



## Trabajo Práctico Dispositivos E.

GRUPO N°-----

CURSO:R3031

**PROFESORES:** Ricardo Alberto ZuazquitaY Eduardo Víctor Oreglia

**ASISTE LOS DÍAS:** Lunes y Viernes

**EN EL TURNO:** Tarde

**TRABAJO PRÁCTICO N°:** 3

**TÍTULO:** Simulación y Análisis Exhaustivo de Transistores MOSFET en LT-Spice

**Alumno:** Costarelli Facundo Lautaro

**Dni:** 42.724.683

**Legajo:** 176.291-6

	FECHAS	FIRMA Y ACLARACIÓN DEL DOCENTE
REALIZADO EL	15/07/2024	
CORREGIDO		
APROBADO		

**INDICACIONES PARA LAS CORRECCIONES:**

# Índice

1. Introducción	Pag 1
2. Desarrollo	Pag 2
i. <i>Obtención de la curva de transferencia de un transistor MOSFET</i>	Pag 2
ii. <i>Obtención de las curvas de Salida de un transistor MOSFET</i>	Pag 5
iii. <i>Amplificador Monoetapa con MOSFET. Obtención de la Ganancia de Tensión</i>	Pag 9
iiii. <i>Amplificador Monoetapa con MOSFET. Obtención de la Respuesta en frecuencia del circuito</i>	Pag 10
3. Conclusión	Pag 16

## **Introducción**

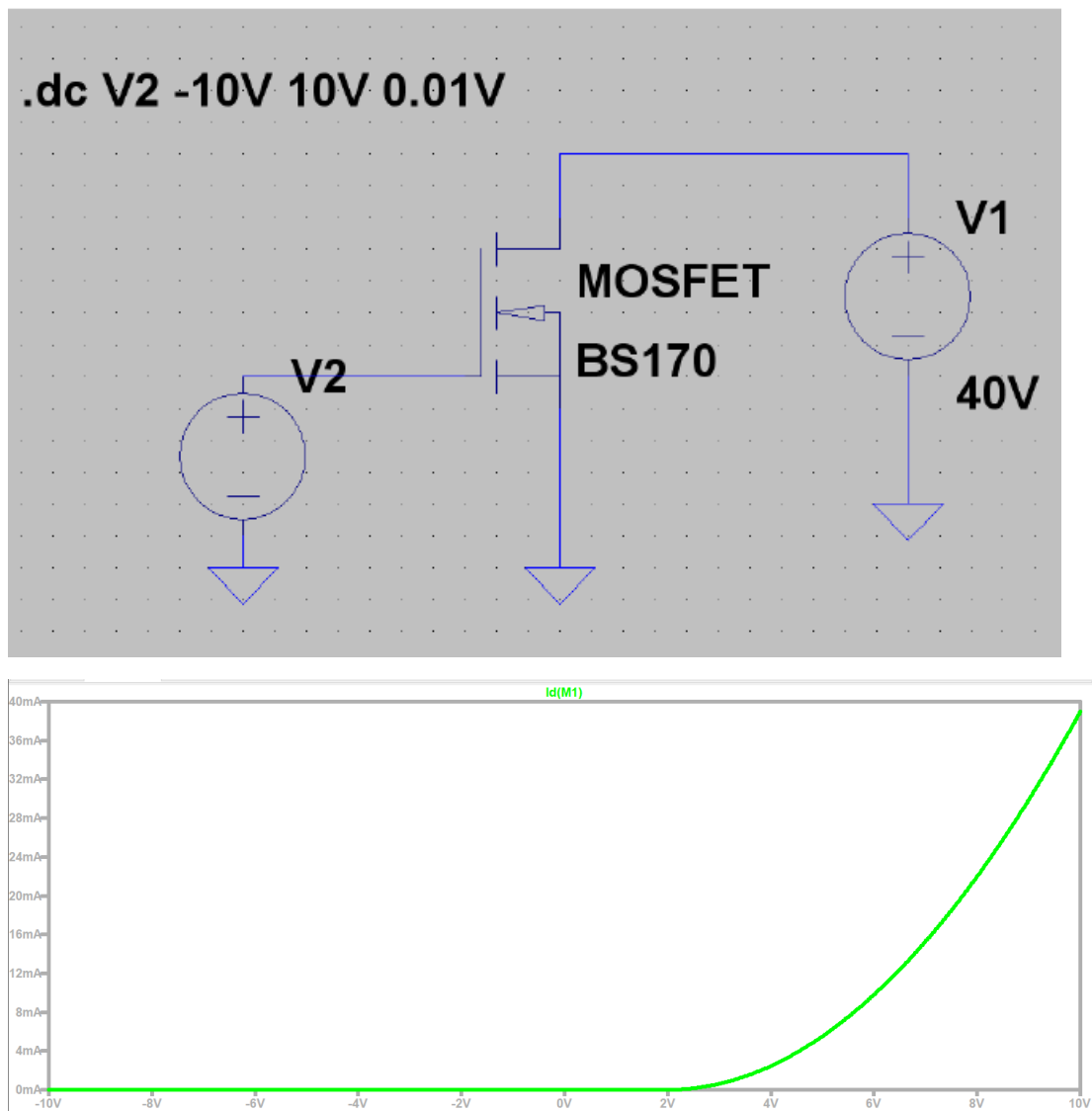
En este informe se busca estudiar la curva de transferencia de un MOSFET tomando como referencia el BS170 para así determinar la tensión de umbral, que tipo de canal es así como el tipo de contaminación del mismo. Estudiar la transconductancia nos ayudará a entender como varía o es regulada la corriente de salida  $I_d$  en función de la variación de la tensión de polarización  $V_{gs}$  en el transistor. Será importante estudiar incluso curvas de transferencia para diferentes temperaturas para poder ver como el transistor interactúa con diferentes temperaturas y cuales son los cambios vitales producidos.

