



 UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

ELT085 - Circuitos Eletrônicos Analógicos

Prof. Dr. Thiago de Oliveira
Departamento de Eng. Eletrônica

 **g**ep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG




 UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG

Parte V:

Estágio de Potência


 **g**ep
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG



Estágio de Potência

- A finalidade do estágio de saída é proporcionar uma baixa impedância de saída ao amplificador;
 - Possibilita alimentar cargas com baixa perda de ganho;
 - Provê ganho de corrente;
- Comumente o estágio de saída lida com sinais de “grande” amplitude, logo o uso de modelos de pequenos sinais deve ser feito de forma cuidadosa;
- **Parâmetros importantes do estágio de saída:**
 - Linearidade – Deseja-se que a amplificação ocorra com baixa distorção (THD);
 - Eficiência – Deseja-se que a potência dissipada no estágio de potência seja baixa em relação à demanda da carga;

3



Estágio de Potência - Classes



- Classe G/H: Mistura de um Classe AB+C;
- Classe D/E: Amplificador chaveado. Não utiliza amplificadores na região linear, mas em corte/saturação;
- A dificuldade de se encontrar uma classe que entregue Eficiência e Baixa Distorção justifica a existência das múltiplas classes;

4

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Classe A

- Condução de 360° - Baixa distorção e alta dissipação de potência;

Formas de onda

5

gpep
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG


Classe A

- Dissipação de potência
 - A maior dissipação de potência nos transistores ocorrerá quando $V_O = 0V$, neste caso, $P_{diss} = V_{CC}I_Q$, sendo que o projeto térmico dos transistores deve ser feito para esta condição;
 - Ao se aplicar um sinal de saída, a eficiência do amplificador se eleva, atingindo seu máximo valor quando $\bar{v}_O = V_{CC}$. Neste caso deve-se levar em consideração as perdas no transistor de saída e na fonte de corrente:

$$P_{D1} = \frac{V_{CC}I}{2}$$

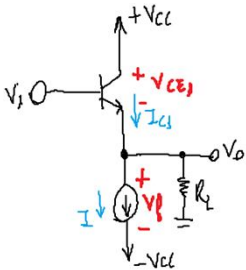
$$P_I = V_{CC}I$$

6



Classe A

- Dissipação de potência
 - A maior dissipação de potência nos transistores ocorrerá quando $V_o = 0V$, neste caso, $P_{diss} = V_{CC}I_Q$, sendo que o projeto térmico dos transistores deve ser feito para esta condição;
 - Ao se aplicar um sinal de saída, a eficiência do amplificador se eleva, atingindo seu máximo valor quando $\bar{v}_o = V_{CC}$. Neste caso deve-se levar em consideração as perdas no transistor de saída e na fonte de corrente:




$$P_{Diss} = \frac{V_{CC}I}{2} + V_{CC}I = \frac{3}{2}V_{CC}I$$

$$P_{Omax} = V_{ORms}I_{ORms} = \frac{V_{CC}I}{2}$$

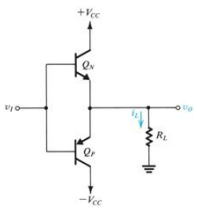
$$\eta_{max} = \frac{P_{Omax}}{P_{Diss} + P_{Omax}} = \frac{V_{CC}I}{4V_{CC}I} = 25\%$$

