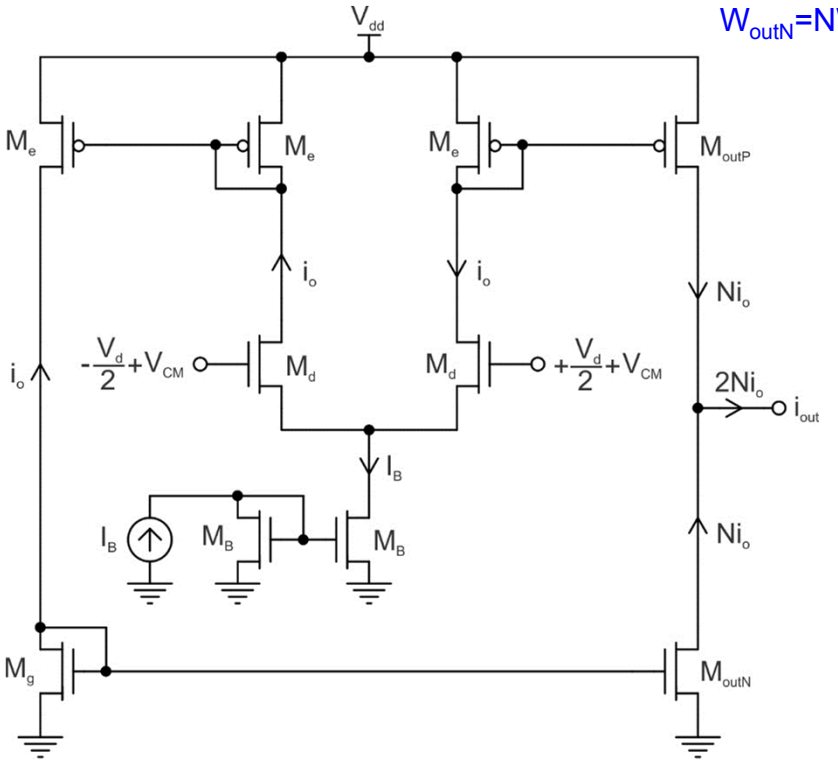
Amplificador Operacional de Transcondutância - OTA

Amplificadores Operacionais de Transcondutância (OTA) são dispositivos muito usados na microeletrônica, principalmente no projeto de filtros a capacitores chaveados (SC) e filtros contínuos no tempo (gm-C). Sua impedância de saída é muito elevada, e a corrente de saída é proporcional ao ganho de transcondutância gm_d do amplificador diferencial de entrada. Quando usado com carga capacitiva, torna-se um integrador. Os polos produzidos pelas capacitâncias parasitas estão em frequências altas, de forma que o capacitor de saída define o polo dominante, dispensando compensação em frequência na maioria das aplicações.

