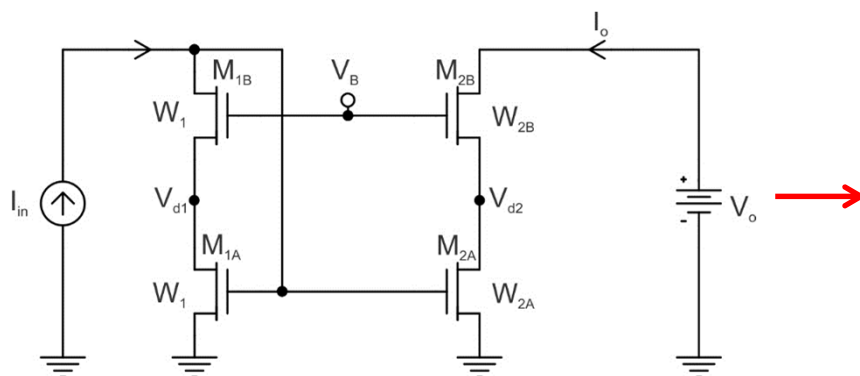


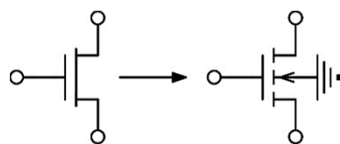
## Espejo de Corrente em Cascode com Elevada Excursão de Sinal

Este espejo possui as mesmas características do espejo em cascode simples, aquele espejo de corrente em cascode com os transistores de entrada configurados como diodo (que agora será referido como espejo de corrente em cascode simples), porem com excursão de sinal maior. Entretanto, necessita de tensão de polarização, que deve ser cuidadosamente calculada para garantir que os transistores sempre operem em saturação.



Ganho de corrente

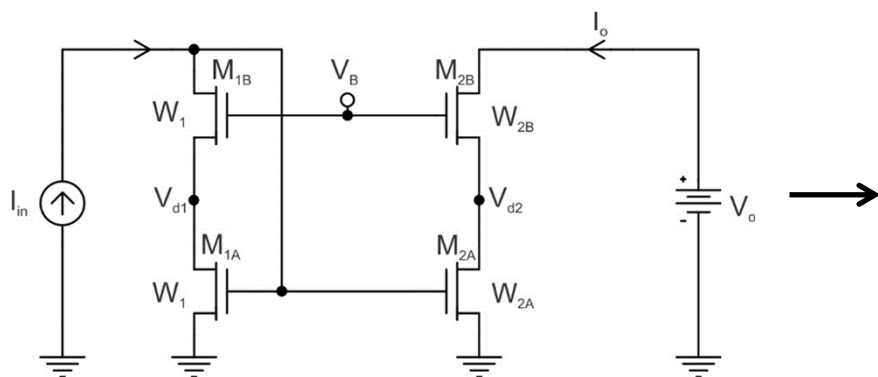
$$\longrightarrow \frac{I_o}{I_{in}} = A_I = \frac{W_2}{W_1}$$



A corrente  $I_o$  é espelhada do transistor  $M_{1A}$  para o  $M_{2A}$ , enquanto  $M_{1B}$  e  $M_{2B}$  são responsáveis por fazer  $V_{d1}$  aproximadamente igual a  $V_{d2}$ . Isto torna a corrente de saída  $I_o$  praticamente independente de  $V_o$ , implicando em uma impedância de saída muito elevada. Mas nesta configuração,  $V_{D2}$  é menor que na configuração em cascode simples, com os dois transistores de entrada não estão conectados em diodo. Desta forma, a tensão  $V_{omin}$  também é menor.

## Excursão de Sinal do Espelho de Corrente de Elevada Excursão de Sinal

A menor tensão de saída deve ser tal que todos os transistores permaneçam em saturação. No caso extremo, a menor tensão de saída ocorre quando  $V_B$  é o mínimo possível.



$$V_{d2} = V_B - \Delta V_{gs} - V_{T_2}$$

$$V_{0\min} = V_{d2} + V_{sat}$$

$$V_{0\min} = V_B + \Delta V_{gs} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right) - V_{T_2}$$

$$\Delta V_{gs} = \frac{V_{0\min} - V_B + V_{T_2}}{\left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right)}$$

**No caso extremo**  $\rightarrow V_{d2} = V_{sat} = \frac{\Delta V_{gs}}{\alpha}$

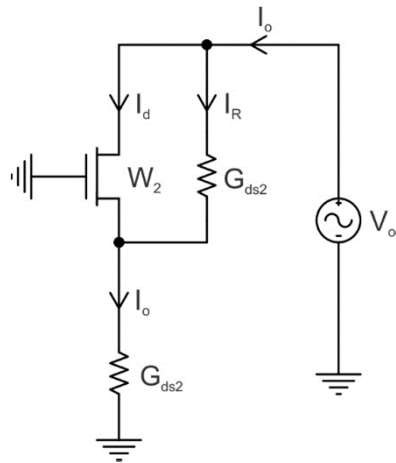
$$V_{B\min} = \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \Delta V_{gs} + V_{T_2}$$

$$V_{0\min} = \frac{2\Delta V_{gs}}{\alpha}$$

$$\rightarrow \Delta V_{gs} = \frac{\alpha V_{0\min}}{2}$$

### *Impedância de Saída do Espelho de Corrente de Elevada Excursão de Sinal*

Este espelho possui as mesmas características do espelho em cascode simples, e isto implica em impedância de saída com a mesma característica.



