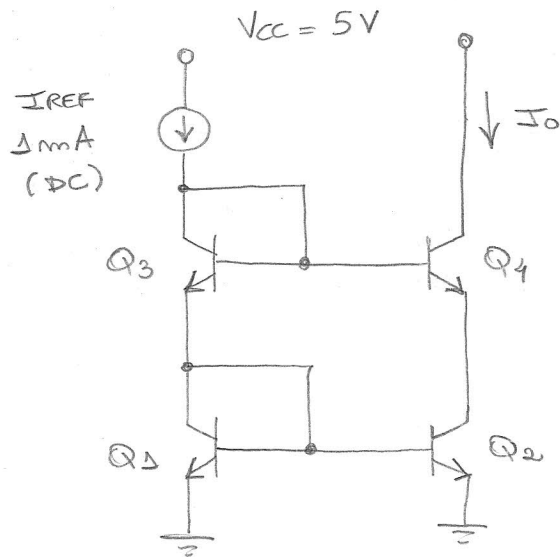
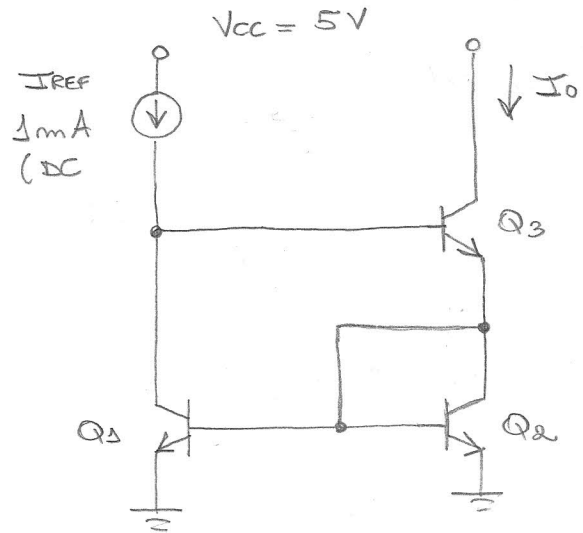


1. SIMULE OS ESPELHOS DE CORRENTE APRESENTADOS ABAIXO, USANDO TRANSISTORES BC546A. MEÇA A CORRENTE DE SAÍDA I_O EM CADA CASO. COM BASE NOS RESULTADOS OBTIDOS, QUAL DAS DUAS TOPOLOGIAS APRESENTOU O MENOR ERRO ENTRE I_O E I_{REF} ? EXPLIQUE.

