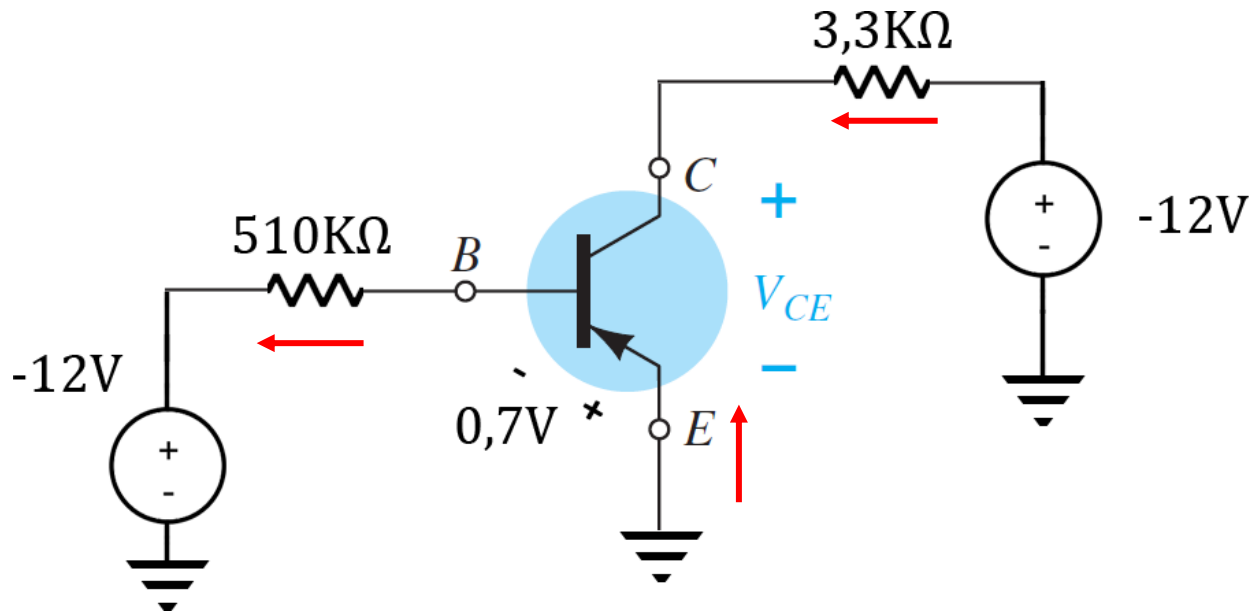
Transistor PNP

Exercício: Dado o circuito abaixo, calcule: i_B , i_C e V_{CE}



Circuito com polarização por divisor de tensão

Exercício: Dado o circuito abaixo, calcule: i_B , i_C e V_{CE}



$$i_B = \frac{12 - 0,7}{510 \cdot 10^3} = 22,16 \mu A$$

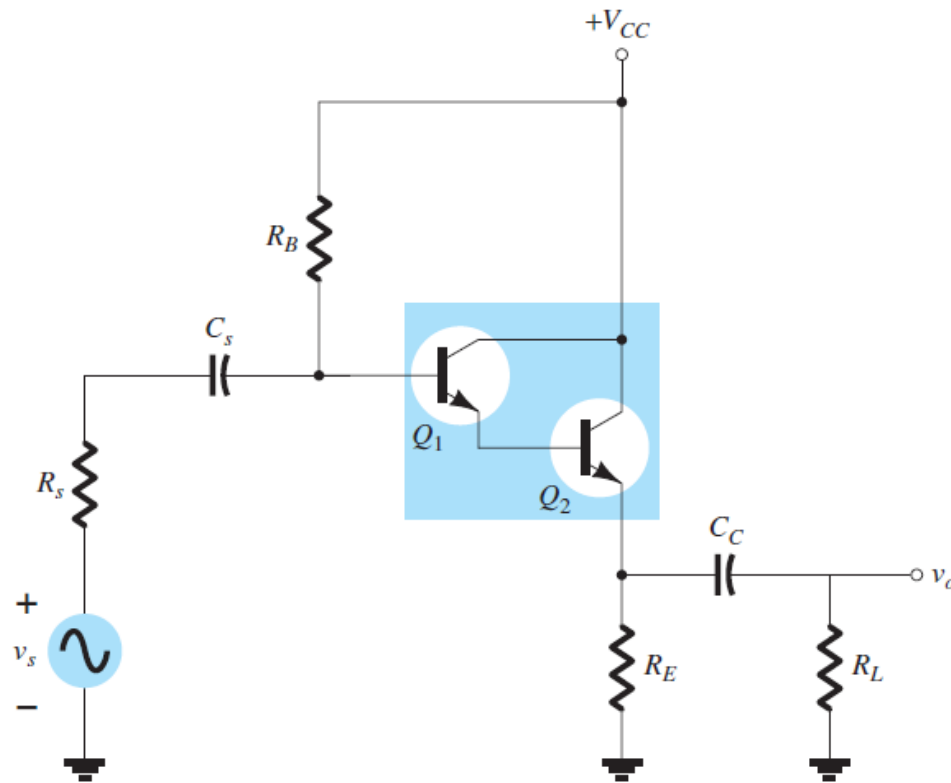
$$i_C = 22,16 \cdot 10^{-6} \cdot 100 = 2,22 mA$$

$$V_{CE} = 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot 3,3 \cdot 10^3 - 12$$