$$R_0 = (2 + R_{DS2} g_{m2}) R_{DS2}$$

$$|A_{V_{2\max}}| = g_{m2} R_{DS2} \rightarrow$$

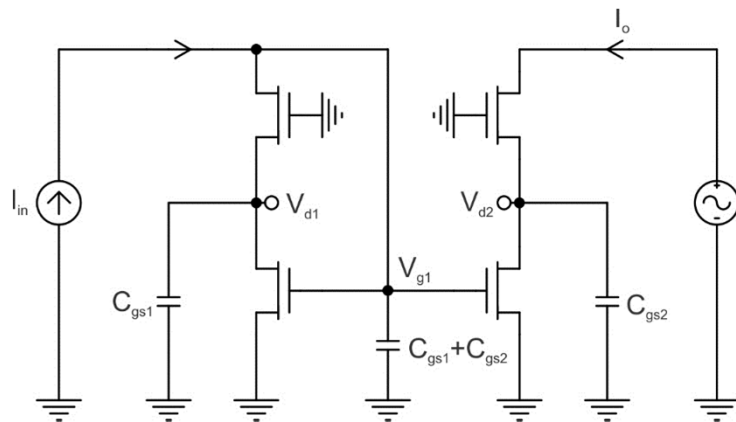
Máximo ganho de tensão na configuração source comum.

$$R_0 = (2 + |A_{V_{2\max}}|) R_{DS2}$$

$$|A_{V_{2\max}}| \gg 1 \rightarrow$$

Ganho de tensão alto.

## Resposta em Frequência do Espelho de Corrente em Cascode de Elevada Excursão de Sinal



Função de transferência

$$\frac{I_0}{I_{in}} = \frac{A_I}{s^2 \frac{C_{gs1}^2}{gm_1^2} (A_I + 1) + s \frac{C_{gs1}}{gm_1} (A_I + 1) + 1}$$

$$A_I = \frac{I_0}{I_{in}} = \frac{W_2}{W_1}$$

Polos →

$$P_1 = -\frac{gm_1}{C_{gs1}} \left( \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{A_I + 1}} \right)$$

$$P_2 = -\frac{gm_1}{C_{gs1}} \left( \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{A_I + 1}} \right)$$

$A_I > 3$ , polos simples

$A_I = 3$ , polos duplos

$A_I < 3$ , polos complexos conjugados

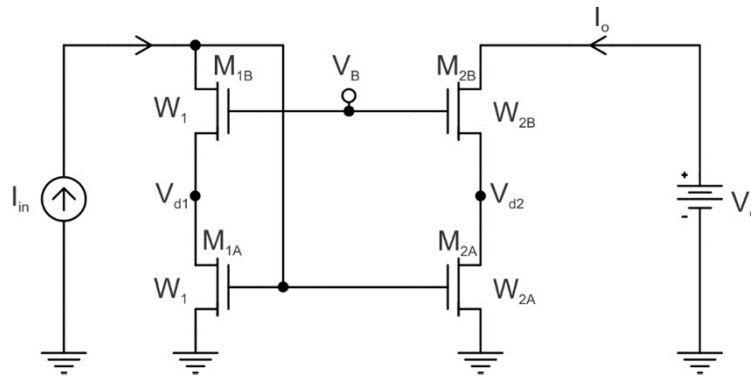
Frequência de corte →

$$f_{3dB} = \frac{gm_1}{C_{gs1}} \frac{\sqrt{-2(A_I + 1)(A_I - 1 - \sqrt{A_I^2 - 2A_I + 5})}}{4\pi(A_I + 1)}$$

$$f_{3dB} = \frac{3k_p V_{o\min}}{4L^2 C_{ox}} \frac{\sqrt{-2(A_I + 1)(A_I - 1 - \sqrt{A_I^2 - 2A_I + 5})}}{4\pi(A_I + 1)}$$

## Descasamento do Espelho de Corrente em Cascode de Elevada Excursão de Sinal

O espelho de corrente em cascode de elevada excursão de sinal possui descasamento similar ao do espelho de corrente em cascode simples.