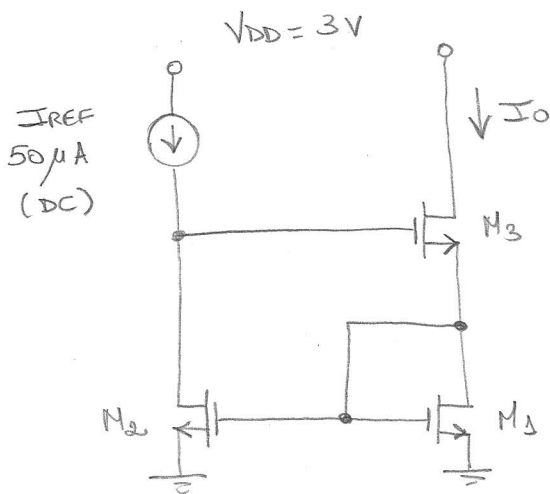


ESPELHO EM CASCODE

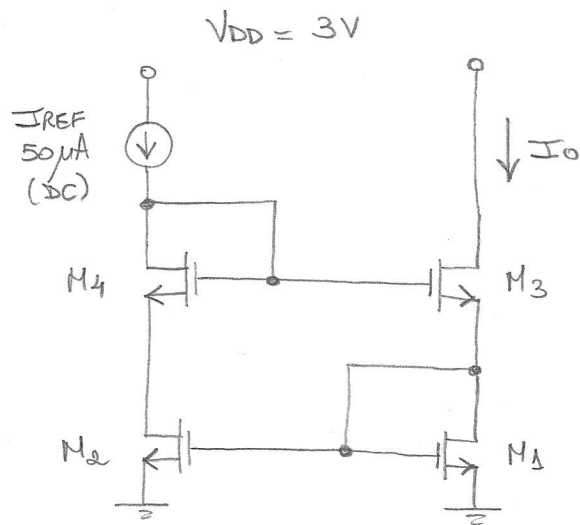


ESPELHO DE WILSON

2. SIMULE OS ESPELHOS DE CORRENTE APRESENTADOS ABAIXO E MEÇA A CORRENTE I_O EM CADA CASO. COM BASE NOS RESULTADOS, QUAL DAS DUAS TOPOLOGIAS APRESENTOU O MENOR ERRO ENTRE I_O E I_{REF} ? EXPLIQUE O MOTIVO. EM TODOS OS CIRCUITOS USE TRANSISTORES COM $W = 1\mu m$ E $L = 1\mu m$.

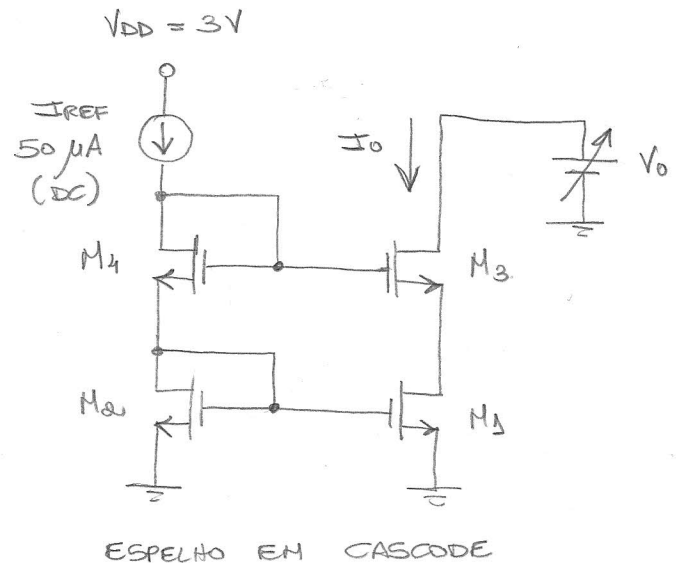
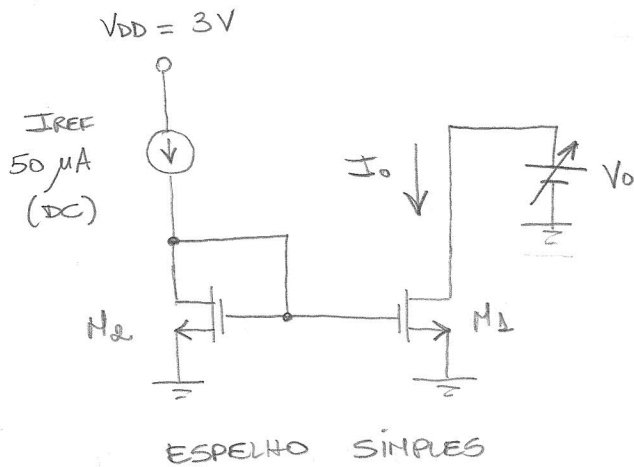


ESPELHO DE WILSON



ESPELHO DE WILSON MODIFICADO

- ③ PARA CADA UM DOS ESPELHOS DE CORRENTE ABAIXO, REALIZE UMA SIMULAÇÃO DO TIPO "DC SWEEP", ONDE A FONTE DE TENSÃO V_0 É VARIADA DE 0 A 3V, COM PASSO DE 0,001V. ASSIM, PARA CADA CIRCUITO, APRESENTE O GRÁFICO $I_0 \times V_0$ E RESPONDA ÀS PERGUNTAS ABAIXO. EM TODOS OS CIRCUITOS, UTILIZE TRANSISTORES COM $W = 1\mu\text{m}$ E $L = 1\mu\text{m}$.



