



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA

UF *m* G




ELT085 - Circuitos Eletrônicos Analógicos


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



GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

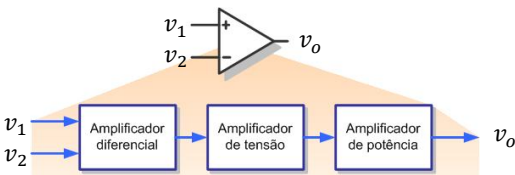


GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG



Amplificadores Operacionais

- Estrutura básica de um Ampop



v_1 v_2 v_o
 v_1 v_2 v_o

Principais Impactos

R_{in}
Offset
CMRR
PSRR

A_d
BW
SR

R_o
 P_o
THD
 η

2

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Amplificadores Operacionais

- Organização da primeira etapa da disciplina:

v_1 v_2 v_o
 Amplificador diferencial Amplificador de tensão Amplificador de potência v_o
 Parte II Cap. 9 Parte I Cap. 8 Parte III Cap. 12
 Parte IV - Cap. 10 Resposta em Frequência
 Parte V - Cap. 11 Realimentação

3

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Amplificadores Operacionais

- Detalhe importante:
 - O livro texto é focado em **microeletrônica**:
 - A discussão é direcionada ao projeto de circuitos integrados;
 - O projetista tem liberdade de projetar os dispositivos semicondutores;
 - O projetista não é limitado aos dispositivos encontrados no mercado;
 - A disciplina em si não possui esse foco:
 - A discussão diferenciará situações de projeto de circuitos integrados e projetos discretos;
 - As limitações de projetos discretos serão abordadas;
 - Detalhes muito específicos de projetos integrados serão mencionados, mas não explorados;
 - Aos alunos interessados em se aprofundar em microeletrônica:
 - Tecnologia de dispositivos semicondutores;
 - Disciplinas ofertadas pelos professores do OptmaLab;

4





Parte I:

Estruturas básicas de amplificadores em circuitos integrados




GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG




Circuitos Integrados Analógicos X Circuitos Discretos Analógicos

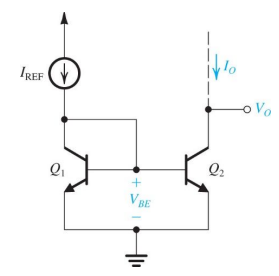
- O desenvolvimento de circuitos integrados apresenta uma série de restrições e oportunidades aos projetistas. Estas podem ser condensadas na seguinte filosofia de projeto:
 - **Minimização da área da pastilha:**
 - Evita-se o uso de resistores, substituindo-os por transistores quando possível;
 - Uso de capacitores de alto valor é proibitivo, por isso a maioria dos amplificadores tem acoplamento direto. Capacitores de pF podem ser produzidos por tecnologia MOS, logo, são mais utilizados;
 - A miniaturização dos dispositivos leva à necessidade de se reduzir a tensão de alimentação, de modo a reduzir o campo elétrico sobre os gates dos MOS e evitar superaquecimento do chip;
 - **Variedade de dispositivos:** Ao contrário dos projetos discretos, onde se deve utilizar dispositivos ofertados pelos fabricantes. Em CI, o projetista tem controle sobre os parâmetros dos dispositivos, podendo especificar as dimensões dos mesmos, para atender critérios de desempenho;
 - **Tecnologia:** A tecnologia TBJ ainda é empregada em AmpOps de uso geral, no entanto, de uma forma mais ampla, a tecnologia MOS é a preferida para desenvolvimento de sistema analógicos mais complexos.
- Nesta etapa, iremos discutir classes de circuitos utilizadas no projeto de circuitos analógicos integrados.

