



# Projeto de Circuitos Eletrônicos Integrados 2

**Amplificadores Operacionais Avançados**  
*Amp. Op. Cascode*

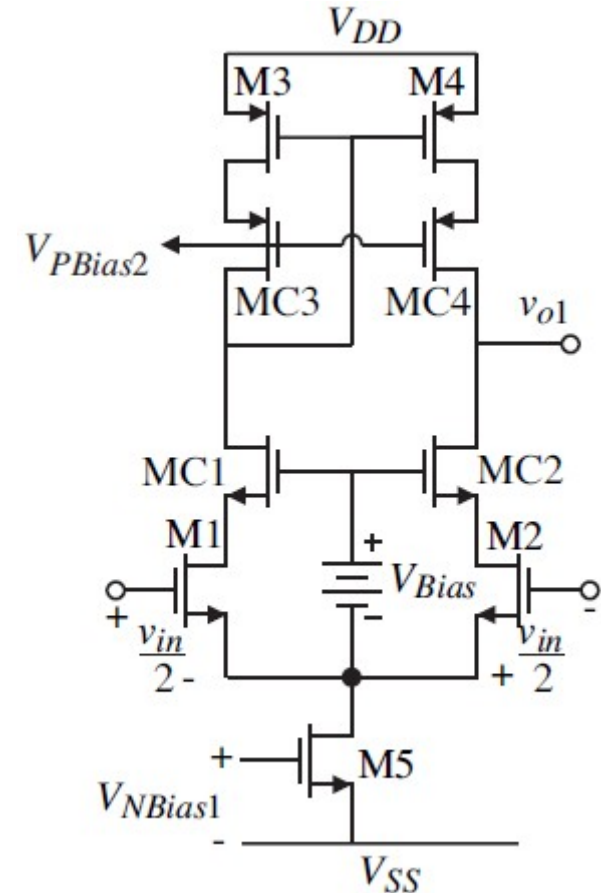
Professor: Wellington Amaral ([waamaral@unb.br](mailto:waamaral@unb.br))

# Amp. Op. Cascode

## Justificativa

➤ Três maneiras de aumentar o ganho de um amplificador operacional:

1. Adicionar mais estágios de ganho
2. Aumentar a transcondutância do primeiro ou do segundo estágio
3. Aumentar a impedância de saída vista pelo primeiro ou segundo estágio



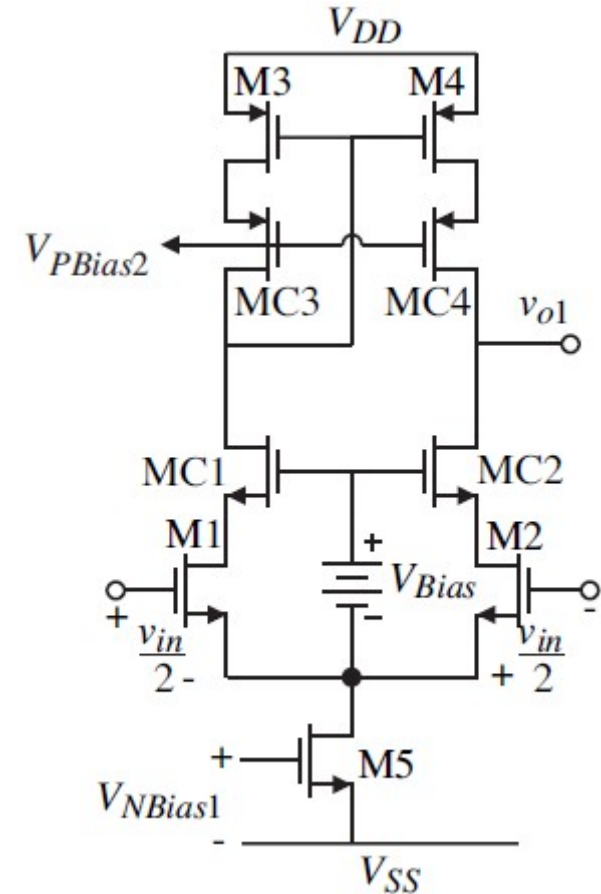
# Amp. Op. Cascode

## Justificativa

➤ Três maneiras de aumentar o ganho de um amplificador operacional:

1. Adicionar mais estágios de ganho

Pode levar à instabilidade



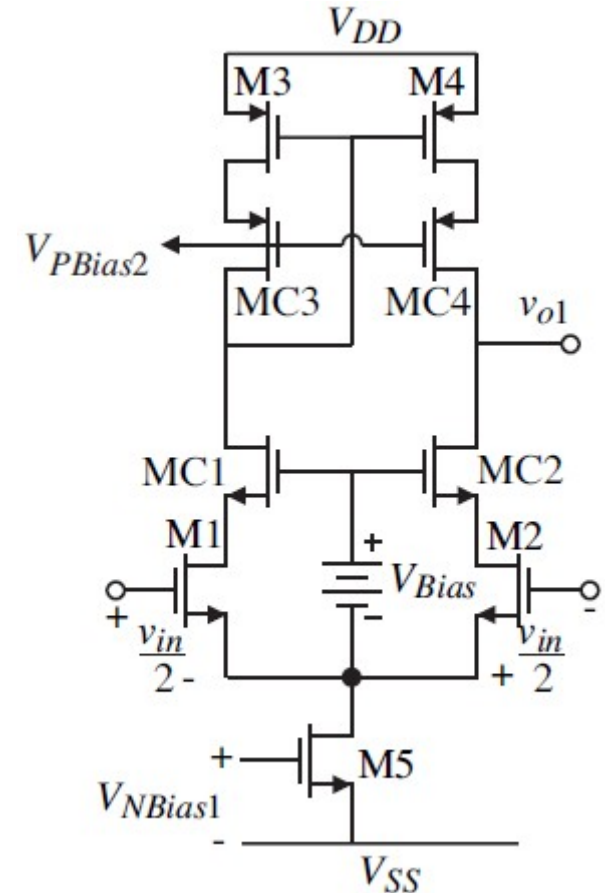
# Amp. Op. Cascode

## Justificativa

➤ Três maneiras de aumentar o ganho de um amplificador operacional:

1. Adicionar mais estágios de ganho
2. Aumentar a transcondutância do primeiro ou do segundo estágio

Aumento do consumo de potência

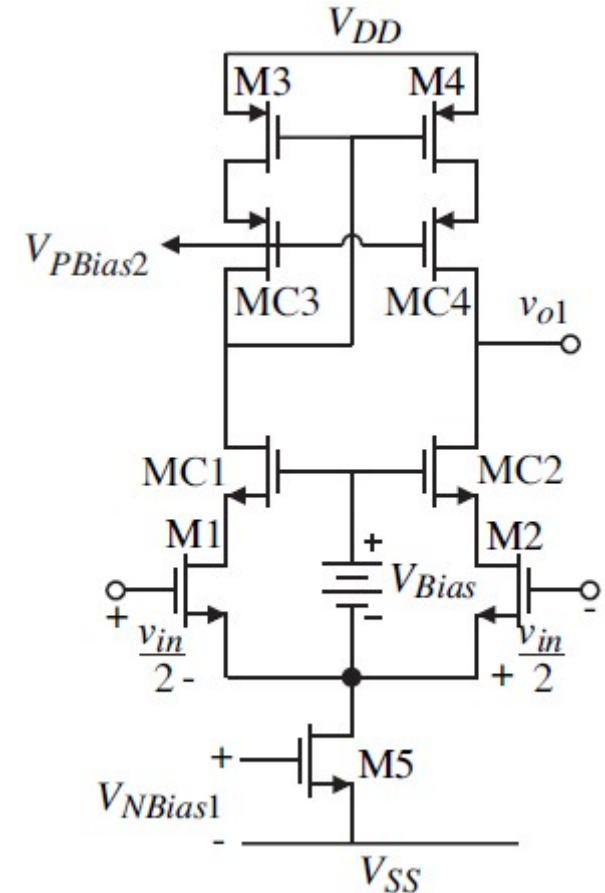


# Amp. Op. Cascode

## Justificativa

➤ Três maneiras de aumentar o ganho de um amplificador operacional:

1. Adicionar mais estágios de ganho
2. Aumentar a transcondutância do primeiro ou do segundo estágio
3. Aumentar a impedância de saída vista pelo primeiro ou segundo estágio