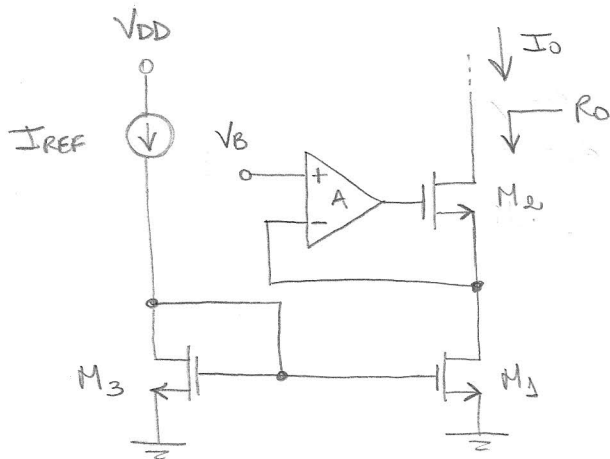
- (a) QUAL É A FAIXA DE VALORES DA TENSÃO V_0 EM QUE CADA UM DOS CIRCUITOS ESTÁ OPERANDO SATISFATORIAMENTE COMO UM ESPELHO DE CORRENTE? CONSIDERE QUE UM ESPELHO DE CORRENTE SÓ ESTARÁ OPERANDO SATISFATORIAMENTE QUANDO TIVERMOS:

$$\text{ERRO} = \left| \frac{I_0 - I_{REF}}{I_{REF}} \right| < 1\%$$

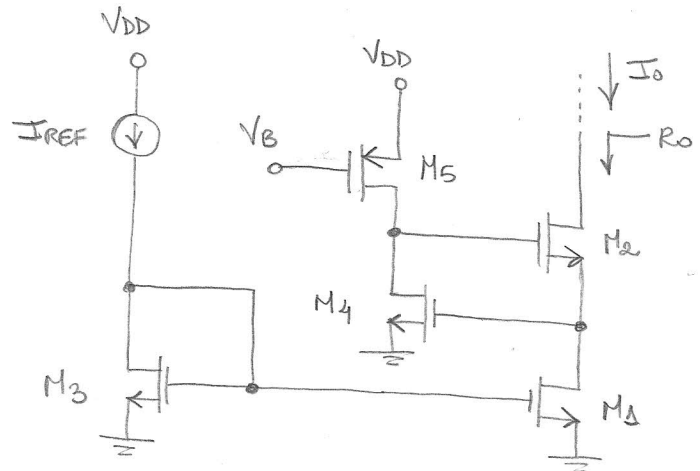
COM BASE Nesses RESULTADOS, QUAL DAS TOPOLOGIAS ACIMA APRESENTA A MAIOR FAIXA DE OPERAÇÃO PARA A TENSÃO V_0 ? EXPLIQUE.

- (b) MEÇA A INCLINAÇÃO DA RETA TANGENTE AO GRÁFICO $I_0 \times V_0$ NA REGIÃO EM QUE OS CIRCUITOS ESTÃO OPERANDO SATISFATORIAMENTE COMO ESPELHOS DE CORRENTE E OBTENHA, ASSIM, SUAS RESPECTIVAS IMPEDÂNCIAS DE SAÍDA. QUAL DAS TOPOLOGIAS APRESENTA A MAIOR IMPEDÂNCIA DE SAÍDA? POR QUÊ?

- ③ ABAIXO, TEMOS DUAS VERSÕES DO ESPELHO EM CASCODE REGULADO. NO CIRCUITO I, O AMPLIFICADOR EMPREGADO É IDEAL, COM IMPEDÂNCIA DE ENTRADA INFINITA, IMPEDÂNCIA DE SAÍDA NULA E GANHO DE TENSÃO A . NO CIRCUITO II, O AMPLIFICADOR IDEAL É SUBSTITUÍDO POR UM AMPLIFICADOR EM FONTE COMUM COM CARGA ATIVA.



