LOM3206 – ELETRÔNICA
AULA 8

Prof. Dr. Emerson G. Melo

Sumário

- Amplificadores de Potência;
- Classes de Amplificação;
- Amplificador Classe A;
- Amplificador Classe B;
- Amplificador Classe AB;
- Distorção Harmônica Total (THD)

Amplificadores de Potência

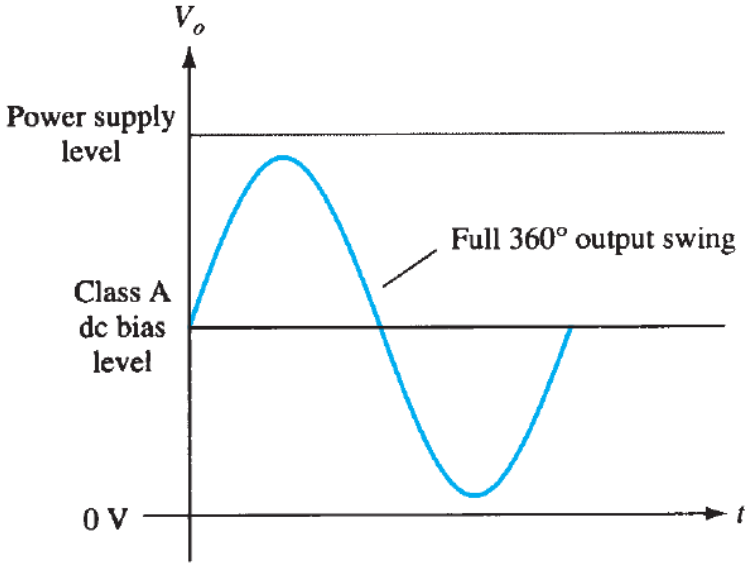
- Em amplificadores de pequenos sinais as maiores preocupações são linearidade e ganho de tensão, pois geralmente são utilizados para realizar uma amplificação inicial de sinais com amplitudes muito pequenas, de alguns milivolts ou microvolts. Por isso, via de regra, não se tem muita preocupação com alguns requisitos como eficiência e potência.
- Quando é necessário excitar cargas que demandam potências mais elevadas, como alto-falantes ou outros transdutores, são utilizados amplificadores de potência.
- Entre as características principais de amplificadores de potência temos:
  - Máxima potência fornecida à carga;
  - Eficiência: Relação entre a potência entregue à carga e a potência consumida sem sinal;
  - Casamento de impedância;
  - Distorção Harmônica Total.

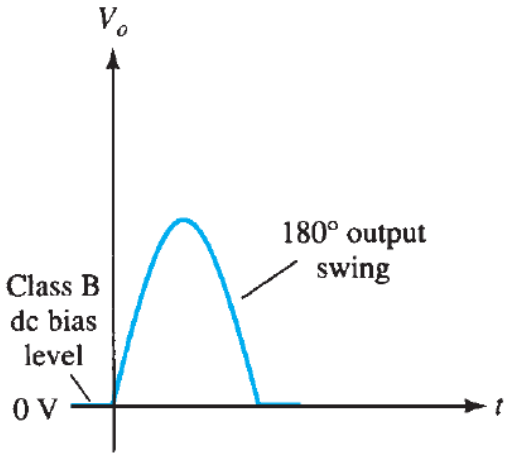
Classes de Amplificação

- Classes de amplificação são utilizadas para indicar a forma como os elementos de potência (BJT ou FET) atuam sobre o sinal de saída para reconstituir um ciclo do sinal de entrada.
  - Classe A: Um único elemento é responsável por amplificar o sinal de entrada ao longo de 360°.
  - Classe B: Cada elemento é responsável por amplificar 180° do sinal de entrada. Um ciclo completo pode ser amplificado através de uma configuração *push-pull*. Gera distorções no sinal de saída.
  - Classe AB: Apresenta características das classes A e B.
  - Classe C: Amplifica menos de 180° do sinal de entrada. Funciona em conjunto com um circuito ressonante sintonizado para uma frequência específica.
  - Classe D: O sinal de entrada é reconstituído através da amplificação de um sinal pulsado utilizando técnicas digitais. Permite obter grandes eficiências.

Classes de Amplificação

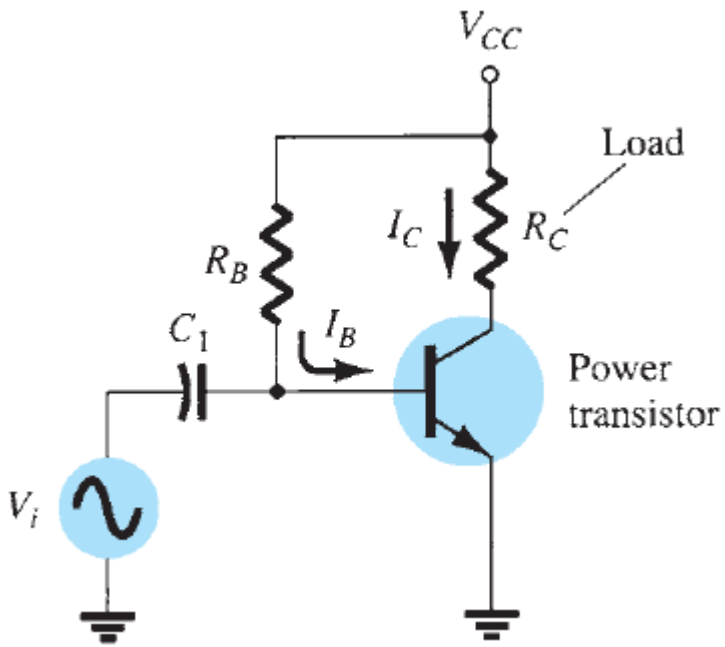
	A	AB	B	C	D
Ciclo de operação	360°	180° a 360°	180°	Menor que 180°	Operação pulsada.
Eficiência de potência	25% a 50%	Entre 25% e 78,5%	78,5%	Não se aplica	Acima de 90%

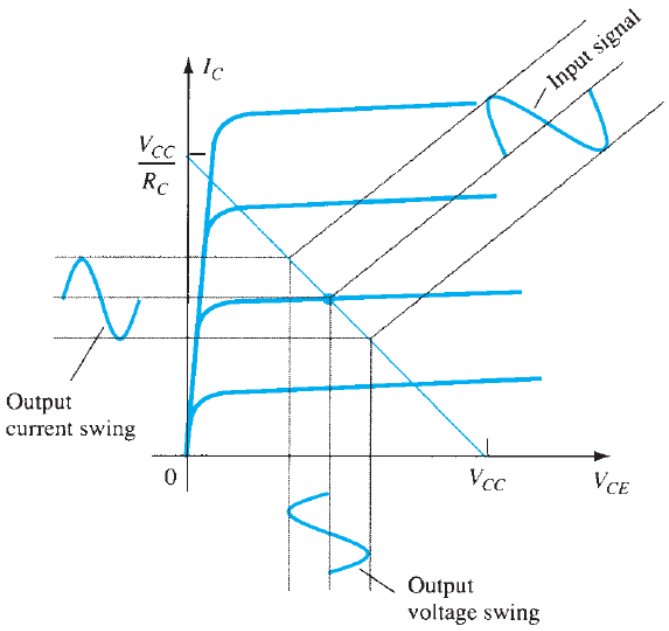


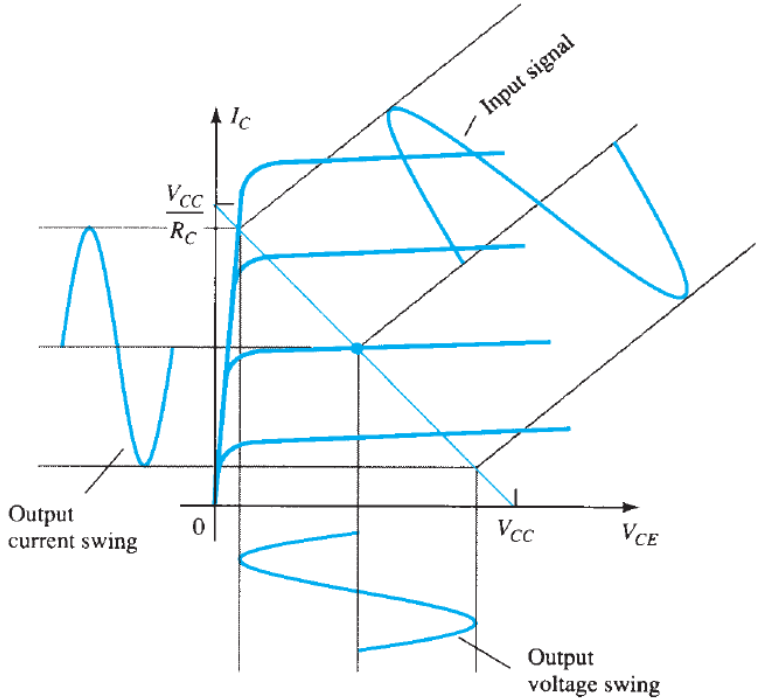


Amplificador Classe A

- Um único elemento é responsável por amplificar o sinal de entrada ao longo de 360°.







