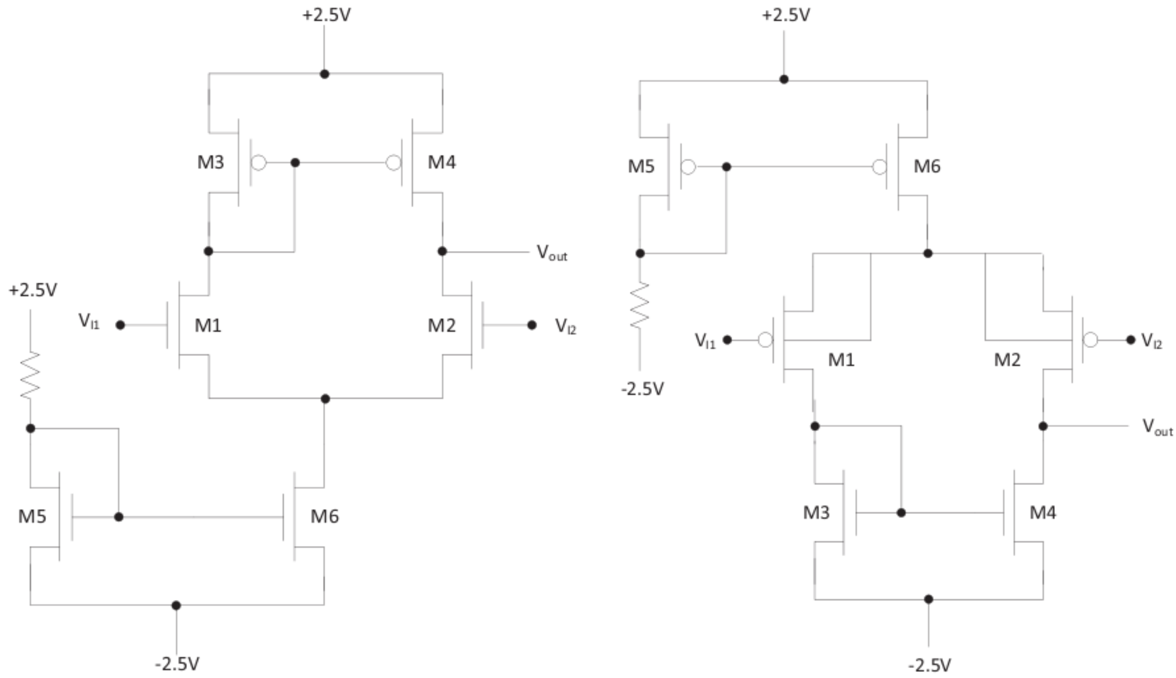
**Problema 3 (4 puntos).** Determine la ganancia para pequeña señal y la dinámica de modo común (CMR) para los amplificadores diferenciales de la Figura 2. Asuma que todos los transistores NMOS tienen una relación de aspecto $\frac{W}{L} = \frac{15}{5}$, que todos los PMOS tienen una relación de aspecto $\frac{W}{L} = \frac{70}{5}$, y que las resistencias son de 3.8 MΩ.



**POLARIZACIÓN DEL CIRCUITO DE LA IZQUIERDA:**

Los transistores M3 y M5 están en SATURACIÓN porque tienen conectados los terminales D y G. De este modo, se cumple que:

$$V_{DS}=V_{GS}>V_{GS}-V_T$$

Además, se cumple también, por supuesto, que:

$$V_{GS}>V_T$$

Por lo tanto, aplicaremos en ambos transistores la fórmula correspondiente a la región de saturación:

$$I_{DS}=\frac{K_n}{2}\cdot\frac{W}{L}(V_{GS}-V_T)^2 \quad \text{[Página 22 del Tema 3]}$$

Utilizaremos los siguientes valores de substitución:

$$\begin{pmatrix} K_{n,3}=17\,\mu AV^{-2} \\ K_{n,5}=50\,\mu AV^{-2} \\ \frac{W_3}{L_3}=\frac{70}{5} \\ \frac{W_5}{L_5}=\frac{15}{5} \\ -V_{T,3}=-V_{T,4}=V_{T,5}=V_{T,6}=V_{T,1}=V_{T,2}=0.83\,V \end{pmatrix}$$

El motivo de haber tomado estos valores para la tensión umbral es porque ambos transistores tienen el sustrato conectado a tensión negativa (NMOS) y positiva (PMOS), respectivamente. Véase la página 15 del Tema 3, donde se explica el aumento de la tensión umbral debido a la polarización del substrato.