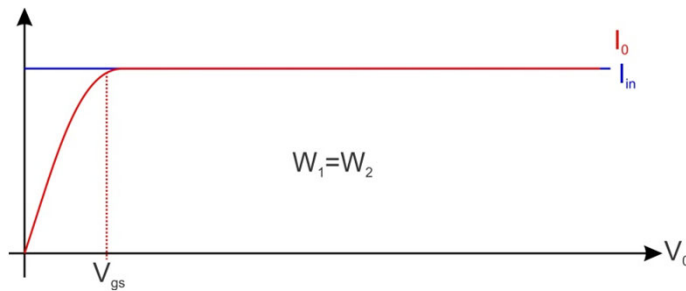


$$I_1 \gg I_{G1}$$

$$I_0 = \frac{W_2}{W_1} I_{in} + \frac{(V_0 - V_{gs})}{(2 + g_{m2} R_{DS2}) R_{DS2}}$$

$$\frac{\Delta I_0}{I_{0q}} = \frac{(V_0 - V_{gs})}{(2 + g_{m2} R_{DS2}) R_{DS2} I_{0q}} \quad \leftarrow R_{DS2} = \frac{1}{\lambda I_{0q}}$$

$$\frac{\Delta I_0}{I_{0q}} = \frac{\lambda (V_0 - V_{gs})}{(2 + g_{m2} R_{DS2})}$$



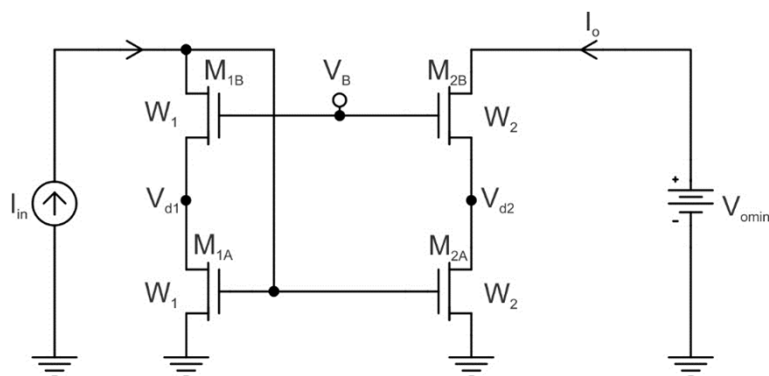
$$g_{m2} = \frac{k_p}{\alpha} \frac{W_2}{L} \Delta V_{gs}$$

$$G_{DS2} = \frac{k_p}{2\alpha} \frac{W_2}{L} \Delta V_{gs}^2 \lambda$$

$$\frac{\Delta I_0}{I_{0q}} = \frac{\lambda^2 (V_0 - V_T - \Delta V_{gs}) \Delta V_{gs}}{2(\lambda \Delta V_{gs} + 1)}$$

## Ajuste da Tensão de Polarização $V_B$

A tensão de polarização  $V_B$  não pode ser escolhida aleatoriamente. Seu valor deve ser tal que mantenha todos os transistores saturados, apesar das variações de  $I_{in}$  e  $V_o$ .



- Todos os transistores operam em inversão forte.
- As condições de saturação de  $M_{1A}$  e  $M_{2A}$  são iguais.

## Curvas de Limites de Saturação

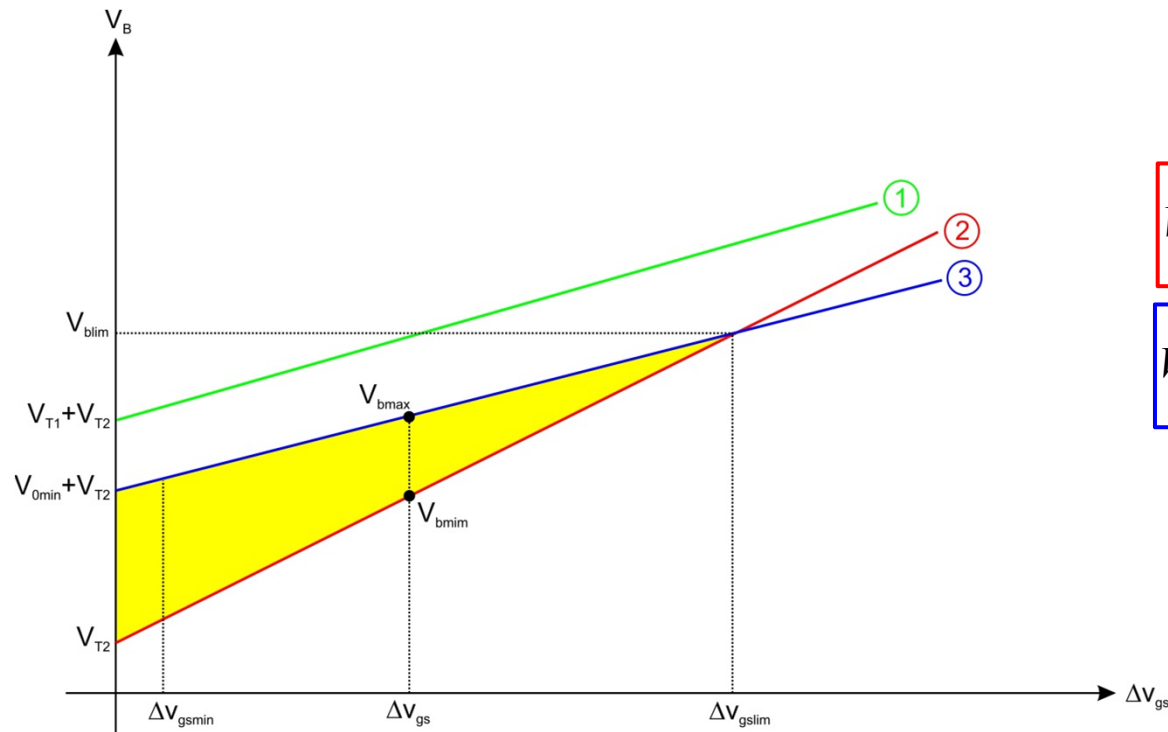
Saturação de  $M_{1B}$   $\longrightarrow V_B \leq V_{T_1} + V_{T_2} + \left(2 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$  ①

