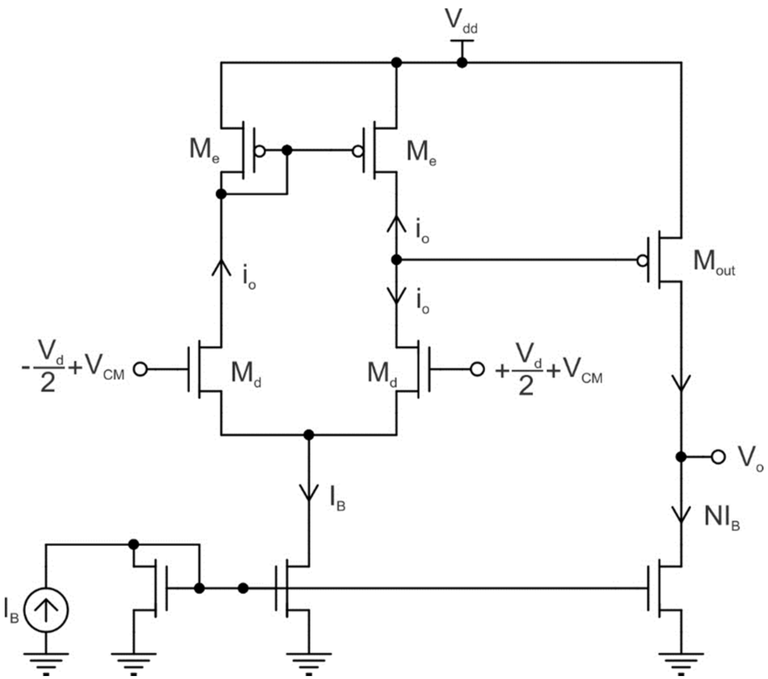
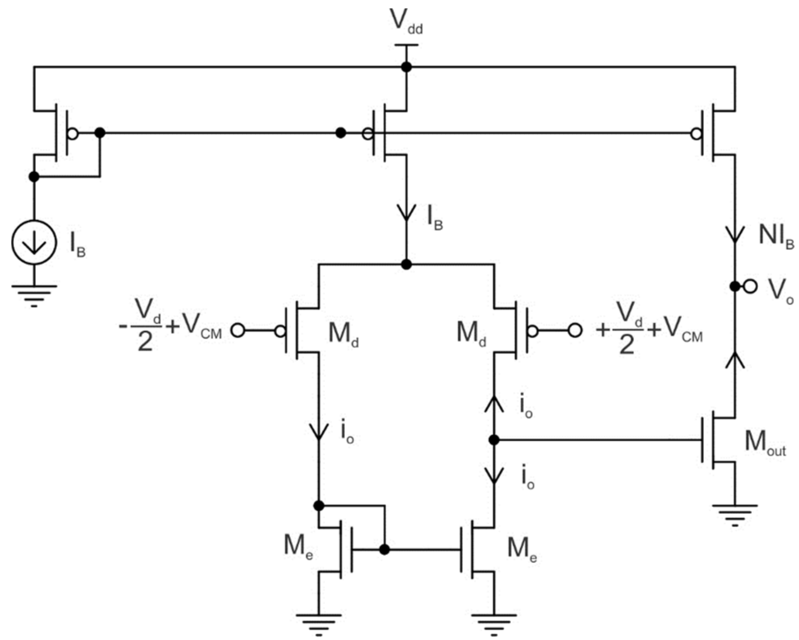
Amplificador Operacional

Amplificadores Operacionais (OpAmp) são os dispositivos mais básicos da eletrônica, tendo aplicações em praticamente toda a área de eletrônica analógica. Eles são amplificadores de tensão com duas entradas e uma saída, no caso *single-ended*, ou duas saídas, no caso *fully-differential*.