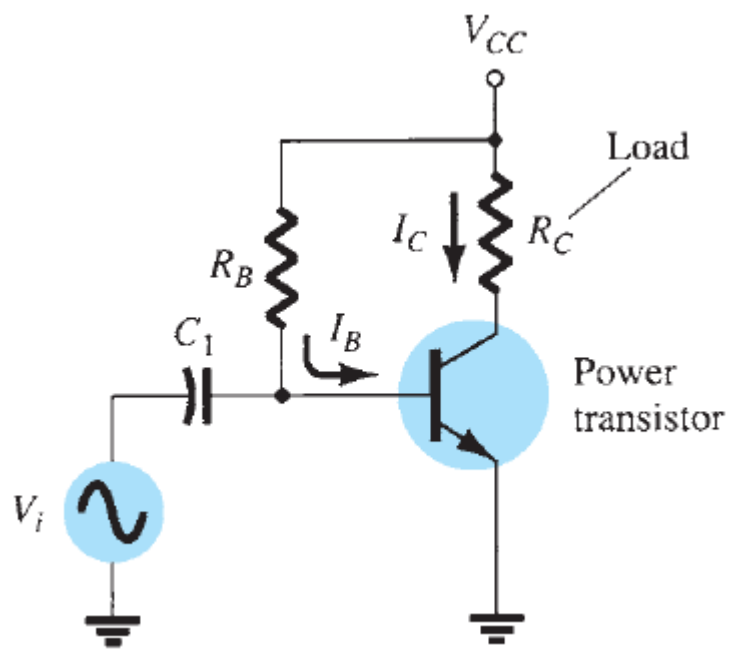
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

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

O ponto Q é ajustado para metade do valor máximo de tensão e corrente no coletor

Potências de entrada e saída



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

$$I_C = \beta I_B$$

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

Potência de Entrada

Representa a potência total drenada da fonte de alimentação.

$$P_{iDC} = V_{CC} I_{CQ}$$

Potência de Saída

Representa a potência AC liberada para a carga.

$$P_{oAC} = V_{R_C(RMS)} I_{R_C(RMS)}$$

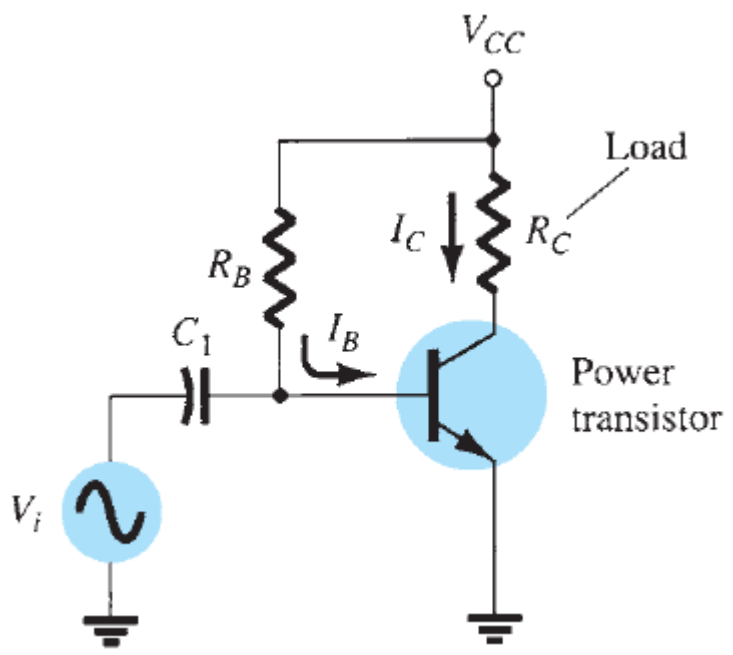
$$P_{oAC} = \frac{V_{R_C(\mathrm{p})}}{\sqrt{2}} \frac{I_{R_C(\mathrm{p})}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{R_C(\mathrm{p})} I_{R_C(\mathrm{p})}}{2}$$

Utilizando sinais de pico-a-pico.

$$P_{oAC} = \frac{V_{R_C(\mathrm{pp})}}{2\sqrt{2}} \frac{I_{R_C(\mathrm{pp})}}{2\sqrt{2}} = \frac{V_{R_C(\mathrm{pp})} I_{R_C(\mathrm{pp})}}{8} = \frac{{I_{R_C(\mathrm{pp})}}^2 R_C}{8} = \frac{{V_{R_C(\mathrm{pp})}}^2}{8R_C}$$

Amplificador Classe A

- Eficiência: Indica a quantidade de potência AC liberada pela fonte DC.



Eficiência

$$\eta = \frac{P_{oAC}}{P_{iDC}} \times 100\%$$

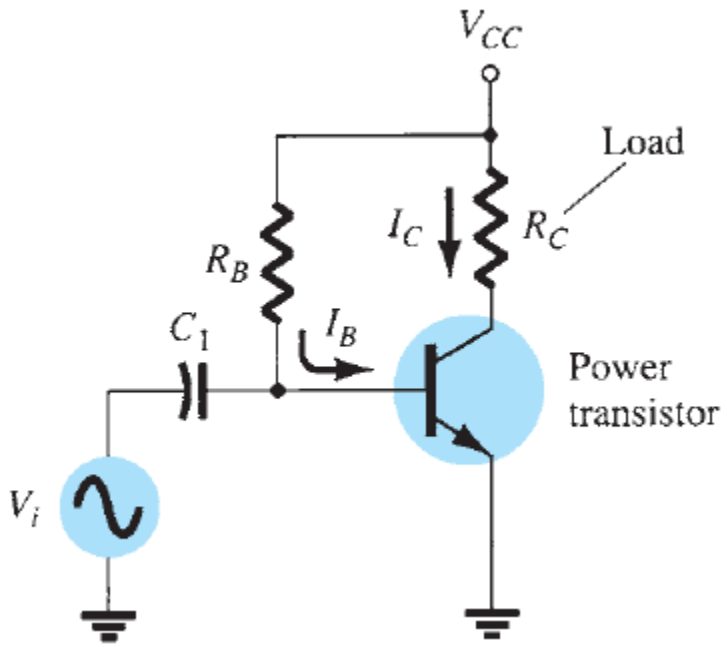
Potência de Entrada

$$P_{iDC} = V_{CC} I_{CQ}$$

Potência de Saída

$$P_{oAC} = \frac{V_{R_C(\mathrm{pp})} I_{R_C(\mathrm{pp})}}{8}$$

Eficiência Máxima



Potência de Entrada

$$P_{iDC} = V_{CC} I_{CQ}$$

Adotando: $I_{C\max} = \dfrac{V_{CC}}{2R_C}$

$$P_{iDC\max} = V_{CC} I_{C\max}$$

$$P_{iDC\max} = V_{CC} \frac{V_{CC}}{2R_C}$$

$$P_{iDC\max} = \frac{{V_{CC}}^2}{2R_C}$$

Potência de Saída

$$P_{oAC} = \frac{V_{R_C(PP)} I_{R_C(PP)}}{8}$$

$$V_{R_C(\mathrm{pp})} = V_{CC} \qquad I_{R_C(\mathrm{pp})} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