7

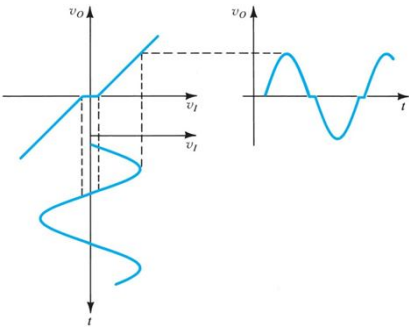


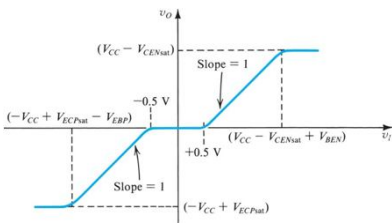
Classe B

- Saída não polarizada – 180° de condução




Formas de onda de saída



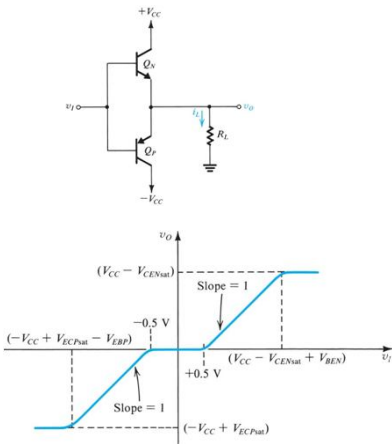


8

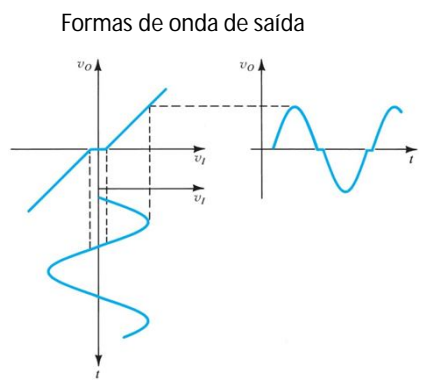


Classe B


- Saída não polarizada – 180° de condução



Formas de onda de saída

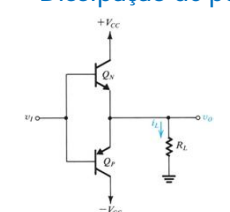


9



Classe B

- Dissipação de potência

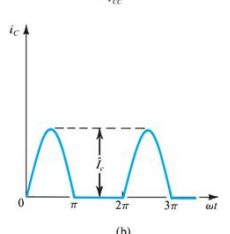


$$P_O = \frac{V_O^2}{2R_L}$$

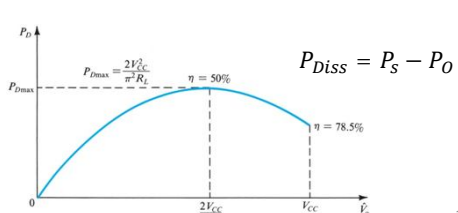
Potência fornecida pelas fontes de alimentação

$$P_{dn} = P_{dp} = \frac{V_O}{\pi R_L} V_{CC} \rightarrow P_S = \frac{2V_O V_{CC}}{R_L \pi}$$

$$\eta = \frac{\pi V_O}{4V_{CC}}$$




(b)



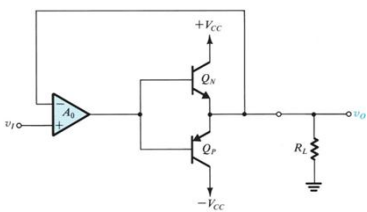
$P_{Diss} = P_S - P_O$

10

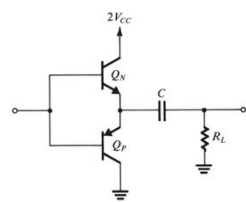


Classe B


- Redução da distorção de crossover



- Operação em fonte simples

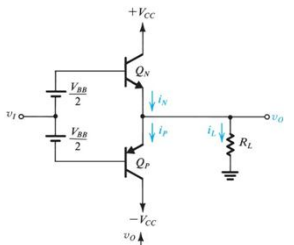


11



Classe AB

- Polarização do estágio classe B

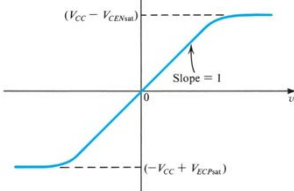


A polarização é escolhida de modo que

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

Assim compensando o crossover.

