

Amplificadores de Potência

Prof. Carlos Fernando Teodósio Soares

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

Departamento de Engenharia Eletrônica e de Computação

Agenda da Aula - Capítulo 12

- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Agenda da Aula - Capítulo 12

- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Amplificadores de Potência

Amplificadores de Potência

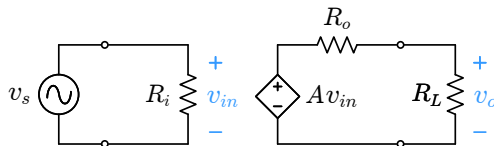
São chamados **Amplificadores de Potência** aqueles amplificadores cuja função é entregar uma grande quantidade de potência elétrica para a carga. Por essa razão, seus principais requisitos são: Baixa Resistência de Saída e Alta Eficiência.

Amplificadores de Potência

Amplificadores de Potência

São chamados **Amplificadores de Potência** aqueles amplificadores cuja função é entregar uma grande quantidade de potência elétrica para a carga. Por essa razão, seus principais requisitos são: Baixa Resistência de Saída e Alta Eficiência.

- **Baixa Resistência de Saída:** Se a carga consome muita potência, a resistência de carga R_L deve ser pequena. Dessa forma, para minimizar a redução no ganho de tensão, devemos garantir que o amplificador seja tal que $R_O \ll R_L$.



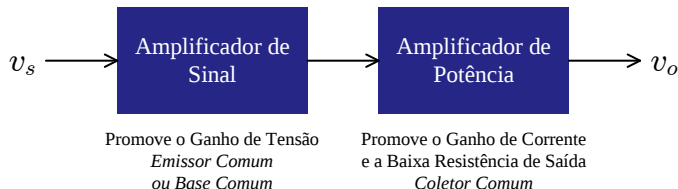
$$v_o = \frac{R_L}{R_o + R_L} \cdot A \cdot v_s$$

Amplificadores de Potência

Amplificadores de Potência

São chamados **Amplificadores de Potência** aqueles amplificadores cuja função é entregar uma grande quantidade de potência elétrica para a carga. Por essa razão, seus principais requisitos são: Baixa Resistência de Saída e Alta Eficiência.

- **Baixa Resistência de Saída:** Se a carga consome muita potência, a resistência de carga R_L deve ser pequena. Dessa forma, para minimizar a redução no ganho de tensão, devemos garantir que o amplificador seja tal que $R_O \ll R_L$.



Amplificadores de Potência

Amplificadores de Potência

São chamados **Amplificadores de Potência** aqueles amplificadores cuja função é entregar uma grande quantidade de potência elétrica para a carga. Por essa razão, seus principais requisitos são: Baixa Resistência de Saída e Alta Eficiência.

- **Alta Eficiência:** Como é necessário entregar muita potência para a carga, o Amplificador de Potência deve apresentar elevada eficiência para minimizar as perdas no transistor.

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}}$$

Onde:

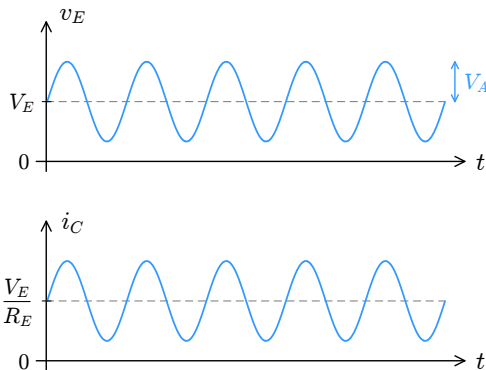
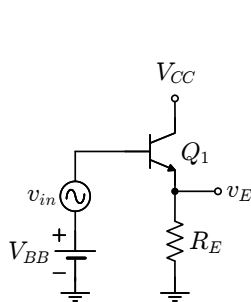
- $P_L \rightarrow$ Potência média de sinal consumida pela carga R_L .
- $P_{V_{CC}} \rightarrow$ Potência Média entregue pela fonte de alimentação V_{CC} .

Agenda da Aula - Capítulo 12

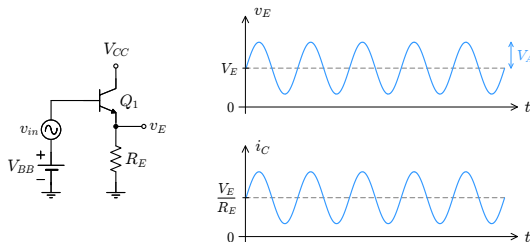
- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Amplificadores Classe A

Amplificadores Classe A são aqueles em que o transistor conduz corrente elétrica durante todo o ciclo da senoide de entrada. Os amplificadores de sinal são usualmente polarizados em Classe A.



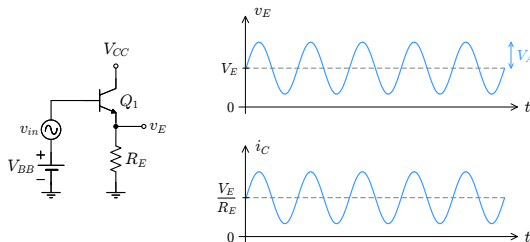
Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



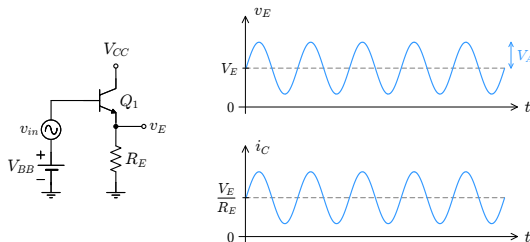
$$v_E(t) = V_E + V_A \text{sen}(\omega t)$$

$$\begin{aligned} i_C(t) &\approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ &\approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t) \end{aligned}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T [V_A \text{sen}(\omega t)] \cdot \left[\frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t) \right] dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \text{sen}(\omega t)$$

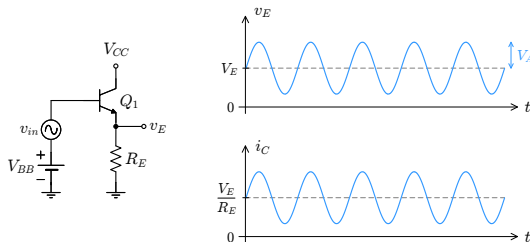
$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t)$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T [V_A \text{sen}(\omega t)] \cdot \left[\frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t) \right] dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \text{sen}^2(\omega t) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \text{sen}(\omega t)$$

$$\begin{aligned} i_C(t) &\approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ &\approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t) \end{aligned}$$

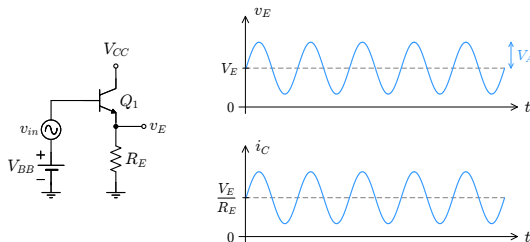
- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T [V_A \text{sen}(\omega t)] \cdot \left[\frac{V_A}{R_E} \text{sen}(\omega t) \right] dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \text{sen}^2(\omega t) dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



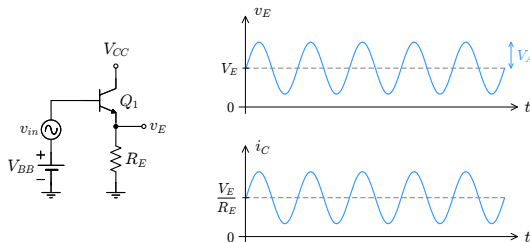
$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



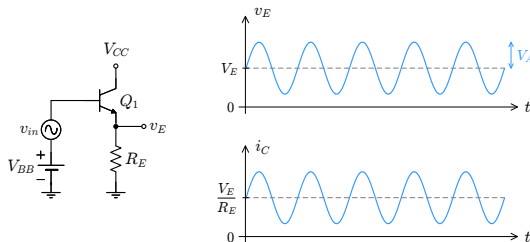
$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt \\ P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \cdot \frac{T}{2} - 0$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

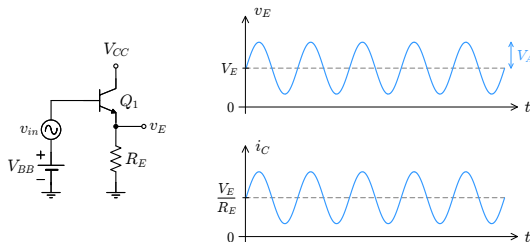
- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \cdot \frac{T}{2} - 0$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{2 R_E}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



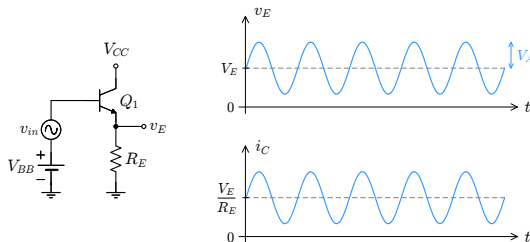
$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$\begin{aligned} i_C(t) &\approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ &\approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \end{aligned}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \left[\frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \right] dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

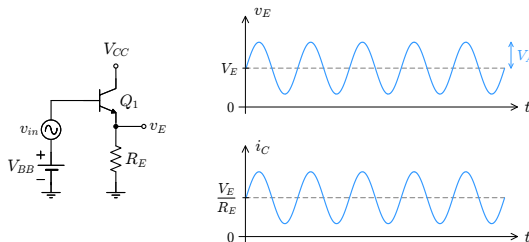
$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \left[\frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \right] dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_{CC} V_E}{R_E} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_{CC} V_A}{R_E} \sin(\omega t) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

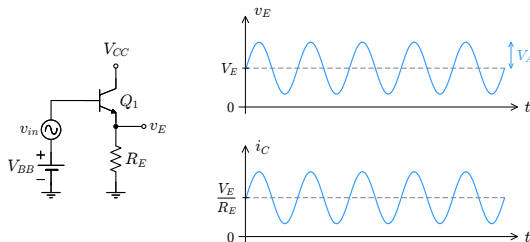
- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \left[\frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \right] dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_{CC} V_E}{R_E} dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_{CC} V_A}{R_E} \sin(\omega t) dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_E}{T \cdot R_E} \int_0^T dt + \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \int_0^T \sin(\omega t) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