OpAmp NMOS

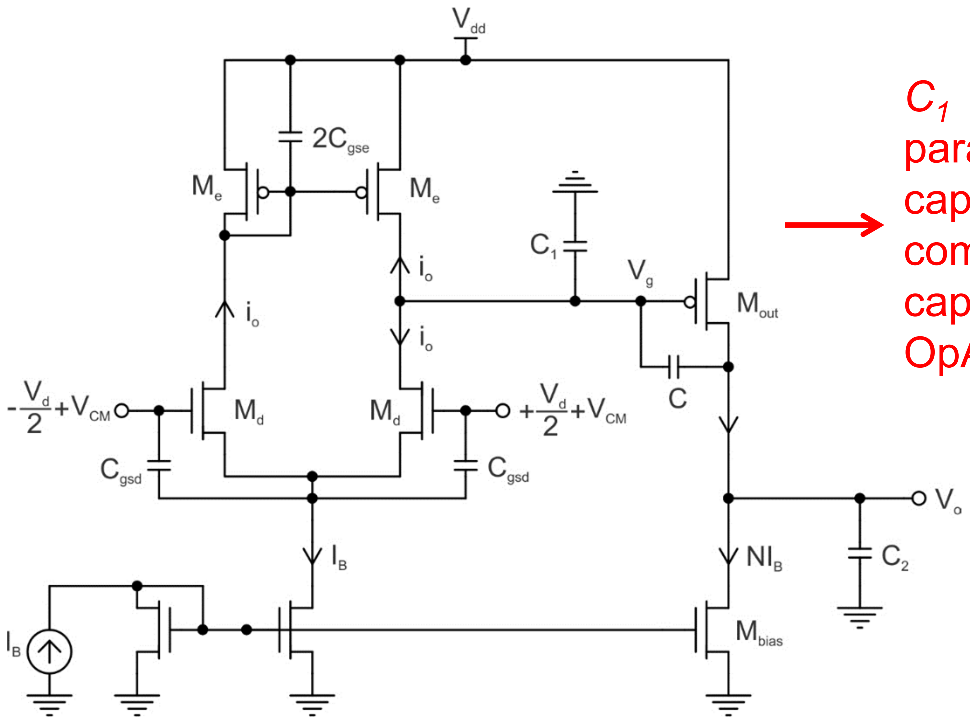


OpAmp PMOS



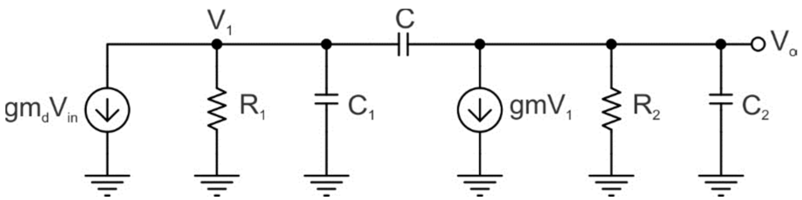
Função de Transferência com Compensação de Polo Dominante

Para a estimativa da função de transferência, desprezaremos as capacitâncias C_{gs} de M_e, pois estão conectadas a um nó de baixa impedância, e geram polos de alta frequência. Os capacitores C_{gs} de M_d não participam da função de transferência. Somente C_1, C_2 e C serão considerados.



C_1 corresponde a todas as capacitâncias parasitas no nó V_g. Ele é em grande parte o capacitor C_{gs} de M_{out}. C é o capacitor de compensação, e C_2 representa todas as capacitâncias conectadas à saída do OpAmp.