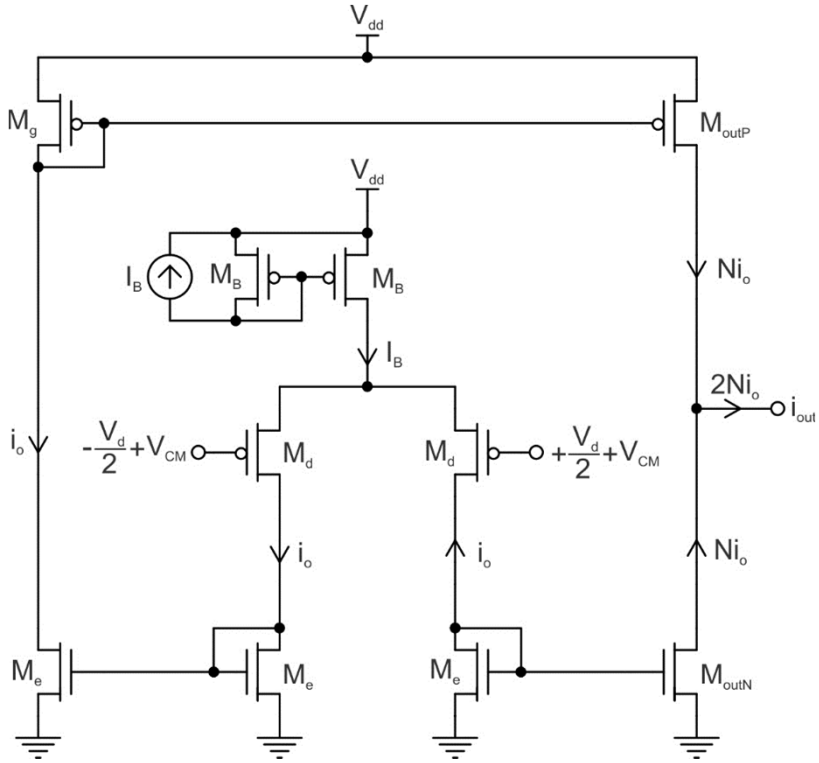
Versão single-ended - NMOS

$W_{outP}=NW_e$

$W_{outN}=NW_g$

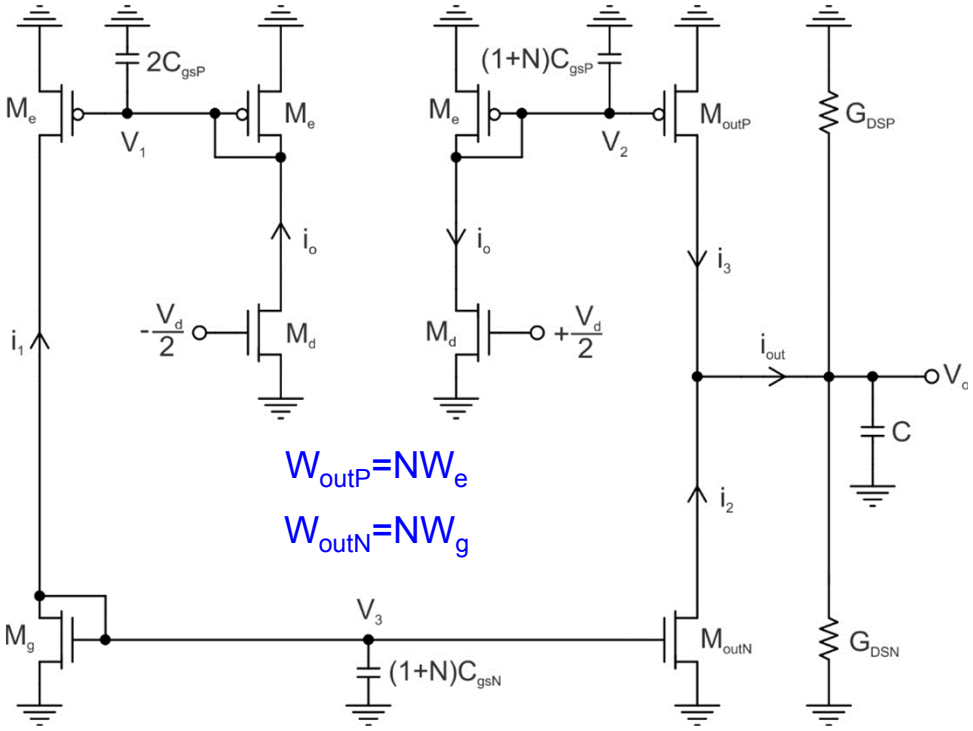


Versão single-ended - PMOS



Análise AC de Pequenos Sinais com Carga Capacitiva

Versão single-ended - NMOS



$$I_{out} = I_2 + I_3$$

$$I_0 = gm_d \frac{V_d}{2} \longrightarrow V_1 = \frac{\frac{I_0}{gm_e}}{s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1}$$

$$I_1 = gm_e V_1 \longrightarrow V_3 = \frac{-\frac{I_1}{gm_g}}{s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1}$$

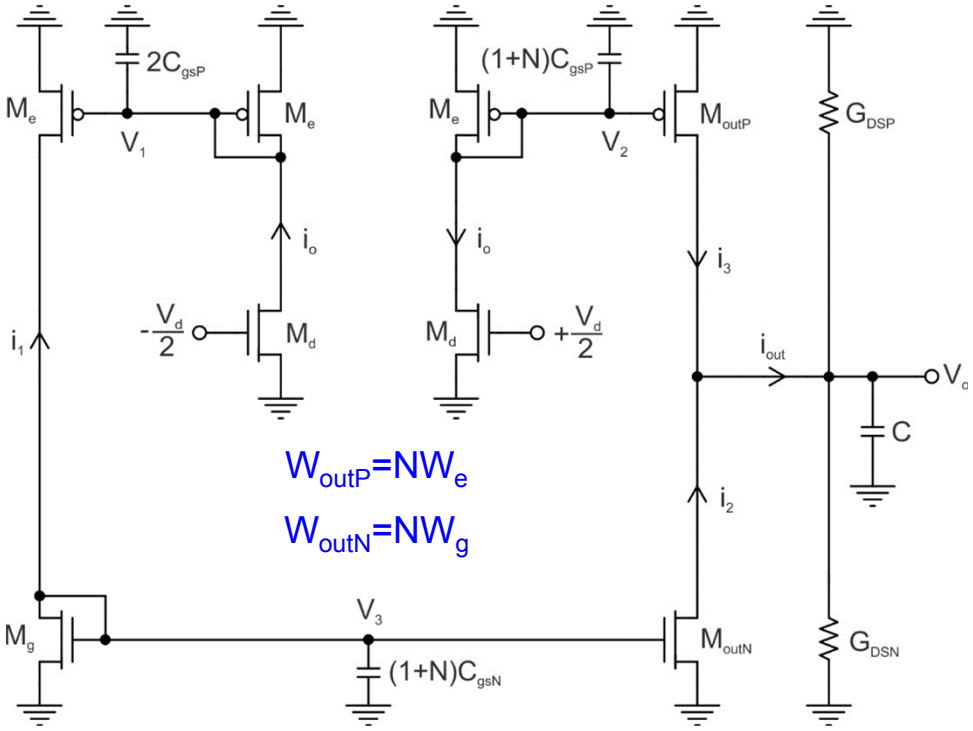
$$V_3 = \frac{-\frac{gm_e}{gm_g}V_1}{s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1} \longrightarrow I_2 = -Ngm_g V_3$$

$$V_2 = \frac{-\frac{I_0}{gm_e}}{s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1} \longrightarrow I_3 = -Ngm_e V_2$$

$$\frac{I_{out}}{V_d} = \frac{\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)+\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)}{\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)}\frac{Ngm_d}{2}$$

Análise AC de Pequenos Sinais com Carga Capacitiva

Versão single-ended - NMOS



$$I_{out} = I_2 + I_3$$

$$I_0 = gm_d \frac{V_d}{2} \longrightarrow V_1 = \frac{\frac{I_0}{gm_e}}{s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1}$$

$$I_1 = gm_e V_1 \longrightarrow V_3 = \frac{-\frac{I_1}{gm_g}}{s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1}$$

$$V_3 = \frac{-\frac{gm_e}{gm_g}V_1}{s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1} \longrightarrow I_2 = -Ngm_g V_3$$

$$V_2 = \frac{-\frac{I_0}{gm_e}}{s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1} \longrightarrow I_3 = -Ngm_e V_2$$