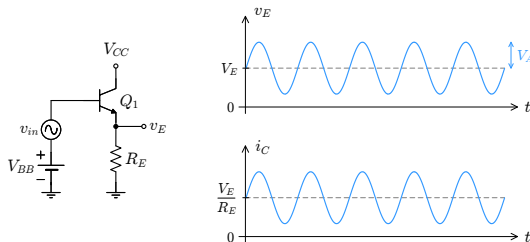
$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$\begin{aligned} i_C(t) &\approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ &\approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \end{aligned}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_E}{T \cdot R_E} \cdot T + 0$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

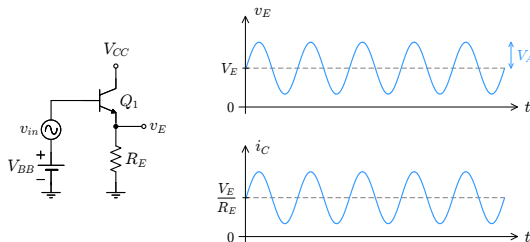
$$\begin{aligned} i_C(t) &\approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ &\approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t) \end{aligned}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_E}{T \cdot R_E} \cdot T + 0$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_E}{R_E}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



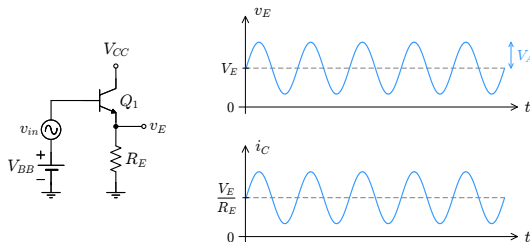
$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_C(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

- A eficiência do Amplificador Classe A é dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}} = \frac{\frac{V_A^2}{2 R_E}}{\frac{V_{CC} V_E}{R_E}} = \frac{V_A^2}{2 V_{CC} V_E}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe A



$$v_E(t) = V_E + V_A \sin(\omega t)$$

$$i_E(t) \approx \frac{v_E(t)}{R_E} \\ \approx \frac{V_E}{R_E} + \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t)$$

- A eficiência do Amplificador Classe A é dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}} = \frac{\frac{V_A^2}{2 R_E}}{\frac{V_{CC} V_E}{R_E}} = \frac{V_A^2}{2 V_{CC} V_E}$$

- Quando temos a máxima amplitude possível de sinal na saída, a eficiência é máxima:

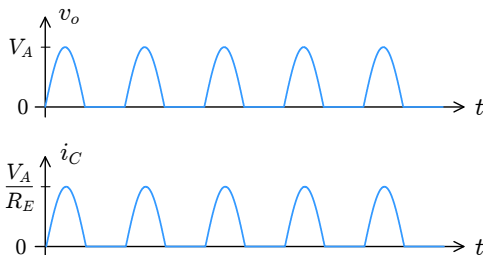
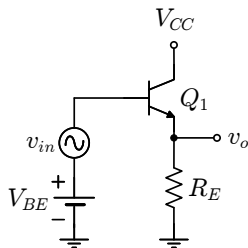
$$\eta_{\text{máx}} = \frac{V_A^2}{2 V_{CC} V_E} = \frac{\left(\frac{V_{CC}}{2}\right)^2}{2 V_{CC} \left(\frac{V_{CC}}{2}\right)} = \frac{1}{4} = 25\%$$

Agenda da Aula - Capítulo 12

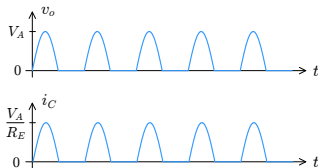
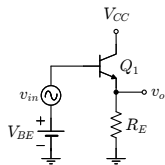
- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Amplificadores Classe B

Amplificadores Classe B são aqueles em que o transistor conduz corrente elétrica apenas durante metade do ciclo da senoide de entrada. Na outra metade, o transistor estará em corte.



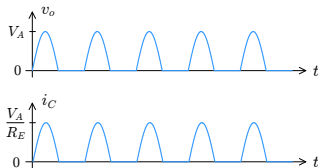
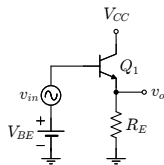
Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



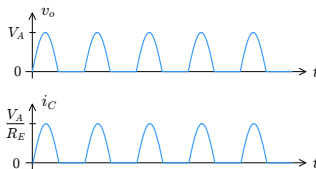
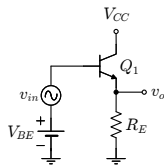
$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) \cdot \frac{v_o(t)}{R_E} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

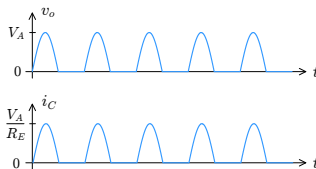
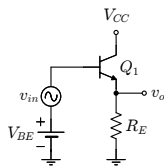
$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) \cdot \frac{v_o(t)}{R_E} dt$$

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_A^2 \sin^2(\omega t)}{R_E} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

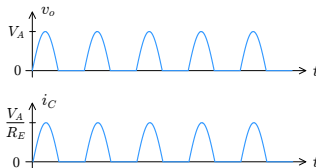
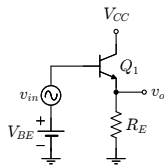
- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) \cdot \frac{v_o(t)}{R_E} dt$$

$$P_L = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_A^2 \sin^2(\omega t)}{R_E} dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



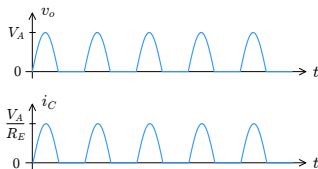
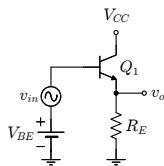
$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

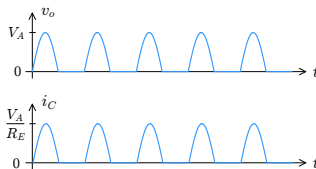
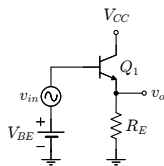
$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \cdot \frac{T}{4} - 0$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

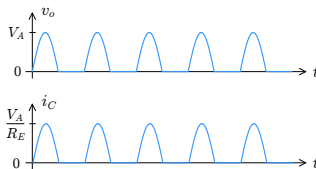
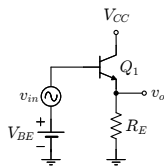
- Potência média de sinal na carga R_E :

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \cdot \frac{T}{4} - 0$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{4 R_E}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média de sinal na carga R_E :

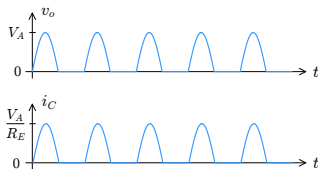
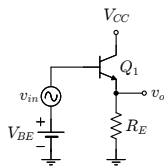
$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{1}{2} dt - \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{T \cdot R_E} \cdot \frac{T}{4} - 0$$

$$P_L = \frac{V_A^2}{4 R_E}$$

OBSERVAÇÃO: Como esperado, a potência média de sinal entregue pelo Amplificador em Classe B para a carga R_E é exatamente igual à metade da potência média que o Amplificador em Classe A entrega para a carga.

Eficiência dos Amplificadores Classe B



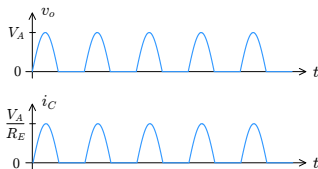
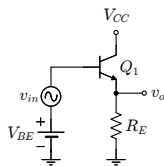
$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

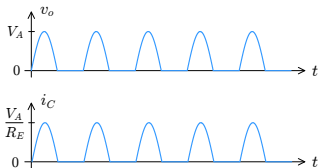
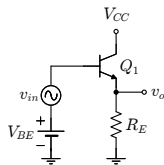
$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{CC} \cdot \frac{V_A \sin(\omega t)}{R_E} dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

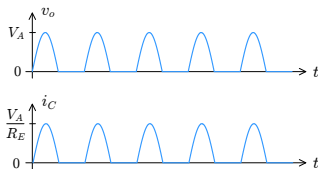
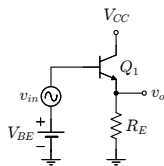
- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{CC} \cdot \frac{V_A \sin(\omega t)}{R_E} dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

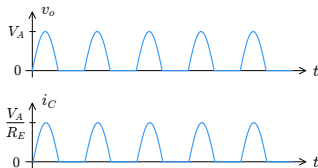
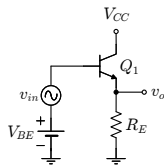
$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{CC} \cdot i_C(t) dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{CC} \cdot \frac{V_A \sin(\omega t)}{R_E} dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin(\omega t) dt$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \int_0^{\frac{T}{2}} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



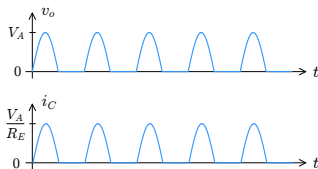
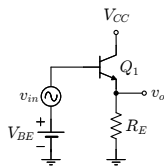
$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

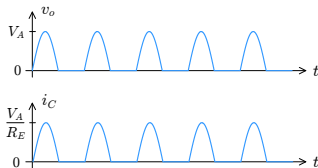
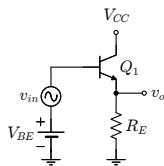
$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos(\pi) + \frac{T}{2\pi} \cos(0) \right]$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

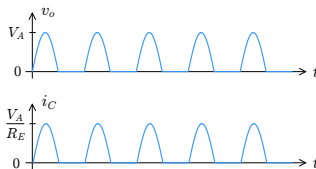
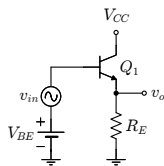
- Potência média entregue pela fonte V_{CC} :

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right]_0^{\frac{T}{2}}$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{T \cdot R_E} \cdot \left[-\frac{T}{2\pi} \cos(\pi) + \frac{T}{2\pi} \cos(0) \right]$$

$$P_{V_{CC}} = \frac{V_{CC} V_A}{\pi R_E}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



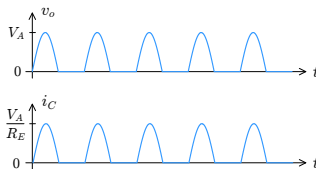
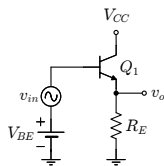
$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- A eficiência do Amplificador Classe B é dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}} = \frac{\frac{V_A^2}{4 R_E}}{\frac{V_{CC} V_A}{\pi R_E}} = \frac{\pi V_A}{4 V_{CC}}$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