$$V_{CE} = -4,67 V$$

Transistores do tipo Darlington

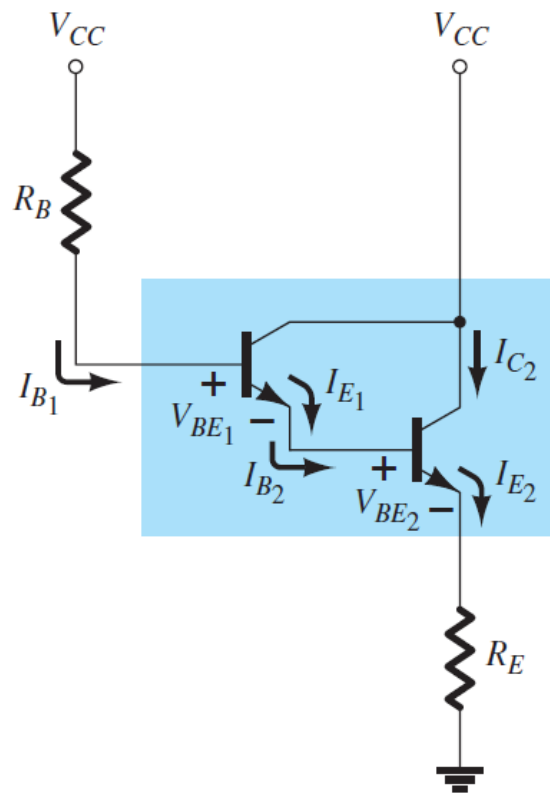
Os Transistores do tipo Darlington consistem em uma cascara de dois transistores TJB, aumento o ganho do componente. Estes componentes são comumente utilizados para chaveamento de potência



Transistores do tipo Darlington

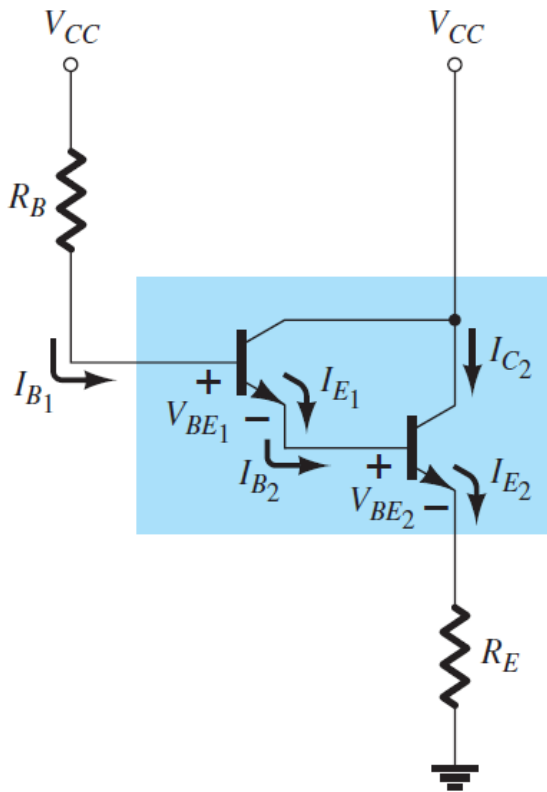
Exercício: Calcule o ganho para a associação dos transistores abaixo e as equações para i_{B1} , V_{CE2}