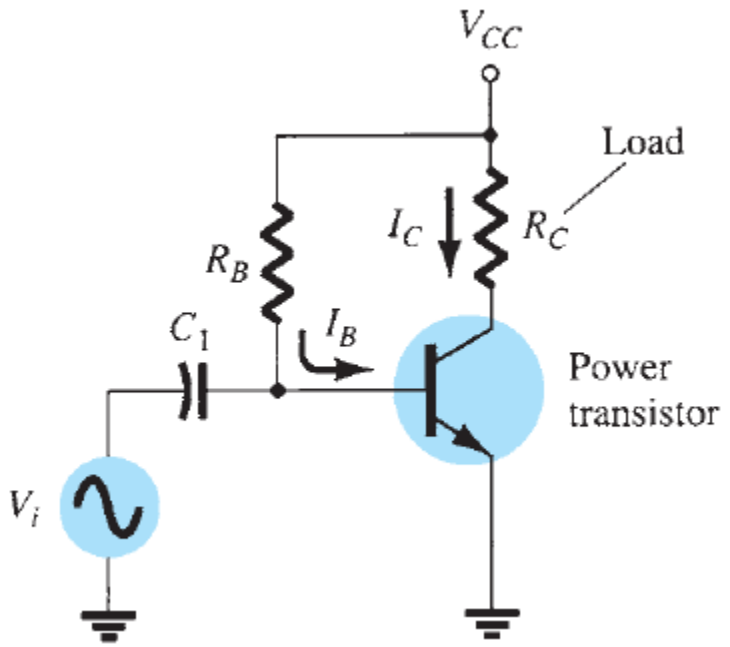
$$P_{oAC\max} = \frac{V_{CC}(V_{CC}/R_C)}{8}$$

$$P_{oAC\max} = \frac{{V_{CC}}^2}{8R_C}$$

Eficiência Máxima

$$\eta = \frac{P_{oAC\max}}{P_{iDC\max}} \times 100\% = \frac{{V_{CC}}^2/8R_C}{{V_{CC}}^2/2R_C} \times 100\% = 25\%$$

Potência dissipada pelo transistor de saída

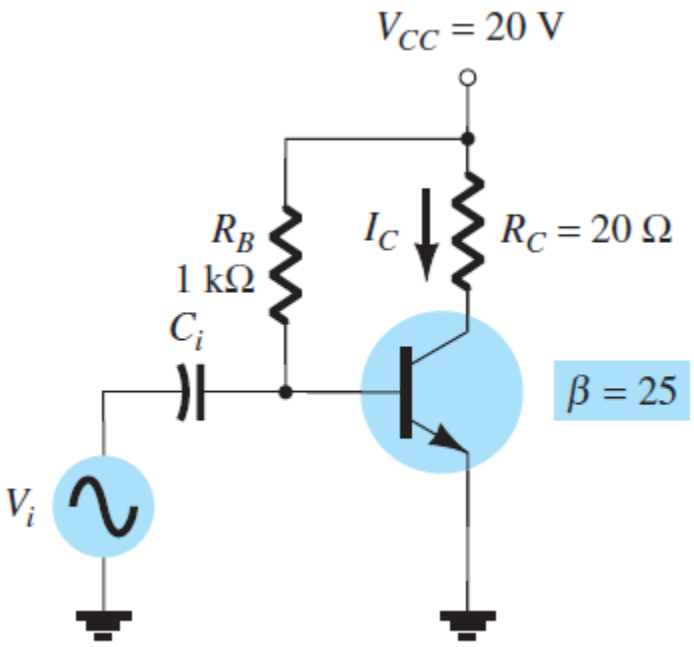


Potência Dissipada

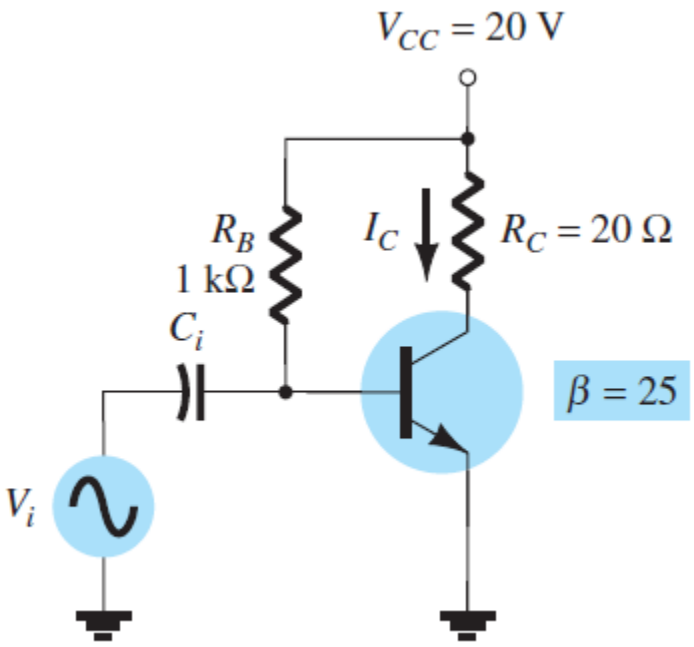
$$P_Q = P_{iDC} - P_{oAC}$$

Amplificador Classe A

- Exemplo: Calcular a potência de entrada, potência de saída e eficiência do circuito abaixo para um sinal que produza uma corrente de base de 20 mA pp.



- Exemplo: Calcular a potência de entrada, potência de saída e eficiência do circuito abaixo para um sinal que produza uma corrente de base de 20 mA pp.



Potência de Entrada

$$P_{iDC} = V_{CC} I_{CQ}$$

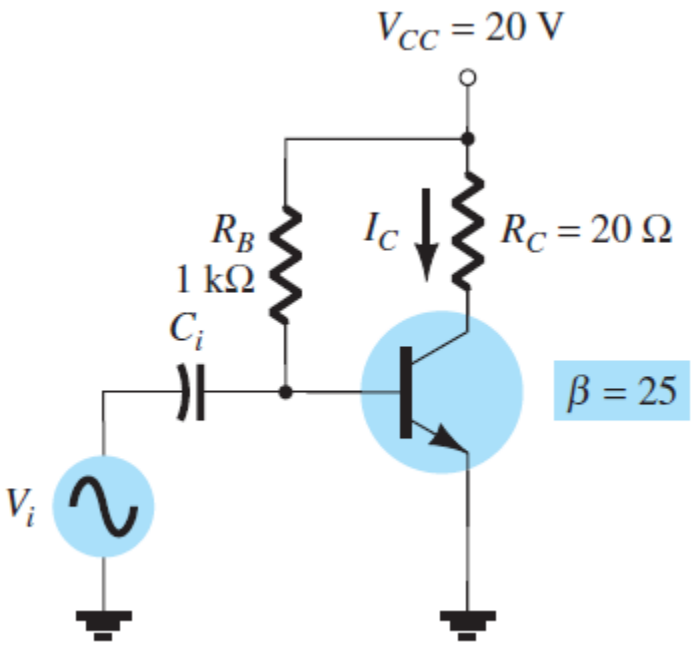
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} = \frac{20\text{ V} - 0{,}7\text{ V}}{1\text{ k}\Omega} = 19{,}3\text{ mA}$$

$$I_C = \beta I_B = 25(19{,}3\text{ mA}) = 482{,}5\text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 20\text{ V} - 482{,}5\text{ mA} \times 20\ \Omega = 10{,}4\text{ V}$$

$$P_{iDC} = V_{CC} I_{CQ} = 20\text{ V} \times 482{,}5\text{ mA} = 9{,}6\text{ W}$$

- Exemplo: Calcular a potência de entrada, potência de saída e eficiência do circuito abaixo para um sinal que produza uma corrente de base de 20 mA pp.



Potência de Saída

$$P_{oAC} = \frac{V_{R_C(\mathrm{pp})} I_{R_C(\mathrm{pp})}}{8} = \frac{{I_{R_C(\mathrm{pp})}}^2 R_C}{8} = \frac{{V_{R_C(\mathrm{pp})}}^2}{8R_C}$$

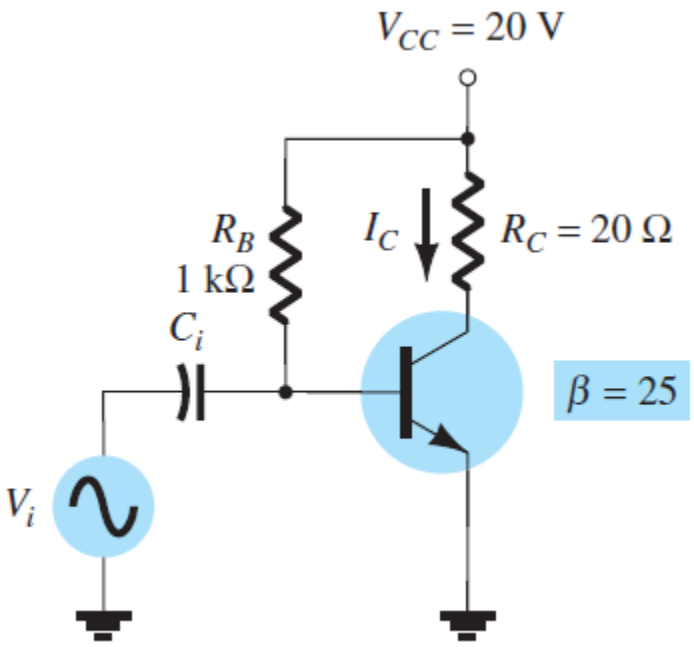
Para: $I_{B(\mathrm{pp})} = 20\ \mathrm{mA}$

$$I_{R_C(\mathrm{pp})} = \beta I_{R_C(\mathrm{pp})} = 25(20\ \mathrm{mA}) = 500\ \mathrm{mA}$$

$$P_{oAC} = \frac{{I_{R_C(\mathrm{pp})}}^2 R_C}{8} = \frac{500\ \mathrm{mA}^{\ 2} \times 20\ \Omega}{8} = 0{,}625\ \mathrm{W}$$

Amplificador Classe A

- Exemplo: Calcular a potência de entrada, potência de saída e eficiência do circuito abaixo para um sinal que produza uma corrente de base de 20 mA pp.