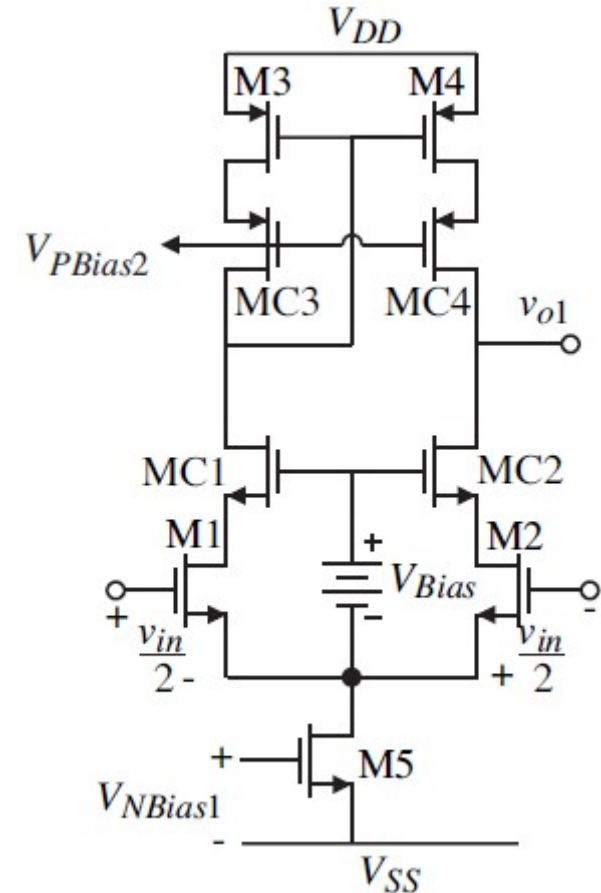
# Amp. Op. Cascode

## Funcionamento

$$R_I \approx (g_{mC2}r_{dsC2}r_{ds2}) \parallel (g_{mC4}r_{dsC4}r_{ds4})$$

$$\text{Voltage gain} = \frac{v_{o1}}{v_{in}} = g_{m1}R_I$$

- Vbias é utilizado para polarizar MC1 e MC2 e ajustar a tensão Vds de M1 e M2







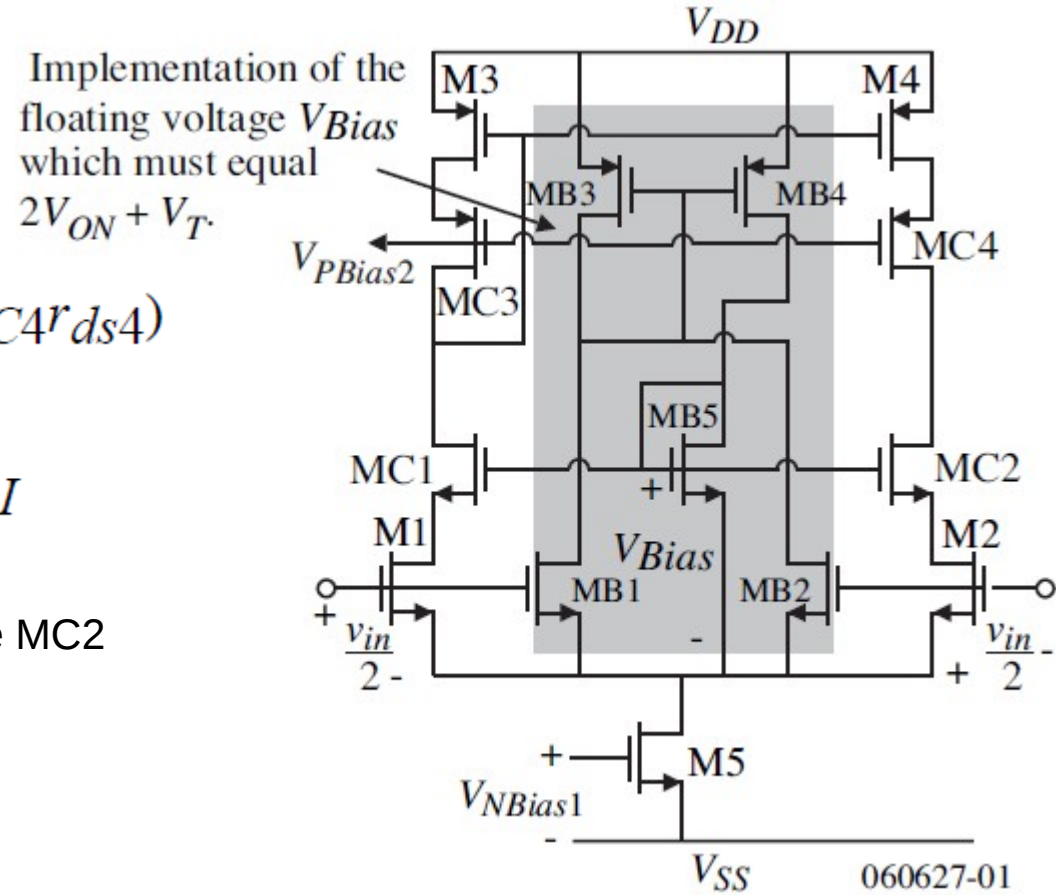
# Amp. Op. Cascode

# Funcionamento

$$R_I \approx (g_m C2r_{ds} C2r_{ds2}) \parallel (g_m C4r_{ds} C4r_{ds4})$$

$$\text{Voltage gain} = \frac{v_{o1}}{v_{in}} = g_{m1}R_I$$

- Vbias é utilizado para polarizar MC1 e MC2 e ajustar a tensão Vds de M1 e M2



# Amp. Op. Cascode

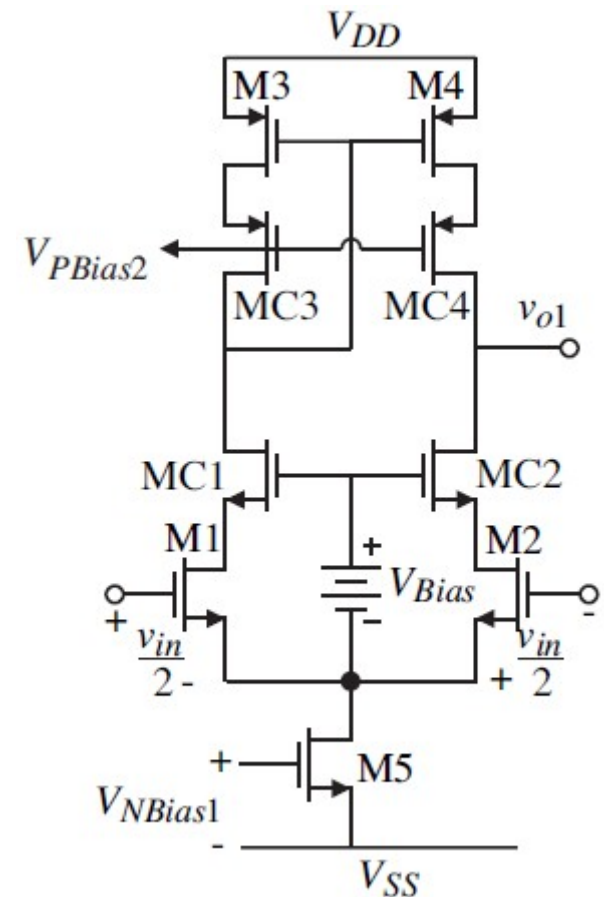
## Exercício

- Projete um Amplificador Cascode com as seguintes especificações abaixo. Encontre  $A_v$  e  $C_1$ .

$V_{DD} = 2,5V$	$I_{ds1} = I_{ds2} = 50\mu A$
$W/L = 10\mu m/1\mu m$	$GB = 10MHz$

- Dados da tecnologia:

$V_{tn} = 0.5V$	$\lambda_N = 0.06V^{-1}$
$V_{tp} = 0.5V$	$\lambda_P = 0.08V^{-1}$
$K_n = 120\mu A/V^2$	
$K_p = 25\mu A/V^2$	