As fontes irão fornecer uma potência igual à fornecida para o classe B, mais uma parcela igual a $2V_{CC}I_Q$



12

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Classe AB

- Formas de polarizar

$I_{Bias} > I_{Omax} / \beta_N$

$V_{BB} \approx V_{BE1} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$

13

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Classe AB – variações

- Uso de polarização com Seguidor de Emissor

- Eleva a resistência de entrada do estágio;
- Um bom casamento entre os transistores permite eliminar o crossover;

14



Classe AB – variações

- **Uso de dispositivos compostos (Darlington)**




$\beta = \beta_1 \beta_2$



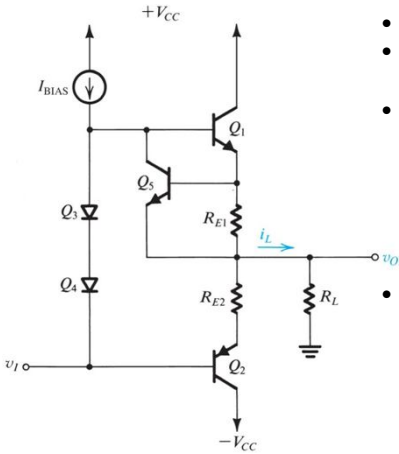
- Eleva o ganho de corrente do transistor;
- Eleva a queda VBE;
- Permite se encontrar um dispositivo com elevado ganho e alto calibre de corrente.

15



Classe AB – variações

- **Proteção de sobre-corrente**




- RE melhora a estabilidade térmica do circuito;
- RE reduz a máxima tensão de saída em ao menos $\pm 0.5V$;
- Se $V_{BE5} = R_{E1} I_L |_{pos} > 0.7V$, Q5 drena corrente de base de Q1, grampeando i_L em um valor

$$I_{Lmax} \approx \frac{0.7V}{R_{E1}}$$

- A proteção negativa (Q2) é simétrica;

Dúvida: Em um sistema realimentado, como a proteção vai limitar i_L ? Que tipo de problema pode ocorrer na proteção negativa?

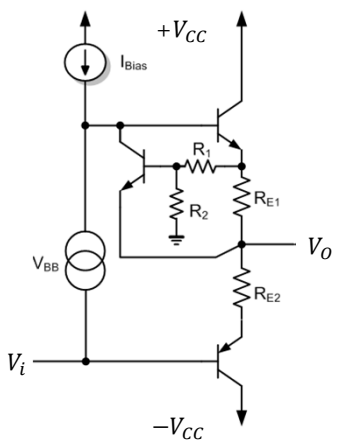
16




Classe AB – variações

- Proteção de sobre-corrente (Fold-back)
 - A corrente de proteção decai linearmente com o valor de tensão de saída;
 - Possibilita uma menor dissipação de potência em curto-circuito que a proteção grampeada;

Desafio: Avaliar o funcionamento do circuito e traçar o comportamento V_{xI}

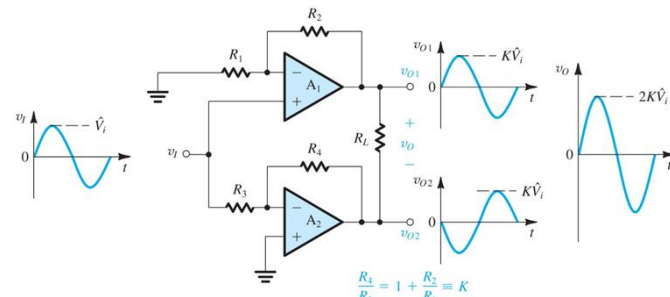


17




Amplificadores em Ponte (Bridge-Tied Load --- BTL)

- Permite elevar a tensão e potência de saída, sem o uso de fontes de maior tensão



$$\frac{R_4}{R_3} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = K$$


18



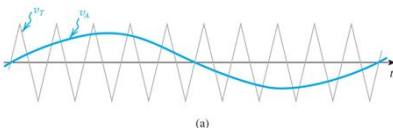
Amplificador Classe D – Circuito chaveado

- Normalmente, amplificadores lineares possibilitam um alta fidelidade de reprodução (baixa THD), mas a eficiência é bastante baixa;
- O uso de circuitos chaveados (operando em corte/saturação) permite se atingir altíssimas eficiências ($\approx 90\% - 95\%$), ao custo de uma maior presença de ruído;
- A tecnologia chaveada mais comum comercialmente se baseia na modulação por largura de pulsos (PWM – pulse width modulation):
 - Um sinal pulsado é produzido a partir da comparação de uma modulante com uma portadora triangular;
 - Se a frequência da portadora for muito superior à da modulante, o sinal resultante é uma onda quadrada com frequência fixa e ciclo de trabalho variante por ciclo;