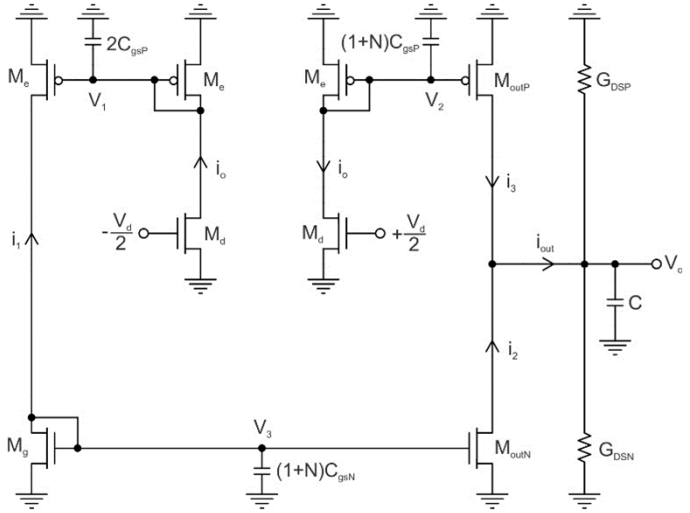
$$\frac{I_{out}}{V_d} = \frac{\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)+\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)}{\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)}\frac{Ngm_d}{2}$$

$$\frac{I_{out}}{V_d}=\frac{\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)+\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)}{\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)\left(s\frac{(1+N)C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)}\frac{Ngm_d}{2}$$

$$\rightarrow \boxed{V_0=\frac{\frac{I_{out}}{\left(G_{DS_P}+G_{DS_N}\right)}}{\left(s\frac{C}{G_{DS_P}+G_{DS_N}}+1\right)}}$$

N=1

$$\frac{I_{out}}{V_d}=\frac{gm_d\left(s\frac{C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)}{\left(s\frac{2C_{gs_P}}{gm_e}+1\right)\left(s\frac{2C_{gs_N}}{gm_g}+1\right)}$$



$$gm_e \gg G_{DS_P}+G_{DS_N}$$
$$gm_g \gg G_{DS_P}+G_{DS_N}$$

$$\rightarrow V_0=\frac{\frac{gm_d}{\left(G_{DS_P}+G_{DS_N}\right)}}{\left(s\frac{C}{G_{DS_P}+G_{DS_N}}+1\right)}V_d$$

$$R_0=\frac{1}{G_{DS_P}+G_{DS_N}}$$

$$\rightarrow \boxed{\frac{V_0}{V_d}=\frac{R_0gm_d}{(sR_0C+1)}}$$

Capacitor de saída define o polo dominante, e faz a compensação em frequência.

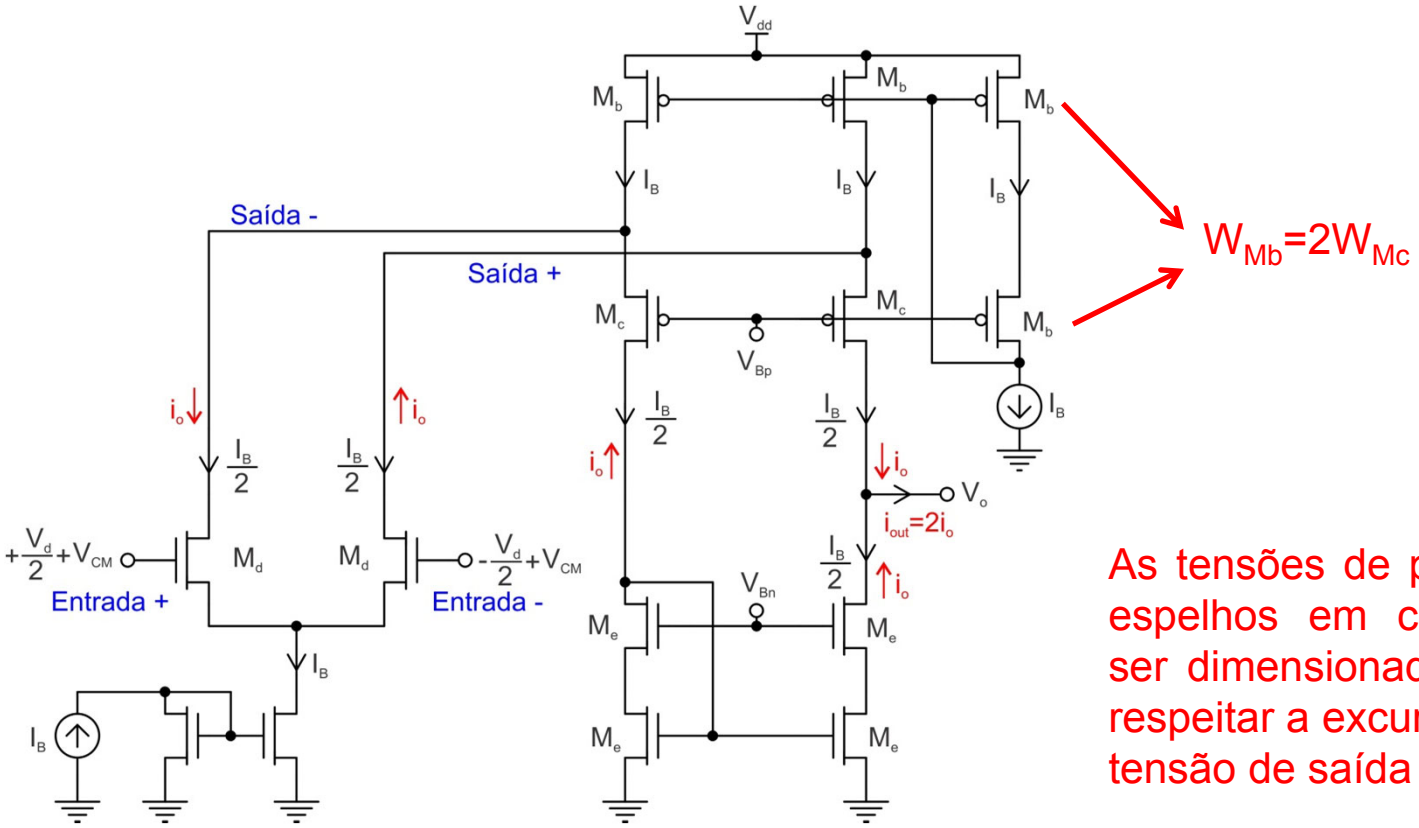
N>1

$$\rightarrow V_0=\frac{\frac{Ngm_d}{\left(NG_{DS_P}+NG_{DS_N}\right)}}{\left(s\frac{C}{NG_{DS_P}+NG_{DS_N}}+1\right)}V_d \rightarrow \boxed{\frac{V_0}{V_d}=\frac{R_0gm_d}{\left(s\frac{R_0C}{N}+1\right)}}$$