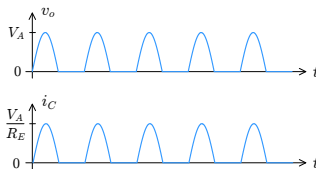
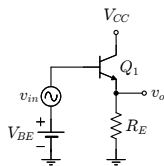
- A eficiência do Amplificador Classe B é dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}} = \frac{\frac{V_A^2}{4 R_E}}{\frac{V_{CC} V_A}{\pi R_E}} = \frac{\pi V_A}{4 V_{CC}}$$

- Quando temos a máxima amplitude possível de sinal na saída, a eficiência é máxima:

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{\pi V_{CC}}{4 V_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 78,5\%$$

Eficiência dos Amplificadores Classe B



$$v_o(t) = \begin{cases} V_A \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

$$i_C(t) \approx \begin{cases} \frac{V_A}{R_E} \sin(\omega t), & 0 < t < \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} < t < T \end{cases}$$

- A eficiência do Amplificador Classe B é dada por:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{V_{CC}}} = \frac{\frac{V_A^2}{4 R_E}}{\frac{V_{CC} V_A}{\pi R_E}} = \frac{\pi V_A}{4 V_{CC}}$$

- Quando temos a máxima amplitude possível de sinal na saída, a eficiência é máxima:

$$\eta_{\text{máx}} = \frac{\pi V_{CC}}{4 V_{CC}} = \frac{\pi}{4} = 78,5\%$$

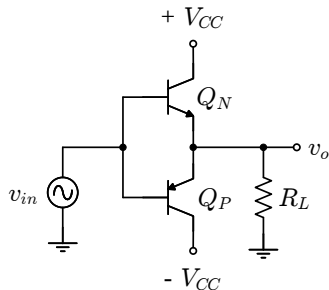
OBSERVAÇÃO: Essa eficiência é significativamente maior que os 25% obtidos para o Amplificador Classe A. Entretanto, o Amplificador Classe B só amplifica metade do ciclo do sinal aplicado à entrada.

Agenda da Aula - Capítulo 12

- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

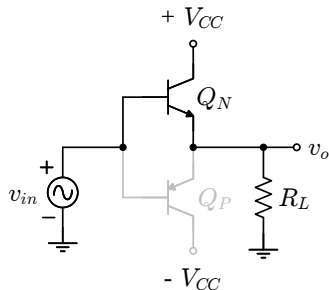
Amplificador Push-Pull

Para conseguir amplificar as duas metades do sinal de entrada com alta eficiência, adota-se o circuito conhecido como **Amplificador Push-Pull**. Nesse circuito, temos dois Amplificadores Classe B operando alternadamente para amplificar ambos os ciclos do sinal de entrada.



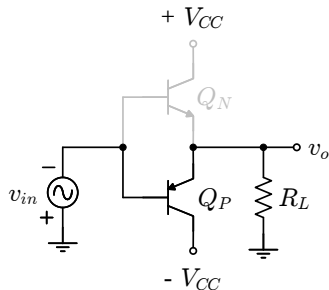
Amplificador Push-Pull

Para conseguir amplificar as duas metades do sinal de entrada com alta eficiência, adota-se o circuito conhecido como **Amplificador Push-Pull**. Nesse circuito, temos dois Amplificadores Classe B operando alternadamente para amplificar ambos os ciclos do sinal de entrada.



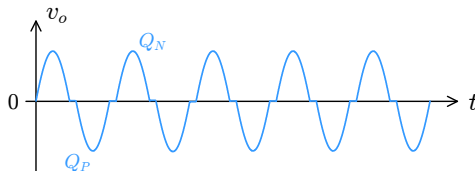
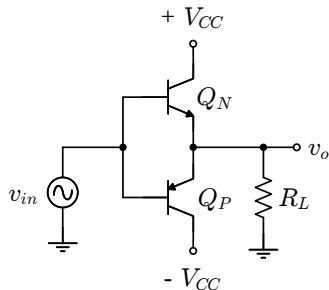
Amplificador Push-Pull

Para conseguir amplificar as duas metades do sinal de entrada com alta eficiência, adota-se o circuito conhecido como **Amplificador Push-Pull**. Nesse circuito, temos dois Amplificadores Classe B operando alternadamente para amplificar ambos os ciclos do sinal de entrada.



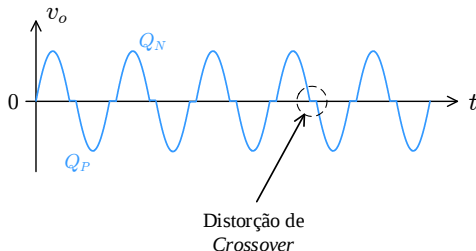
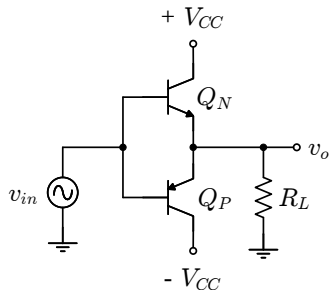
Amplificador Push-Pull

Para conseguir amplificar as duas metades do sinal de entrada com alta eficiência, adota-se o circuito conhecido como **Amplificador Push-Pull**. Nesse circuito, temos dois Amplificadores Classe B operando alternadamente para amplificar ambos os ciclos do sinal de entrada.



Amplificador Push-Pull

Para conseguir amplificar as duas metades do sinal de entrada com alta eficiência, adota-se o circuito conhecido como **Amplificador Push-Pull**. Nesse circuito, temos dois Amplificadores Classe B operando alternadamente para amplificar ambos os ciclos do sinal de entrada.



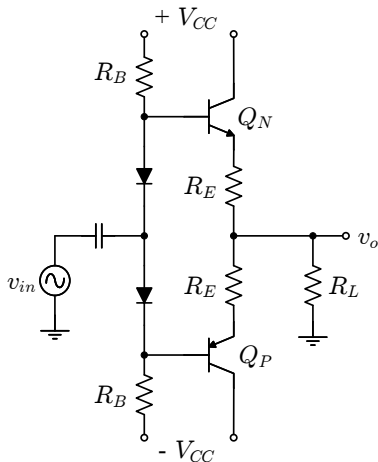
Como a junção base-emissor do transistor bipolar necessita de uma tensão de pelo menos 0,6 V para entrar em condução, então, sempre que o sinal de entrada v_{in} cruzar o nível zero de tensão, haverá um pequeno intervalo de tempo em que ambos os transistores do amplificador estarão cortados.

Agenda da Aula - Capítulo 12

- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Amplificador Push-Pull Classe AB

Para resolver o problema da *Distorção de Crossover*, emprega-se um Amplificador Push-Pull Classe AB, onde os transistores são polarizados de modo a conduzirem durante um intervalo ligeiramente maior que a metade do ciclo do sinal.

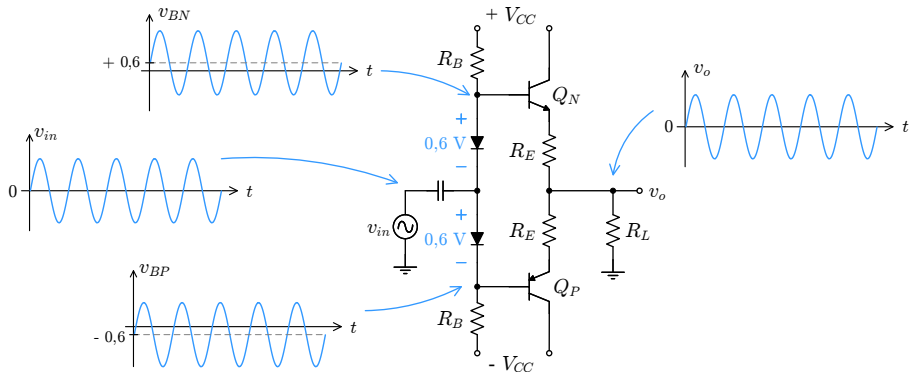


Amplificador Push-Pull

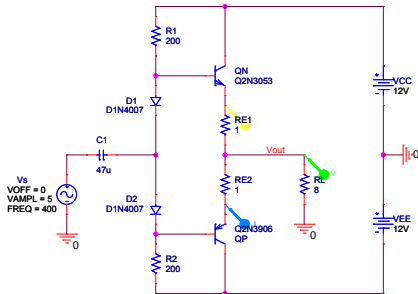
- Os resistores R_B garantem que os diodos de polarização estarão conduzindo corrente elétrica entre as fontes de alimentação $+V_{CC}$ e $-V_{CC}$. Assim, garante-se que ambos os diodos exibam uma tensão de condução direta de aproximadamente 0,6 V.
- As tensões nos diodos polarizam as junções base-emissor dos transistores bipolares de modo a deixar ambos praticamente em condução quando $v_{in} = 0$.
- Os resistores R_E servem para limitar a corrente em Q_N e Q_P quando ambos estiverem em condução, garantindo a estabilidade térmica.

Amplificador Push-Pull Classe AB

Para resolver o problema da *Distorção de Crossover*, emprega-se um Amplificador Push-Pull Classe AB, onde os transistores são polarizados de modo a conduzirem durante um intervalo ligeiramente maior que a metade do ciclo do sinal.

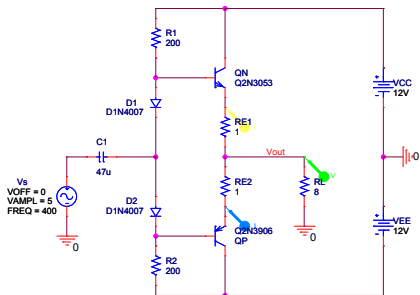


Simulação do Amplificador Push-Pull

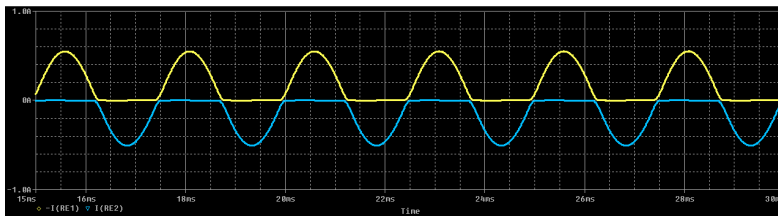


- O Amplificador Push-Pull ao lado alimenta uma carga $R_L = 8,0 \Omega$ (impedância típica de um alto-falante).