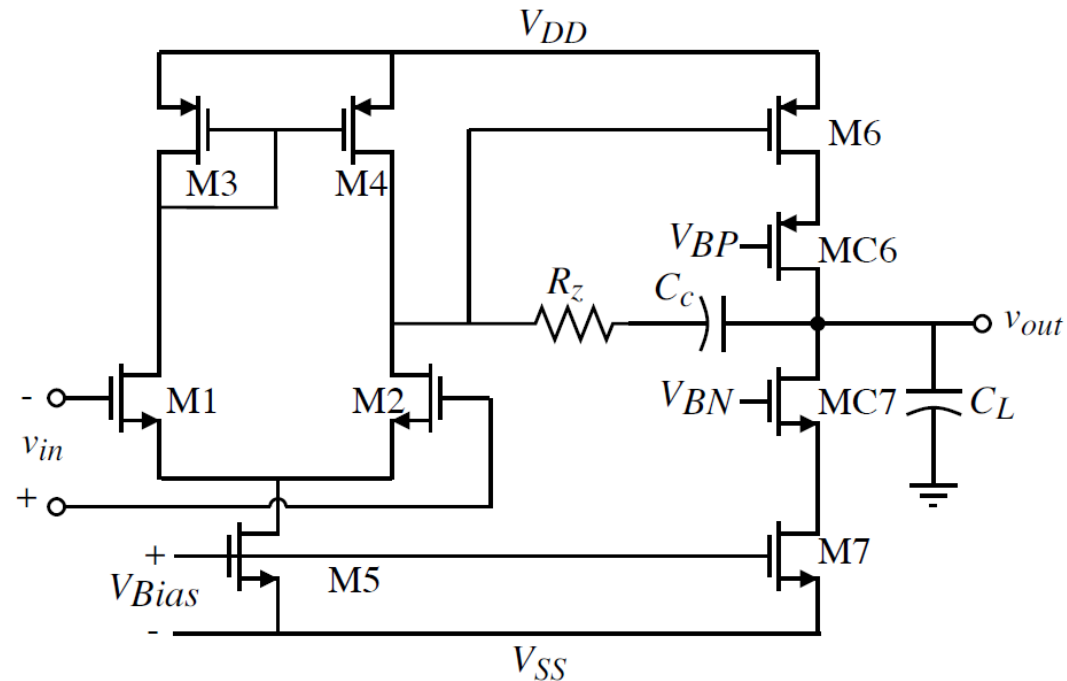


# Amp. Op. Cascode

## Cascode no Segundo Estágio

➤ Elimina a necessidade de um *Level Shifter*

$$A_v = g_{mI} g_{mII} R_I R_{II}$$



# Amp. Op. Cascode

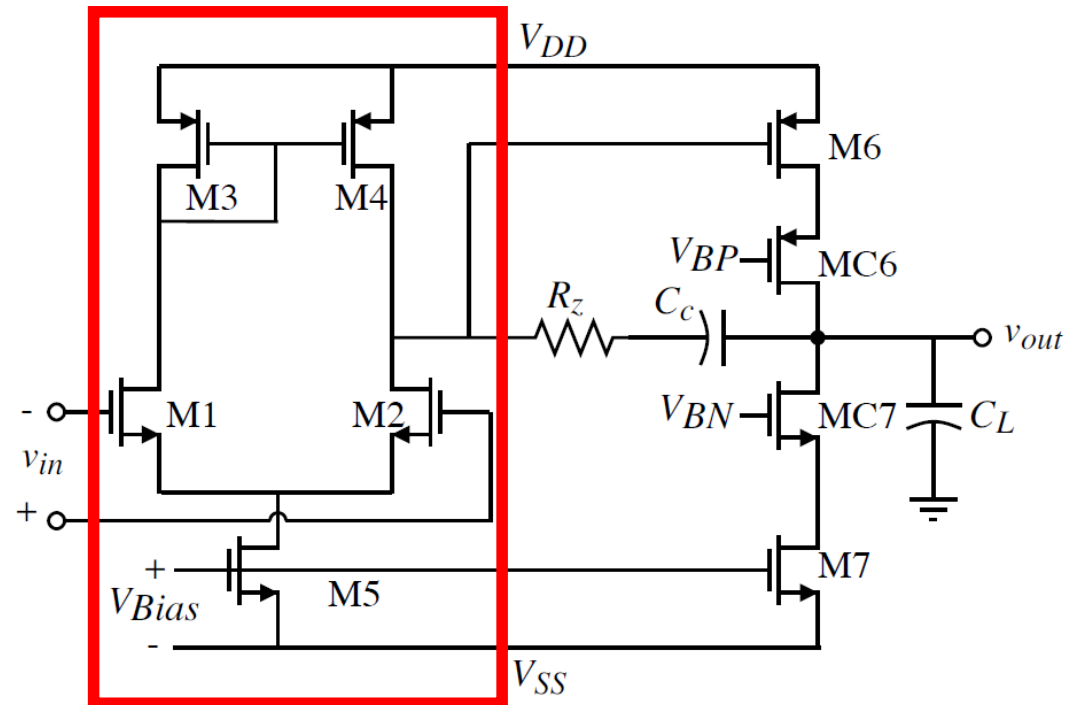
## Cascode no Segundo Estágio

➤ Elimina a necessidade de um *Level Shifter*

$$A_v = \underline{g_{mI}} g_{mII} \underline{R_I} R_{II}$$

$$g_{mI} = g_{m1} = g_{m2}$$

$$R_I = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{2}{(\lambda_2 + \lambda_4) I_{D5}}$$



# Amp. Op. Cascode

## Cascode no Segundo Estágio

➤ Elimina a necessidade de um *Level Shifter*

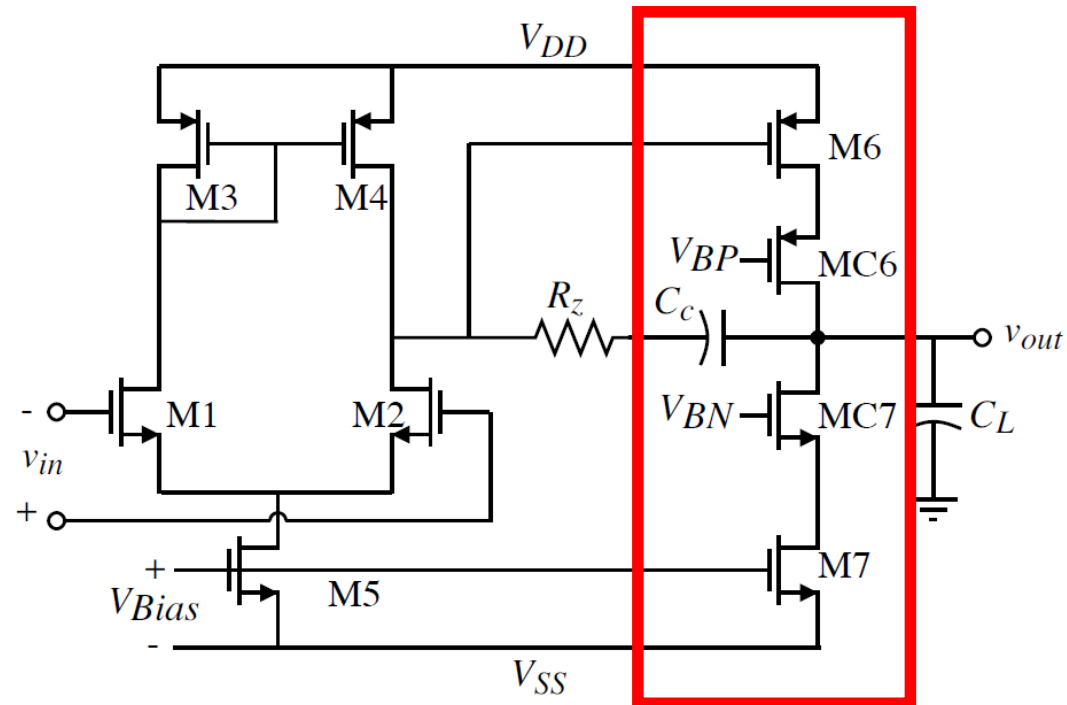
$$A_v = g_{mI} \underline{g_{mII}} \underline{R_I} \underline{R_{II}}$$