CIRCUITO I



CIRCUITO II

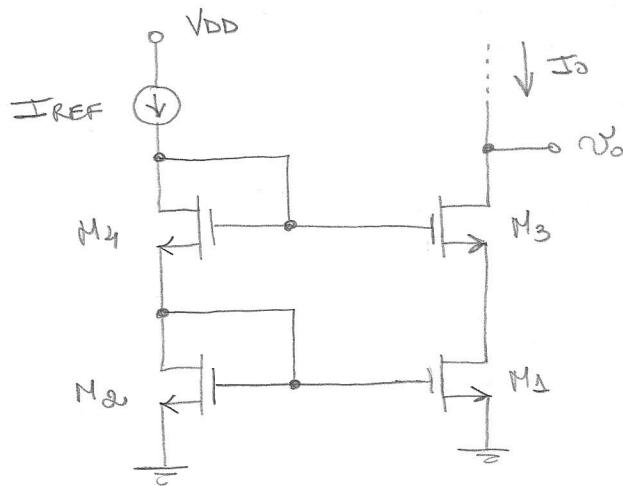
EM AMBOS OS CIRCUITOS, A TENSÃO V_B CORRESPONDE A UMA POLARIZAÇÃO DC FIXA.

(a) PROVE QUE A IMPEDÂNCIA DE SAÍDA R_O DO CIRCUITO I É DADA APROXIMADAMENTE POR $R_O \approx g_{m2} V_{O2} V_{O3} (1+A)$.

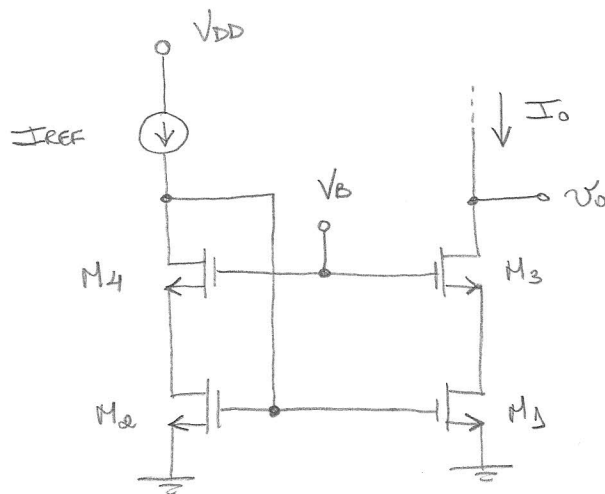
(b) OBTENHA A EXPRESSÃO ANALÍTICA PARA A IMPEDÂNCIA DE SAÍDA R_O DO ESPELHO DE CORRENTE DO CIRCUITO II.

- ④ O ESPELHO DE CORRENTE CASCODE FOI DESENVOLVIDO COM O OBJETIVO DE PRODUZIR FONTES DE CORRENTE COM ELEVADA IMPEDÂNCIA DE SAÍDA. ENTRETANTO, ESSA TOPOLOGIA IMPÕE UM ALTO LIMITE PARA A MÍNIMA TENSÃO QUE PODE SER APLICADA À SAÍDA DO ESPELHO SEM QUE OS TRANSISTORES DEIXEM DE OPERAR NO MODO DE SATURAÇÃO.

(a) CONSIDERANDO QUE TODOS OS TRANSISTORES DO CIRCUITO A SEGUIR APRESENTAM $k_N = 1 \text{ mA/V}^2$, $V_t = 0,8 \text{ V}$, $W = 2 \mu\text{m}$ E $L = 1 \mu\text{m}$, CALCULE QUAL É A MÍNIMA TENSÃO V_O PERMITIDA NA SAÍDA DO ESPELHO, ONDE $I_{REF} = 40 \mu\text{A}$.