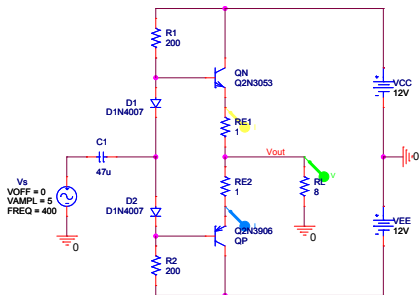
Simulação do Amplificador Push-Pull



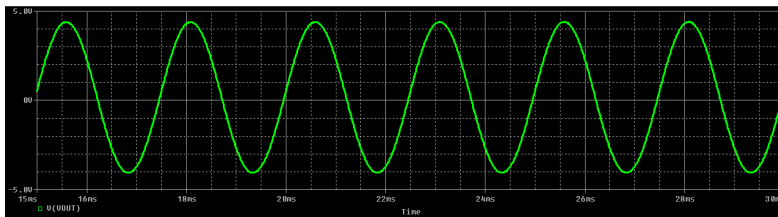
- O Amplificador Push-Pull ao lado alimenta uma carga $R_L = 8,0 \, \Omega$ (impedância típica de um alto-falante).
- Aplicando um sinal de entrada v_s com amplitude de 5,0 V, verifica-se que os transistores do circuito Push-Pull operam alternadamente.



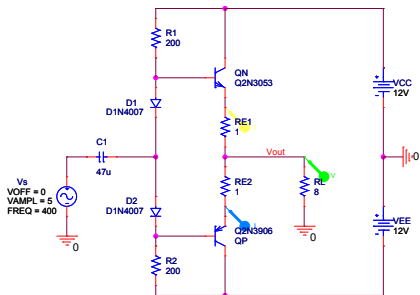
Simulação do Amplificador Push-Pull



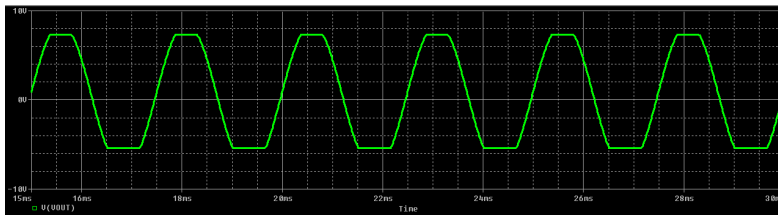
- O Amplificador Push-Pull ao lado alimenta uma carga $R_L = 8,0 \Omega$ (impedância típica de um alto-falante).
- Aplicando um sinal de entrada v_s com amplitude de 5,0 V, verifica-se que os transistores do circuito Push-Pull operam alternadamente.
- A polarização em Classe AB faz com que o sinal na saída v_o não apresente distorção de *crossover*.



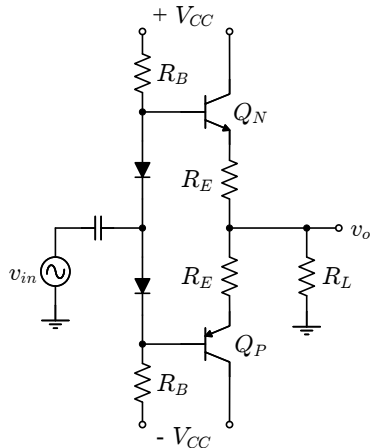
Simulação do Amplificador Push-Pull



- O Amplificador Push-Pull ao lado alimenta uma carga $R_L = 8,0 \, \Omega$ (impedância típica de um alto-falante).
- Aplicando um sinal de entrada v_s com amplitude de 5,0 V, verifica-se que os transistores do circuito Push-Pull operam alternadamente.
- A polarização em Classe AB faz com que o sinal na saída v_o não apresente distorção de *crossover*.
- Aumentando demais a amplitude do sinal de entrada v_o , nota-se que o amplificador Push-Pull atinge o limite de potência que é possível entregar à carga.

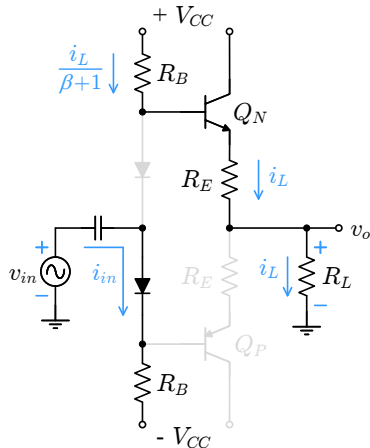


Máxima Potência entregue à Carga



- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.

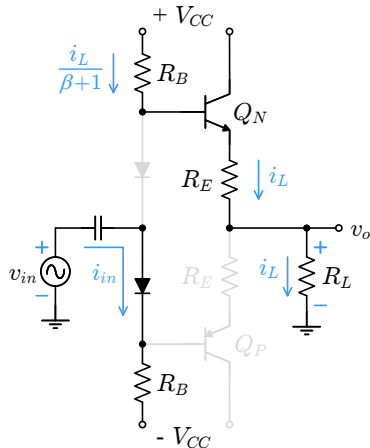
Máxima Potência entregue à Carga



- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo positivo de v_{in} :

$$V_{CC} - R_B \frac{i_L}{\beta + 1} - 0,6 - R_E i_L - R_L i_L = 0$$

Máxima Potência entregue à Carga

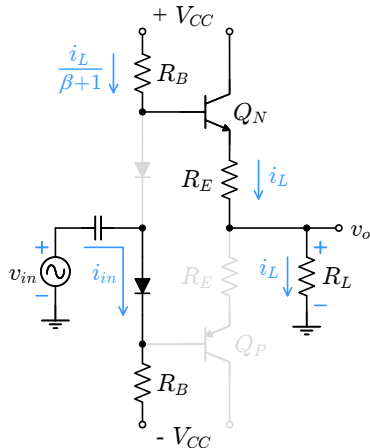


- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo positivo de v_{in} :

$$V_{CC} - R_B \frac{i_L}{\beta + 1} - 0,6 - R_E i_L - R_L i_L = 0$$

$$i_L = \frac{V_{CC} - 0,6}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

Máxima Potência entregue à Carga



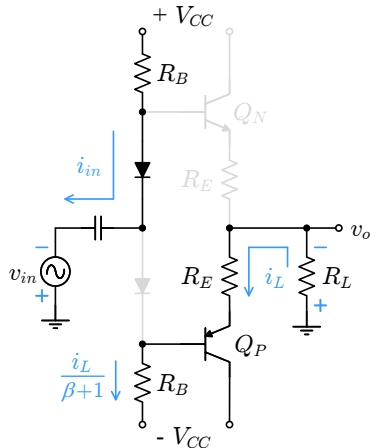
- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo positivo de v_{in} :

$$V_{CC} - R_B \frac{i_L}{\beta + 1} - 0,6 - R_E i_L - R_L i_L = 0$$

$$i_L = \frac{V_{CC} - 0,6}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

$$v_{o\text{máx}} = \frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

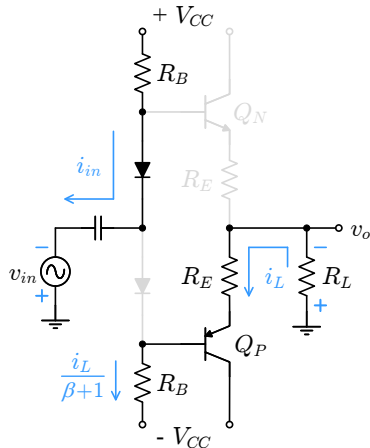
Máxima Potência entregue à Carga



- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo negativo de v_{in} :

$$-V_{CC} + R_B \frac{i_L}{\beta + 1} + 0,6 + R_E i_L + R_L i_L = 0$$

Máxima Potência entregue à Carga

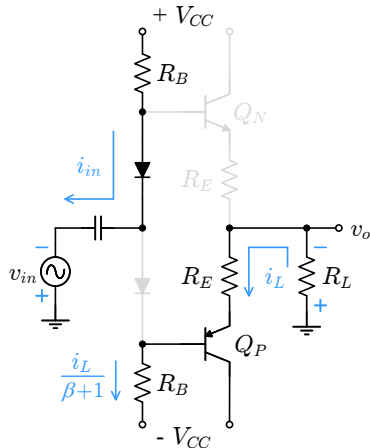


- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo negativo de v_{in} :

$$-V_{CC} + R_B \frac{i_L}{\beta + 1} + 0,6 + R_E i_L + R_L i_L = 0$$

$$i_L = \frac{V_{CC} - 0,6}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

Máxima Potência entregue à Carga



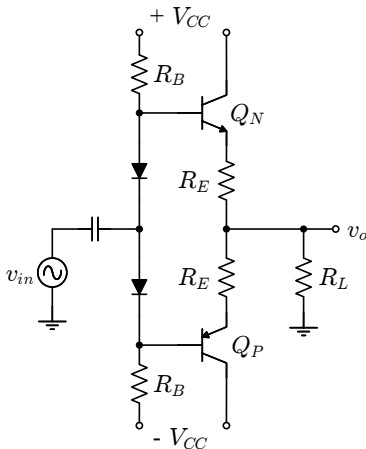
- Aplicando-se um sinal v_{in} com amplitude suficientemente grande, atinge-se o limite máximo de corrente que o Push-Pull consegue entregar para a carga.
- No semiciclo negativo de v_{in} :

$$-V_{CC} + R_B \frac{i_L}{\beta + 1} + 0,6 + R_E i_L + R_L i_L = 0$$

$$i_L = \frac{V_{CC} - 0,6}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

$$v_{o\text{mín}} = -\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}}$$

Máxima Potência entregue à Carga

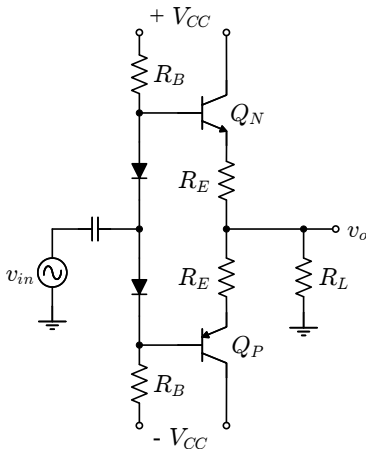


- Dados os limites de excursão de sinal na saída:

$$v_{o\text{máx}} = \frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

$$v_{o\text{mín}} = -\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

Máxima Potência entregue à Carga



- Dados os limites de excursão de sinal na saída:

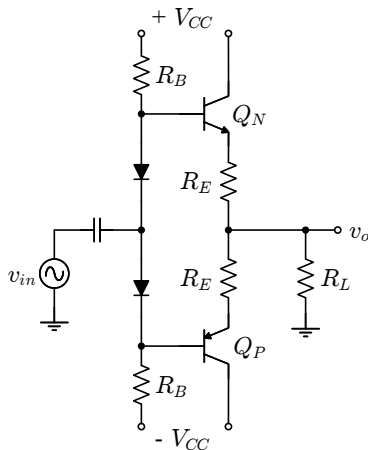
$$v_{om\acute{a}x} = \frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

$$v_{om\acute{i}n} = -\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

- A potência máxima que o Amplificador Push-Pull é capaz de entregar à carga R_L é:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{v_{om\acute{a}x}^2}{2 R_L}$$

Máxima Potência entregue à Carga



- Dados os limites de excursão de sinal na saída:

$$v_{om\acute{a}x} = \frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

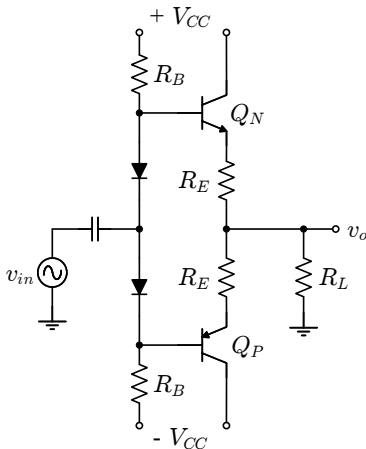
$$v_{om\grave{a}n} = -\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

- A potência máxima que o Amplificador Push-Pull é capaz de entregar à carga R_L é:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{v_{om\acute{a}x}^2}{2 R_L}$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2 R_L} \cdot \left(\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}} \right)^2$$

Máxima Potência entregue à Carga



- Dados os limites de excursão de sinal na saída:

$$v_{om\acute{a}x} = \frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

$$v_{om\acute{i}n} = -\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}}$$

- A potência máxima que o Amplificador Push-Pull é capaz de entregar à carga R_L é:

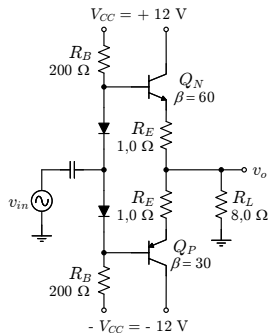
$$P_{m\acute{a}x} = \frac{v_{om\acute{a}x}^2}{2 R_L}$$

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{1}{2 R_L} \cdot \left(\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta+1}} \right)^2$$

Observação

De acordo com a expressão acima, a potência máxima que o Amplificador Push-Pull é capaz de entregar à carga R_L depende da fonte de alimentação V_{CC} , do ganho β do transistor e da própria carga R_L .

Máxima Potência entregue à Carga

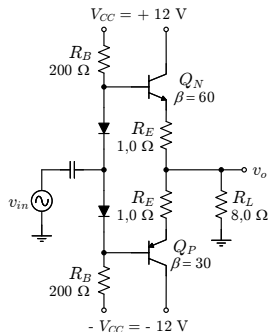


- Para o Amplificador Push-Pull da simulação:

$$v_{om\acute{a}x} = + \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{60+1}} = +7,43 \text{ V}$$

$$v_{om\grave{a}n} = - \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{30+1}} = -5,90 \text{ V}$$

Máxima Potência entregue à Carga



- Para o Amplificador Push-Pull da simulação:

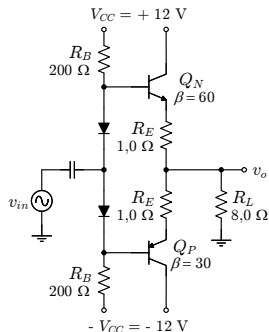
$$v_{om\acute{a}x} = + \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{60+1}} = +7,43 \text{ V}$$

$$v_{om\grave{i}n} = - \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{30+1}} = -5,90 \text{ V}$$

- A máxima potência que o amplificador é capaz de entregar à carga R_L é:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{5,9^2}{2 \cdot 8,0} = 2,18 \text{ W}$$

Máxima Potência entregue à Carga



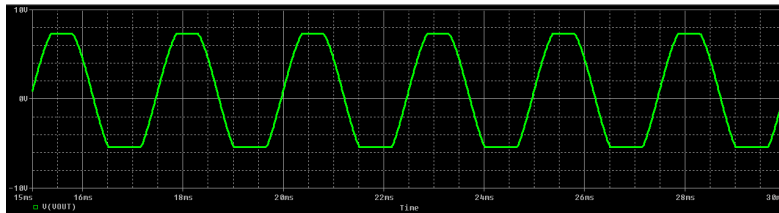
- Para o Amplificador Push-Pull da simulação:

$$v_{om\acute{a}x} = + \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{60+1}} = +7,43 \text{ V}$$

$$v_{om\grave{a}n} = - \frac{8,0 (12 - 0,6)}{8,0 + 1,0 + \frac{200}{30+1}} = -5,90 \text{ V}$$

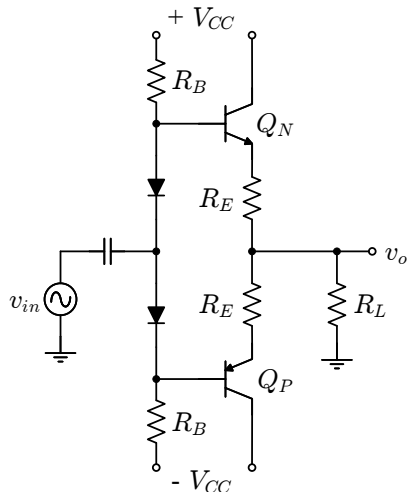
- A máxima potência que o amplificador é capaz de entregar à carga R_L é:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{5,9^2}{2 \cdot 8,0} = 2,18 \text{ W}$$



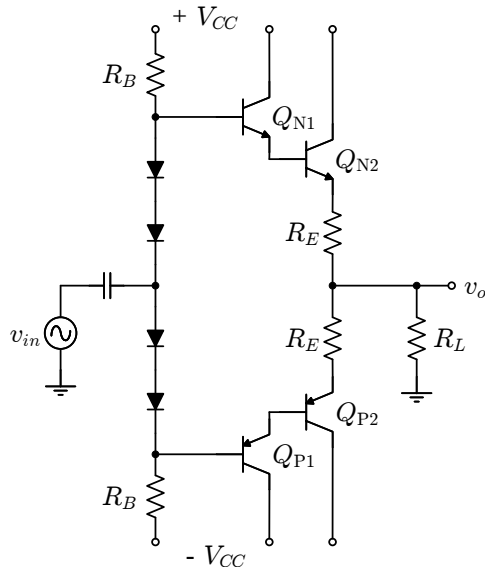
Configuração Darlington

- O baixo ganho β dos transistores de potência limita a capacidade de fornecimento de potência dos Amplificadores Push-Pull.



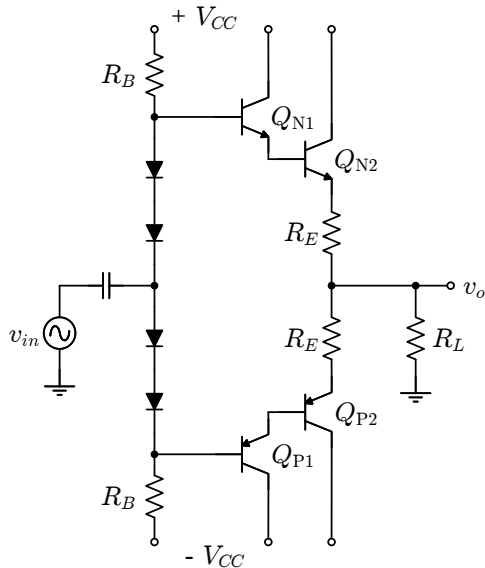
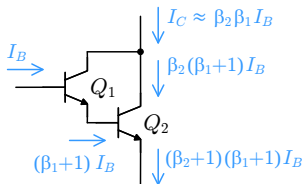
Configuração Darlington

- O baixo ganho β dos transistores de potência limita a capacidade de fornecimento de potência dos Amplificadores Push-Pull.
- Esse problema pode ser contornado utilizando-se a chamada **Configuração Darlington**.



Configuração Darlington

- O baixo ganho β dos transistores de potência limita a capacidade de fornecimento de potência dos Amplificadores Push-Pull.
- Esse problema pode ser contornado utilizando-se a chamada **Configuração Darlington**.
- Os dois transistores do Par Darlington são combinados de modo a operar de forma equivalente a um transistor com $\beta_{eq} \approx \beta_1 \cdot \beta_2$:



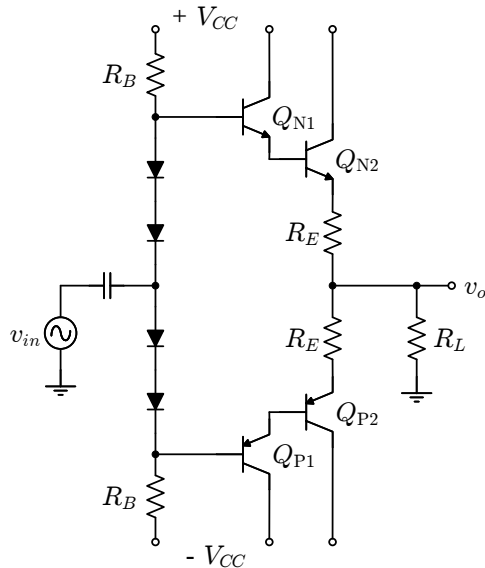
Configuração Darlington

- Com o emprego da Configuração Darlington, os limites de excursão de sinal na saída do amplificador de potência push-pull passam a ser dados por:

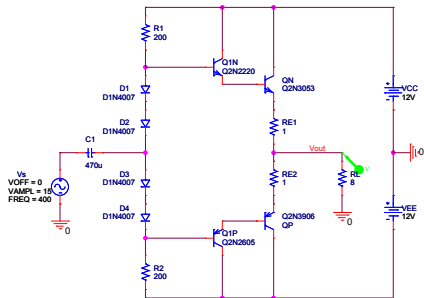
$$v_{om\acute{a}x} = \frac{R_L (V_{CC} - 2 V_{BE})}{R_L + R_E + \frac{R_B}{(\beta_1+1)(\beta_2+1)}}$$

$$v_{om\acute{i}n} = - \frac{R_L (V_{CC} - 2 V_{BE})}{R_L + R_E + \frac{R_B}{(\beta_1+1)(\beta_2+1)}}$$

- Dessa forma, é possível aumentar a amplitude e a potência de sinal na saída do amplificador.