$$g_{mI} = g_{m1} = g_{m2}$$

$$R_I = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}} = \frac{2}{(\lambda_2 + \lambda_4)I_{D5}}$$

$$g_{mII} = g_{m6}$$

$$R_{II} = (g_{mC6}r_{dsC6}r_{ds6}) \parallel (g_{mC7}r_{dsC7}r_{ds7})$$



# Amp. Op. Cascode

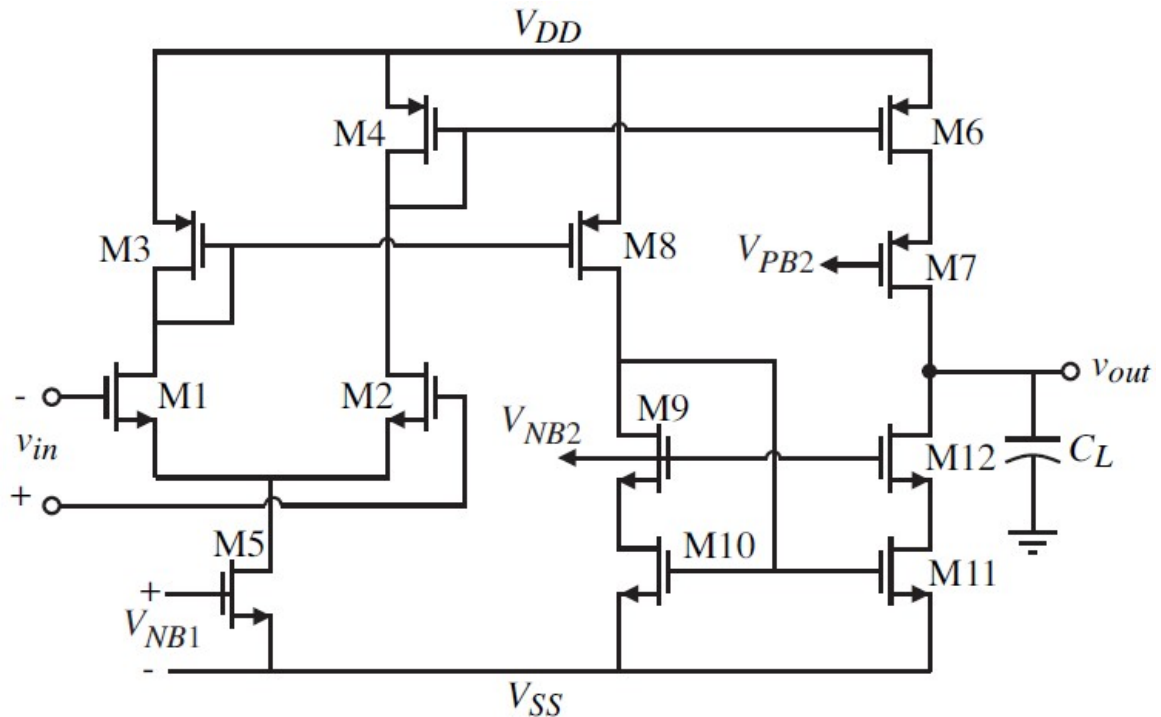
## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

- Mais estável
- Autocompensado

$$A_{VI} = g_{m2}/g_{m4}$$

$$= g_{m1}/g_{m3}$$

$$A_{VII} = \left( \frac{g_{m6} + g_{m8}}{2} \right) R_{II}$$

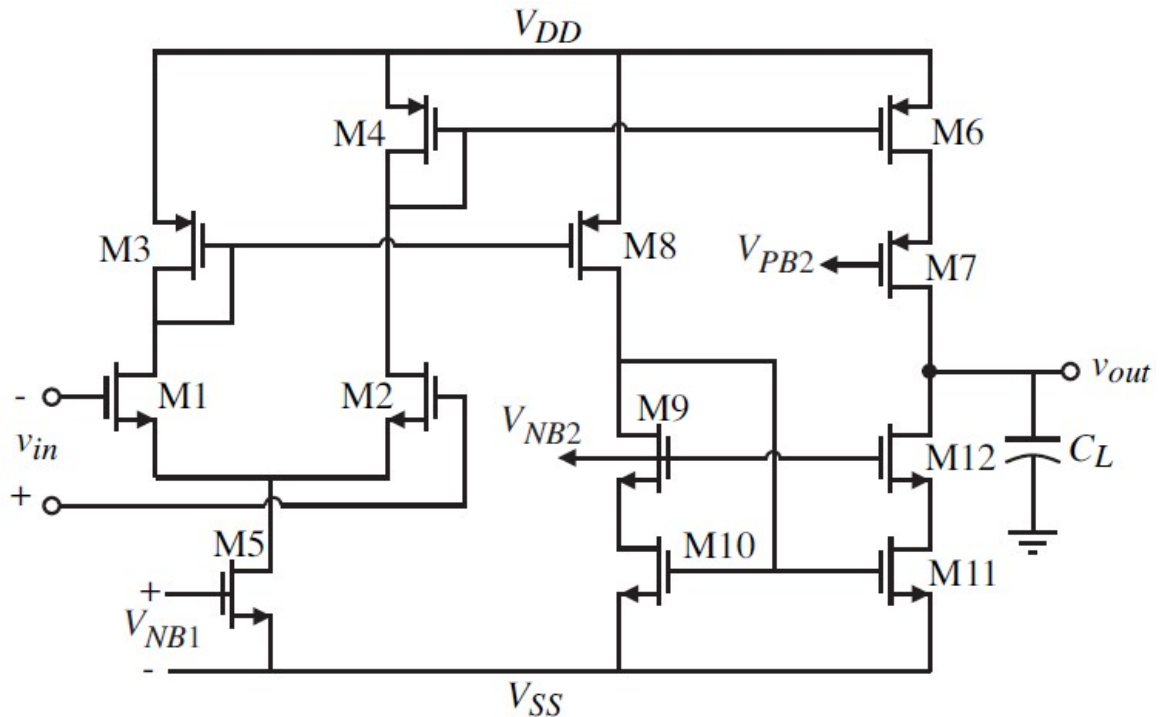


$$R_{II} = (g_{m7}r_{ds7}r_{ds6}) || (g_{m12}r_{ds12}r_{ds11})$$

# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

### Equações de Projeto



$$\text{Slew rate} = \frac{I_{\text{out}}}{C_L}$$

$$GB = \frac{g_{m1}g_{m8}}{g_{m3}C_L}$$

$$A_v = \frac{1}{2} \left( \frac{g_{m1}g_{m8}}{g_{m3}} + \frac{g_{m2}g_{m6}}{g_{m4}} \right) R_{II}$$