Saturação de  $M_{1A}$  e  $M_{2A}$   $\longrightarrow V_B \geq V_{T_2} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$  ②

Saturação de  $M_{2B}$   $\longrightarrow V_B \leq V_{0min} + V_{T_2} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$  ③

## Corrente de Entrada Constante

$V_{0\min} \leq V_{T_1} + \Delta V_{gs}$   $\longrightarrow$  Condição mais comum, de baixa tensão de saída. Somente as condições de saturação para  $M_{1A}$  e  $M_{2B}$  são importantes.



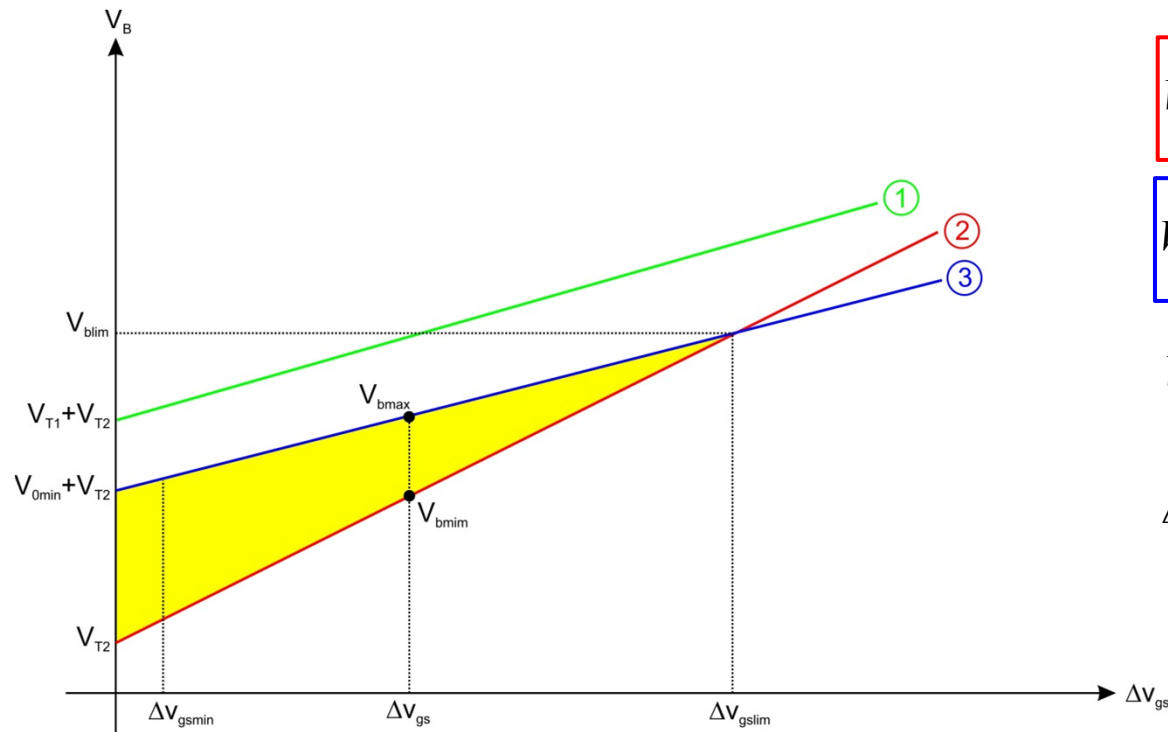
$$V_B \leq V_{T_1} + V_{T_2} + \left(2 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \geq V_{T_2} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \leq V_{0\min} + V_{T_2} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

## Corrente de Entrada Constante

$V_{0\min} \leq V_{T_1} + \Delta V_{gs} \rightarrow$  Condição mais comum, de baixa tensão de saída. Somente as condições de saturação para  $M_{1A}$  e  $M_{2B}$  são importantes.