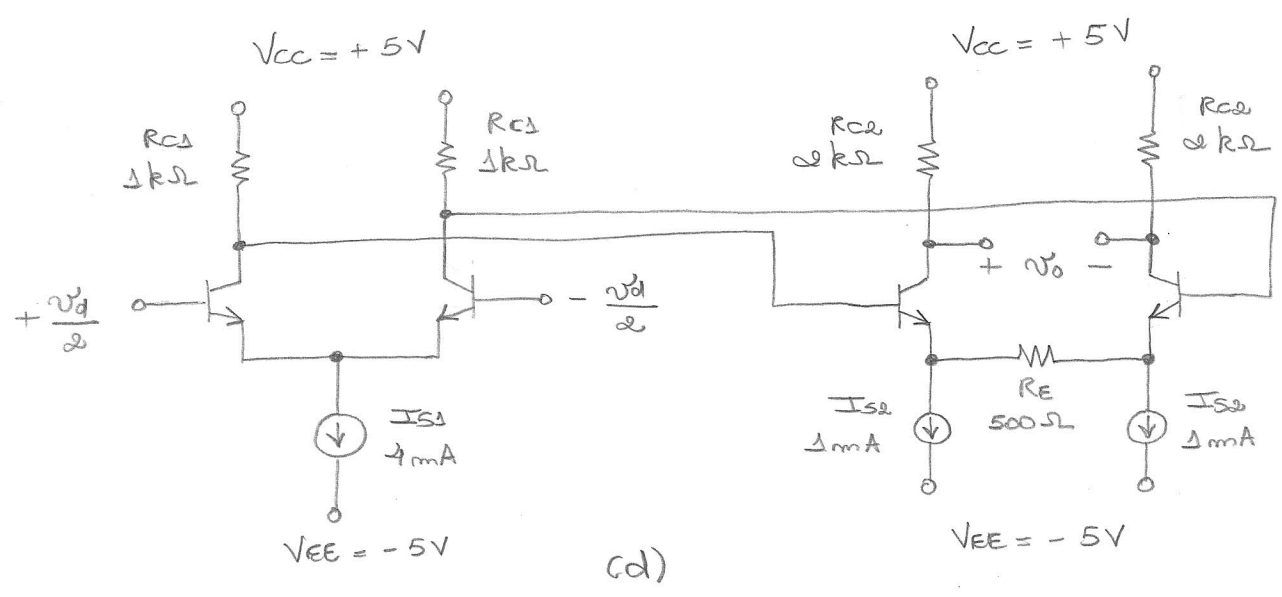
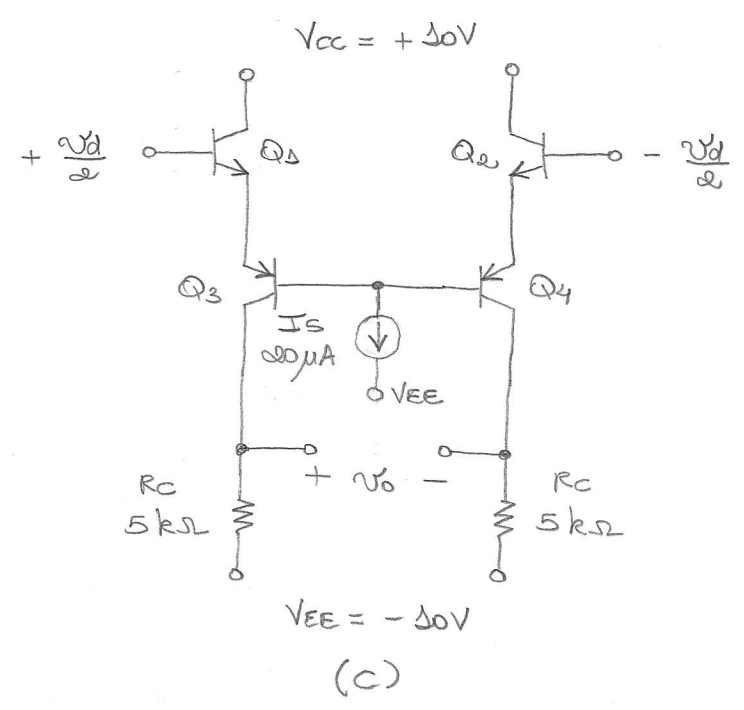