$$V_{in}(\text{max}) = V_{DD} - \left[ \frac{I_5}{\beta_3} \right]^{1/2} - |V_{TO3}|(\text{max}) + V_{T1}(\text{min})$$

$$V_{in}(\text{min}) = V_{SS} + V_{DS5} + \left[ \frac{I_5}{\beta_1} \right]^{1/2} + V_{T1}(\text{min})$$

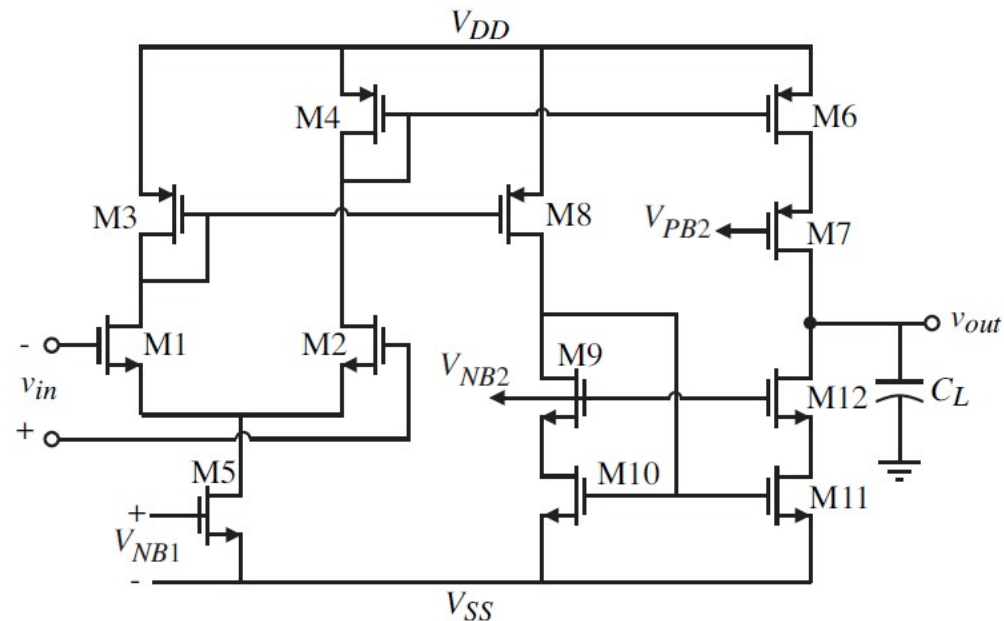


# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

- Projete o Amp. Op ao lado com as seguintes especificações:

$V_{DD} = 2.5V$	$A_v \geq 5000$
$ICMR = 1V$ a $2V$	
Slew rate = $5V/\mu s$ com $50pF$ de carga	
$GB = 10MHz$ com $25pF$ de carga	
$0.5V < \text{Output swing} < 2V$	



- Dados da tecnologia:

$V_{tn} = 0.5V$	$\lambda_n = 0.06V^{-1}$
$V_{tp} = 0.5V$	$\lambda_p = 0.08V^{-1}$
$K_n = 120\mu A/V^2$	$C_{ox} = 6E-15 F/\mu m^2$
$K_p = 25\mu A/V^2$	

- Demais dados de projeto:

$L = 0.5\mu m$

# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

1) Máxima corrente na saída

$$I_{\text{source}}/I_{\text{sink}} = C_L \times \text{slew rate} = 50 \text{ pF}(5 \text{ V}/\mu\text{s}) = 250 \mu\text{A}$$

2) Corrente máxima na saída (considerando que toda corrente  $I_5$  flui em M4)

$$\text{Max. } I_{\text{out}}(\text{source}) = (S_6/S_4)I_5 \quad \text{and} \quad \text{Max. } I_{\text{out}}(\text{sink}) = (S_8/S_3)I_5$$

Será considerado:

$$S_3 = S_4, \quad S_6 = S_8, \quad \text{and} \quad S_{10} = S_{11}$$

3) Dimensões dos transistores de saída

Escolhendo  $I_5 = 100\mu\text{A}$ :

$$S_6 = 2.5S_4 \quad \text{and} \quad S_8 = 2.5S_3$$

4) Amplitude de saída mínima de 0,5V (sob máxima corrente de 250uA)

$$0.25 = \sqrt{\frac{2I_{11}}{K'_N S_{11}}} = \sqrt{\frac{2I_{12}}{K'_N S_{12}}} = \sqrt{\frac{500 \mu\text{A}}{(120 \mu\text{A}/\text{V}^2)S_{11}}} \quad \text{resultando} \quad \begin{aligned} S_{11} &= S_{12} = 67 \\ S_9 &= S_{10} = 67 \end{aligned}$$

# *Amp. Op. Cascode*

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

Amplitude de saída máxima de 2V (sob máxima corrente de 250uA)

$$0.25 = \sqrt{\frac{2I_6}{K'_P S_6}} = \sqrt{\frac{2I_7}{K'_P S_7}} = \sqrt{\frac{500 \mu A}{(25 \mu A/V^2) S_6}} \Rightarrow \begin{aligned} S_6 &= S_7 = S_8 = 320 \\ S_3 &= S_4 = (320/2.5) = 128 \end{aligned}$$