$$V_B \geq V_{T_2} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \leq V_{0\min} + V_{T_2} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_{B\lim} = \frac{\alpha + 1}{2} V_{0\min} + V_{T_2}$$

$$\Delta v_{gs\lim} = \frac{\alpha}{2} V_{0\min}$$

Reta média  $\rightarrow$

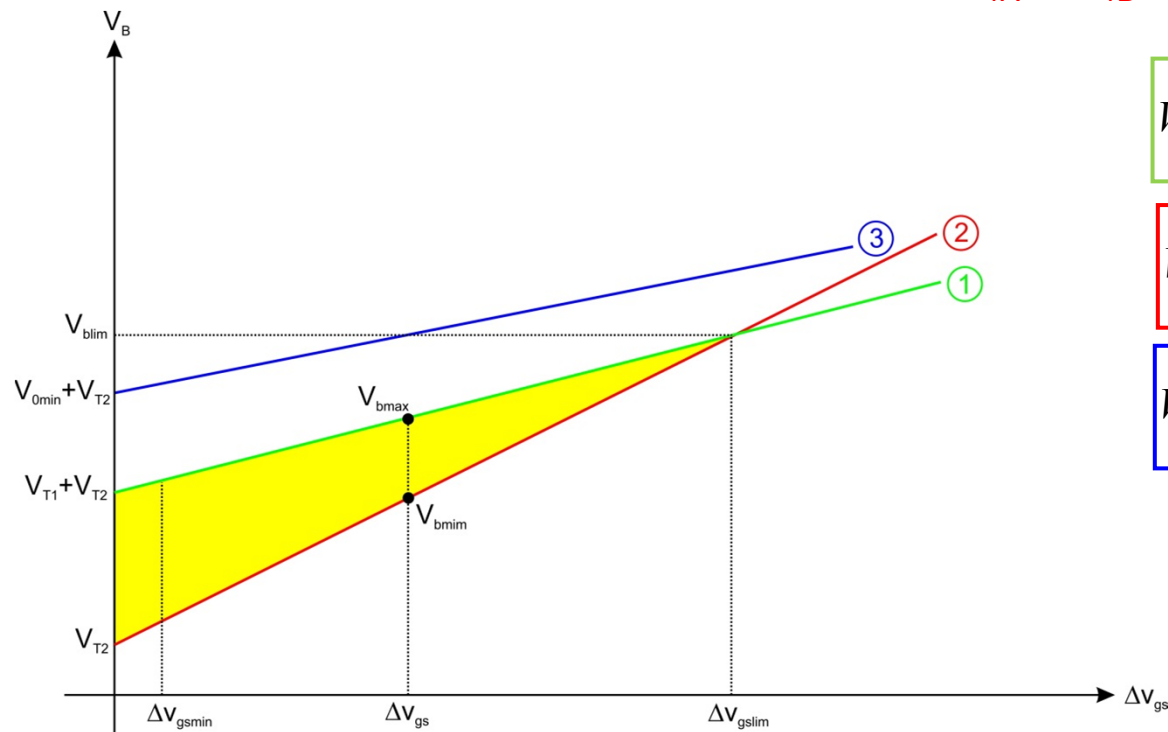
$$V_B = \Delta v_{gs} + V_{T_2} + \frac{V_{0\min}}{2}$$

$$\Delta V_B = \pm \left( \frac{\Delta v_{gs}}{\alpha} - \frac{V_{0\min}}{2} \right)$$



## Corrente de Entrada Constante

$V_{0min} > V_{T_1} + \Delta V_{gs}$   $\longrightarrow$  Condição menos comum, pois implica em valores mais elevados para  $V_{0min}$ . Neste caso,  $V_{0min}$  não é importante, e somente a saturação de  $M_{1A}$  e  $M_{1B}$  é considerada.