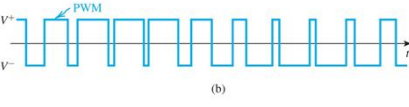
19




Amplificador Classe D – Circuito chaveado



(a)

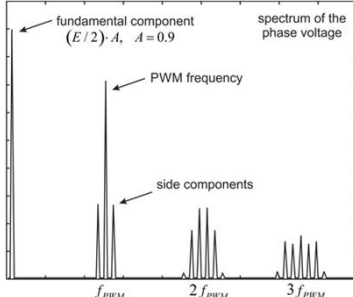


(b)



(c) (d)

Espectro de um PWM 2 níveis



fundamental component $(E/2) \cdot A, A=0.9$

PWM frequency

side components

f_{PWM} $2f_{PWM}$ $3f_{PWM}$

Um simples filtro Passa-baixas é capaz de reconstruir o sinal com boa fidelidade

20



Amplificador Classe D – Circuito chaveado

- O estudo de circuitos chaveados não faz parte do escopo da disciplina, mas dois estágios de potência típicos são apresentados abaixo. **Mais detalhes desta tecnologia em ELT040;**



(a) (b)

21



Projeto térmico de amplificadores


- Como o estágio de potência dissipa uma potência significativa, o projeto do sistema de refrigeração dos seus transistores é de suma importância;



(a) (b)

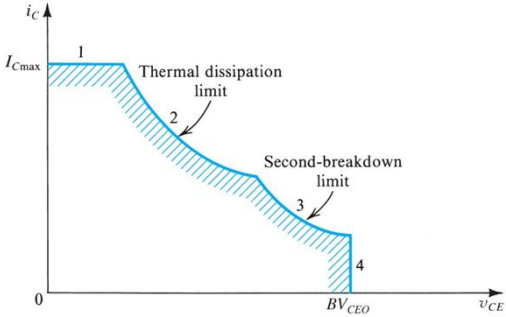
22

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG




Projeto térmico de amplificadores

- TBJ região de operação segura



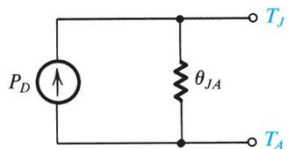
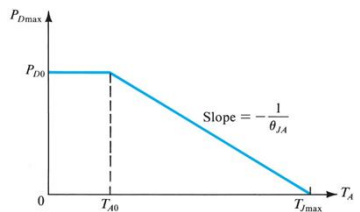
23

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG




Projeto térmico de amplificadores

- Circuito térmico equivalente:
 - Conhecendo a dissipação de um transistor, modela-se a potência dissipada como uma fonte de corrente;
 - A resistência e capacitância térmica dos dispositivos são modelados como elementos de circuitos;
 - A temperatura dos nós é modelada como uma fonte de tensão

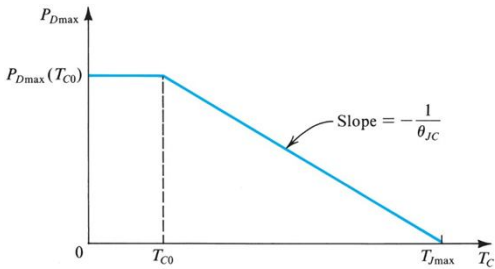
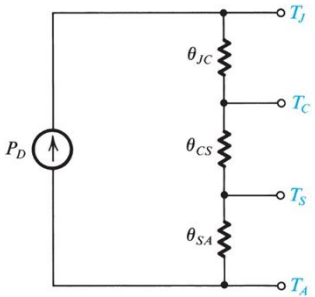



24



Projeto térmico de amplificadores

- Dimensionamento de dissipadores
 - Caso a capacidade de dissipação do dispositivo não seja adequada, um dissipador de calor pode ser utilizado para reduzir a temperatura de junção



25