5) Verificar a excursão de entrada e a influência dos seus pólos

- Utilizando os dados de ICMR

$$V_{in}(\max) = V_{DD} - \left[ \frac{I_5}{\beta_3} \right]^{1/2} - |V_{TO3}|(\max) + V_{T1}(\min)$$

# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

Amplitude de saída máxima de 2V (sob máxima corrente de 250uA)

$$0.25 = \sqrt{\frac{2I_6}{K'_P S_6}} = \sqrt{\frac{2I_7}{K'_P S_7}} = \sqrt{\frac{500 \mu A}{(25 \mu A/V^2) S_6}} \Rightarrow \begin{aligned} S_6 &= S_7 = S_8 = 320 \\ S_3 &= S_4 = (320/2.5) = 128 \end{aligned}$$

5) Verificar a excursão de entrada e a influência dos seus pólos

- Utilizando os dados de ICMR obtém-se  $S_3 > 16$
- $S_3$  foi calculado anteriormente como sendo  $S_3 = 128$
- Utilizando um  $S_3$  maior obtém-se uma maior excursão na entrada

$$V_{in}(\max) = V_{DD} - \left[ \frac{I_5}{\beta_3} \right]^{1/2} - |V_{TO3}|(\max) + V_{T1}(\min)$$

# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

Amplitude de saída máxima de 2V (sob máxima corrente de 250uA)

$$0.25 = \sqrt{\frac{2I_6}{K'_P S_6}} = \sqrt{\frac{2I_7}{K'_P S_7}} = \sqrt{\frac{500 \mu A}{(25 \mu A/V^2) S_6}} \Rightarrow \begin{aligned} S_6 &= S_7 = S_8 = 320 \\ S_3 &= S_4 = (320/2.5) = 128 \end{aligned}$$

5) Verificar a excursão de entrada e a influência dos seus pólos

- Utilizando os dados de ICMR obtém-se  $S_3 > 16$
- $S_3$  foi calculado anteriormente como sendo  $S_3 = 128$
- Utilizando um  $S_3$  maior obtém-se uma maior excursão na entrada
- Com  $S_3 = 128$  obtém-se  $V_{in(max)} = 2.32V$
- Verificar se ele provoca um pólo abaixo de  $GB$

$$p_3 = \frac{-g_{m3}}{C_{gs3} + C_{gs8}} = \frac{-\sqrt{2K'_P S_3 I_3}}{(0.667)(W_3 L_3 + W_8 L_8) C_{ox}} = 3.125 \times 10^9 \text{ rads/sec or } 497 \text{ MHz}$$

que é maior que 10GB!

# *Amp. Op. Cascode*

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

6) Cálculo de  $g_{m1}$  e  $g_{m2}$  (duas maneiras possíveis)

a) A partir da especificação de  $A_v$ .

$$A_v = (g_{m1}/2g_{m4})(g_{m6} + g_{m8}) R_{II}$$

considerando  $S_6/S_4$  ( $S_8/S_3 = S_{11}/S_3$ ) =  $k$

$$\frac{g_{m6}}{g_{m4}} = \frac{g_{m11}}{g_{m3}} = \sqrt{\frac{2K_{P'} \cdot S_6 \cdot I_6}{2K_{P'} \cdot S_4 \cdot I_4}} = k$$

após o cálculo das várias transcondutâncias e resistências de saída obtém-se:

$$g_{m4} = 566 \mu S$$

$$r_{ds6} = r_{d7} = 100 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m6} = g_{m7} = g_{m8} = 1414$$

$$r_{ds11} = r_{ds12} = 133 \text{ k}\Omega$$

$$g_{m11} = g_{m12} = 1414 \mu S$$



# *Amp. Op. Cascode*

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

considerando os valores anteriores e que  $A_v$  deve ser maior que 5000 e  $k = 2.5$

$$g_{m1} > 221\mu S$$

b) A partir da especificação de GB

Multiplicando o ganho pelo pólo dominante ( $1/C_{II}R_{II}$ ) obtém-se:

$$GB = \frac{g_{m1}(g_{m6} + g_{m8})}{2g_{m4}C_L}$$

Considerando  $C_L = 25pF$  e utilizando a especificação de GB obtém-se:

$$g_{m1} = 628\mu S$$

como este valor é maior que  $221\mu S$  é escolhido

$$g_{m1} = g_{m2} = 628\mu S$$

Considerando o valor de  $I_5$ :  
 $S_1 = S_2 = 32.9 \approx 33$



## *Amp. Op. Cascode*

### Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

7) Verificar se S1 e S2 são grandes o suficiente para  $ICMR_{min}$

$$V_{in}(\min) = V_{SS} + V_{DS5} + \left[ \frac{I_5}{\beta_1} \right]^{1/2} + V_{T1}(\min)$$

# *Amp. Op. Cascode*

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

7) Verificar se  $S_1$  e  $S_2$  são grandes o suficiente para  $ICMR_{min}$

- Utilizando a equação da saturação obtém-se que  $V_{ds5} = 0.341V$ . Logo  $S_5 = 15$
- O ganho obtido foi de  $A_v = 14182V/V$ , com  $GB = 10MHz$  para uma  $CL = 25pF$

8) Conhecendo as corrente de polarização e os valores de  $W/L$ , as tensões de polarização  $V_{NB1}$ ,  $V_{NB2}$  e  $V_{PB2}$  podem ser projetadas.