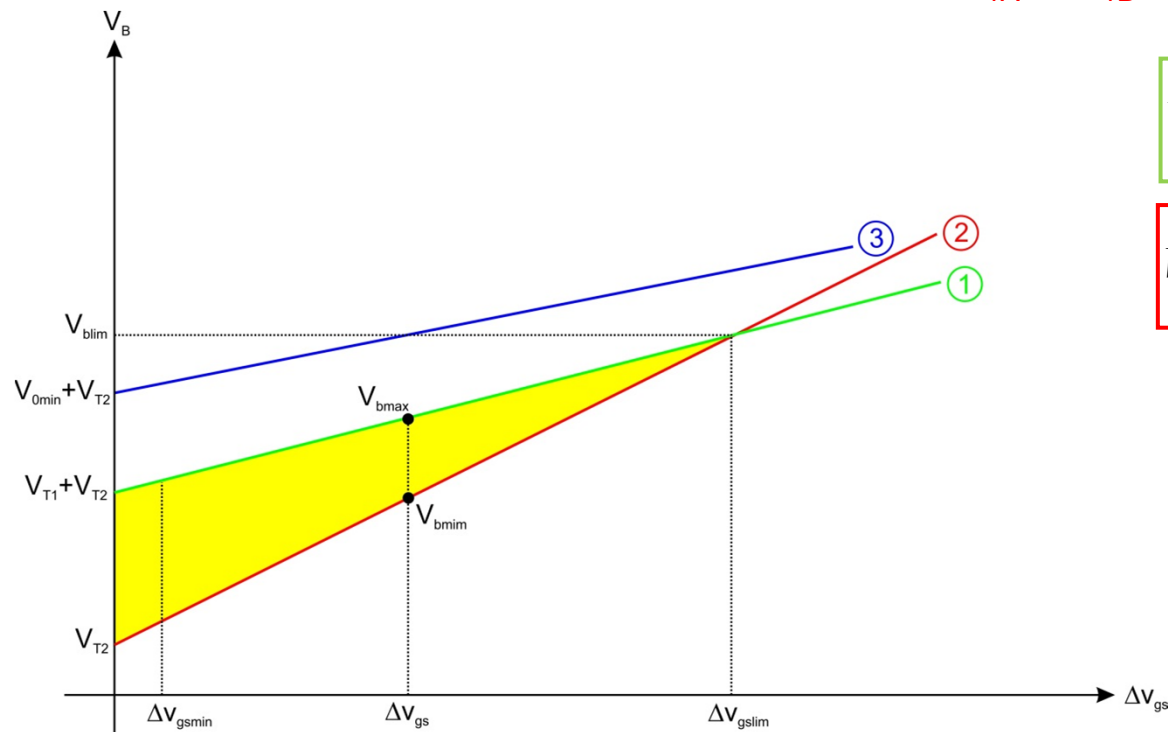
$$V_B \leq V_{T_1} + V_{T_2} + \left(2 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \geq V_{T_2} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \leq V_{0min} + V_{T_2} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

## Corrente de Entrada Constante

$V_{0min} > V_{T1} + \Delta V_{gs}$   $\longrightarrow$  Condição menos comum, pois implica em valores mais elevados para  $V_{0min}$ . Neste caso,  $V_{0min}$  não é importante, e somente a saturação de  $M_{1A}$  e  $M_{1B}$  é considerada.



$$V_B \leq V_{T1} + V_{T2} + \Delta V_{gs} + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$V_B \geq V_{T2} + \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \Delta V_{gs}$$

$$\Delta v_{gs \lim} = \frac{\alpha}{2 - \alpha} V_{T1}$$

$$V_{B \lim} = \frac{\alpha + 1}{2 - \alpha} V_{T1} + V_{T2}$$

Reta média  $\longrightarrow$

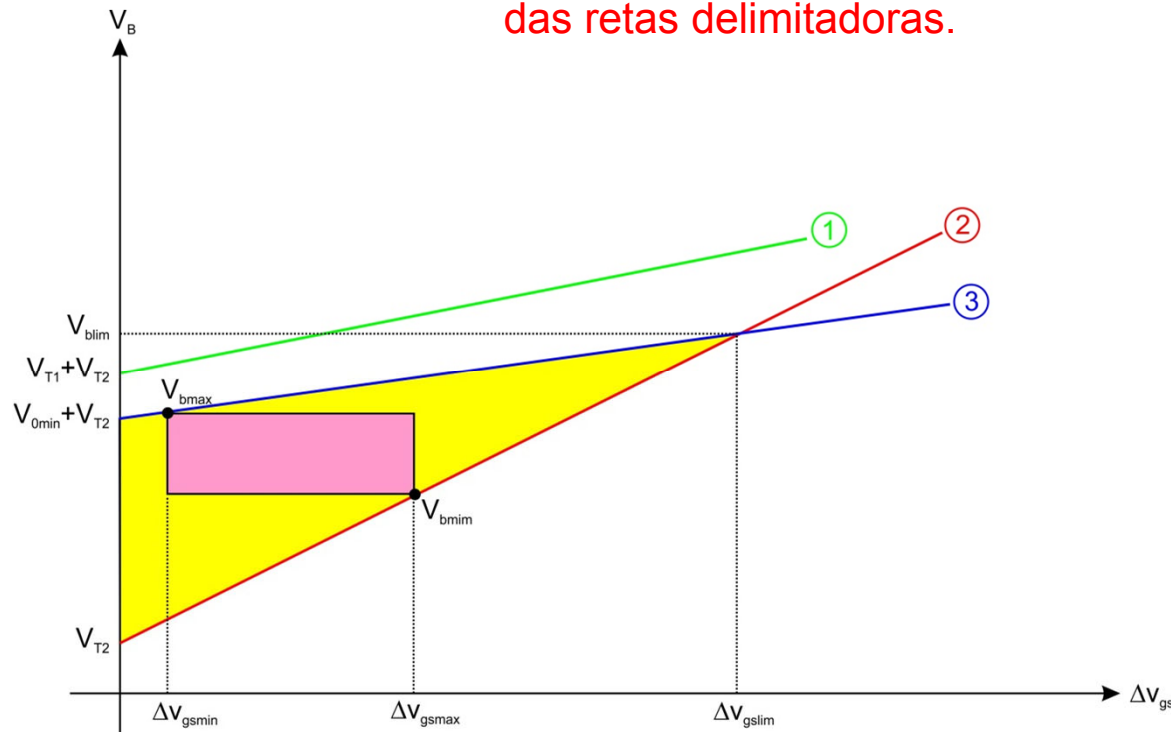
$$V_B = \frac{3}{2} \Delta v_{gs} + \frac{V_{T1}}{2} + V_{T2}$$

$$\Delta V_B = \pm \left( V_{T1} - \frac{2 - \alpha}{\alpha} \Delta v_{gs} \right)$$