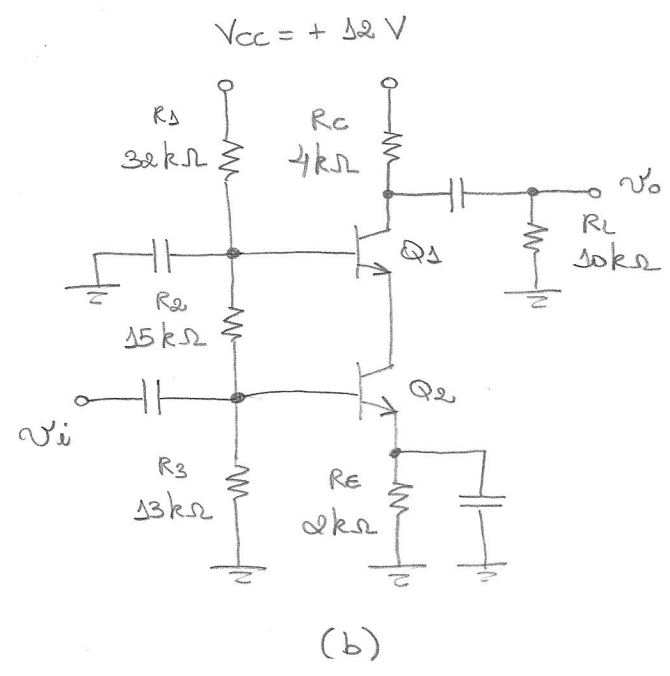
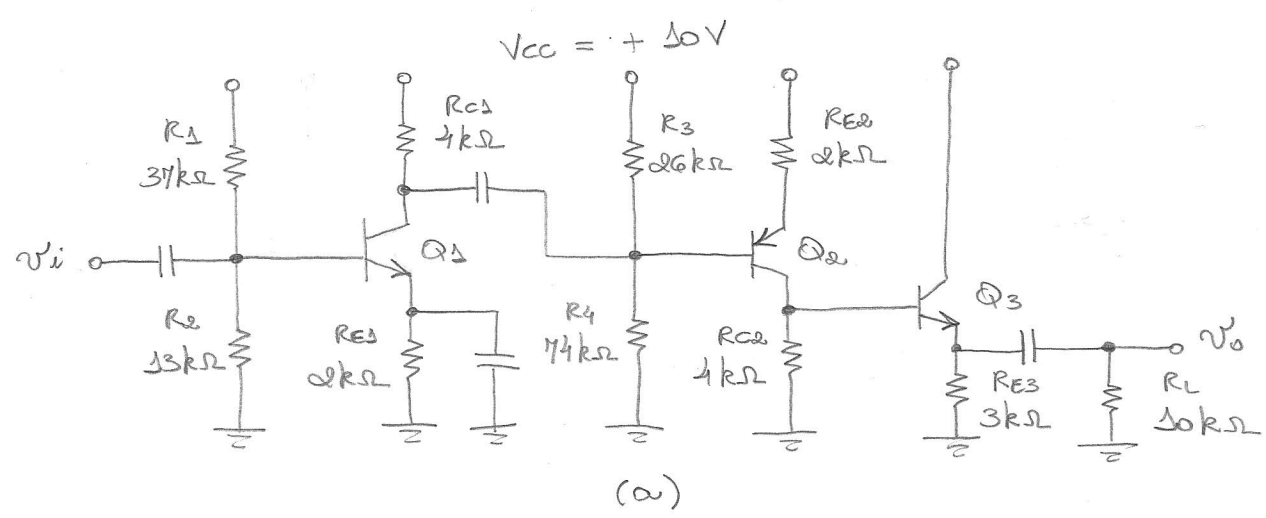