Sin embargo, no conocemos aún el valor de la intensidad que atraviesa el transistor M5, que permanecerá como incógnita en la siguiente ecuación:

$$I_{DS,5}=\frac{50\,\mu AV^{-2}}{2}\cdot\frac{15}{5}(2.5\,V-3.8\,M\Omega\cdot I_{DS,5}-(-2.5\,V)-0.83\,V)^2$$

Desarrollando esta ecuación de segundo grado, y resolviendo, aparecen dos soluciones:

$$\begin{pmatrix} I_{1,DS,5}=1.13\,\mu A \\ I_{2,DS,5}=1.07\,\mu A \end{pmatrix}$$

Una de estas soluciones es válida y la otra no lo es. Para identificar la solución correcta, vamos a substituir y calcular la tensión en la puerta del transistor:

$$\begin{pmatrix} V_{1,GS,5}=2.5\,V-3.8\,M\Omega\cdot 1.13\,\mu A-(-2.5\,V)=0.7\,V<V_T \\ V_{2,GS,5}=2.5\,V-3.8\,M\Omega\cdot 1.07\,\mu A-(-2.5\,V)=0.94\,V>V_T \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, la segunda solución es la correcta:

$$\begin{pmatrix} I_{DS,5}=1.07\,\mu A \\ V_{GS,5}=0.94\,V \\ V_{DS,5}=0.94\,V>V_{GS}-V_T \end{pmatrix}$$

Por simetría de los componentes, la intensidad que atraviesa el transistor M6 será la misma que la del transistor M5, y por lo tanto, estará igualmente saturado. Así pues:

$$\begin{Bmatrix} I_{DS,6} = 1.07\,\mu A \\ V_{GS,6} = 0.94\,V \end{Bmatrix}$$

Pero no podemos calcular aún la tensión en el drenador del transistor M6. Sin embargo, por simetría de los componentes, en polarización continua tendremos que las intensidades que atraviesan los transistores M1 y M2 son iguales, al igual que las de los transistores M3 y M4, y por parejas suman la intensidad del transistor M6. De este modo, tenemos que:

$$I_{DS,1} = I_{DS,2} = I_{SD,3} = I_{SD,4} = 0.535\,\mu A$$

Ahora bien, en M3 podemos aplicar la fórmula correspondiente a la región de saturación:

$$0.535\,\mu A = \frac{17\,\mu A V^{-2}}{2} \cdot \frac{70}{5} \left[ V_{G,3} - 2.5\,V - (-0.83\,V) \right]^2$$

De nuevo aparecen dos resultados, siendo válido solamente uno de ellos:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,G,3} = 1.737\,V \\ V_{2,G,3} = 1.603\,V \end{Bmatrix}$$

Para identificar la solución verdadera, substituimos en la tensión entre puerta y fuente:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,SG,3} = 2.5\,V - 1.737\,V = 0.763\,V < |V_T| \\ V_{2,SG,3} = 2.5\,V - 1.603\,V = 0.897\,V > |V_T| \end{Bmatrix}$$

Siendo correcta, evidentemente, la segunda de las soluciones:

$$\begin{Bmatrix} V_{G,3} = V_{G,4} = 1.603\,V \\ V_{SG,3} = V_{SG,4} = 0.897\,V \\ V_{SD,3} = V_{SD,4} = 0.897\,V > V_{SG} - |V_T| \end{Bmatrix}$$

Ahora ya podemos calcular las tensiones en M1 y M2, suponiendo que se encuentran ambos en la región de saturación:

$$0.535\,\mu A = \frac{50\,\mu A V^{-2}}{2} \cdot \frac{15}{5} (0\,V - V_{S,1} - 0.83\,V)^2$$

De nuevo aparecen dos resultados, siendo válido solamente uno de ellos:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,S,1} = -0.746\,V \\ V_{2,S,1} = -0.914\,V \end{Bmatrix}$$

Para identificar la solución verdadera, calculamos la tensión entre puerta y fuente:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,GS,1} = 0\,V - (-0.746\,V) = 0.746\,V < V_T \\ V_{2,GS,1} = 0\,V - (-0.914\,V) = 0.914\,V > V_T \end{Bmatrix}$$