## Corrente de Entrada Variável

$$V_{0\min} \leq V_{T1} + \Delta V_{gs} \longrightarrow$$

Condição mais comum, de baixa tensão de saída. Somente as condições de saturação para  $M_{1A}$  e  $M_{2B}$  são importantes. Neste caso, a região de operação válida é um retângulo dentro das retas delimitadoras.



$$V_{B\min} = \frac{\alpha + 1}{\alpha} \Delta v_{gs\max} + V_{T2}$$

$$V_{B\max} = \frac{\alpha - 1}{\alpha} \Delta v_{gs\min} + V_{0\min} + V_{T2}$$

$$\Delta v_{gs\lim} = \frac{\alpha}{2} V_{0\min}$$

$$V_{B\lim} = \frac{\alpha + 1}{2} V_{0\min} + V_{T2}$$

Valor médio  $\longrightarrow$

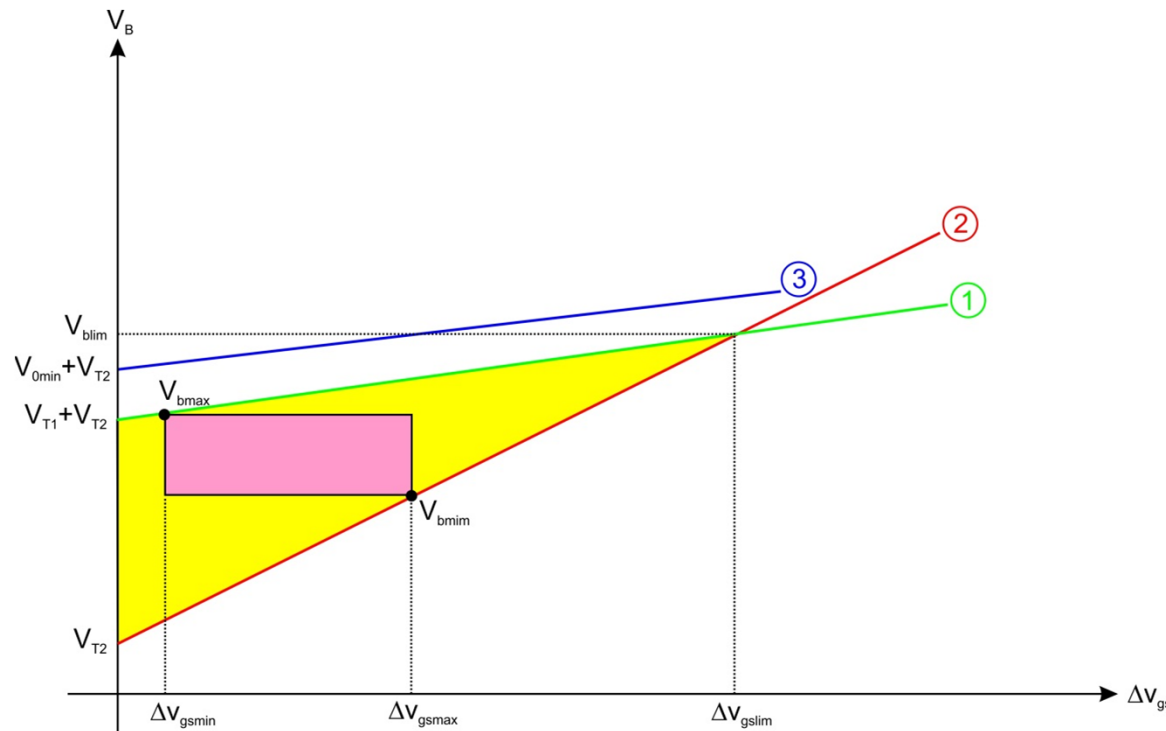
$$\overline{V_B} = \frac{\frac{\alpha - 1}{\alpha} \Delta v_{gs\min} + \frac{\alpha + 1}{\alpha} \Delta v_{gs\max} + V_{0\min}}{2} + V_{T2}$$

$$\Delta V_B = \pm \frac{V_{B\max} - V_{B\min}}{2}$$

## Corrente de Entrada Variável

$$V_{0\min} > V_{T1} + \Delta V_{gs} \longrightarrow$$

Condição menos comum, de tensão de saída mais elevada. Somente as condições de saturação para  $M_{1A}$  e  $M_{1B}$  são importantes. Neste caso, a região de operação válida é um retângulo dentro das retas delimitadoras.