Equações Nodais



$$\left(sC_{1C}R_1+1\right)V_1-sCR_1V_0+R_1gm_dV_{in}=0$$

$$\left(sC_{2C}R_2+1\right)V_0+\left(A_{V_2}-sCR_2\right)V_1=0$$

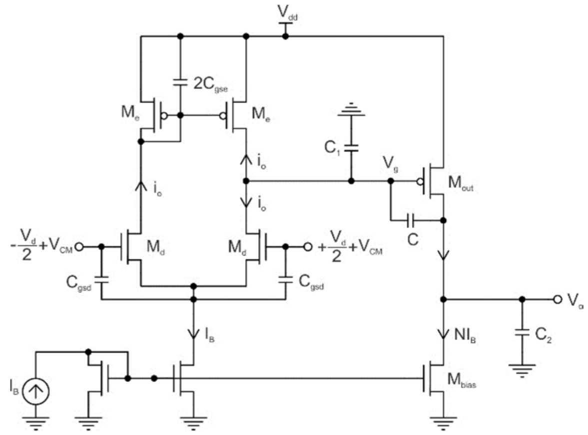
$$C_{1C}=C_1+C$$

$$C_{2C}=C_2+C$$

$$A_{V_2}=gmR_2$$

$$A_{V_1}=gm_dR_1$$

$$A_{V_{DC}}=A_{V_1}A_{V_2}$$



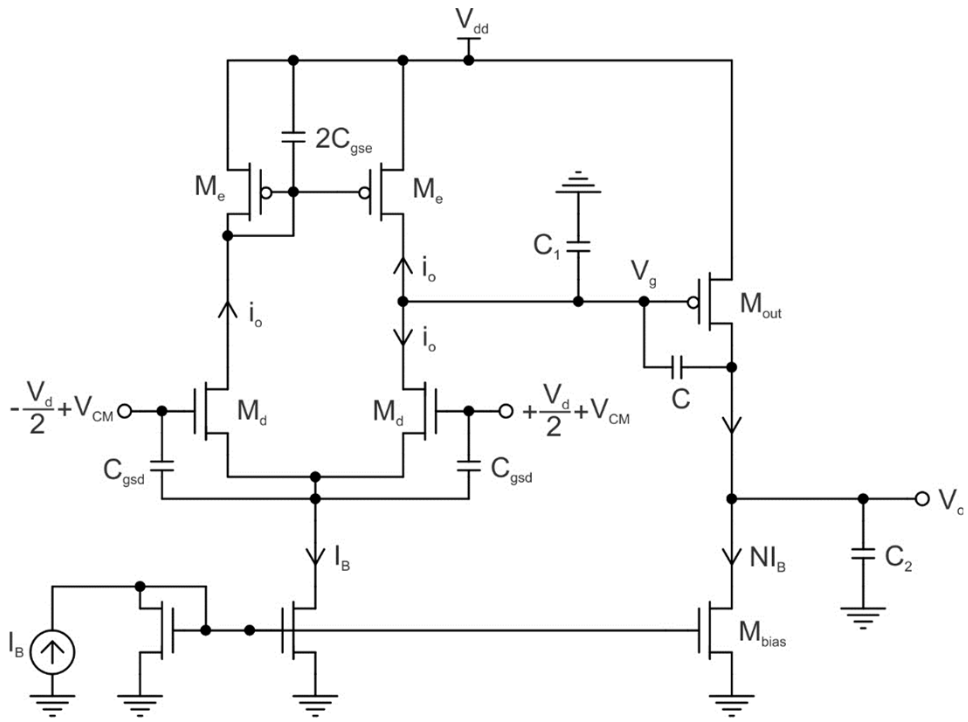
Função de Transferência

$$A_V=\frac{V_0}{V_{in}}=-\frac{A_{V_{DC}}\left(s\frac{CR_2}{A_{V_2}}-1\right)}{s^2\left(C_{1C}C_{2C}R_1R_2-C^2R_1R_2\right)+\left(A_{V_2}CR_1+C_{1C}R_1+C_{2C}R_2\right)s+1}$$

Ganho DC ⟶ $A_{V_{DC}}=A_{V_1}A_{V_2}=gm_dR_1gmR_2$

Zero positivo (SPLD) ⟶ $Z=\dfrac{A_{V_2}}{CR_2}$

Estimativa de Valores



$$C_1 \cong C_{gs_{out}} = \frac{2}{3} C_{ox} W_{out} L_{out}$$

$$R_1 = \frac{1}{G_{DS_d} + G_{DS_e}} = \frac{2}{I_B\left(\lambda_d + \lambda_e\right)}$$

$$gm_d = \frac{2i_0}{V_d} = \sqrt{\frac{k_{p_N} W_d I_B}{\alpha_N L_d}}$$

$$gm = \sqrt{\frac{2k_{p_P} W_{out} N I_B}{\alpha_P L_{out}}}$$

$$R_2 = \frac{1}{G_{DS_{out}} + G_{DS_{bias}} + \frac{1}{R_L}} = \frac{1}{N I_B\left(\lambda_{out} + \lambda_{bias}\right) + \frac{1}{R_L}}$$