Siendo correcta, evidentemente, la segunda de las soluciones:

$$\begin{Bmatrix} V_{S,1} = V_{S,2} = -0.914\,V \\ V_{GS,1} = V_{GS,2} = 0.914\,V \\ V_{DS,1} = V_{DS,2} = 1.603\,V - (-0.914\,V) = 2.517\,V > V_{GS} - V_T \end{Bmatrix}$$

**POLARIZACIÓN DEL CIRCUITO DE LA DERECHA:**

De forma MUY similar a como hemos obrado en el circuito de la izquierda:

Los transistores M3 y M5 están en SATURACIÓN porque tienen conectados los terminales D y G. De este modo, se cumple que:

$$V_{DS}=V_{GS}>V_{GS}-V_T$$

Además, se cumple también, por supuesto, que:

$$V_{GS}>V_T$$

Por lo tanto, aplicaremos en ambos transistores la fórmula correspondiente a la región de saturación:

$$I_{DS}=\frac{K_n}{2}\cdot\frac{W}{L}(V_{GS}-V_T)^2 \quad \text{[Página 22 del Tema 3]}$$

Utilizaremos los siguientes valores de substitución:

$$\begin{pmatrix} K_{n,3}=50\,\mu AV^{-2} \\ K_{n,5}=17\,\mu AV^{-2} \\ \frac{W_3}{L_3}=\frac{15}{5} \\ \frac{W_5}{L_5}=\frac{70}{5} \\ V_{T,3}=V_{T,4}=-V_{T,5}=-V_{T,6}=-V_{T,1}=-V_{T,2}=0.83\,V \end{pmatrix}$$

El motivo de haber tomado estos valores para la tensión umbral es porque ambos transistores tienen el sustrato conectado a tensión negativa (NMOS) y positiva (PMOS), respectivamente. Véase la página 15 del Tema 3, donde se explica el aumento de la tensión umbral debido a la polarización del substrato.

Sin embargo, no conocemos aún el valor de la intensidad que atraviesa el transistor M5, que permanecerá como incógnita en la siguiente ecuación:

$$I_{SD,5}=\frac{17\,\mu AV^{-2}}{2}\cdot\frac{70}{5}\left[-2.5\,V+3.8\,M\,\Omega\cdot I_{SD,5}-2.5\,V-(-0.83\,V)\right]^2$$

Desarrollando esta ecuación de segundo grado, y resolviendo, aparecen dos soluciones, prácticamente idénticas a las obtenidas en el circuito anterior:

$$\begin{Bmatrix} I_{1,SD,5}=1.13\,\mu A \\ I_{2,SD,5}=1.07\,\mu A \end{Bmatrix}$$

Una de estas soluciones es válida y la otra no lo es. Para identificar la solución correcta, vamos a substituir y calcular la tensión en la puerta del transistor:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,SG,5}=2.5\,V-(3.8\,M\,\Omega\cdot 1.13\,\mu A-2.5\,V)=0.7\,V<|V_T| \\ V_{2,SG,5}=2.5\,V-(3.8\,M\,\Omega\cdot 1.07\,\mu A-2.5\,V)=0.94\,V>|V_T| \end{Bmatrix}$$

Por lo tanto, la segunda solución es la correcta:

$$\begin{Bmatrix} I_{SD,5}=1.07\,\mu A \\ V_{SG,5}=0.94\,V \\ V_{SD,5}=0.94\,V > V_{GS}-|V_T| \end{Bmatrix}$$

Por simetría de los componentes, la intensidad que atraviesa el transistor M6 será la misma que la del transistor M5, y por lo tanto, estará igualmente saturado. Así pues:

$$\begin{Bmatrix} I_{SD,6}=1.07\,\mu A \\ V_{SG,6}=0.94\,V \end{Bmatrix}$$

Por simetría de los componentes, en polarización continua tendremos que las intensidades que atraviesan los transistores M1 y M2 son iguales, al igual que las de los transistores M3 y M4, y por parejas suman la intensidad del transistor M6. De este modo, tenemos que:

$$I_{SD,1}=I_{SD,2}=I_{DS,3}=I_{DS,4}=0.535\,\mu A$$

Ahora bien, en M3 podemos aplicar la fórmula correspondiente a la región de saturación:

$$0.535\,\mu A=\frac{50\,\mu A V^{-2}}{2}\cdot\frac{15}{5}\left[V_{G,3}-(-2.5\,V)-0.83\,V\right]^2$$