6




Polarização de circuitos transistorizados em CI

- A polarização de transistores em circuitos integrados analógicos normalmente é feita por meio de fontes de corrente (para se evitar o uso de resistores)

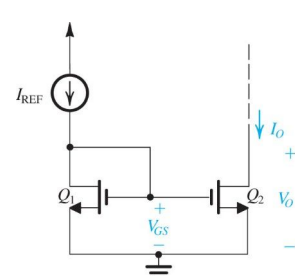
7

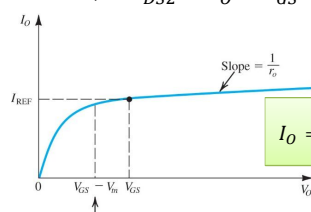


Polarização de circuitos transistorizados em CI

- Análise do espelho de corrente MOS – o efeito early
 - Sabemos que $I_{D1} = I_{Ref}$;
 - Como ambos MOS tem a mesma tensão V_{GS} :


$$\frac{I_O}{I_{ref}} = \frac{k_{n2}}{k_{n1}} \cong \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$
 - Mas, se $V_{DS2} = V_O > V_{GS}$





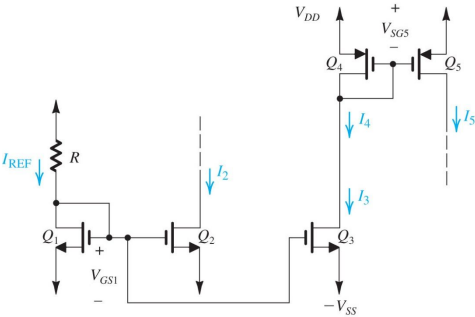
$$I_O = I_{Ref} \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} \left(1 + \frac{V_O - V_{GS}}{V_{A2}} \right)$$

8




Polarização de circuitos transistorizados em CI

- Guias de corrente MOS – alimentação de múltiplos estágios



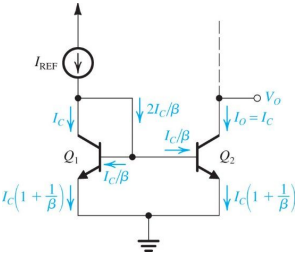
- Problemas de distribuição de corrente serão semelhantes ao analisado anteriormente;
- Todos os transistores devem estar em saturação (reg. Linear)

9



Polarização de circuitos transistorizados em CI

- Análise do espelho de corrente TBJ – não-idealidades




$$I_C = I_S e^{\frac{v_{BE}}{V_T}}$$

- Logo,
$$I_O = I_{ref} \frac{1}{1 + 2/\beta}$$
- Agora, se $I_{S2} = m I_{S1}$
$$I_O = I_{ref} \frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}}$$
- Levando em consideração o efeito early

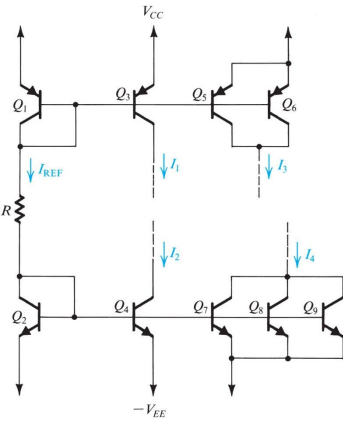
$$I_O = I_{ref} \left(\frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}} \right) \left(1 + \frac{V_O - V_{BE}}{V_{A2}} \right)$$

10




Polarização de circuitos transistorizados em CI

- Guias de corrente - TBJ



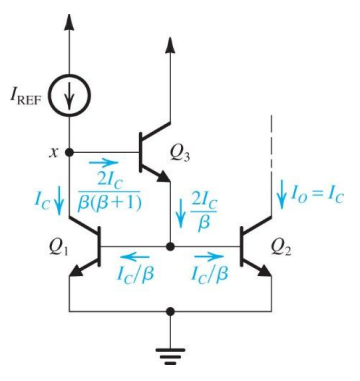
- Problemas de distribuição de corrente ocorrerão em função de diferenças entre os TBJs e efeito térmico, pois isto afeta o β ;
- O uso de espelhos de corrente em circuitos discretos pode apresentar maiores discrepâncias entre as correntes do que em circuitos integrados, devido ao descasamento dos dispositivos;