Eficiência

$$\eta = \frac{P_{oAC}}{P_{iDC}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_{oAC}}{P_{iDC}} \times 100\% = \frac{0{,}625\ \text{W}}{9{,}6\ \text{W}} \times 100\% = 6{,}5\%$$

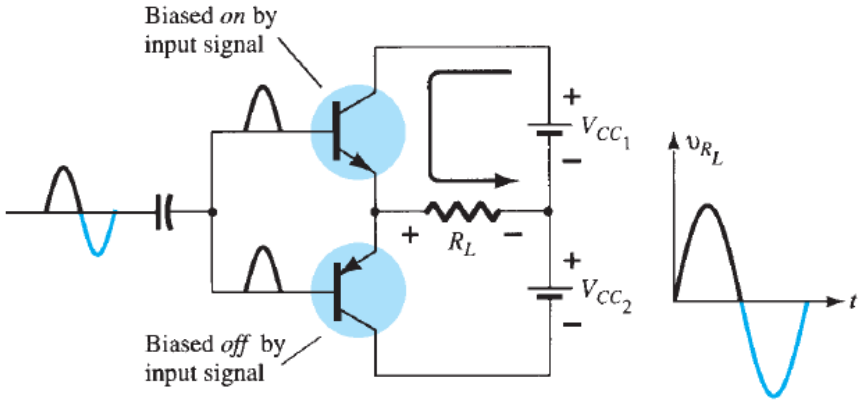
Potência Dissipada

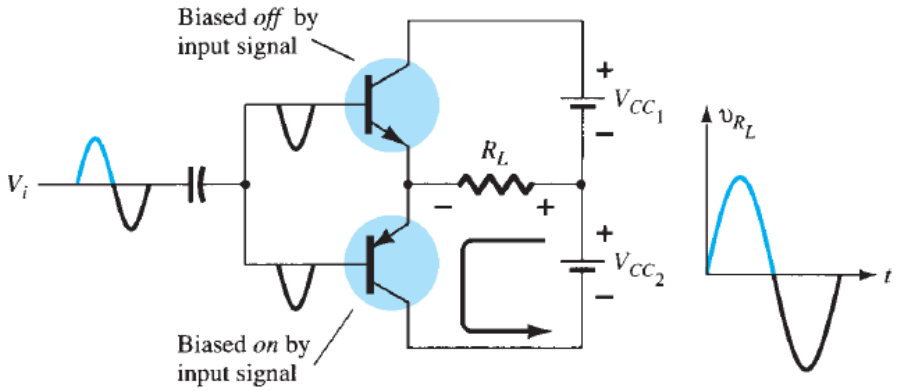
$$P_Q = P_{iDC} - P_{oAC}$$

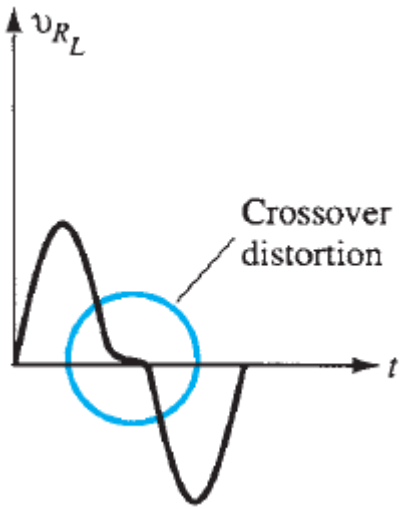
$$P_Q = 9{,}6\ \text{W} - 0{,}625\ \text{W} = 8{,}975\ \text{W}$$

Amplificador Classe B

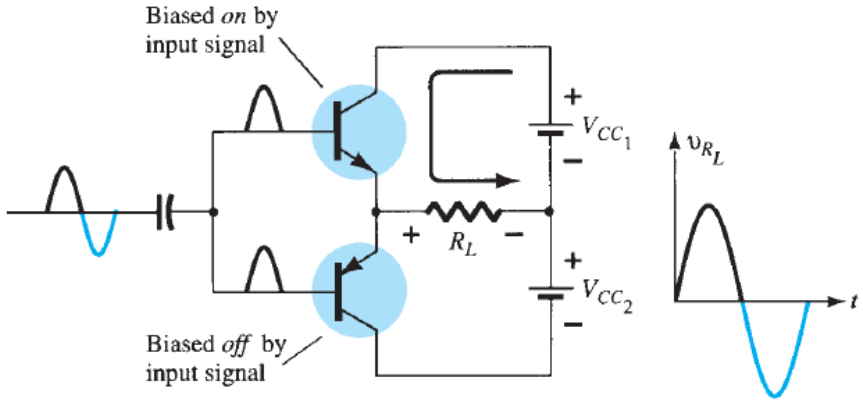
- Cada elemento é responsável por amplificar 180° do sinal de entrada. Um ciclo completo pode ser amplificado através de uma configuração *push-pull*. Gera distorções no sinal de saída (crossover). Ganho de tensão unitário.

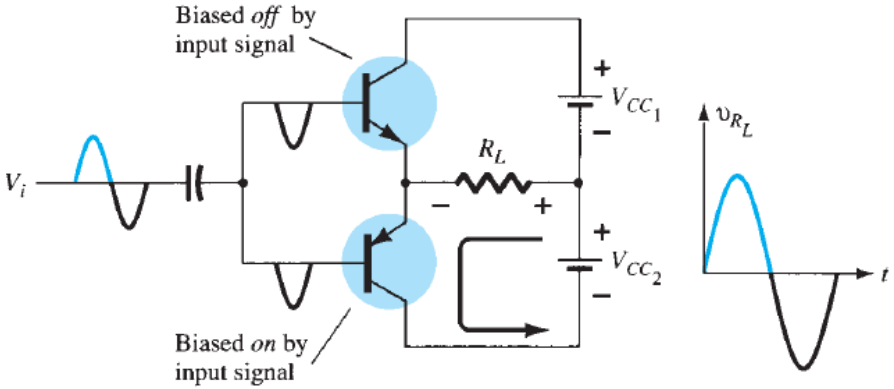






Potências de entrada e saída





Potência de Entrada

A corrente drenada de uma das fontes em um semi-ciclo é: $I_{dc} = \dfrac{2I_{L(\mathrm{p})}}{\pi}$

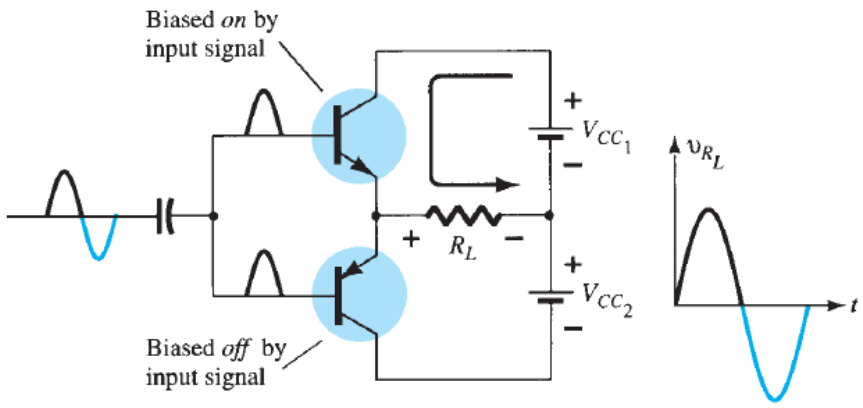
$$P_{iDC} = V_{CC}\left(\frac{2I_{L(\mathrm{p})}}{\pi}\right)$$

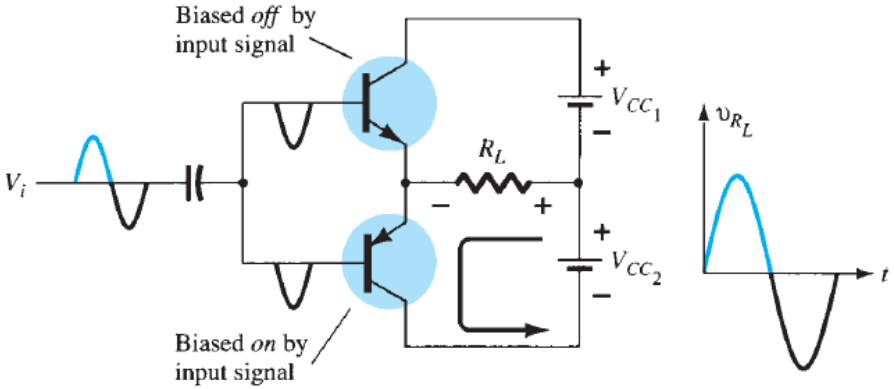
Potência de Saída

Utilizando sinais de pico.