OTA com Saída em Cascode Dobrado

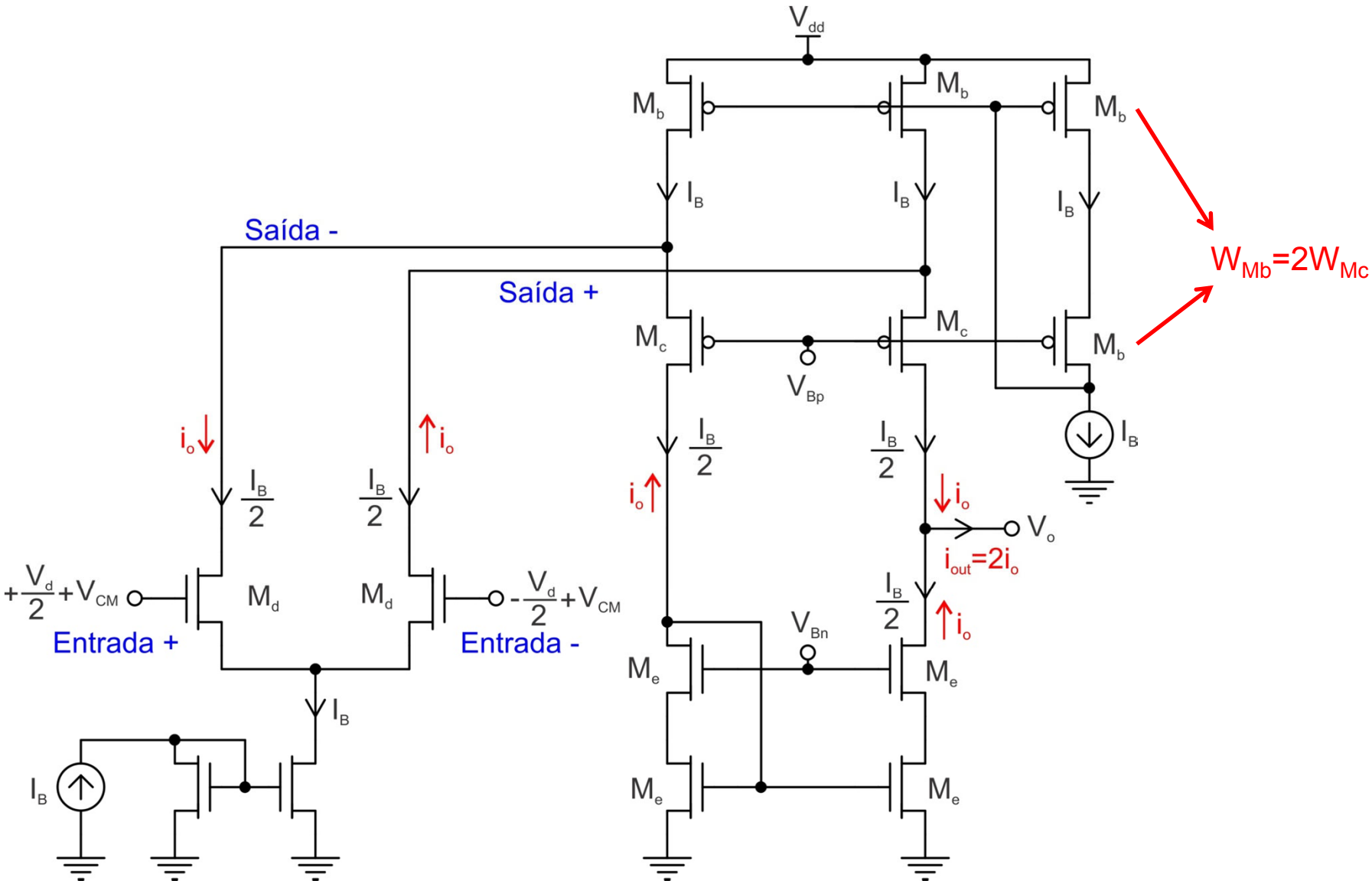
O OTA com estágio de saída em cascode dobrado possui impedância de saída muito mais elevada que a versão simples, e, consequentemente, ganho DC mais alto. Esta configuração é a mais usada no projeto de filtros gm-C e capacitores chaveados.