11



Polarização de circuitos transistorizados em CI

- Melhoria no espelho de corrente TBJ – menor dependência de β




- Para fins de simplificação, considere os transistores casados;
- Assim:

$$I_O \approx I_{ref} \left(1 + \frac{2}{\beta^2} \right)$$

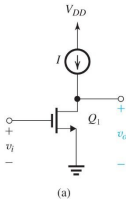
- A influência da resistência de saída será a mesma discutida anteriormente;

12

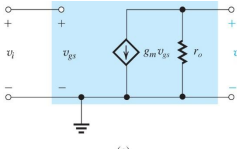


Célula básica de ganho – Common-source e Common-emitter

- A célula básica de ganho em circuitos analógicos integrados é o CS/CE, no entanto, a fonte de corrente:
 - Evita o uso de resistores;
 - Provê altos ganhos de tensão



(a)

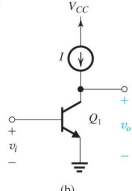


(c)

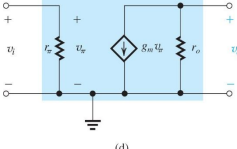
Ganho Intrínseco

$$A_{vo} = -r_o g_m$$

$$A_{vo} = -\frac{2V_A}{V_{ov}}$$



(b)




(d)

$$A_{vo} = -\frac{V_A}{V_T}$$

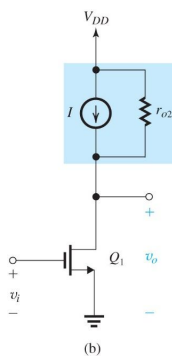
Interessante: TBJ possui ganho maior do que MOS;

13

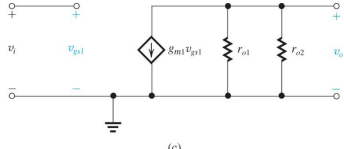


Célula básica de ganho – Common-source e Common-emitter

- Efeito da resistência de saída da fonte de corrente



(b)



(c)

- Ganho da célula:

$$A_{vo} = -g_m (r_{o1} \parallel r_{o2})$$

14

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Célula básica de ganho – Common-source e Common-emitter

- Determinando a resistência de saída da fonte de corrente

$$R_{in} = \frac{r_{o1}}{r_{o1}g_{m1} + 1}$$

$$R_o = r_{o2}$$

- Uma análise similar pode ser feita para a fonte com TBJ;
- Note que se a célula de ganho e a fonte de corrente forem construídas com dispositivos similares ($r_{o1} \approx r_{o2}$), o ganho intrínseco da célula é dividido por 2;

15

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Aumentando o ganho da célula básica

- Como aumentar o ganho da célula básica?
 - É necessário elevar a resistência de saída do transistor amplificador e/ou da carga;
 - Algumas opções interessantes:
 - Introduzir um resistor de degeneração no emissor da célula CE/CS;
 - Introduzir um buffer de corrente na saída da célula, para elevar a sua impedância;
 - Modificar a estrutura da fonte de corrente para elevar sua impedância de saída;
- Efeito da resistência de fonte/emissor

$$R_o \approx (1 + g_m R_s) r_o$$

- O ganho g_m é degenerado por um fator R_s , logo o ganho intrínseco não é alterado;

$$R_o = R_s + r_o + g_m r_o R_s$$

$$R_o = (1 + g_m R_s) r_o$$

Célula Tradicional

16

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Aumentando o ganho da célula básica

- Uso de buffers de corrente

(a)

Célula Tradicional

(b)

Célula com buffer

- O buffer permite se elevar a impedância de saída da célula, sem alterar significativamente o ganho de transcondutância;
- Amplificadores CB/CG operam como buffers de corrente;

17

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Aumentando o ganho da célula básica

- Análise do amplificador CG

(a)

Ganho de corrente unitário


(b)

Resistência de entrada

$R_{in} = \frac{r_o + R_L}{1 + g_m r_o}$
Se $g_m r_o \gg 1$
→
 $R_{in} \cong \frac{1}{g_m} + \frac{R_L}{g_m r_o}$

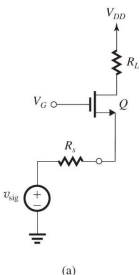
- Uma resistência de saída finita reflete a resistência de carga para a entrada, elevando Rin;
- A reflexão é escalonada pelo ganho intrínseco da célula;
- Rin ainda é muito baixo.