→ R_L é a carga ligada à saída do OpAmp

Aproximação Para os Polos e Pole Splitting

O polo P_1 é de frequência mais baixa, e tende para zero quando A_{V2} tende para o infinito. Porém, leva a uma indeterminação do tipo $\infty - \infty$, que torna difícil estabelecer uma aproximação. Entretanto, P_2 não possui indeterminação quando A_{V2} tende para o infinito, e permite estabelecer uma aproximação para o polo quando A_{V2} é grande.

$$P_1 = -\frac{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1 + C_{2c}R_2 - \left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1\sqrt{1 + \dfrac{4\left(\frac{1}{2}CA_{V_2}C_{2c} + C^2 - \frac{1}{2}C_{1c}C_{2c}\right)R_1R_2 + C_{2c}^2R_2^2}{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)^2 R_1^2}}}{2R_1R_2\left(C_{1c}C_{2c} - C^2\right)}$$

$$P_2 = -\frac{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1 + C_{2c}R_2 + \left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1\sqrt{1 + \dfrac{4\left(\frac{1}{2}CA_{V_2}C_{2c} + C^2 - \frac{1}{2}C_{1c}C_{2c}\right)R_1R_2 + C_{2c}^2R_2^2}{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)^2 R_1^2}}}{2R_1R_2\left(C_{1c}C_{2c} - C^2\right)}$$

Referência Bibliográfica

Analysis and Design of Analog Integrated Circuits - Fifth Edition
Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, Robert G. Meyer

Aproximação Para P_2

Vamos considerar A_{V2} muito grande

$$A_{V_2} \gg 1$$

$$P_2 = -\frac{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1 + C_{2c}R_2 + \left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1\sqrt{1 + \frac{4\left(\frac{1}{2}CA_{V_2}C_{2c} + C^2 - \frac{1}{2}C_{1c}C_{2c}\right)R_1R_2 + C_{2c}^2R_2^2}{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)^2 R_1^2}}}{2R_1R_2\left(C_{1c}C_{2c} - C^2\right)}$$

$$P_2 \cong -\frac{A_{V_2}}{R_2\left(\frac{C_{1c}C_{2c}}{C} - C\right)} \longrightarrow \begin{cases} C_{1C} = C_1 + C \\ C_{2C} = C_2 + C \end{cases} \longrightarrow P_2 \cong -\frac{A_{V_2}}{R_2\left(\frac{C_1C_2}{C} + C_1 + C_2\right)}$$

$$\xrightarrow{\text{Em Hz}} P_2 \cong -\frac{A_{V_2}}{2\pi R_2\left(\frac{C_1C_2}{C} + C_1 + C_2\right)}$$

Aproximação Para P_1

$$A_{V_2} \gg 1$$

$$P_1 = -\frac{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1 + C_{2c}R_2 - \left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)R_1\sqrt{1 + \frac{4\left(\frac{1}{2}CA_{V_2}C_{2c} + C^2 - \frac{1}{2}C_{1c}C_{2c}\right)R_1R_2 + C_{2c}^2R_2^2}{\left(CA_{V_2} + C_{1c}\right)^2 R_1^2}}}{2R_1R_2\left(C_{1c}C_{2c} - C^2\right)}$$

Podemos estimar P_1 através da equivalência do produto dos polos, e do conhecimento prévio de P_2.

$$A_V = \frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{A_{V_{DC}}\left(s\frac{CR_2}{A_{V_2}} - 1\right)}{s^2\left(C_{1C}C_{2C}R_1R_2 - C^2R_1R_2\right) + \left(A_{V_2}CR_1 + C_{1C}R_1 + C_{2C}R_2\right)s + 1}$$

$$A_V = \frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{A_{V_{DC}}\left(\frac{s}{Z} - 1\right)}{s^2\left(\frac{1}{P_1P_2}\right) - \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}\right)s + 1}$$

$$A_V = \frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{A_{V_{DC}}\left(s\frac{CR_2}{A_{V_2}} - 1\right)}{s^2\left(C_{1C}C_{2C}R_1R_2 - C^2R_1R_2\right) + \left(A_{V_2}CR_1 + C_{1C}R_1 + C_{2C}R_2\right)s + 1}$$