De nuevo aparecen dos resultados, siendo válido solamente uno de ellos:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,G,3}=-1.754\,V \\ V_{2,G,3}=-1.586\,V \end{Bmatrix}$$

Para identificar la solución verdadera, substituimos en la tensión entre puerta y fuente:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,GS,3}=-(-2.5\,V)-1.737\,V=0.746\,V<V_T \\ V_{2,GS,3}=-(-2.5\,V)-1.586\,V=0.914\,V>V_T \end{Bmatrix}$$

Siendo correcta, evidentemente, la segunda de las soluciones:

$$\begin{Bmatrix} V_{G,3}=V_{G,4}=-1.586\,V \\ V_{GS,3}=V_{GS,4}=0.914\,V \\ V_{DS,3}=V_{DS,4}=0.914\,V>V_{GS}-V_T \end{Bmatrix}$$

Podemos calcular las tensiones en M1 y M2, suponiendo que se encuentran ambos en saturación:

$$0.535\,\mu A=\frac{17\,\mu A V^{-2}}{2}\cdot\frac{70}{5}\left[0\,V-V_{S,1}-(-0.83\,V)\right]^2$$

De nuevo aparecen dos resultados, siendo válido solamente uno de ellos:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,S,1}=0.763\,V \\ V_{2,S,1}=0.897\,V \end{Bmatrix}$$

Para identificar la solución verdadera, calculamos la tensión entre puerta y fuente:

$$\begin{Bmatrix} V_{1,SG,1}=0.763\,V-0\,V=0.763\,V<|V_T| \\ V_{2,SG,1}=0.897\,V-0\,V=0.897\,V>|V_T| \end{Bmatrix}$$

Siendo correcta, evidentemente, la segunda de las soluciones:

$$\begin{Bmatrix} V_{S,1}=V_{S,2}=0.897\,V \\ V_{SG,1}=V_{SG,2}=0.897\,V \\ V_{SD,1}=V_{SD,2}=0.897\,V-(-1.586\,V)=2.483\,V>V_{SG}-|V_T| \end{Bmatrix}$$

**ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL DEL CIRCUITO DE LA IZQUIERDA:**

Según la página 63 del Tema 3:

$$g_m = \sqrt{2K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot I_{DS}}$$

Según la página 66 del Tema 3:

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_{DS}}$$

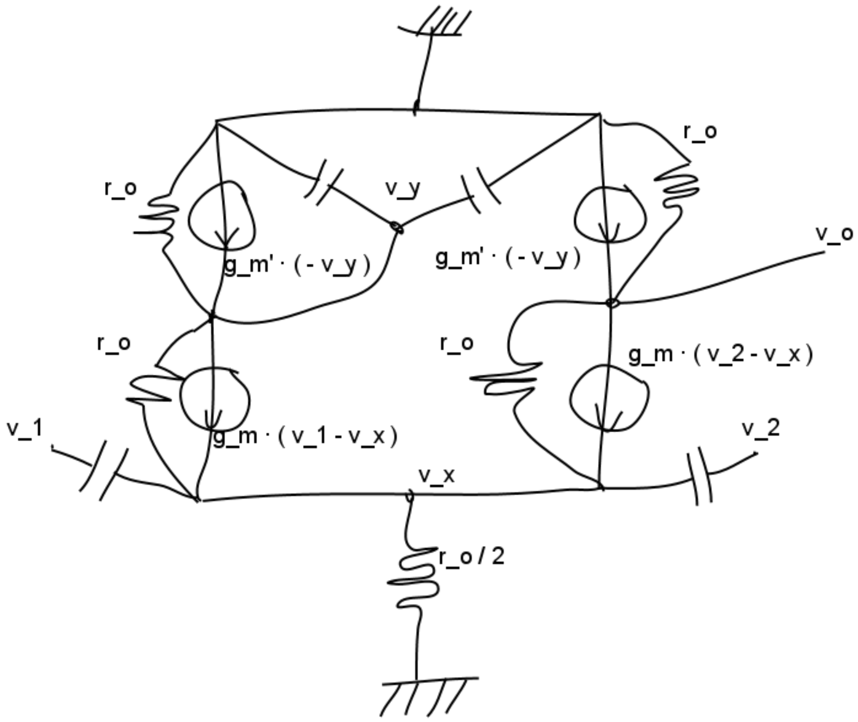
Recordemos del apartado de polarización que:

$$I_{DS,1} = I_{DS,2} = I_{SD,3} = I_{SD,4} = 0.535\,\mu A$$

Luego podemos calcular los parámetros de pequeña señal:

$$\left\{\begin{array}{c}
g_m = g_{m,1} = g_{m,2} = \sqrt{2 \cdot 50\,\mu A V^{-2} \cdot \frac{15}{5} \cdot 0.535\,\mu A} \approx \frac{1}{79\,K\,\Omega} \\
g_m{}' = g_{m,3} = g_{m,4} = \sqrt{2 \cdot 17\,\mu A V^{-2} \cdot \frac{70}{5} \cdot 0.535\,\mu A} \approx \frac{1}{63\,K\,\Omega} \\
r_o = \frac{1}{0.06 \cdot 0.535\,\mu A} \approx 31\,M\,\Omega \\
r_o{}' = \frac{1}{\lambda I_{DS,5}} = \frac{1}{0.06 \cdot 1.07\,\mu A} \approx \frac{31\,M\,\Omega}{2}
\end{array}\right.$$

Recordemos ahora el modelo de pequeña señal, tal y como está descrito en la página 67 del Tema 3, y despreciemos el condensador para considerar frecuencias medias. El resultado es el diagrama que sigue a continuación:



Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo X, tenemos:

$$g_m(v_1-v_x)+g_m(v_2-v_x)=\frac{v_x}{r_o}+\frac{v_x}{r_o}+\frac{2v_x}{r_o}$$

Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo Y, tenemos:

$$g_m'(-v_y)-g_m(v_1-v_x)=\frac{v_y}{r_o}+\frac{v_y}{r_o}$$

Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo O, tenemos:

$$g_m'(-v_y)-g_m(v_2-v_x)=\frac{v_o}{r_o}+\frac{v_o}{r_o}$$

Desarrollando y simplificando estas tres ecuaciones nos queda:

$$\begin{Bmatrix} g_m r_o v_1+g_m r_o v_2=v_x(4+2g_m r_o)\approx v_x 2 g_m r_o \\ -g_m r_o v_1+g_m r_o v_x=v_y(2+g_m' r_o)\approx v_y g_m' r_o \\ -g_m' r_o v_y-g_m r_o v_2+g_m r_o v_x=2v_o \end{Bmatrix}$$

Simplificando aún más nos queda:

$$\begin{Bmatrix} g_m r_o v_1+g_m r_o v_2\approx v_x 2 g_m r_o \\ g_m r_o v_x-v_y g_m' r_o\approx g_m r_o v_1 \\ g_m r_o v_1-g_m r_o v_2=2v_o \end{Bmatrix}$$

Luego ya tenemos la solución para la ganancia diferencial:

$$\frac{v_o}{v_2-v_1}=-\frac{g_m r_o}{2}\approx-196$$

**ANÁLISIS DE PEQUEÑA SEÑAL DEL CIRCUITO DE LA DERECHA:**

Según la página 63 del Tema 3:

$$g_m = \sqrt{2 K_n \cdot \frac{W}{L} \cdot I_{DS}}$$

Según la página 66 del Tema 3:

$$r_o = \frac{1}{\lambda I_{DS}}$$

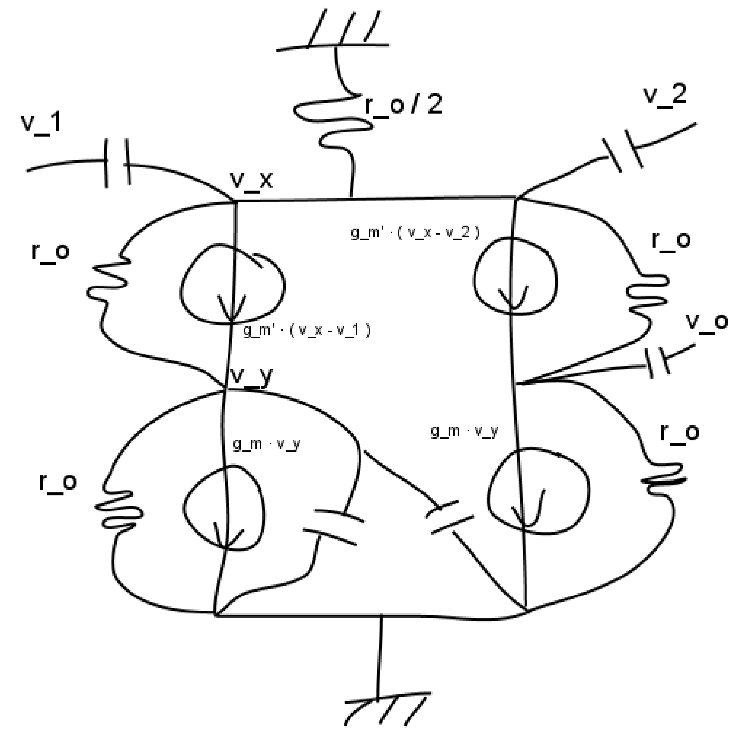
Recordemos del apartado de polarización que:

$$I_{SD,1} = I_{SD,2} = I_{DS,3} = I_{DS,4} = 0.535\,\mu A$$

Luego podemos calcular los parámetros de pequeña señal:

$$\left( \begin{array}{c} g_m' = g_{m,1} = g_{m,2} = \sqrt{2 \cdot 17\,\mu A V^{-2} \cdot \frac{70}{5} \cdot 0.535\,\mu A} \approx \frac{1}{63\,K\Omega} \\ g_m = g_{m,3} = g_{m,4} = \sqrt{2 \cdot 50\,\mu A V^{-2} \cdot \frac{15}{5} \cdot 0.535\,\mu A} \approx \frac{1}{79\,K\Omega} \\ r_o = \frac{1}{0.06 \cdot 0.535\,\mu A} \approx 31\,M\Omega \\ r_o' = \frac{1}{\lambda I_{SD,5}} = \frac{1}{0.06 \cdot 1.07\,\mu A} \approx \frac{31\,M\Omega}{2} \end{array} \right)$$

Recordemos ahora el modelo de pequeña señal, tal y como está descrito en la página 67 del Tema 3, y despreciemos el condensador para considerar frecuencias medias. El resultado es el diagrama que sigue a continuación:



Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo X, tenemos:

$$g_m'(v_x - v_1) + g_m'(v_x - v_2) + \frac{v_x}{r_o} + \frac{v_x}{r_o} + \frac{2v_x}{r_o} = 0$$

Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo Y, tenemos:

$$g_m'(v_x - v_1) = \frac{v_y}{r_o} + \frac{v_y}{r_o} + g_m v_y$$

Si aplicamos la Ley de Kirchhoff para las intensidades al nodo O, tenemos:

$$g_m'(v_x - v_2) = \frac{v_o}{r_o} + \frac{v_o}{r_o} + g_m v_y$$

Desarrollando y simplificando estas tres ecuaciones nos queda:

$$\left\{\begin{matrix} g_m' r_o v_1 + g_m' r_o v_2 = v_x(4 + 2 g_m' r_o) \approx v_x 2 g_m' r_o \\ -g_m' r_o v_1 + g_m' r_o v_x = v_y(2 + g_m r_o) \approx v_y g_m r_o \\ -g_m r_o v_y - g_m' r_o v_2 + g_m' r_o v_x = 2 v_o \end{matrix}\right\}$$

Simplificando aún más nos queda:

$$\left\{\begin{matrix} g_m' r_o v_1 + g_m' r_o v_2 \approx v_x 2 g_m' r_o \\ g_m' r_o v_x - v_y g_m r_o \approx g_m' r_o v_1 \\ g_m' r_o v_1 - g_m' r_o v_2 = 2 v_o \end{matrix}\right\}$$

Luego ya tenemos la solución para la ganancia diferencial:

$$\frac{v_o}{v_2 - v_1} = -\frac{g_m' r_o}{2} \approx -246$$

**DINÁMICA DE MODO COMÚN (CMR) DEL CIRCUITO DE LA IZQUIERDA:**

***CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÍNIMA EN MODO COMÚN:***

En este caso, el transistor M1 se encuentra en saturación, y el transistor M6 a punto de entrar en su región óhmica.