- (b) PARA AMENIZAR ESSE PROBLEMA, É MUITO COMUM UTILIZAR UMA VERSÃO MODIFICADA DO ESPELHO EM CASCODE, APRESENTADA A SEGUIR. CONSIDERANDO UMA TENSÃO DE POLARIZAÇÃO $V_B = 1,4V$, CALCULE QUAL É A MÍNIMA TENSÃO V_O PERMITIDA NA SAÍDA DO ESPELHO CASCODE MODIFICADO. CONSIDERE TRANSISTORES COM OS MESMOS PARÂMETROS DO ÍTEM (a).

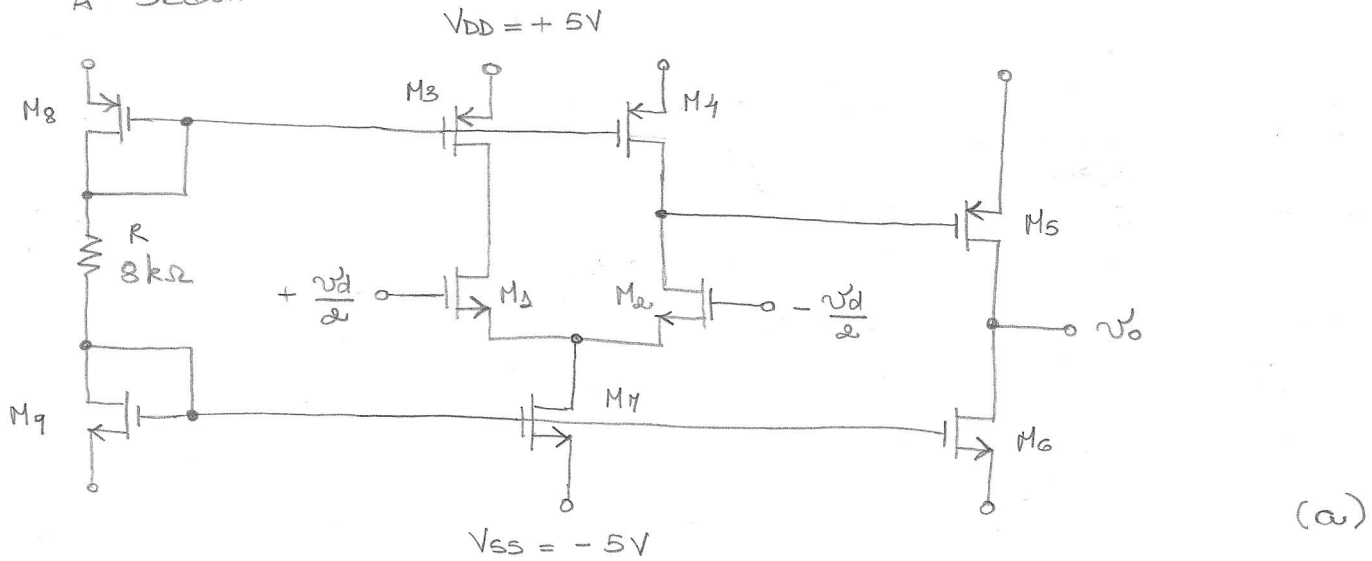


- (c) SABENDO-SE QUE A IMPEDÂNCIA DE SAÍDA DO ESPELHO CASCODE DO ÍTEM (a) É $R_O = V_{O1} + V_{O2} + g_{m3} V_{O1} V_{O3}$, MOSTRE QUE A IMPEDÂNCIA DE SAÍDA DO ESPELHO EM CASCODE DO ÍTEM (b) É EXATAMENTE IGUAL.

⑤ CALCULE O GANHO DE TENSÃO DOS AMPLIFICADORES A SEGUIR. NO CASO DE AMPLIFICADORES DIFERENCIAIS, OBTENHA APENAS O GANHO DIFERENCIAL. CONSIDERE TRANSISTORES COM $\beta = 100$, $|V_{BE}| = 0,6V$ E $V_T = 25mV$.