Versão single-ended - NMOS

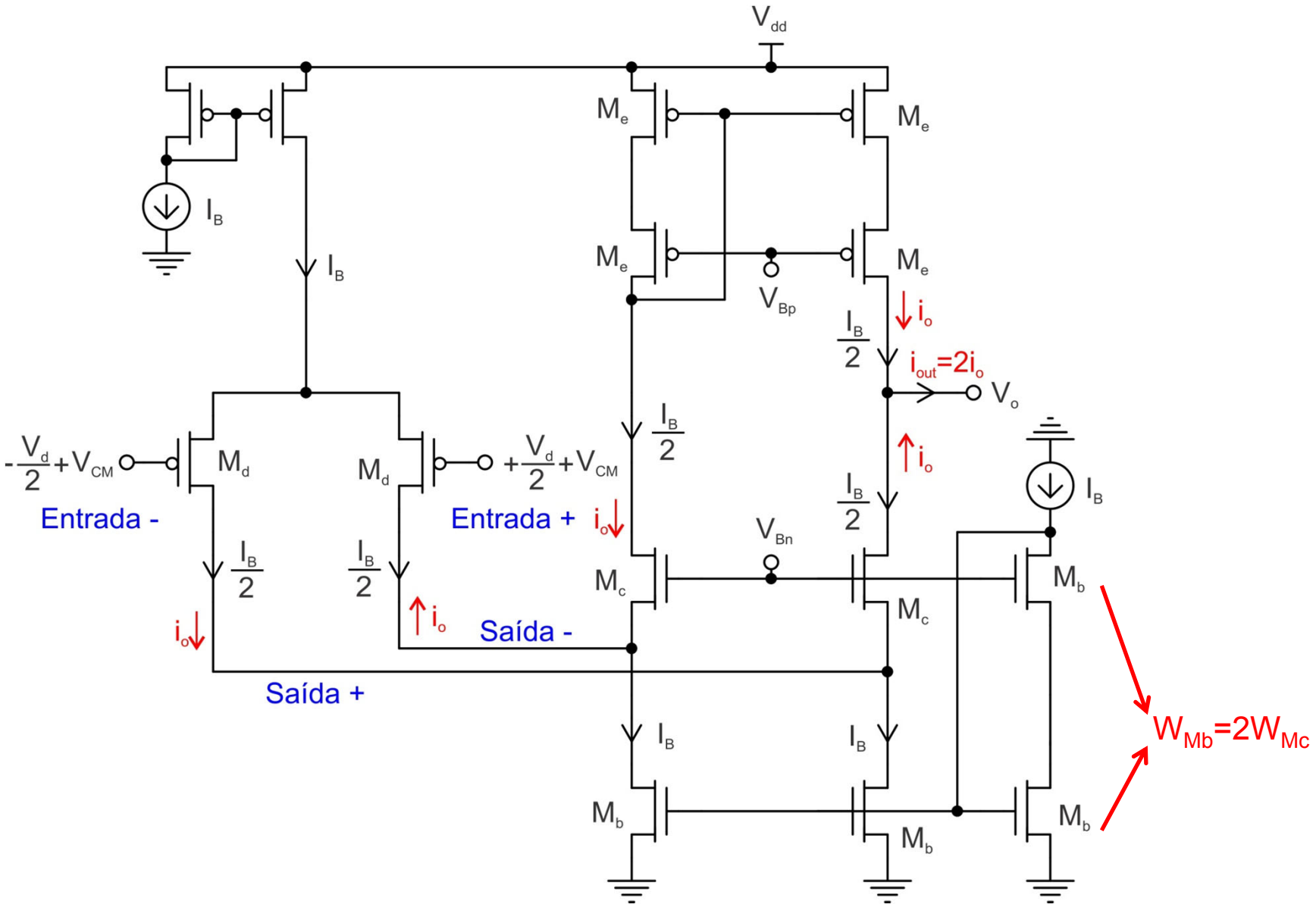


As tensões de polarização dos espelhos em cascode devem ser dimensionadas de forma a respeitar a excursão de sinal de tensão de saída

Princípio de funcionamento da versão single-ended - NMOS

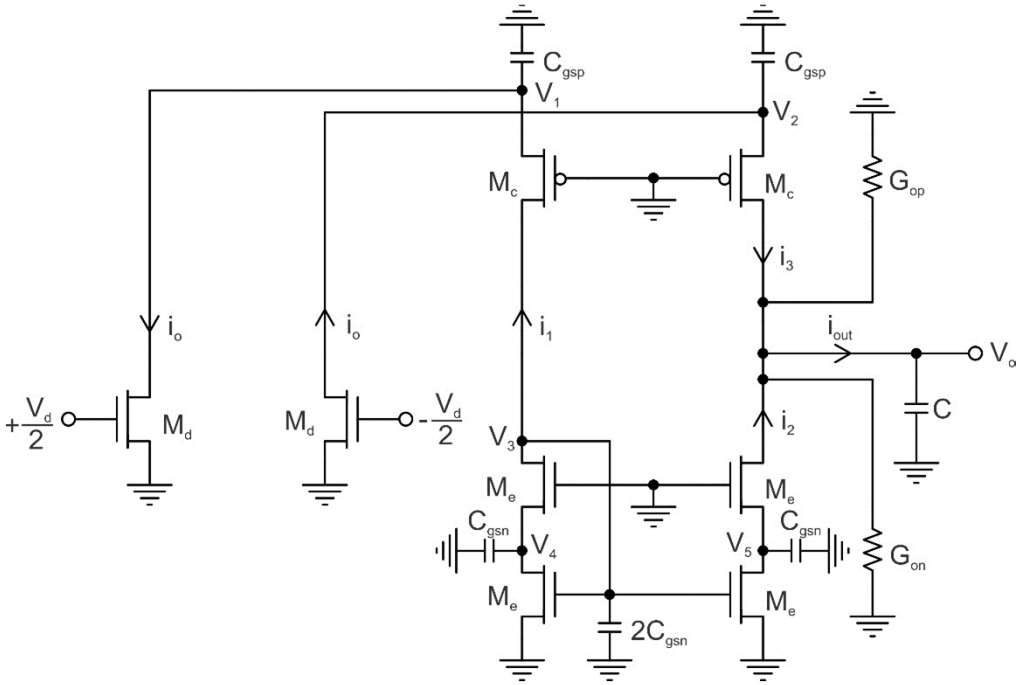


Versão single-ended - PMOS



Análise de Pequenos Sinais com Carga Capacitiva

Versão single-ended - NMOS



$$I_0 = \frac{gm_d}{2} V_d$$

$$I_1 = \frac{I_0}{s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1}$$

$$I_3 = \frac{I_0}{s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1}$$

$$I_2 = \frac{I_0}{\left(s^2 \frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 1\right)\left(s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1\right)}$$