Según resolvimos en el apartado de polarización, sabemos que la intensidad del drenador y la tensión de puerta en el transistor M6 están fijadas por el espejo de corriente formado por los transistores M5 y M6. Recordemos los valores obtenidos.

Para el transistor M5:

$$\left\{\begin{matrix} I_{DS,5}=1.07\,\mu A \\ V_{GS,5}=0.94\,V \\ V_{DS,5}=0.94\,V>V_{GS}-V_T \end{matrix}\right\}$$

Mientras que, para el transistor M6, obteníamos valores simétricos:

$$\left\{\begin{matrix} I_{DS,6}=1.07\,\mu A \\ V_{GS,6}=0.94\,V \end{matrix}\right\}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que, para analizar el valor mínimo de la tensión en modo común, debemos suponer el transistor M6 a punto de entrar en su región óhmica, debe entonces cumplirse la siguiente relación entre las tensiones:

$$\left\{\begin{matrix} V_{DS,6}=V_{GS,6}-V_{T,6}=0.94\,V-0.83\,V=0.11\,V \\ V_{D,6}=V_{S,6}+V_{DS,6}=-2.5\,V+0.11\,V=-2.39\,V \end{matrix}\right\}$$

Por otra parte, el transistor M1 sigue estando en saturación, por lo que tiene cumplirse que:

$$\left\{\begin{matrix} I_{DS,1}=\frac{K_{n,1}}{2}\cdot\frac{W_1}{L_1}(V_{GS,1}-V_{T,1})^2=\frac{K_{n,1}}{2}\cdot\frac{W_1}{L_1}(V_{C,mín}-V_{D,6}-V_{T,1})^2 \\ 0.535\,\mu A=\frac{50\,\mu A V^{-2}}{2}\cdot\frac{15}{5}(V_{C,mín}-(-2.39\,V)-0.83\,V)^2 \\ \frac{107\,V^2}{15000}=(V_{C,mín}+1.56\,V)^2 \end{matrix}\right\}$$

De esta ecuación se obtienen dos valores:

$$\left\{\begin{matrix} V_{C,mín}=-1.56\,V+0.084\,V=-1.476\,V \\ V_{C,mín}=-1.56\,V-0.084\,V=-1.644\,V \end{matrix}\right\}$$

Para verificar cuál de los dos valores es el correcto, calculamos la tensión de puerta del transistor:

$$\left\{\begin{matrix} V_{GS,1}=V_{C,mín}-V_{D,6}=-1.476\,V-(-2.39\,V)=0.914\,V>V_T \\ V_{GS,1}=V_{C,mín}-V_{D,6}=-1.644\,V-(-2.39\,V)=0.746\,V<V_T \end{matrix}\right\}$$

Siendo, pues, correcta, la primera de las soluciones:

$$V_{C,mín}=-1.476\,V$$

***CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA EN MODO COMÚN:***

En este caso, el transistor M1 se encuentra a punto de entrar en su región óhmica.

Según resolvimos en el apartado de polarización, sabemos que el transistor M3 está en saturación, porque tiene conectados los terminales drenador y puerta. Recordemos los valores obtenidos para dicho transistor:

$$\begin{Bmatrix} V_{G,3}=1.603\,V \\ V_{SG,3}=0.897\,V \\ V_{SD,3}=0.897\,V > V_{SG,3}-|V_T| \\ V_{D,1}=V_{D,3}=V_{G,3}=1.603\,V \end{Bmatrix}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que, para analizar el valor mínimo de la tensión en modo común, debemos suponer el transistor M1 a punto de entrar en su región óhmica, debe entonces cumplirse la siguiente relación entre las tensiones:

$$\begin{Bmatrix} V_{DS,1}=V_{GS,1}-V_{T,1} \\ V_{D,1}=V_{G,1}-V_{T,1} \\ V_{G,1}=V_{D,1}-V_{T,1}=1.603\,V-0.83\,V=0.773\,V \end{Bmatrix}$$

Ésta es, pues, nuestra solución:

$$V_{C,\,máx}=0.773\,V$$

**DINÁMICA DE MODO COMÚN (CMR) DEL CIRCUITO DE LA DERECHA:**

Vamos a proceder de forma paralelamente simétrica a la resolución del circuito de la izquierda.

***CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÁXIMA EN MODO COMÚN:***

En este caso, el transistor M1 se encuentra en saturación, y el transistor M6 a punto de entrar en su región óhmica.