$$P_{oAC} = \frac{V_{L(\mathrm{p})}I_{L(\mathrm{p})}}{2} = \frac{{I_{L(\mathrm{p})}}^2 R_L}{2} = \frac{{V_{L(\mathrm{p})}}^2}{2R_L}$$

Eficiência





Potência de Entrada

$$P_{iDC} = V_{CC}\left(\frac{2I_{L(\mathrm{p})}}{\pi}\right)$$

Potência de Saída

$$P_{oAC} = \frac{V_{L(\mathrm{p})}I_{L(\mathrm{p})}}{2} = \frac{{I_{L(\mathrm{p})}}^2 R_L}{2} = \frac{{V_{L(\mathrm{p})}}^2}{2R_L}$$

Eficiência

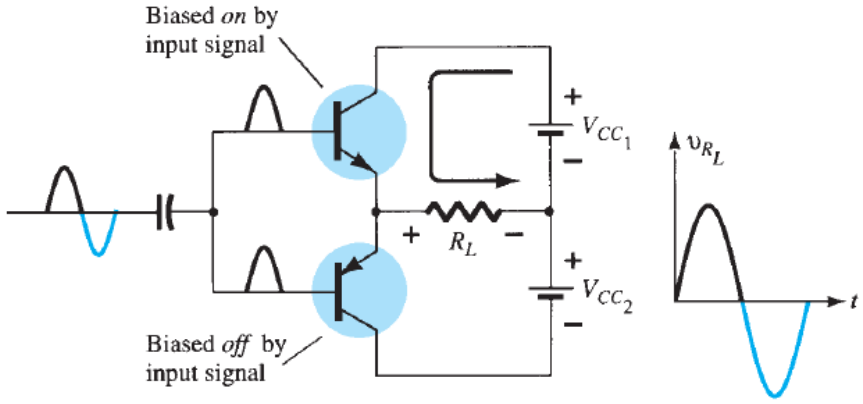
$$\eta = \frac{P_{oAC}}{P_{iDC}} \times 100\% = \frac{{V_{L(\mathrm{p})}}^2/2R_L}{V_{CC}\left[\left(2I_{L(\mathrm{p})}\right)/\pi\right]} \times 100\% = \frac{\pi}{4}\frac{V_{L(\mathrm{p})}}{V_{CC}} \times 100\%$$

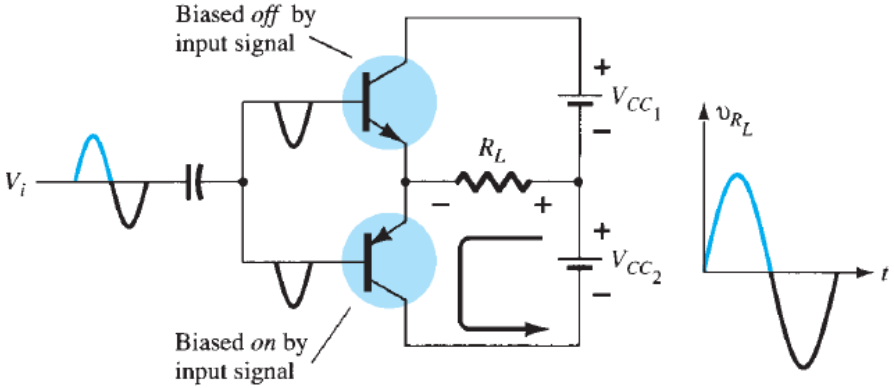
Eficiência Máxima

Adotando: $V_{L(\mathrm{p})} = V_{CC}$

$$\eta = \frac{\pi}{4}\frac{V_{L(\mathrm{p})}}{V_{CC}} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78{,}5\%$$

Potência dissipada pelo transistor de saída



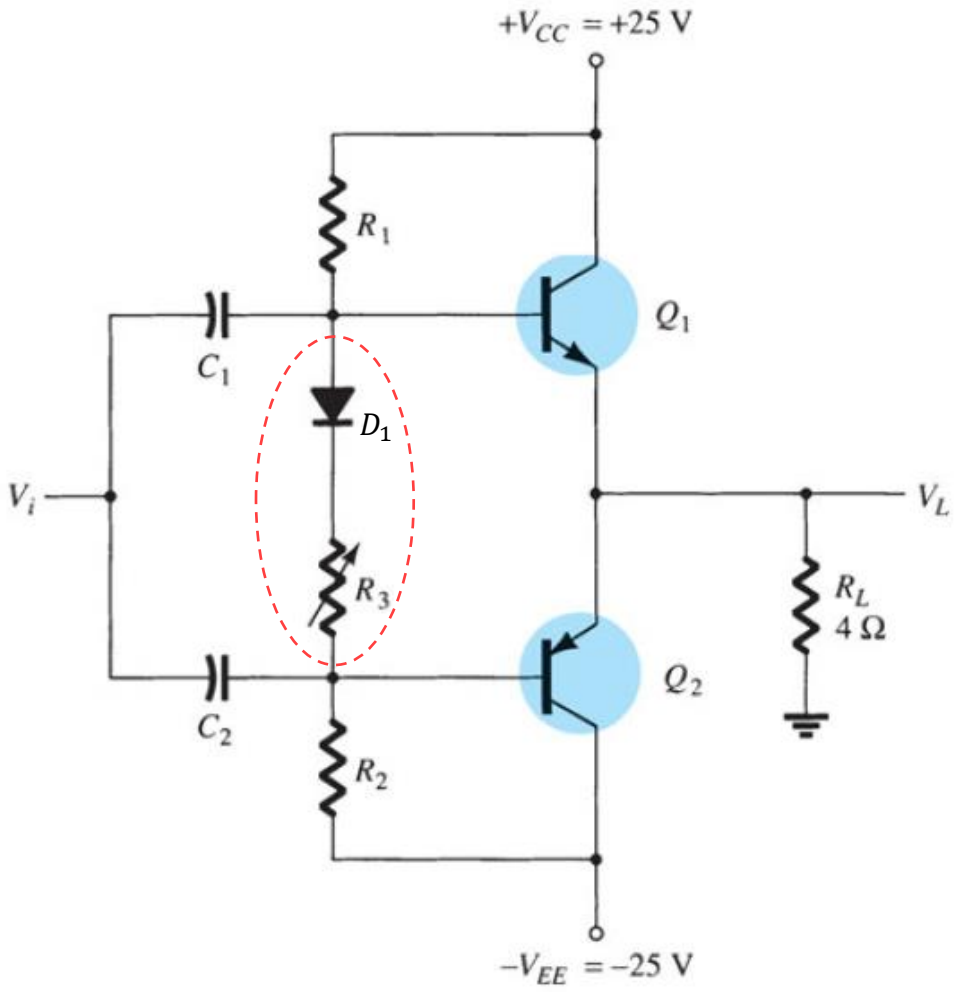


Potência Dissipada

$$P_Q = \frac{P_{iDC} - P_{oAC}}{2}$$

Amplificador Classe AB

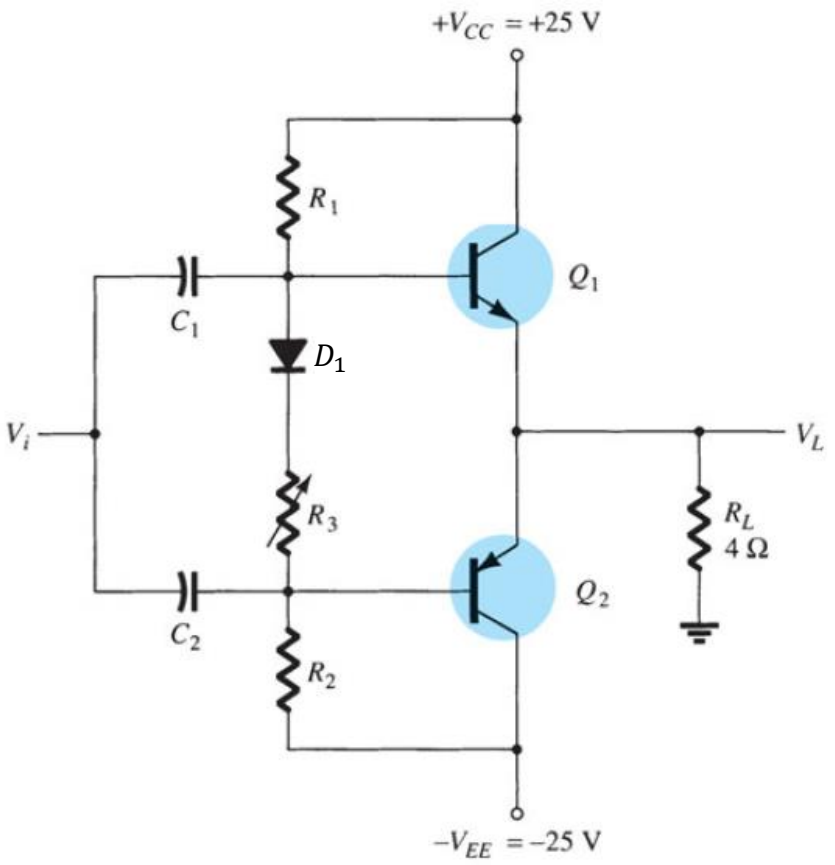
❑ Apresenta características das classes A e B