18

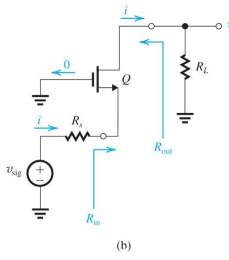


Aumentando o ganho da célula básica

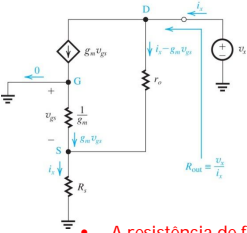
- Análise do amplificador CG



(a)



(b)




Resistência de saída

$R_{out} = r_o + R_S + g_m r_o R_S$
→
 $R_{out} \cong (1 + g_m R_S) r_o$

Se $g_m r_o \gg 1$

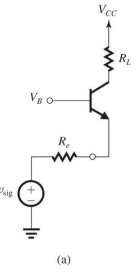
- A resistência de fonte é refletida para saída por fator igual ao ganho intrínseco da célula;
- A impedância de saída é significativamente elevada;

19

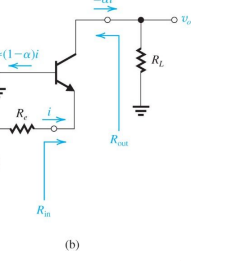


Aumentando o ganho da célula básica

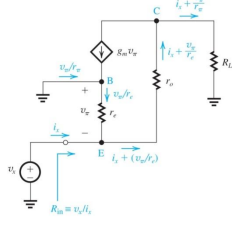
- Análise do amplificador CB



(a)



(b)



Resistência de entrada

$R_{in} \cong r_e \frac{r_o + R_L}{r_o + \beta + 1}$

↗ Se $R_L \rightarrow \infty$, $R_{in} \approx r_e(\beta + 1) = r_\pi$
↘ Se $\frac{R_L}{\beta+1} \ll r_o$, $R_{in} \approx r_e + \frac{R_L r_e}{r_o} = r_e + \frac{\alpha R_L}{g_m r_o}$

20

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Aumentando o ganho da célula básica

- Análise do amplificador CB

Resistência de saída

$$R_{out} = r_o + (1 + g_m r_o)(R_e \parallel r_\pi)$$

Se $g_m r_o \gg 1$

$$R_{out} = r_o(1 + g_m(R_e \parallel r_\pi))$$

21

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA DA UFMG

Aumentando o ganho da célula básica

- Sumarizando

$$R_{out} = r_o + R_S + g_m r_o R_S \approx r_o + (g_m r_o) R_S$$

$$R_{in} = \frac{r_o + R_L}{1 + g_m r_o} \approx \frac{1}{g_m} + \frac{R_L}{g_m r_o}$$

$$R_{out} = r_o + (R_e \parallel r_o) + g_m r_o (R_e \parallel r_o) \approx r_o + (g_m r_o)(R_e \parallel r_o)$$

$$R_{in} \approx r_e \frac{r_o + R_L}{r_o + \frac{R_L}{\beta + 1}} \approx r_e + \frac{R_L}{g_m r_o}, \text{ for } R_L \ll \beta r_o$$

22

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG

Circuitos Cascode

- Utilizando o buffer de corrente para aumentar o ganho da célula básica

$$R_{in} \approx \frac{1}{g_{m2}} + \frac{R_L}{g_{m2}r_{o2}} \xrightarrow{R_L \rightarrow \infty} R_{in} \approx \infty$$

$$R_{out} \approx r_{o2} + g_{m2}r_{o2}r_{o1} \approx g_{m2}r_{o2}r_{o1}$$

$$\frac{v_{o1}}{v_i} = -g_{m1}r_{o1}$$

$$\frac{v_o}{v_{o1}} = g_{m2}r_{o2}$$

$$A_{vo} = -g_{m1}g_{m2}r_{o1}r_{o2}$$

Se os transistores forem casados

$$A_{vo} = -(g_m r_o)^2$$

- Ganho intrínseco e resistência de saída elevados por $g_{m2}r_{o2}$;