Assuma que $\beta \gg 1$ para β_1 e β_2



Transistores do tipo Darlington

Exercício: Calcule o ganho para a associação dos transistores abaixo e as equações para i_{B1} , V_{CE2}



$$i_{C1} \cong i_{E1}$$

$$i_{B2} = i_{E1} = \beta_1 \cdot i_{B1}$$

$$i_{E2} = \beta_2 \cdot i_{B2}$$

$$i_{E2} = \beta_1 \beta_2 \cdot i_{B1}$$

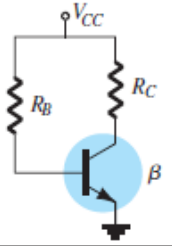
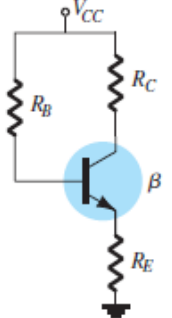
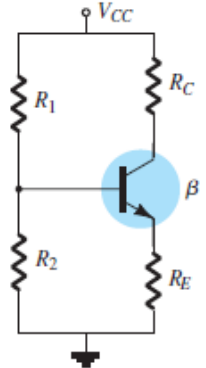
$$\beta_D = \beta_1 \beta_2$$

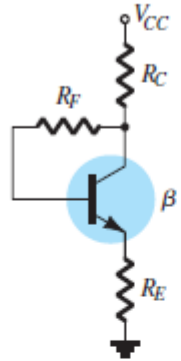
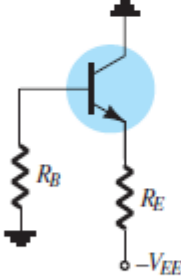
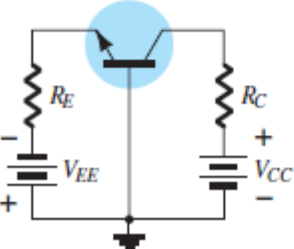
$$V_{BE_D} = V_{BE1} + V_{BE2}$$

$$i_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE1} - V_{BE2}}{R_B + \beta R_E}$$

$$i_{B1} = \frac{V_{CC} - V_{BE_D}}{R_B + \beta R_E}$$

$$V_{CE2} = V_{CC} - \beta_D \cdot i_{B1} \cdot R_E$$

Type	Configuration	Pertinent Equations
Fixed-bias		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$
Emitter-bias		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $R_i = (\beta + 1)R_E$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$
Voltage-divider bias		EXACT: $R_{Th} = R_1 R_2, E_{Th} = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}$ $I_B = \frac{E_{Th} - V_{BE}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$ APPROXIMATE: $\beta R_E \geq 10 R_2$ $V_B = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2}, V_E = V_B - V_{BE}$ $I_E = \frac{V_E}{R_E}, I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$

Type	Configuration	Pertinent Equations
Collector-feedback		$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_F + \beta(R_C + R_E)}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{CC} - I_C(R_C + R_E)$
Emitter-follower		$I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E}$ $I_C = \beta I_B, I_E = (\beta + 1)I_B$ $V_{CE} = V_{EE} - I_E R_E$
Common-base		$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E}$ $I_B = \frac{I_E}{\beta + 1}, I_C = \beta I_B$ $V_{CE} = V_{EE} + V_{CC} - I_E(R_C + R_E)$ $V_{CB} = V_{CC} - I_C R_C$