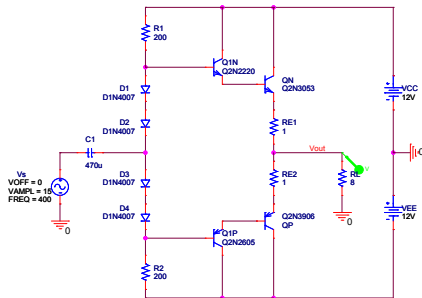


Simulação do Amplificador Push-Pull com Darlington

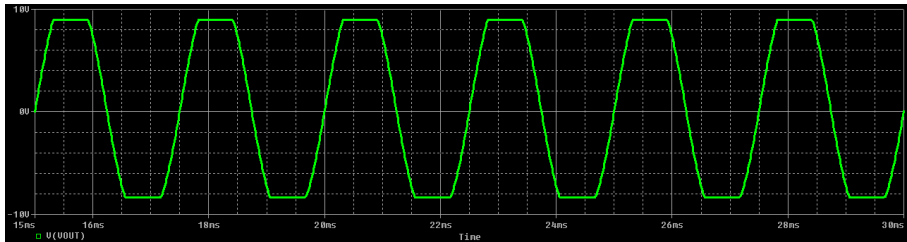


- O Amplificador Push-Pull simulado anteriormente foi modificado de modo a incluir transistores na Configuração Darlington. Todos os demais parâmetros do circuito continuam idênticos.
- Aplicando um sinal de entrada v_{in} com amplitude grande o suficiente para atingir os limites de excursão de sinal na saída, nota-se que este amplificador consegue prover uma maior amplitude de sinal na saída v_o .

Simulação do Amplificador Push-Pull com Darlington

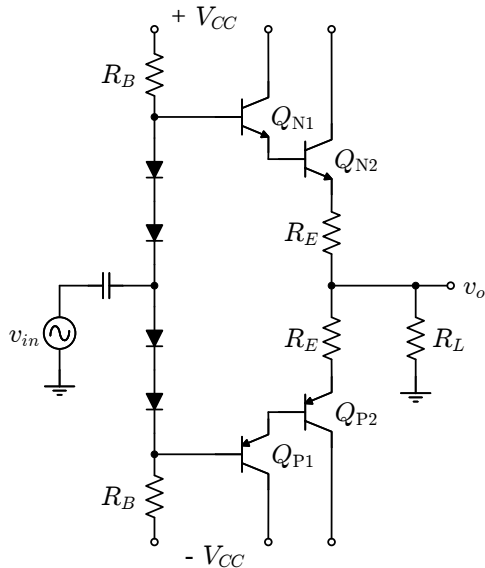


- O Amplificador Push-Pull simulado anteriormente foi modificado de modo a incluir transistores na Configuração Darlington. Todos os demais parâmetros do circuito continuam idênticos.
- Aplicando um sinal de entrada v_{in} com amplitude grande o suficiente para atingir os limites de excursão de sinal na saída, nota-se que este amplificador consegue prover uma maior amplitude de sinal na saída v_o .



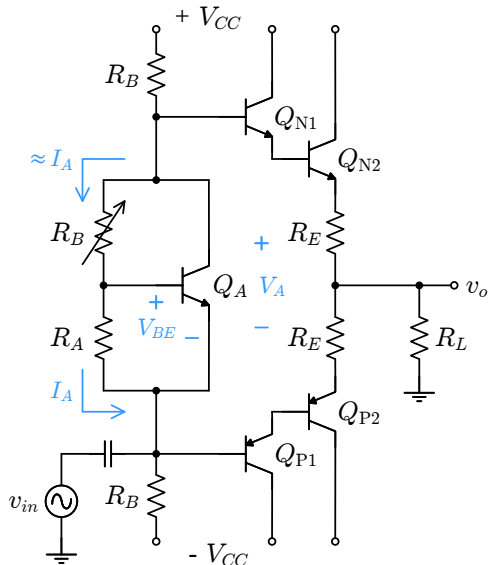
Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .



Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

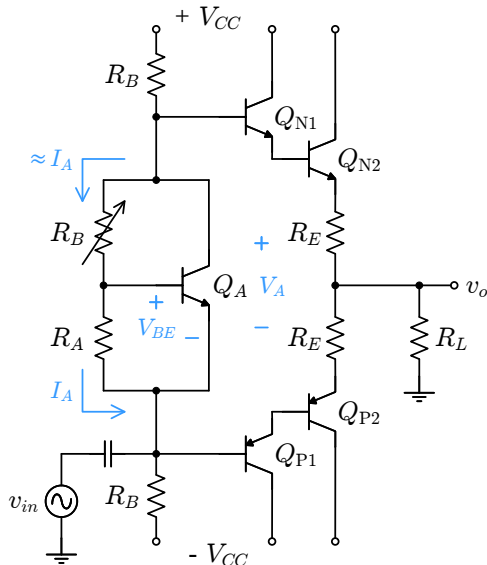
- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .



Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .
- No circuito do Multiplicador de V_{BE} , temos que:

$$I_A = \frac{V_{BE}}{R_A}$$



Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

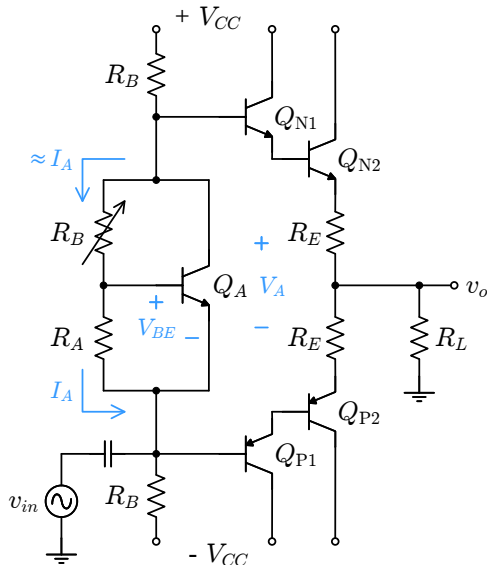
- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .

- No circuito do Multiplicador de V_{BE} , temos que:

$$I_A = \frac{V_{BE}}{R_A}$$

- Considerando que $I_B \approx I_A$, teremos a seguinte tensão de polarização:

$$V_A = V_{BE} + R_B I_A$$



Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .

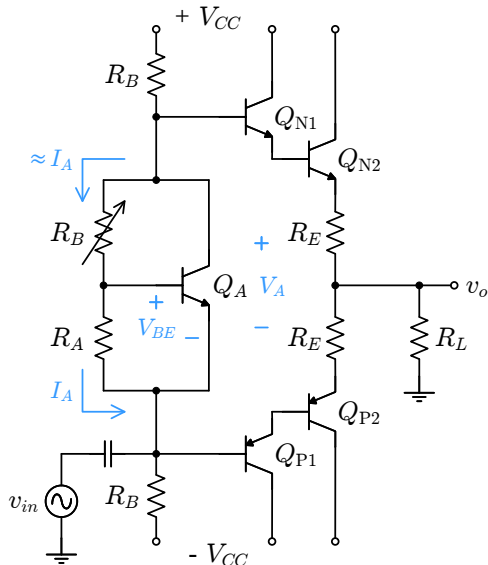
- No circuito do Multiplicador de V_{BE} , temos que:

$$I_A = \frac{V_{BE}}{R_A}$$

- Considerando que $I_B \approx I_A$, teremos a seguinte tensão de polarização:

$$V_A = V_{BE} + R_B I_A$$

$$V_A = V_{BE} + R_B \cdot \frac{V_{BE}}{R_A}$$



Polarização da Configuração Darlington com Multiplicador de V_{BE}

- Alternativamente à associação em série de quatro diodos em série para polarizar os dois pares Darlington em Classe AB, podemos utilizar uma estrutura chamada **Multiplicador de V_{BE}** .

- No circuito do Multiplicador de V_{BE} , temos que:

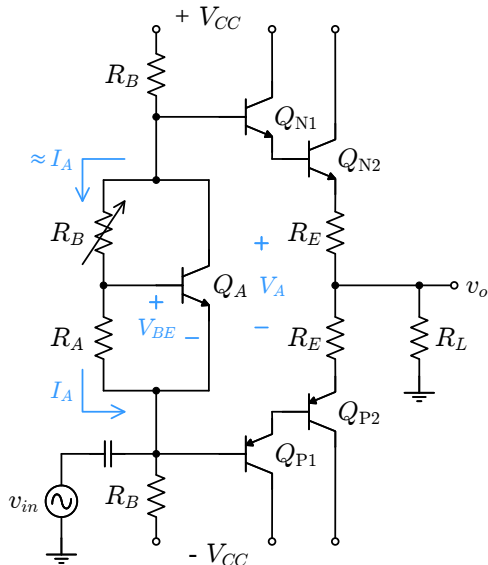
$$I_A = \frac{V_{BE}}{R_A}$$

- Considerando que $I_B \approx I_A$, teremos a seguinte tensão de polarização:

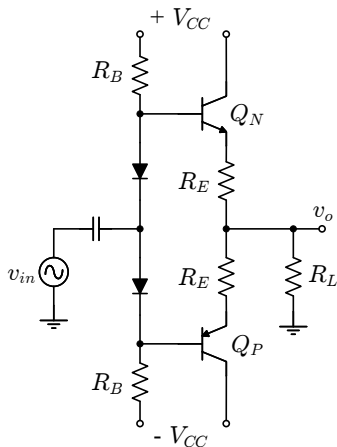
$$V_A = V_{BE} + R_B I_A$$

$$V_A = V_{BE} + R_B \cdot \frac{V_{BE}}{R_A}$$

$$V_A = \left(1 + \frac{R_B}{R_A}\right) V_{BE}$$



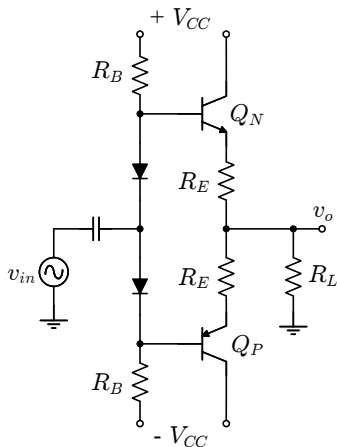
Aumentando a Potência entregue à Carga



- A máxima potência que o amplificador consegue entregar à carga R_L depende diretamente da tensão de alimentação V_{CC} e da carga R_L :

$$P_{\text{máx}} = \frac{v_{o\text{máx}}^2}{2 R_L}$$

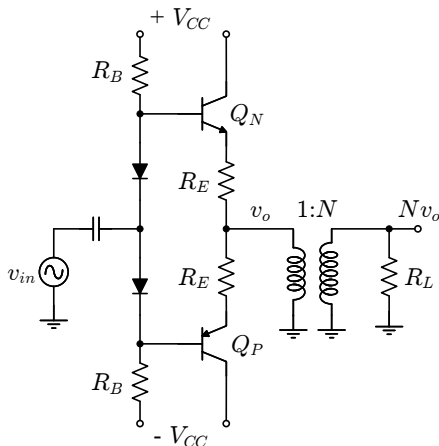
Aumentando a Potência entregue à Carga



- A máxima potência que o amplificador consegue entregar à carga R_L depende diretamente da tensão de alimentação V_{CC} e da carga R_L :

$$P_{\text{máx}} = \frac{1}{2 R_L} \cdot \left(\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} \right)^2$$

Aumentando a Potência entregue à Carga



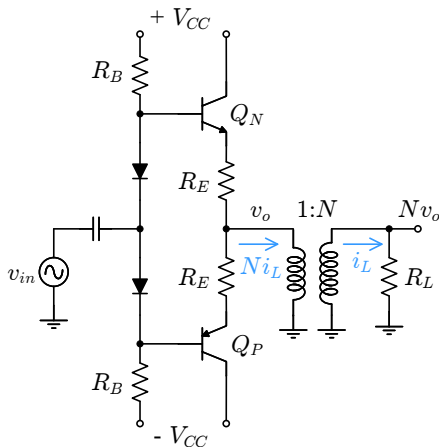
- A máxima potência que o amplificador consegue entregar à carga R_L depende diretamente da tensão de alimentação V_{CC} e da carga R_L :

$$P_{\text{máx}} = \frac{1}{2 R_L} \cdot \left(\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} \right)^2$$

- Uma forma de aumentar a potência entregue à carga, sem alterar a resistência R_L e a tensão de alimentação V_{CC} é usando um transformador de áudio. Assim:

$$P_{out} = \frac{(N \cdot v_o)^2}{2 R_L} = N^2 \cdot \frac{v_o^2}{2 R_L}$$

Aumentando a Potência entregue à Carga



- A máxima potência que o amplificador consegue entregar à carga R_L depende diretamente da tensão de alimentação V_{CC} e da carga R_L :

$$P_{\max} = \frac{1}{2 R_L} \cdot \left(\frac{R_L (V_{CC} - 0,6)}{R_L + R_E + \frac{R_B}{\beta + 1}} \right)^2$$

- Uma forma de aumentar a potência entregue à carga, sem alterar a resistência R_L e a tensão de alimentação V_{CC} é usando um transformador de áudio. Assim:

$$P_{out} = \frac{(N \cdot v_o)^2}{2 R_L} = N^2 \cdot \frac{v_o^2}{2 R_L}$$

- Entretanto, a corrente entregue pelo amplificador também aumentará:

$$i_{out} = N i_L = N \cdot \frac{N \cdot v_o}{R_L} = N^2 \cdot \frac{v_o}{R_L}$$

Agenda da Aula - Capítulo 12

- Amplificadores de Potência
 - Amplificadores Classe A
 - Amplificadores Classe B
- Amplificador de Potência Push-Pull
 - Amplificadores Classe AB
- Dissipadores de Calor

Dissipadores de Calor

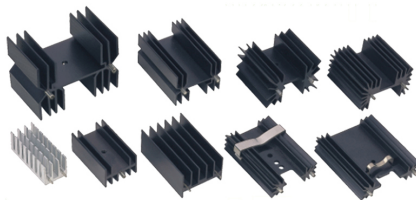
- Os transistores usados na construção de amplificadores de potência devem ser capazes de lidar com elevadas potências.

Dissipadores de Calor

- Os transistores usados na construção de amplificadores de potência devem ser capazes de lidar com elevadas potências.
- A potência dissipada por um transistor está diretamente relacionada à temperatura das suas junções. As máximas temperaturas de junção suportadas por cada material semicondutor são:
 - Silício $\rightarrow$ 150 a 200°C
 - Germânio $\rightarrow$ 100 a 110°C
- A máxima potência que um dispositivo semicondutor é capaz de lidar é determinada pela máxima potência que ele é capaz de dissipar na forma de calor, sem elevar a sua temperatura além do limite máximo.

Dissipadores de Calor

- Os transistores usados na construção de amplificadores de potência devem ser capazes de lidar com elevadas potências.
- A potência dissipada por um transistor está diretamente relacionada à temperatura das suas junções. As máximas temperaturas de junção suportadas por cada material semicondutor são:
 - Silício → 150 a 200°C
 - Germânio → 100 a 110°C
- A máxima potência que um dispositivo semicondutor é capaz de lidar é determinada pela máxima potência que ele é capaz de dissipar na forma de calor, sem elevar a sua temperatura além do limite máximo.
- Empregando dissipadores de calor (*heat sinks*), é possível elevar significativamente a capacidade de potência de um dispositivo semicondutor.



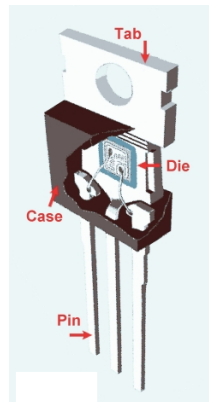
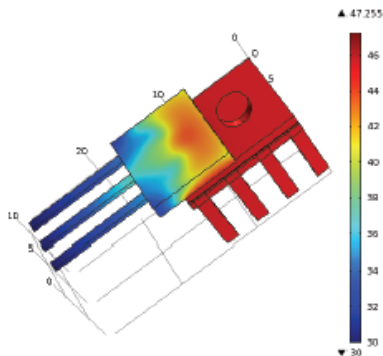
Dissipadores de Calor

- Os transistores de potência são montados em contato direto com os dissipadores para facilitar a transferência de calor.
- Os dissipadores de calor, por sua vez, apresentam uma grande superfície de contato com o ar e, em alguns casos, ventoinhas, para aumentar a capacidade de dissipação.



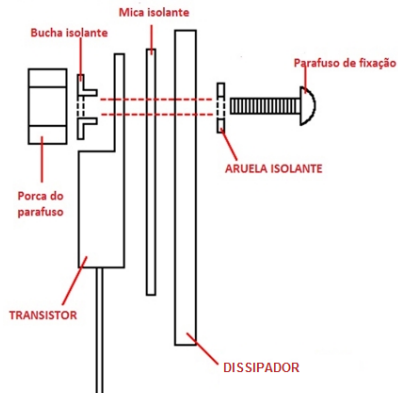
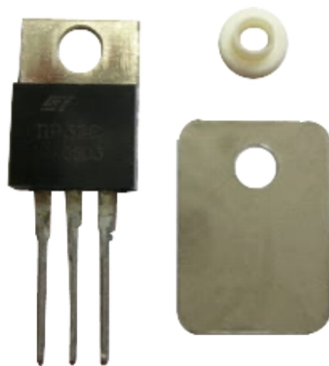
Montagem do Dissipador Térmico

- Como a junção com o coletor é a que mais dissipa potência em um transistor operando como amplificador, os transistores de potência são construídos de modo que a região de coletor fica eletricamente em contato com o dissipador.



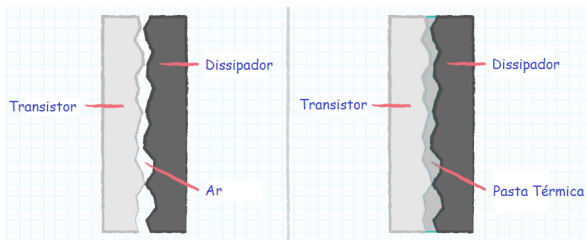
Montagem do Dissipador Térmico

- Caso seja necessário um isolamento elétrico entre o terminal de coletor do transistor e o dissipador térmico (casos em que mais de um dispositivo é conectado ao dissipador), um isolador de plástico ou de mica deve ser utilizado.



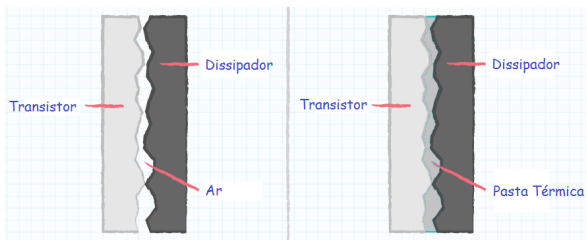
Montagem do Dissipador Térmico

- Irregularidades microscópicas nas superfícies do encapsulamento do transistor e do dissipador térmico reduzem a superfície de contato entre ambos, prejudicando a transferência de calor.
- Esse problema é resolvido aplicando-se uma pasta térmica entre ambas as superfícies:



Montagem do Dissipador Térmico

- Irregularidades microscópicas nas superfícies do encapsulamento do transistor e do dissipador térmico reduzem a superfície de contato entre ambos, prejudicando a transferência de calor.
- Esse problema é resolvido aplicando-se uma pasta térmica entre ambas as superfícies:



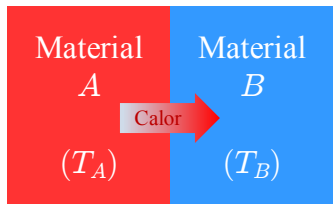
- Não exagerar na quantidade de pasta térmica, porque ela não é um condutor térmico tão bom quanto o material do dissipador e do encapsulamento do transistor.

Resistência Térmica

- O dimensionamento de dissipadores de calor é feito através do conceito de **Resistência Térmica**, que é um modelo análogo ao conceito de Resistência Elétrica.