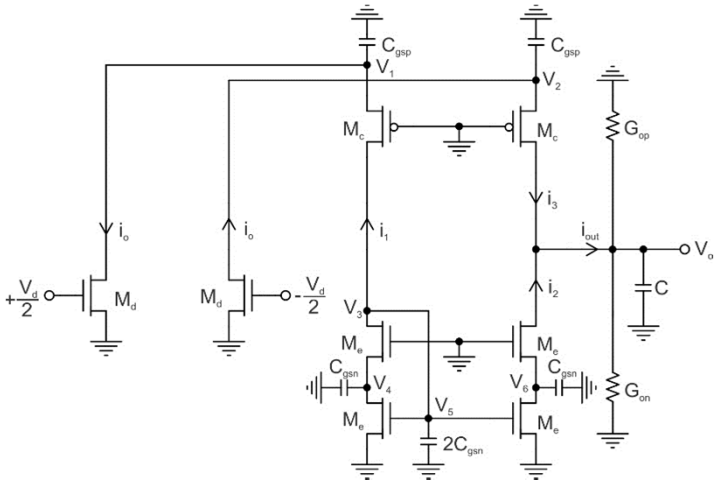
$$I_{out} = I_2 + I_3$$

$$\frac{I_{out}}{V_d} = \frac{gm_d\left(s^2 \frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 2\right)}{2\left(s^2 \frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 1\right)\left(s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1\right)}$$

$$\frac{I_{out}}{V_d} = \frac{gm_d\left(s^2\frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 2\right)}{2\left(s^2\frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 1\right)\left(s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1\right)}$$

$$V_0 = \frac{\frac{I_{out}}{\left(G_{op}+G_{on}\right)}}{\left(s\frac{C}{G_{op}+G_{on}} + 1\right)}$$

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{\frac{gm_d}{\left(G_{DS_P}+G_{DS_N}\right)}\left(s^2\frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 2\right)}{2\left(s^2\frac{2C_{gs_N}^2}{gm_e^2} + s\frac{2C_{gs_N}}{gm_e} + 1\right)\left(s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1\right)\left(s\frac{C}{G_{op}+G_{on}} + 1\right)}$$



$$gm_e \gg G_{op} + G_{on}$$
$$gm_c \gg G_{op} + G_{on}$$

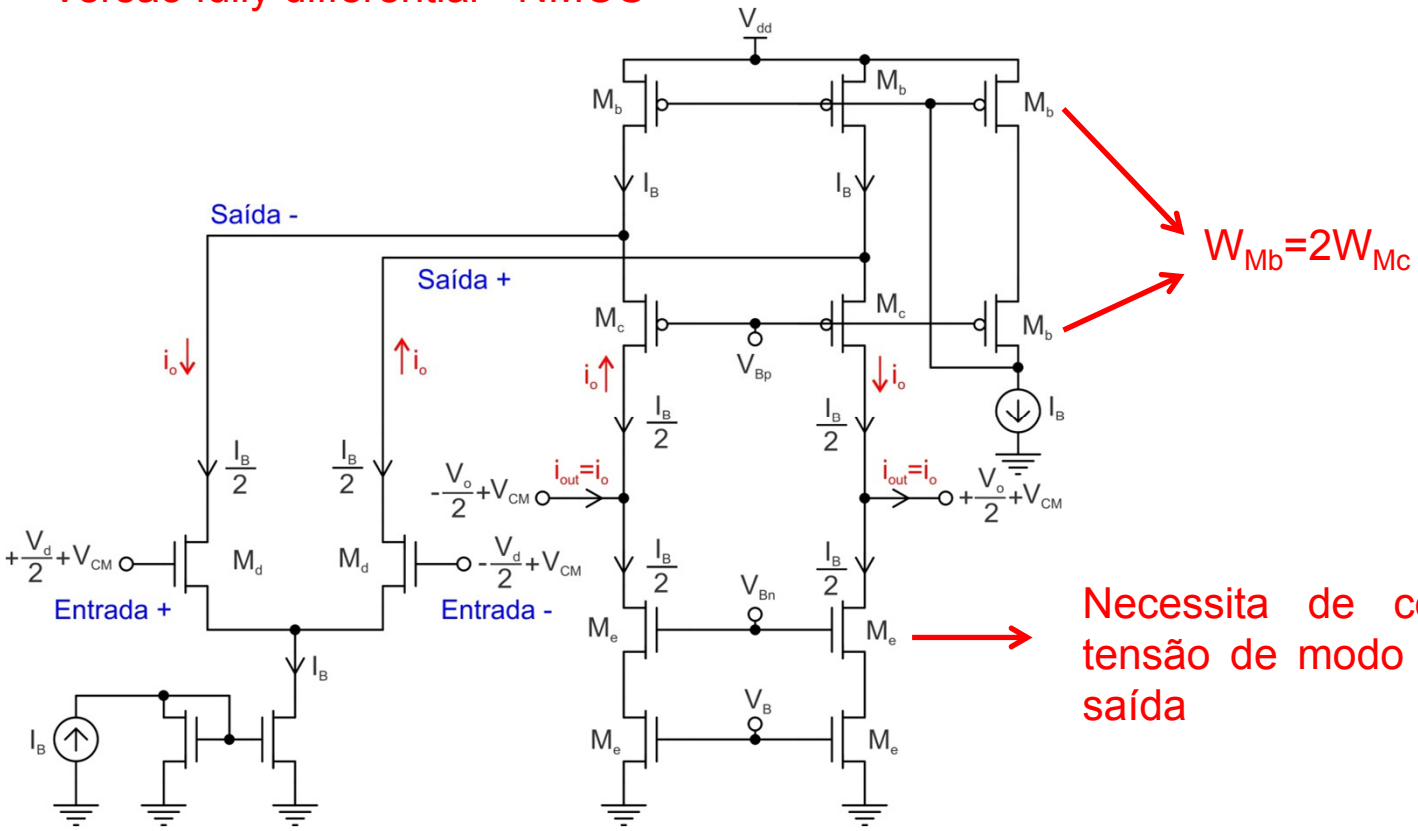
$$R_0 = \frac{1}{G_{op}+G_{on}}$$

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{R_0 gm_d}{\left(sR_0C + 1\right)}$$

Capacitor de saída define o polo dominante, e faz a compensação em frequência.