Os valores obtidos a partir do procedimento anterior foram:

$$\begin{array}{lll} S_1 = S_2 = 33 & S_3 = S_4 = 128 & S_5 = 15 \\ S_6 = S_7 = S_8 = 320 & S_9 = S_{10} = S_{11} = S_{12} = 67 & \end{array}$$

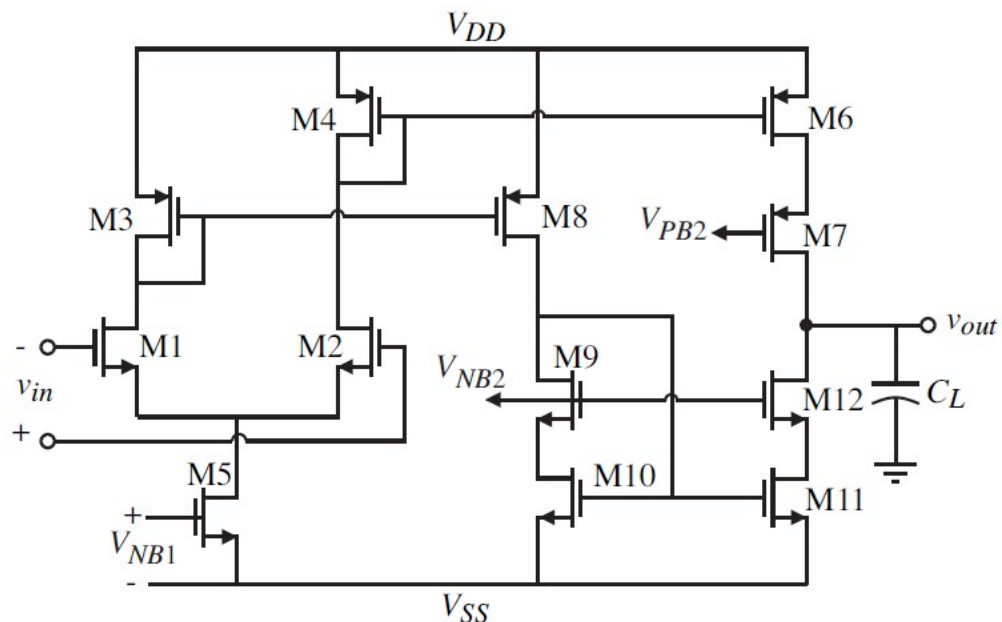
O consumo de potência foi de  $350\mu A \cdot 2.5V = 0.875mW$

# Amp. Op. Cascode

## Balanceado com Cascode no Segundo Estágio

➤ Projete um Amp. Op ao lado com as seguintes especificações:

$V_{DD} = 1,8V$	$A_v \geq 5000$
$GB = 5MHz$	$ICMR = 0,8V$ a $1,3V$
Slew rate = $2V/\mu s$ com $5pF$ de carga	
$GB = 5MHz$ com $2pF$ de carga	
$0,3V < \text{Output swing} < 1,3V$	



➤ Dados da tecnologia:

$V_{tn} = 0,397V$	$\lambda_n = 0,06V^{-1}$
$V_{tp} = 0,457V$	$\lambda_p = 0,08V^{-1}$
$K_n = 591\mu A/V^2$	$C_{ox} = 8,82E-15 F/\mu m^2$
$K_p = 216\mu A/V^2$	

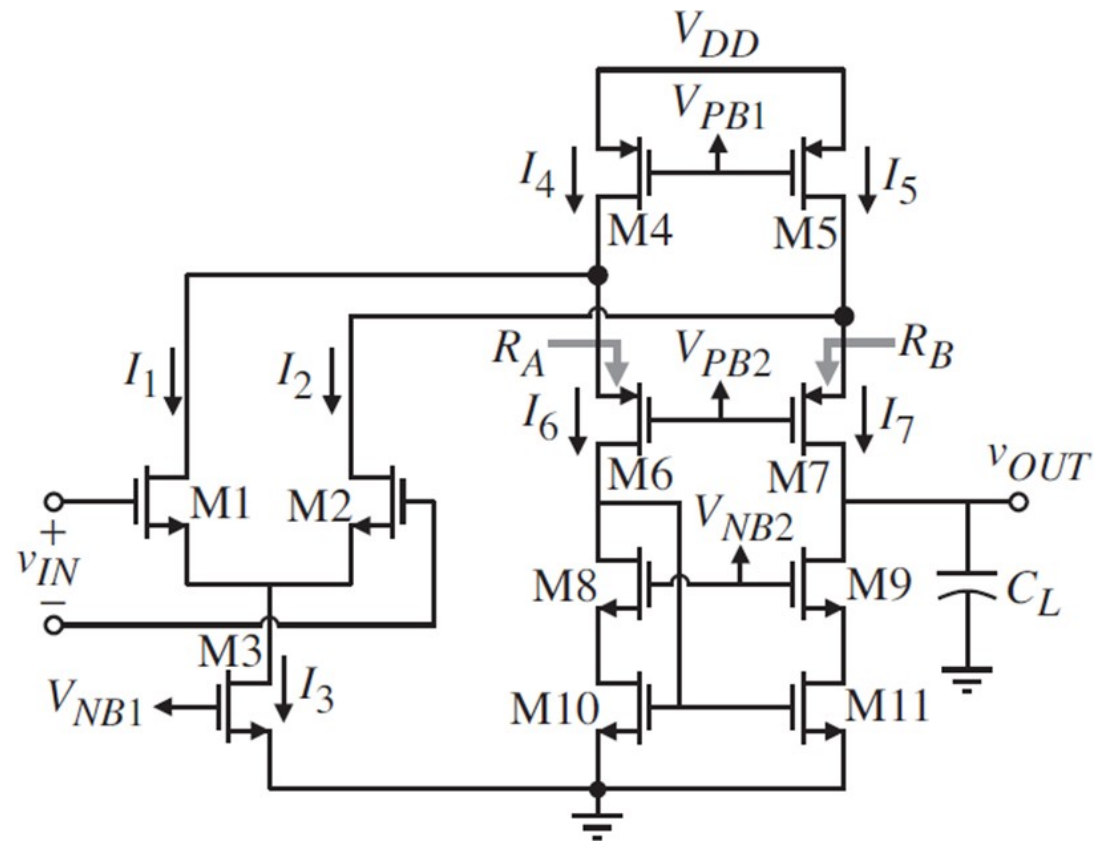
➤ Demais dados de projeto:

$L_{min}$ e $W_{min} = 0,5\mu m$

# *Amp. Op. Folded Cascode*

## Características

- Auto compensado
- Não existe o problema de perda de metade do ganho na conversão para single-ended
- Bom PSRR
- Bom ICMR





# *Referências*

- Phillip Allen, Douglas Holberg, " CMOS Analog Circuit Design", **Capítulo 6** Oxford, 2a ed., 2002.