Resistência Térmica

- O dimensionamento de dissipadores de calor é feito através do conceito de **Resistência Térmica**, que é um modelo análogo ao conceito de Resistência Elétrica.
- Considerando um sistema térmico em estado estacionário, com uma fonte de calor de potência constante, a Resistência Térmica da transferência de calor entre os Materiais A e B é definida da seguinte forma:



$$T_A > T_B$$

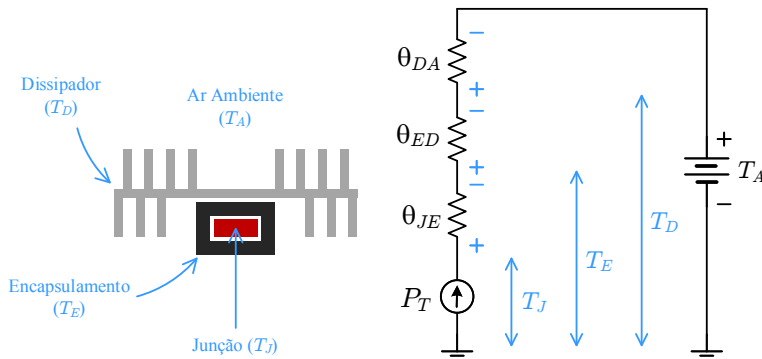
$$(T_A - T_B) = \theta_{AB} \cdot P_A$$

Onde:

- T_A e T_B são as temperaturas (em °C) dos Materiais A e B.
- P_A é a Potência (em W) da fonte de calor que mantém o Material A na temperatura T_A .
- θ_{AB} é a Resistência Térmica (em °C/W) da transferência de calor entre os Materiais A e B.

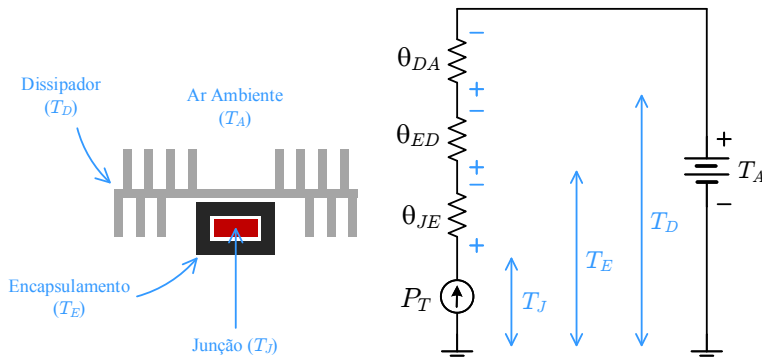
Modelo Elétrico Análogo à Transferência de Calor

Os cálculos da transferência de calor entre a pastilha de silício e o ambiente podem ser realizados usando o modelo elétrico equivalente apresentado abaixo:



Modelo Elétrico Análogo à Transferência de Calor

Os cálculos da transferência de calor entre a pastilha de silício e o ambiente podem ser realizados usando o modelo elétrico equivalente apresentado abaixo:

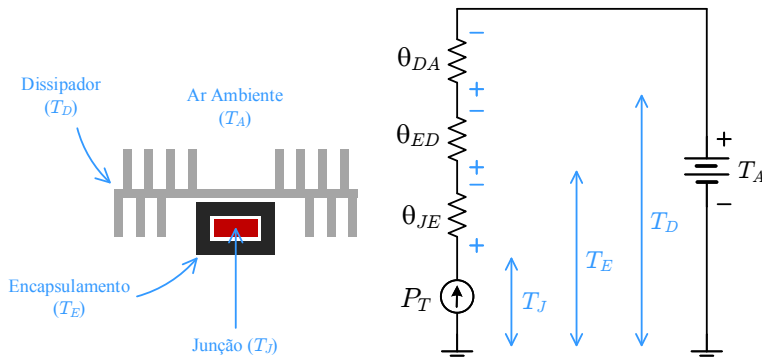


- Temperatura do Dissipador:

$$T_D = T_A + \theta_{DA} P_T$$

Modelo Elétrico Análogo à Transferência de Calor

Os cálculos da transferência de calor entre a pastilha de silício e o ambiente podem ser realizados usando o modelo elétrico equivalente apresentado abaixo:

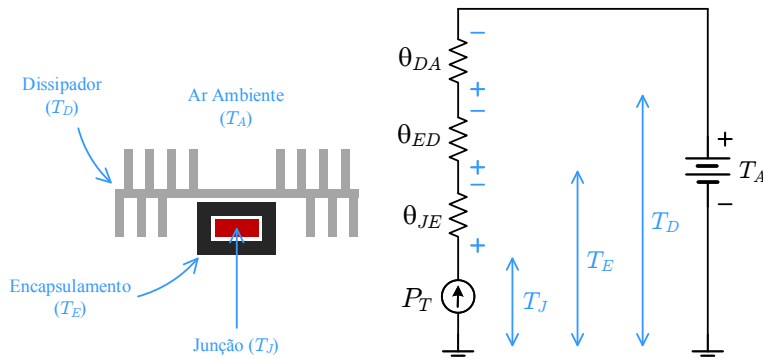


- Temperatura do Encapsulamento do Transistor:

$$T_E = T_A + \theta_{DA}P_T + \theta_{ED}P_T$$

Modelo Elétrico Análogo à Transferência de Calor

Os cálculos da transferência de calor entre a pastilha de silício e o ambiente podem ser realizados usando o modelo elétrico equivalente apresentado abaixo:



- Temperatura da Junção do Transistor:

$$T_J = T_A + \theta_{DA} P_T + \theta_{ED} P_T + \theta_{JE} P_T$$

Dimensionando um Dissipador - Exemplo

Em um amplificador de áudio, a dissipação máxima de potência que o transistor pode atingir durante a operação do circuito é de 4,0 W. De acordo com o manual do transistor, a máxima temperatura de junção que o transistor pode suportar é $T_{J\text{máx}} = 120^{\circ}\text{C}$, e a resistência térmica entre a junção do transistor e o dissipador é $\theta_{JD} = 15^{\circ}\text{C/W}$. Dessa forma, dimensione o dissipador que deve ser usado para que o transistor deste projeto suporte operar em temperaturas ambientes de até 40°C .

Dimensionando um Dissipador - Exemplo

Em um amplificador de áudio, a dissipação máxima de potência que o transistor pode atingir durante a operação do circuito é de 4,0 W. De acordo com o manual do transistor, a máxima temperatura de junção que o transistor pode suportar é $T_{J\text{máx}} = 120^{\circ}\text{C}$, e a resistência térmica entre a junção do transistor e o dissipador é $\theta_{JD} = 15^{\circ}\text{C/W}$. Dessa forma, dimensione o dissipador que deve ser usado para que o transistor deste projeto suporte operar em temperaturas ambientes de até 40°C .

Solução

Considerando que a temperatura da junção atingirá o limite máximo de 120°C quando a temperatura ambiente for de 40°C , teremos que:

$$T_{J\text{máx}} = T_A + (\theta_{DA} + \theta_{JD}) P_T$$

$$120 = 40 + (\theta_{DA} + 15) \cdot 4,0$$

$$\theta_{DA} = \frac{120 - 40}{4,0} - 15$$

$$\theta_{DA} = 5,0^{\circ}\text{C/W}$$

Portanto, a maior resistência térmica que o dissipador deve apresentar é $\theta_{DA} = 5,0^{\circ}\text{C/W}$.

Manual com Especificações de Dissipadores



637 SERIES High-Efficiency Heat Sinks For Vertical Board Mounting

TO-220

Standard P/N	Height Above PC Board "A" in. (mm)	Maximum Footprint in. (mm)	Thermal Performance at Typical Load Natural Convection	Thermal Performance at Typical Load Forced Convection	Weight lbs. (grams)
637-10ABP ▲	1.000 (25.4)	1.375 (34.9) x 0.500 (12.7)	76°C @ 6W	5.8°C/W @ 200 LFM	0.023 (10.43)
637-15ABP ▲	1.500 (38.1)	1.375 (34.9) x 0.500 (12.7)	65°C @ 6W	5.5°C/W @ 200 LFM	0.035 (15.88)
637-20ABP ▲	2.000 (50.8)	1.375 (34.9) x 0.500 (12.7)	55°C @ 6W	4.7°C/W @ 200 LFM	0.050 (22.68)
637-25ABP ▲	2.500 (63.5)	1.375 (34.9) x 0.500 (12.7)	48°C @ 6W	4.2°C/W @ 200 LFM	0.062 (28.12)

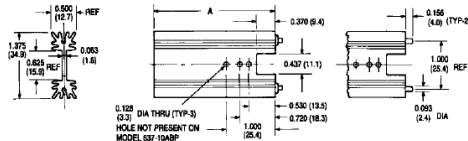
Material: Aluminum, Black Anodized

Wave-solderable pins on 1 in. centers for vertical mounting on printed circuit boards.
Maximum semiconductor package width 0.625 in. (15.9). Use this heat sink where weight

and board space occupied must be minimized. Refer to the Accessory products section for thermal interface materials, thermal compounds, and other accessories products.

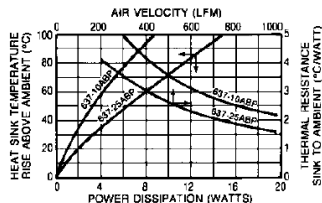
MECHANICAL DIMENSIONS

637 SERIES (EXTRUSION PROFILE 5183)



Dimensions: in. (mm)

NATURAL AND FORCED CONVECTION CHARACTERISTICS



Manual com Especificações do Transistor de Potência

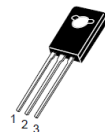
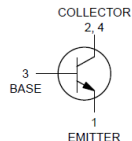
BD135G, BD137G, BD139G

Plastic Medium-Power Silicon NPN Transistors

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage BD135G BD137G BD139G	V_{CEO}	45 60 80	Vdc
Collector-Base Voltage BD135G BD137G BD139G	V_{CBO}	45 60 100	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	5.0	Vdc
Collector Current	I_C	1.5	Adc
Base Current	I_B	0.5	Adc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.25 10	Watts mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	12.5 100	Watts mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

1.5 A POWER TRANSISTORS NPN SILICON 45, 60, 80 V, 12.5 W



TO-225
CASE 77-09
STYLE 1

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	10	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	100	$^\circ\text{C/W}$