- ❑ Um circuito de polarização da base dos transistores permite diminuir, ou eliminar, o crossover.
- ❑ Porém, com os transistores sempre polarizados na região ativa aumenta o consumo de energia e diminui a eficiência.

Amplificador Classe AB

- Exemplo: Para o circuito abaixo, calcular a potência de entrada, potência de saída, potência dissipada por cada transistor e a eficiência do circuito para uma entrada de 12 V rms.



Tensão de pico na entrada:

$$V_i(\text{p}) = \sqrt{2}\, V_i\,(\text{rms}) = \sqrt{2}\,(12\text{ V}) = 16.97\text{ V} \approx 17\text{ V}$$

Configuração emissor-comum, ganho de tensão unitário:

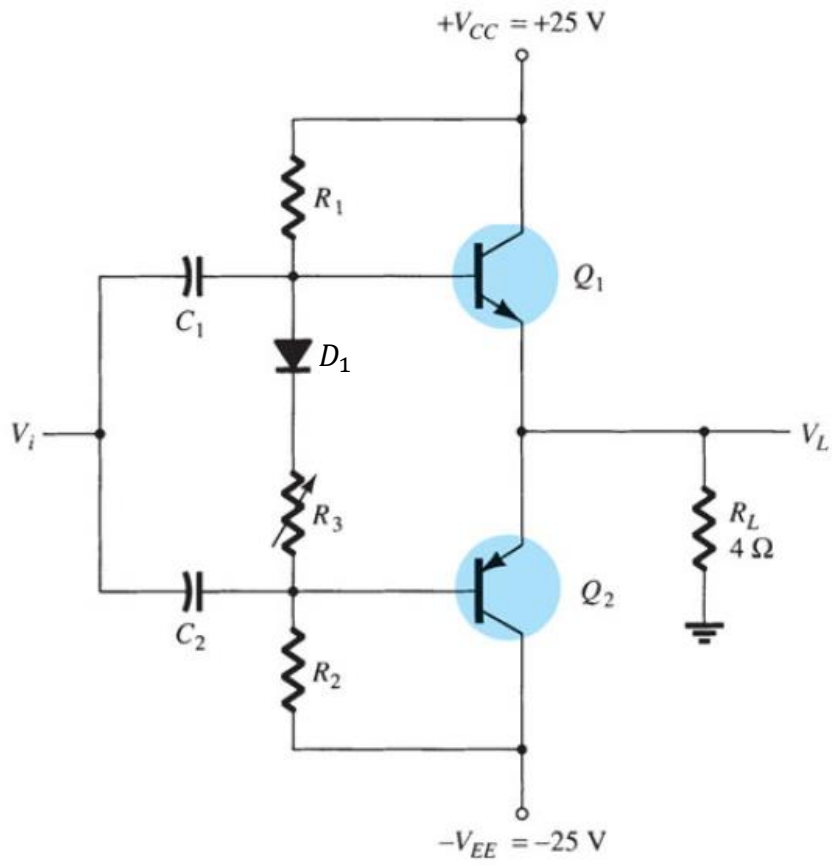
$$V_L(\text{p}) = 17\text{ V}$$

Potência de Saída

$$P_{oAC} = \frac{{V_{L(\text{p})}}^2}{2R_L} = \frac{17\text{ V}^2}{2 \times 4\ \Omega} = 36{,}125\text{ W}$$

Amplificador Classe AB

- Exemplo: Para o circuito abaixo, calcular a potência de entrada, potência de saída, potência dissipada por cada transistor e a eficiência do circuito para uma entrada de 12 V rms.



Corrente de pico na carga:

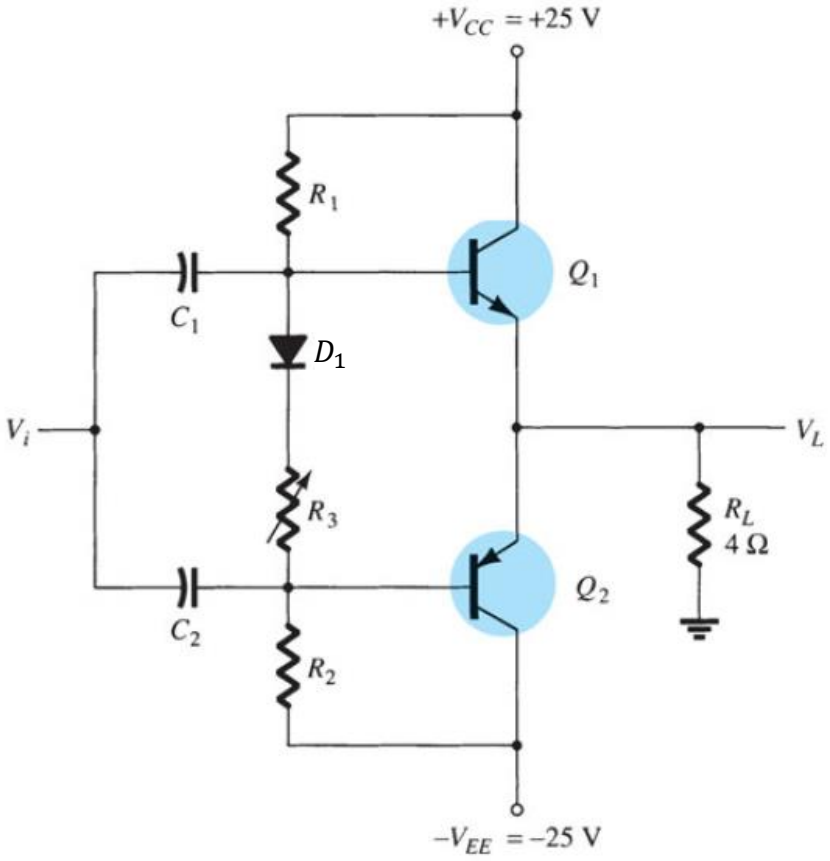
$$I_L(\mathrm{p}) = \frac{V_L(\mathrm{p})}{R_L} = \frac{17\ \mathrm{V}}{4\ \Omega} = 4.25\ \mathrm{A}$$

Potência de Entrada

$$P_{iDC} = V_{CC}\left(\frac{2I_{L(\mathrm{p})}}{\pi}\right) = 25\ \mathrm{V}\left(\frac{2 \times 4{,}25\ \mathrm{A}}{\pi}\right) = 67{,}75\ \mathrm{W}$$

Amplificador Classe AB

- Exemplo: Para o circuito abaixo, calcular a potência de entrada, potência de saída, potência dissipada por cada transistor e a eficiência do circuito para uma entrada de 12 V rms.