$$V_{B\min} = \frac{\alpha + 1}{\alpha} \Delta v_{gs\max} + V_{T2}$$

$$V_{B\max} = \frac{2\alpha - 1}{\alpha} \Delta v_{gs\min} + V_{T1} + V_{T2}$$

$$\Delta v_{gs\lim} = \frac{\alpha}{2 - \alpha} V_{T1}$$

$$V_{B\lim} = \frac{\alpha + 1}{2 - \alpha} V_{T1} + V_{T2}$$

Reta média  $\longrightarrow$

$$\overline{V_B} = \frac{\frac{2\alpha - 1}{\alpha} \Delta v_{gs\min} + \frac{\alpha + 1}{\alpha} \Delta v_{gs\max} + V_{T1}}{2} + V_{T2}$$

$$\Delta V_B = \pm \frac{V_{B\max} - V_{B\min}}{2}$$

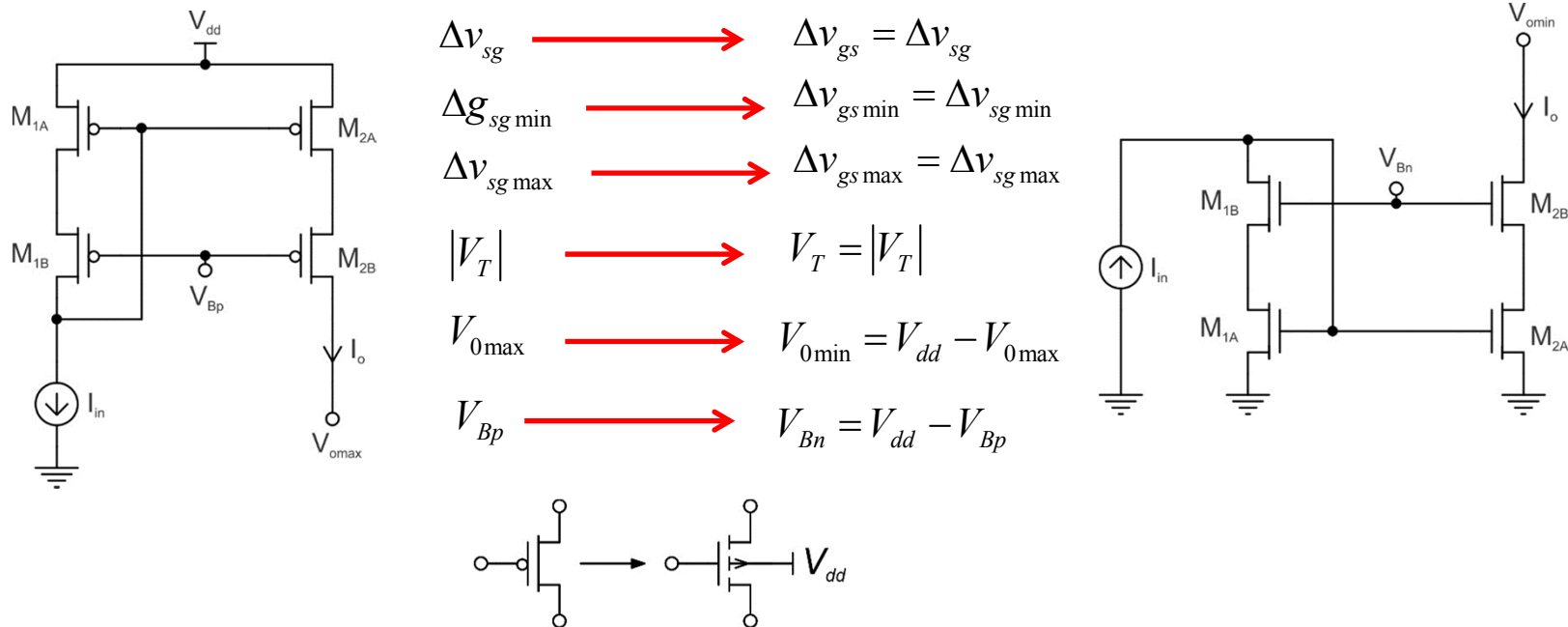
## Como escolher $\Delta v_{gsmin}$ e $\Delta v_{gsmax}$

Os valores de  $\Delta v_{gsmin}$  e  $\Delta v_{gsmax}$  devem ser escolhidos em função das correntes mínima e máxima.

$$\Delta v_{gsmin} = \sqrt{\frac{2\alpha L I_{inmin}}{k_p W_1}} \quad \Delta v_{gsmax} = \sqrt{\frac{2\alpha L I_{inmax}}{k_p W_1}}$$

## Espelho de Corrente PMOS em Cascode com Elevada Excursão de Sinal

O projeto dos espelhos de corrente PMOS pode ser realizado com as equações desenvolvidas para o caso NMOS, mas trocando os parâmetros do transistor NMOS pelos do PMOS.



**Final deste  
Tópico**