OTA com Saída em Cascode Dobrado Fully Differential

Versão fully differential - NMOS

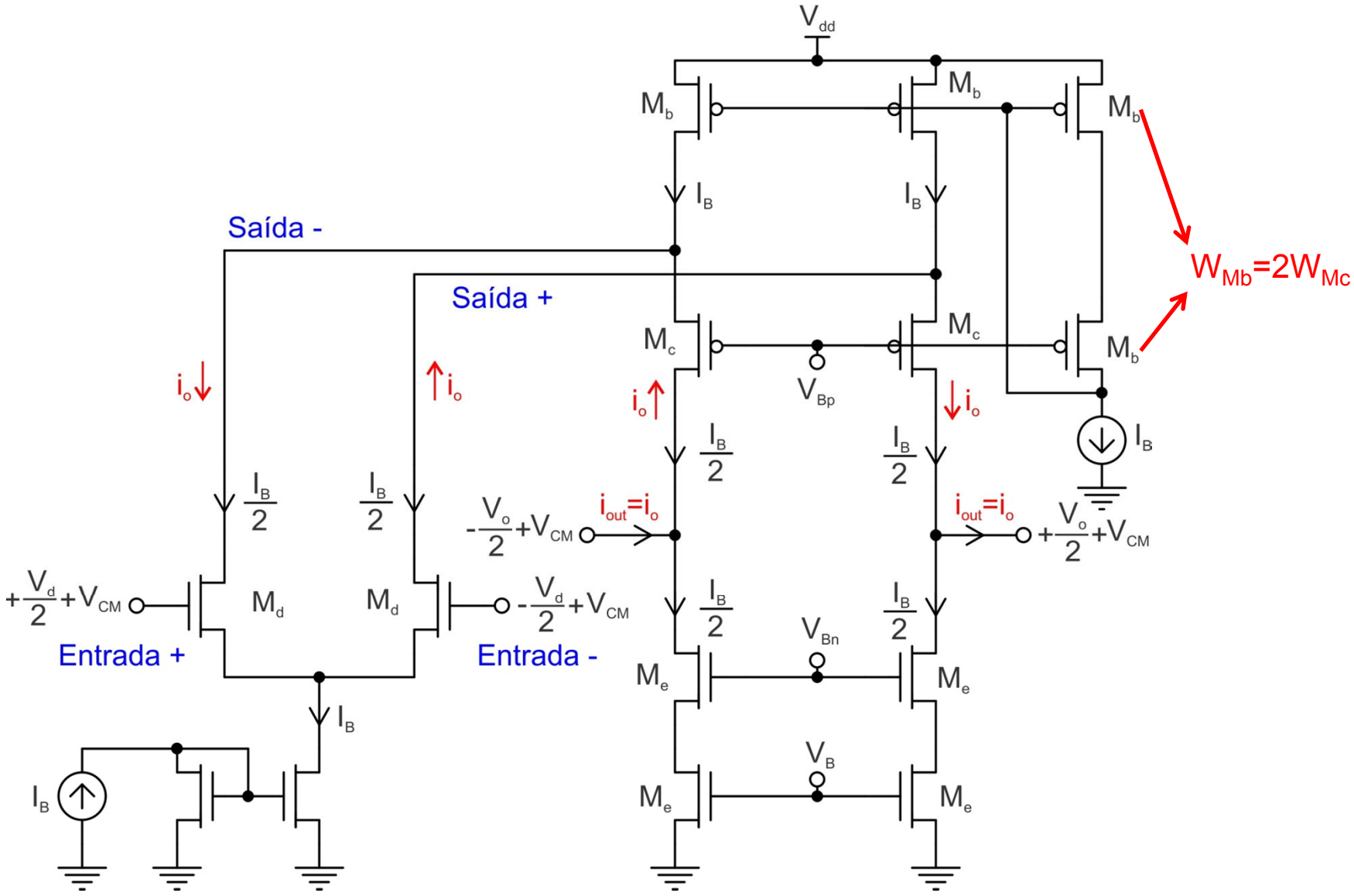


$W_{Mb}=2W_{Mc}$

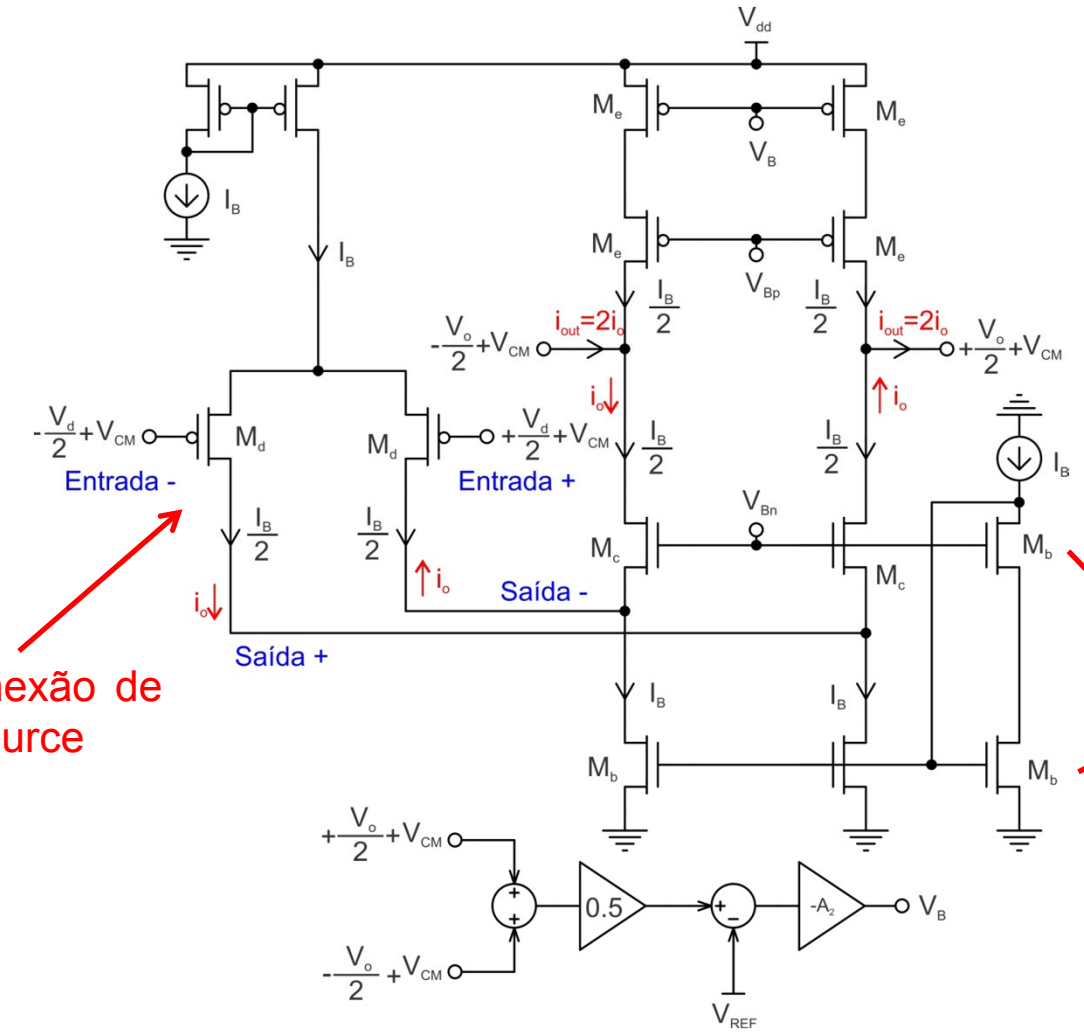
Necessita de controle de tensão de modo comum na saída

- Menor THD
- Melhor resposta em frequência
- Maior excursão de sinal de tensão de saída
- Maior rejeição de modo comum

Princípio de funcionamento da versão fully differential - NMOS



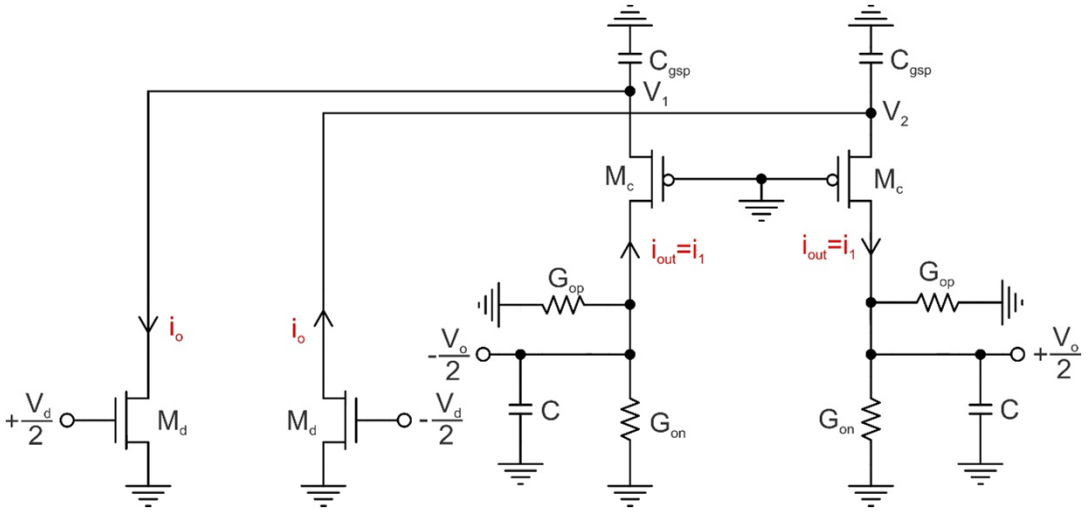
Versão fully differential - PMOS



Permite conexão de Bulk com source

$W_{Mb}=2W_{Mc}$

Análise AC de Pequenos Sinais com Carga Capacitiva



$$I_0 = \frac{gm_d}{2} V_d$$

$$I_1 = \frac{I_0}{s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1}$$

$$I_1 = \frac{gm_d}{s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1} \frac{V_d}{2}$$

$$I_{out} = I_1$$

$$\frac{I_{out}}{V_d} = \frac{\frac{gm_d}{2}}{s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1} \rightarrow \frac{V_0}{V_d} = \frac{\frac{gm_d}{G_{op} + G_{on}}}{\left(s\frac{C_{gs_P}}{gm_c} + 1\right)\left(s\frac{C}{G_{op} + G_{on}} + 1\right)}$$

$$gm_c \gg G_{op} + G_{on} \rightarrow R_0 = \frac{1}{G_{op} + G_{on}} \rightarrow \frac{V_0}{V_d} = \frac{R_0 gm_d}{(sR_0C + 1)}$$

Final deste Tópico