$$A_V = \frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{A_{V_{DC}}\left(\frac{s}{Z} - 1\right)}{s^2\left(\frac{1}{P_1P_2}\right) - \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2}\right)s + 1}$$

$$P_2 \cong -\frac{A_{V_2}}{R_2\left(\frac{C_1C_2}{C} + C_1 + C_2\right)}$$

$$\begin{cases} C_{1C} = C_1 + C \\ C_{2C} = C_2 + C \end{cases}$$

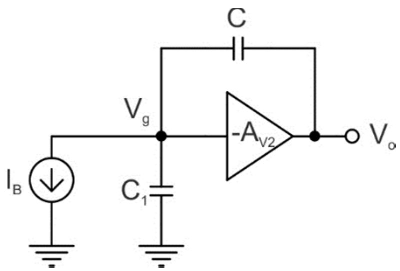
$$\frac{1}{P_1P_2} = C_{1C}C_{2C}R_1R_2 - C^2R_1R_2 \longrightarrow \frac{1}{P_1\left(-\frac{A_{V_2}}{R_2\left(\frac{C_1C_2}{C} + C_1 + C_2\right)}\right)} = \left(C_1 + C\right)\left(C_2 + C\right)R_1R_2 - C^2R_1R_2$$

$$\begin{cases} C_2 \gg C_1 \\ C \gg C_1 \end{cases}$$

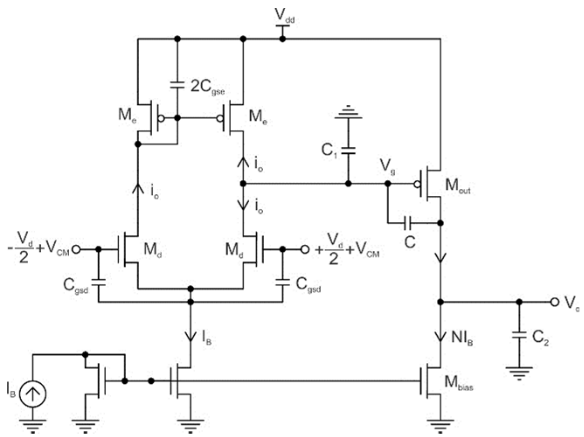
$$P_1 \cong -\frac{1}{R_1CA_{V_2}} \xrightarrow{\text{Em Hz}} P_1 \cong -\frac{1}{2\pi R_1CA_{V_2}} \longleftarrow \text{Polo dominante}$$

Slew-Rate

O slew-rate, ou a máxima taxa de variação de tensão na saída, ocorre quando a tensão de entrada no par diferencial excede o seu valor máximo. Neste caso, toda corrente de polarização do par diferencial é fornecida ao estágio de saída.



Consideração importante: a corrente que circula pelo capacitor *C* não afeta a tensão de saída



$$V_g = -\frac{V_0}{A_{V_2}}$$

$$I_B + C_1\frac{\partial V_g}{\partial t} + C\frac{\partial\left(V_g - V_0\right)}{\partial t} = 0$$

$$I_B + C_1\frac{\partial V_g}{\partial t} + C\left(\frac{\partial V_g}{\partial t} - \frac{\partial V_0}{\partial t}\right) = 0 \rightarrow I_B - \frac{1}{A_{V_2}}\frac{\partial V_0}{\partial t}C_1 + C\left(-\frac{1}{A_{V_2}}\frac{\partial V_0}{\partial t} - \frac{\partial V_0}{\partial t}\right) = 0$$

$$V_0 = \frac{I_B A_{V_2}}{C\left(1 + A_{V_2}\right) + C_1}t \rightarrow SR = \left|\frac{dV_0}{dt}\right| \rightarrow \boxed{SR = \frac{I_B A_{V_2}}{C\left(1 + A_{V_2}\right) + C_1}}$$

$$\begin{cases} C \gg C_1 \\ A_{V_2} \gg 1 \end{cases} \rightarrow \boxed{SR \cong \frac{I_B}{C}}$$

Final deste Tópico