23

gpe
GRUPO DE ELETRÔNICA
DE POTÊNCIA DA UFMG



Circuitos Cascode

- Double cascode e folded cascode

Permite se elevar o ganho e impedância de saída da célula

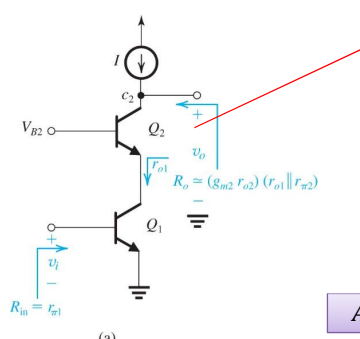
Evita a necessidade de se utilizar fontes de tensão elevadas

24

Circuitos Cascode

- Cascode TBJ



$$R_{in} = r_{\pi 2}$$

$$R_{out} \cong g_{m2} r_{o2} (r_{o1} \parallel r_{\pi 2}) \quad r_o \gg r_{\pi}$$



$$R_{out} \approx g_{m2} r_{\pi 2} r_{o2} = \beta_2 r_{o2}$$

$$A_{v1} = \frac{v_{o1}}{v_i} = -g_{m1} (r_{o1} \parallel r_{\pi 2}) \approx -g_{m1} r_{\pi 2}$$

$$A_{v2} = \frac{v_{o2}}{v_{o1}} = g_{m2} r_{o2}$$

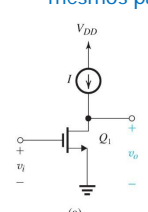
$$A_v = A_{v2} A_{v1} = -g_{m1} g_{m2} r_{\pi 2} r_{o2} = -\beta_2 g_{m1} r_{o2}$$

25

Circuitos Cascode

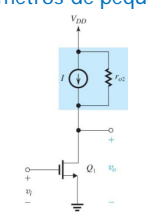
- Efeito da impedância de saída da fonte de corrente
 - Como as fontes de corrente utilizadas para alimentar os circuitos amplificadores não são ideais, a sua impedância de saída irá provocar uma significativa redução do ganho do amplificador;
 - Assumindo, por exemplo, que todos os transistores envolvidos tenham os mesmos parâmetros de pequenos sinais, temos as seguintes situações



(a)

$$A_v = -g_m r_o$$

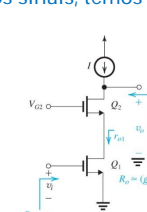
$$R_o = r_o$$



(b)

$$A_v = -\frac{g_m r_o}{2}$$

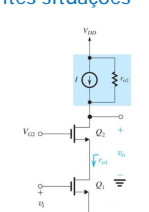
$$R_o = \frac{r_o}{2}$$



(a)

$$A_v = -(g_m r_o)^2$$

$$R_o = g_m r_o^2$$




(b)