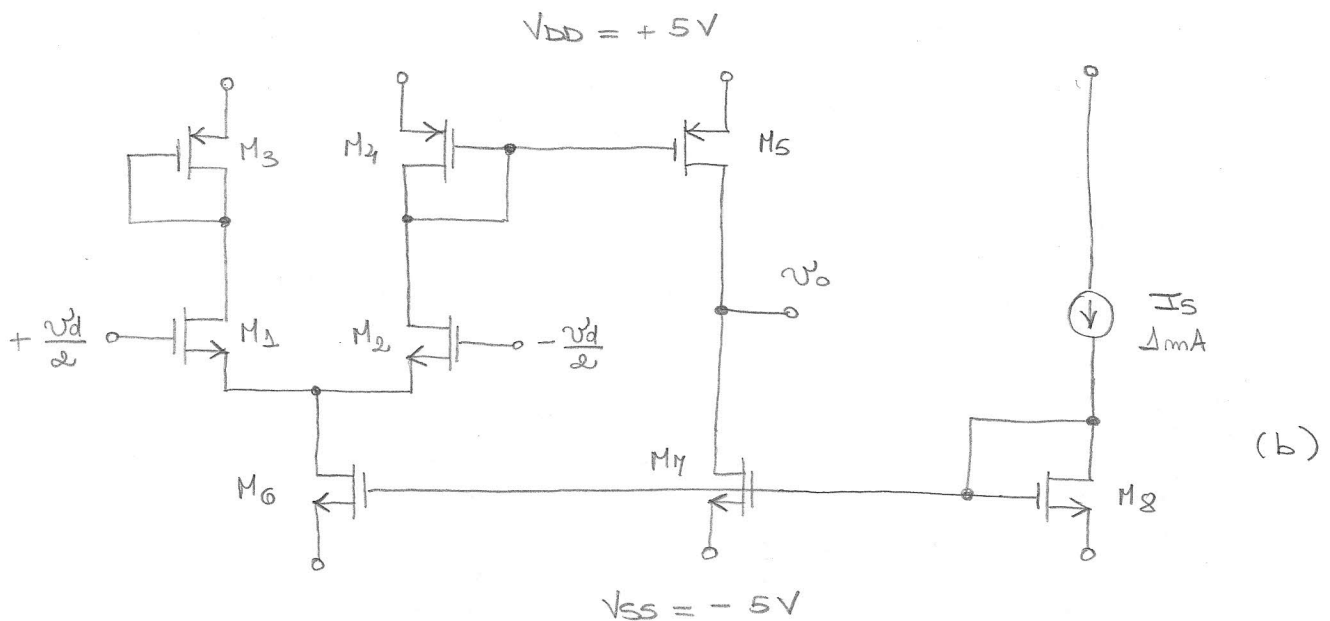


- ⑥ CONSIDERE QUE OS AMPLIFICADORES APRESENTADOS A SEGUIR FORAM IMPLEMENTADOS EM UM PROCESSO CMOS ONDE $k_n = 2 \text{ mA/V}^2$, $k_p = 1 \text{ mA/V}^2$, $|V_{th}| = 0,5 \text{ V}$ E $\lambda = 0,01 \text{ V}^{-1}$. DESSA FORMA, CALCULE O GANHO DIFERENCIAL DE CADA UM DOS AMPLIFICADORES A SEGUIR.



DIMENSÕES DOS TRANSISTORES:

$$\begin{cases} W_1 = W_2 = W_6 = W_9 = 4 \mu\text{m} \\ W_7 = 8 \mu\text{m} \\ W_3 = W_4 = W_5 = W_8 = 2 \mu\text{m} \\ L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = L_9 = 1 \mu\text{m} \end{cases}$$



DIMENSÕES DOS TRANSISTORES:

$$\begin{cases} W_1 = W_2 = W_7 = W_8 = 4 \mu\text{m} \\ W_3 = W_4 = W_5 = W_6 = 8 \mu\text{m} \\ L_1 = L_2 = \dots = L_8 = 1 \mu\text{m} \end{cases}$$