Potência Dissipada por Cada Transistor

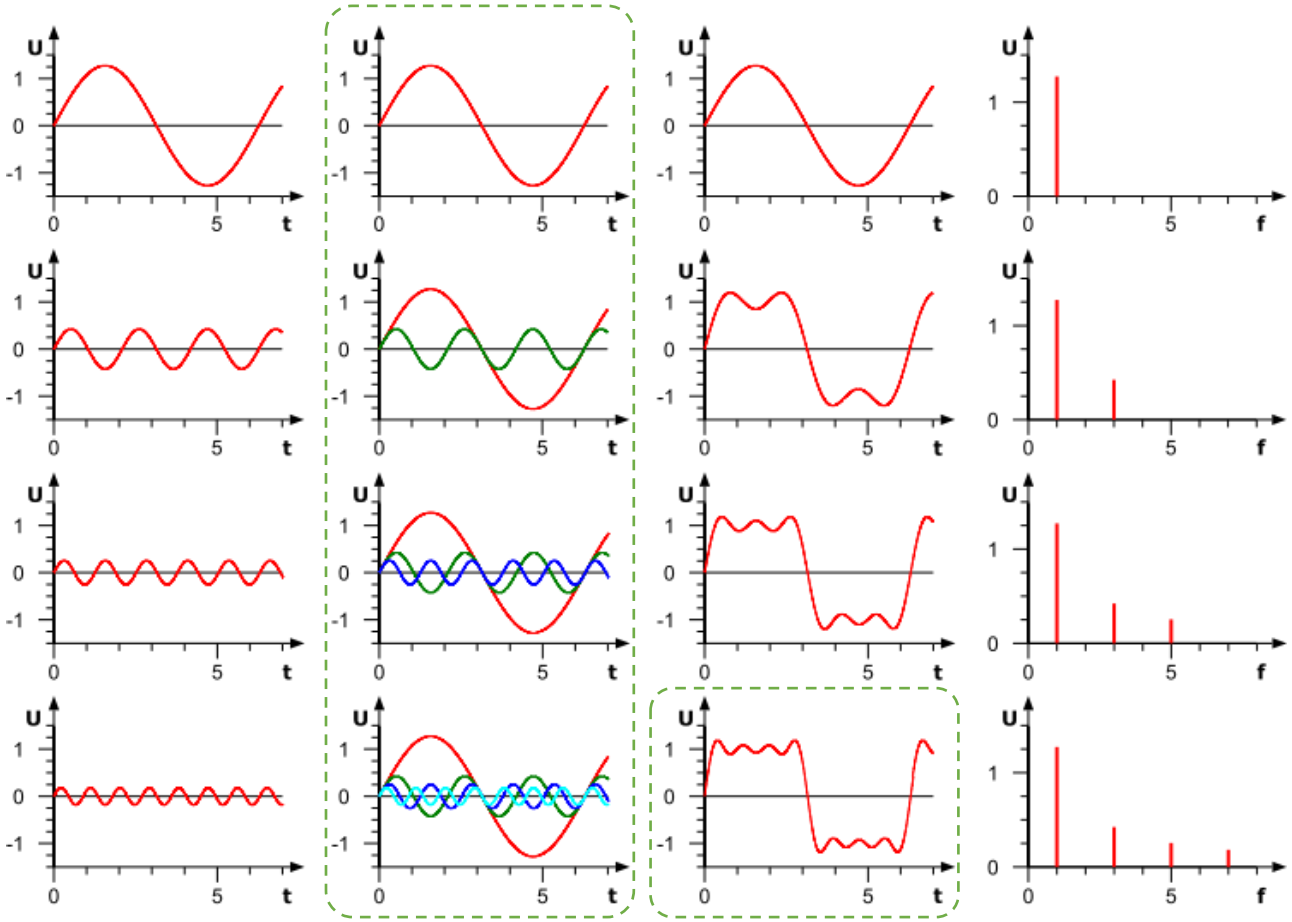
$$P_Q = \frac{P_{iDC} - P_{oAC}}{2} = \frac{67{,}75\ \text{W} - 36{,}125\ \text{W}}{2} = 15{,}8\ \text{W}$$

Eficiência

$$\eta = \frac{\pi}{4}\frac{V_{L(\text{p})}}{V_{CC}} \times 100\% = \frac{\pi}{4}\frac{17\ \text{V}}{25\ \text{V}} \times 100\% = 53{,}4\%$$

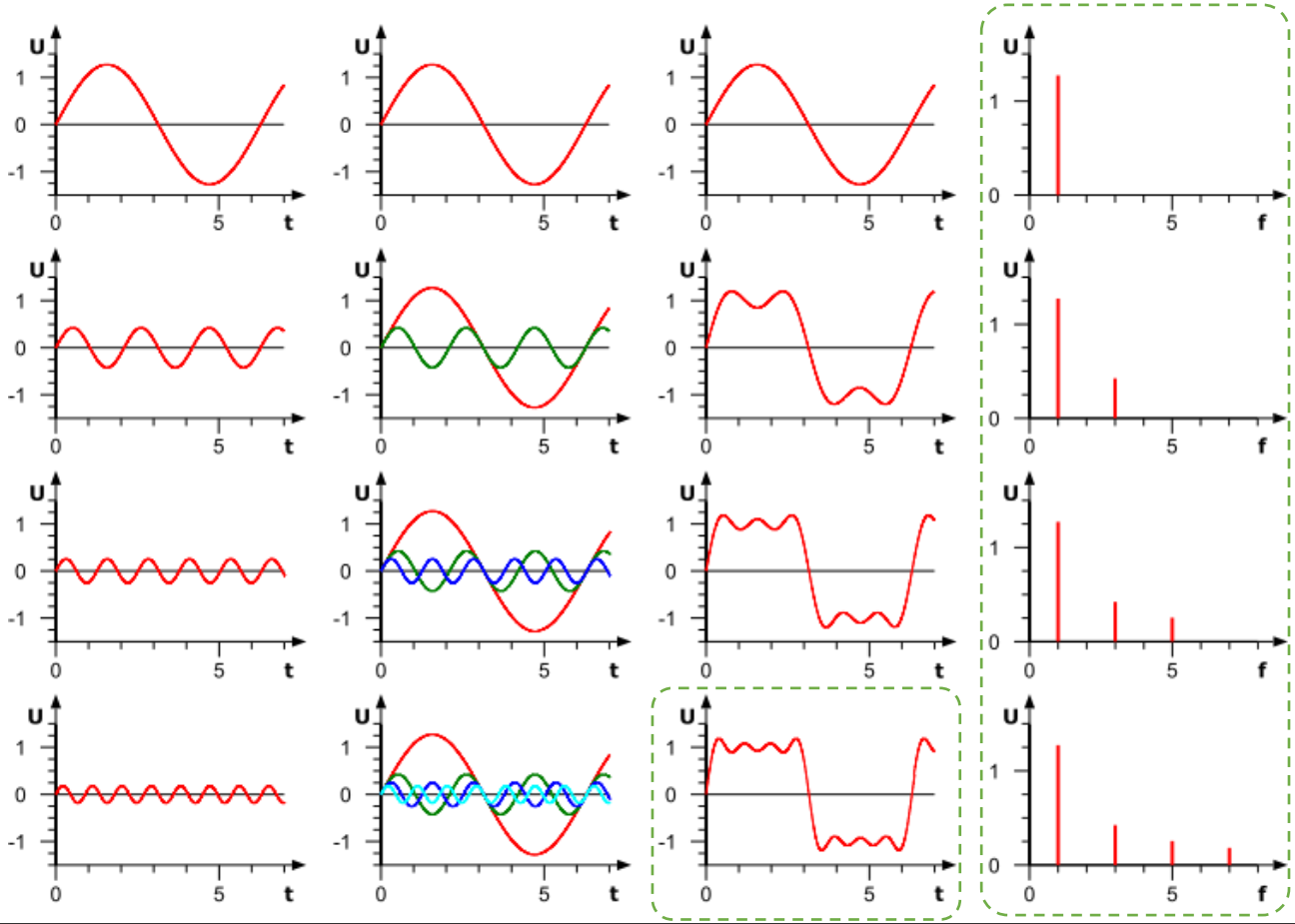
Distorção Harmônica Total (THD)

- Um sinal periódico qualquer pode ser representado por uma somatória de senoides.



Distorção Harmônica Total (THD)

- Através da análise de Fourier é possível obter as amplitudes do componente fundamental e dos harmônicos que constituem determinado sinal.