$$A_v = -g_m r_o$$

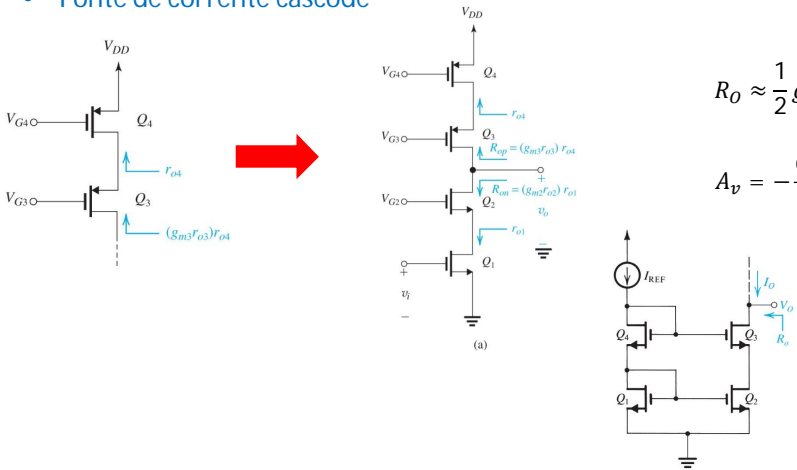
$$R_o = g_m r_o$$

26



Melhorias na fonte de corrente


- Fonte de corrente cascode



$$R_o \approx \frac{1}{2} g_m r_o^2$$

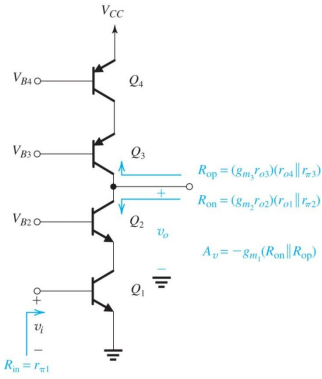
$$A_v = -\frac{(g_m r_o)^2}{2}$$

27





Melhorias na fonte de corrente

- Fonte de corrente cascode



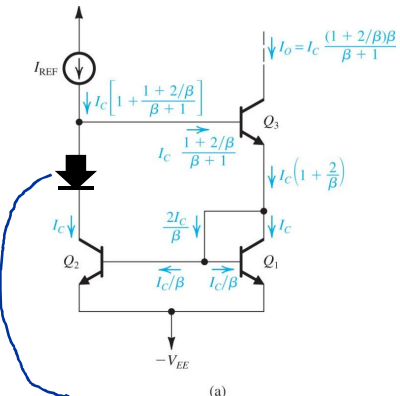
$$A_v \approx -g_m \frac{\beta r_o}{2}$$

28

Melhorias na fonte de corrente

- Espelho de Wilson



(a)

Aconselha-se adicionar um TBJ polarizado como diodo, para equilibrar as tensões



- Considerando os transistores casados:

$$I_{Ref} = I_C \left(1 + \frac{1 + 2/\beta}{\beta + 1} \right)$$

$$I_O = I_C \frac{\beta(1 + 2/\beta)}{\beta + 1}$$

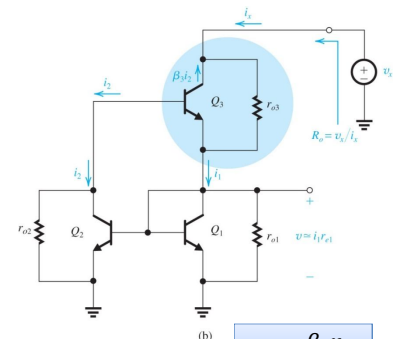
$$\frac{I_O}{I_{Ref}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta(\beta + 1)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2}}$$

29

Melhorias na fonte de corrente

- Espelho de Wilson – análise de pequenos sinais



(b)

$$R_o \approx \frac{\beta_3 r_{o3}}{2}$$

$$i_x = i_1 + i_2 \quad \rightarrow \quad i_1 \approx i_2 = \frac{i_x}{2}$$

$$i_1 \approx i_2 = \frac{i_x}{2}$$

$$i_{r_{o3}} = i_x + \beta_3 i_2 = i_x \left(1 + \frac{\beta_3}{2} \right)$$


$$v_x = v_{r_{o3}} + v_{o1}$$

$$v_{r_{o3}} = r_{o3} i_x \left(1 + \frac{\beta_3}{2} \right)$$

$$v_{o1} = i_1 (r_{e1} \parallel r_{\pi 2} \parallel r_{o1}) \approx i_1 r_{e1} = \frac{i_x r_{e1}}{2}$$

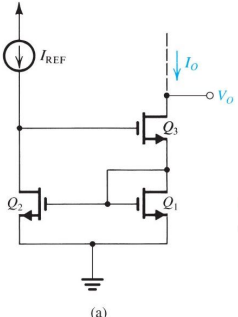
$$v_x = i_x \left(r_{o3} + \frac{r_{o3} \beta_3}{2} + \frac{r_{e1}}{2} \right) \approx i_x \frac{r_{o3} \beta_3}{2}$$

30



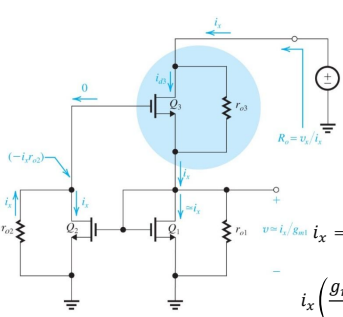
Melhorias na fonte de corrente

- Espelho de Wilson – MOS



(a)