Según resolvimos en el apartado de polarización, sabemos que la intensidad del drenador y la tensión de puerta en el transistor M6 están fijadas por el espejo de corriente formado por los transistores M5 y M6. Recordemos los valores obtenidos.

Para el transistor M5:

$$\left\{\begin{array}{c} I_{SD,5}=1.07\,\mu A \\ V_{SG,5}=0.94\,V \\ V_{SD,5}=0.94\,V > V_{SG,5}-|V_{T,5}| \end{array}\right\}$$

Mientras que, para el transistor M6, obteníamos valores simétricos:

$$\left\{\begin{array}{c} I_{SD,6}=1.07\,\mu A \\ V_{SG,6}=0.94\,V \end{array}\right\}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que, para analizar el valor mínimo de la tensión en modo común, debemos suponer el transistor M6 a punto de entrar en su región óhmica, debe entonces cumplirse la siguiente relación entre las tensiones:

$$\left\{\begin{array}{c} V_{SD,6}=V_{SG,6}-|V_{T,6}|=0.94\,V-0.83\,V=0.11\,V \\ V_{D,6}=V_{S,6}-V_{SD,6}=2.5\,V-0.11\,V=2.39\,V \end{array}\right\}$$

Por otra parte, el transistor M1 sigue estando en saturación, por lo que tiene cumplirse que:

$$\left\{\begin{array}{c} I_{SD,1}=\frac{K_{n,1}}{2}\cdot\frac{W_1}{L_1}(V_{SG,1}-|V_{T,1}|)^2=\frac{K_{n,1}}{2}\cdot\frac{W_1}{L_1}(V_{D,6}-V_{C,máx}-|V_{T,1}|)^2 \\ 0.535\,\mu A=\frac{17\,\mu A V^{-2}}{2}\cdot\frac{70}{5}(2.39\,V-V_{C,máx}-0.83\,V)^2 \\ \frac{107\,V^2}{23800}=(1.56\,V-V_{C,máx})^2 \end{array}\right\}$$

De esta ecuación se obtienen dos valores:

$$\left\{\begin{array}{c} V_{C,máx}=1.56\,V+0.067\,V=1.627\,V \\ V_{C,máx}=1.56\,V-0.067\,V=1.493\,V \end{array}\right\}$$

Para verificar cuál de los dos valores es el correcto, calculamos la tensión de puerta del transistor:

$$\left\{\begin{array}{c} V_{SG,1}=V_{D,6}-V_{C,máx}=2.39\,V-1.627\,V=0.763\,V<|V_{T,1}| \\ V_{SG,1}=V_{D,6}-V_{C,máx}=2.39\,V-1.493\,V=0.897\,V>|V_{T,1}| \end{array}\right\}$$

Siendo, pues, correcta, la segunda de las soluciones:

$$V_{C,máx}=1.493\,V$$

***CÁLCULO DE LA TENSIÓN MÍNIMA EN MODO COMÚN:***

En este caso, el transistor M1 se encuentra a punto de entrar en su región óhmica.

Según resolvimos en el apartado de polarización, sabemos que el transistor M3 está en saturación, porque tiene conectados los terminales drenador y puerta. Recordemos los valores obtenidos para dicho transistor:

$$\left\{\begin{array}{c} V_{G,3}=-1.586\,V \\ V_{GS,3}=0.914\,V \\ V_{DS,3}=0.914\,V>V_{GS,3}-V_{T,3} \\ V_{D,1}=V_{D,3}=V_{G,3}=-1.586\,V \end{array}\right\}$$

Ahora bien, teniendo en cuenta que, para analizar el valor mínimo de la tensión en modo común, debemos suponer el transistor M1 a punto de entrar en su región óhmica, debe entonces cumplirse la siguiente relación entre las tensiones:

$$\left\{\begin{array}{c} V_{SD,1}=V_{SG,1}-\left|V_{T,1}\right| \\ -V_{D,1}=-V_{G,1}-\left|V_{T,1}\right| \\ V_{G,1}=V_{D,1}-\left|V_{T,1}\right|=-1.586\,V-0.83\,V=-2.416\,V \end{array}\right\}$$

Ésta es, pues, nuestra solución:

$$V_{C,mín}=-2.416\,V$$