Componente fundamental

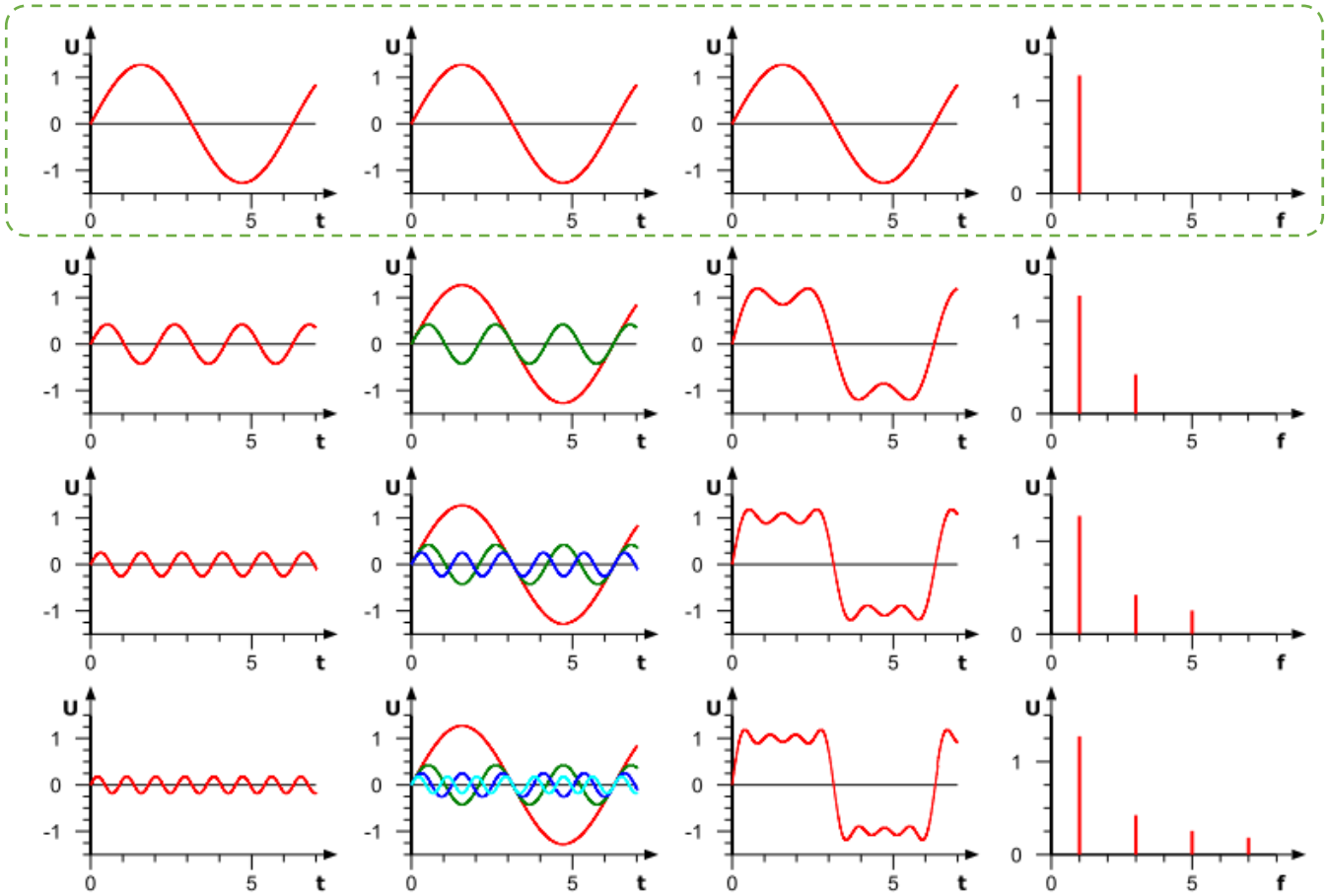
Terceiro harmônico

Quinto harmônico

Sétimo harmônico

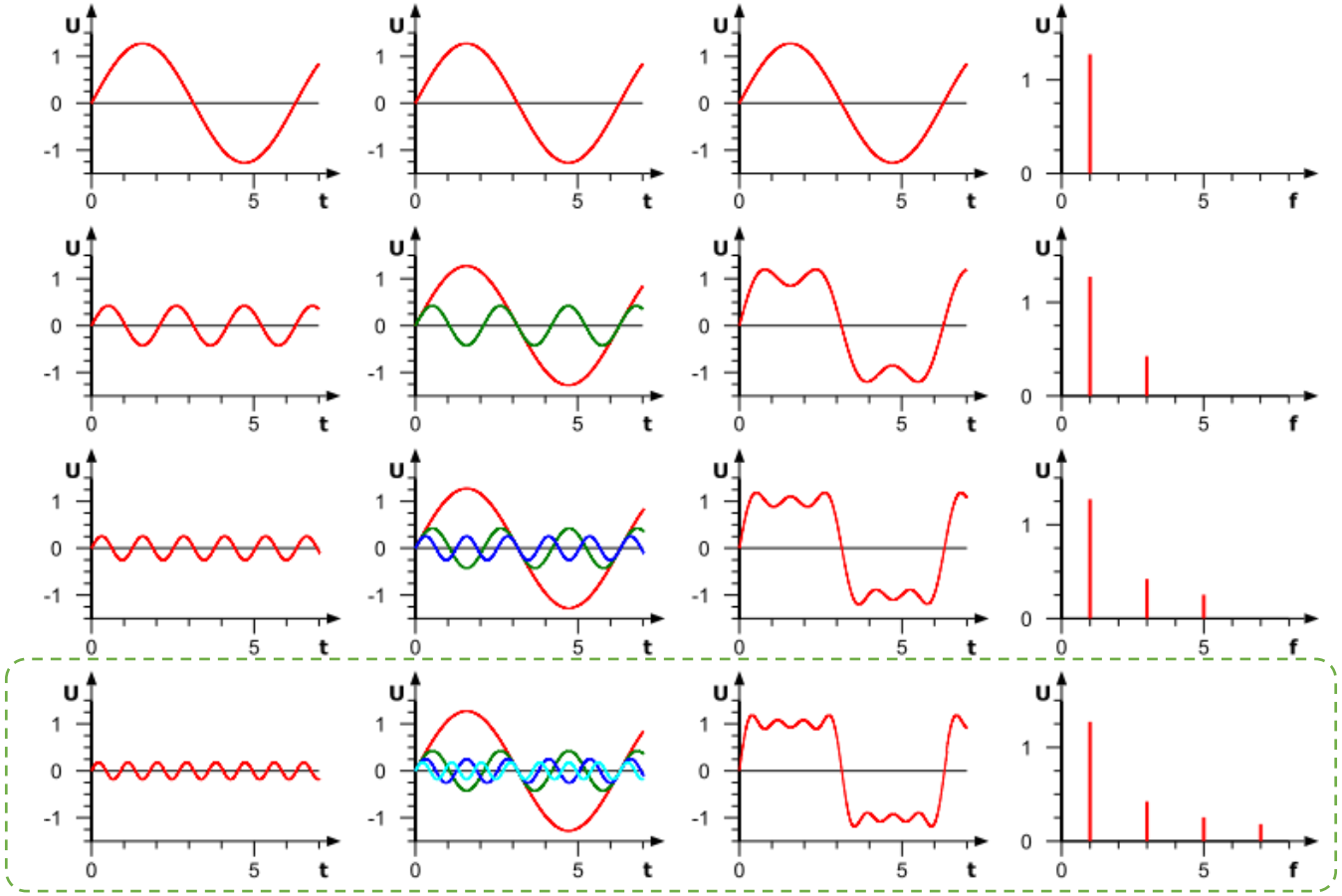
Distorção Harmônica Total (THD)

- Se o sinal senoidal não possui distorções, ou seja, é uma senoide pura, ele é formado apenas pelo componente fundamental.



Distorção Harmônica Total (THD)

- Quando o sinal apresenta distorção, ou seja, não é uma senoide pura, ele apresentará componentes harmônicos com amplitudes não nulas.



Distorção Harmônica Total (THD)

- O THD mede o quanto o sinal de saída está distorcido em relação ao sinal de entrada, ou seja, o quanto a senoide de saída está distorcida em relação a uma senoide pura.

% n-ésima distorção harmônica: $$\%D_\eta = \frac{|A_\eta|}{|A_1|} \times 100\%$$

$$\%THD = \sqrt{{D_2}^2 + {D_3}^2 + {D_4}^2 + \cdots + {D_\eta}^2} \times 100\%$$

Distorção Harmônica Total (THD)

- Exemplo: Calcular o THD para um sinal de saída com as seguintes amplitudes: 2,5 V; 0,25 V; 0,1 V; 0,05 V, correspondentes ao componente fundamental, segundo, terceiro e quarto harmônicos, respectivamente.

$$\%D_2 = \frac{0{,}25\ \mathrm{V}}{2{,}5\ \mathrm{V}} \times 100\% = 10\%$$

$$\%D_3 = \frac{0{,}10\ \mathrm{V}}{2{,}5\ \mathrm{V}} \times 100\% = 4\%$$

$$\%D_4 = \frac{0{,}05\ \mathrm{V}}{2{,}5\ \mathrm{V}} \times 100\% = 2\%$$

$$\%THD = \sqrt{0{,}10^2 + 0{,}04^2 + 0{,}02^2} \times 100\% = 10{,}95\%$$

Referências Bibliográficas

- Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos”, 6 ed., Rio de Janeiro, LTC (1998).
- Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis “Electronic Devices and Circuit Theory”, 11 ed., Boston, Pearson (2013).
- C. K. Alexander, e M. N. O. Sadiku, “Fundamentos de Circuitos Elétricos”, 5 ed., Porto Alegre, AMGH (2013).