$I_O \approx I_{ref}$



(b)

$$i_x = i_{d3} + i_{r_{o3}}$$

$$i_{d3} = g_{m3} v_{gs3}$$

$$v_{gs3} = -i_x r_{o2} \quad v_{s3} \approx \frac{i_x}{g_{m1}}$$


$$i_{d3} = -g_{m3} i_x \left(r_{o2} + \frac{1}{g_{m1}} \right)$$

$$i_x = -\frac{g_{m3}(g_{m1} r_{o2} + 1) i_x}{g_{m1}} + \frac{\left(v_x - \frac{i_x}{g_{m1}} \right)}{r_{o3}}$$

$$i_x \left(\frac{g_{m1} r_{o3} + g_{m3} r_{o3} (1 + g_{m1} r_{o2}) + 1}{g_{m1}} \right) = v_x$$

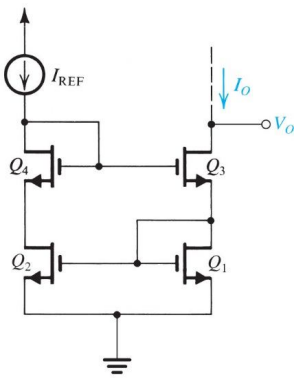
Se $g_{m1} r_{o2} \gg 1$ $R_O \approx g_{m3} r_{o2} r_{o3}$

31



Melhorias na fonte de corrente


- Espelho de Wilson – MOS



(c)

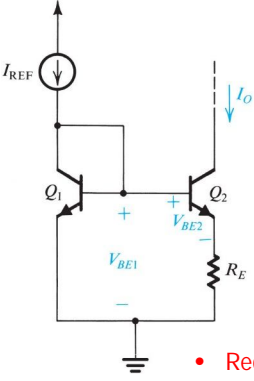
Para balancear as tensões

32



Melhorias na fonte de corrente

- Espelho de Widlar



$I_{ref} \gg I_O$

Desprezando a corrente de base

$$I_O = I_S e^{\frac{V_{BE2}}{V_T}} \quad I_{ref} = I_S e^{\frac{V_{BE1}}{V_T}}$$

$$V_{BE1} = V_{BE2} + R_E I_O$$

$$V_T \ln\left(\frac{I_{ref}}{I_S}\right) = V_T \ln\left(\frac{I_O}{I_S}\right) + R_E I_O$$

$$I_O R_E = V_T \ln\left(\frac{I_{ref}}{I_O}\right)$$

$$R_o \approx (1 + g_m R_E \parallel r_{\pi}) r_o$$

- Reduz o valor dos resistores em relação ao espelho comum;

33



Outras soluções para o amplificador de tensão

- Pares de estágios – CC-CE ou CD-CS



(a)



(b)



(c)

34



Outras soluções para o amplificador de tensão

- Pares de estágios – CC-CB



(a)




(b)



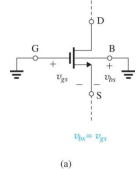
(c)

35

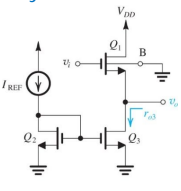


Nota sobre circuitos integrados

- O efeito do substrato (Body)
 - MOSFETS em circuitos integrados não possuem um curto entre fonte e body;
 - Normalmente NMOS possuem o body conectado em -VSS e PMOS em +VCC



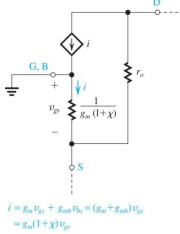
(a)



(b)

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L}{R_L + \frac{1}{g_m}}$$

$$R_L = r_{o1} \parallel r_{o2} \parallel \frac{1}{g_{mb}}$$



(a)

$$i = g_m v_{gs} + g_{mb} v_{bs} = (g_m + g_{mb}) v_{gs}$$

$$= g_m (1 + \chi) v_{gs}$$

(b)

36