Buscaremos también estudiar las curvas de salida de  $I_d$  en función de  $V_{ds}$  para poder determinar las zonas de corte, saturación y parabólica para así entender los comportamientos del transistor en cada una de ellas. La resistencia dinámica a pequeños valores de  $V_{ds}$  y la transconductancia, nos permitirán realizar comparaciones con el caso anterior y observar comportamientos particulares importantes. Finalmente, a partir de un circuito monoetapa amplificador, veremos como se comporta el transistor en estas condiciones, cual es la ganancia de tensión y el desfase natural que producen esta clase de circuitos. Evaluar la respuesta en frecuencia será de utilidad para poder ver el rango de frecuencias de trabajo típico de un transistor donde este amplifique sin pérdidas ni distorsión idealmente. Cambiar los valores internos de  $c_{gs}$  y  $c_{gd}$  nos permitirá evaluar como distintos modelos de transistor o estructuras, modifican las frecuencias de corte del rango de frecuencias de trabajo.

## Desarrollo

### 2) i. Obtención de la curva de transferencia de un transistor MOSFET

a) En base al siguiente circuito de un MOSFET BS170 configurado en source común y con polarización  $V_{gs}$  en directa, se estudia la curva de transferencia de la corriente de drain siendo  $i_d(v_{gs})$ . La temperatura es la ambiente de 27 °C.

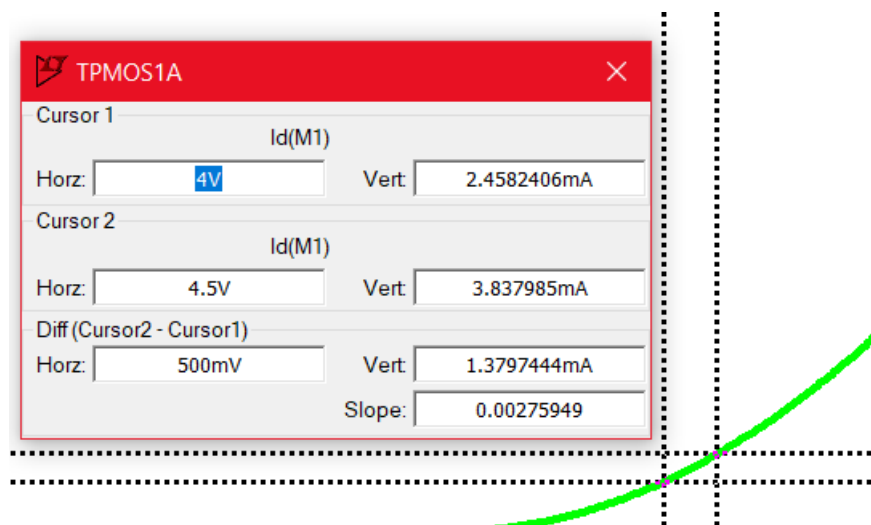


Se coloca una tensión continua  $V_2$  entre Gate y Source de 10 V, y siendo  $V_1 = 40V$  como indica el circuito. Vemos la curva de transferencia del dispositivo. De aquí tenemos una  $V_{th} = 2V$  donde  $V_{th}$  es la tensión de umbral, es decir, para la cual ocurre la inversión del tipo de material del sustrato en una región cercana de la interfaz

Óxido-Semiconductor, tal que se forma el canal y circula corriente entre Drain Y Source. Como los valores de salida  $I_D$  de la curva se dan para valores positivos de  $V_{gs}$  donde la curva crece hacia los positivos, entonces podemos afirmar que el canal es tipo N con sustrato P. Debido a que a curva de transferencia adquiere valores no nulos para una tensión no negativa de  $V_{gs} \geq V_{th}$ , podemos afirmar que el MOSFET es de Canal Inducido. En caso de considerar las “no idealidades” como cargas en óxido, cargas en interface Óxido-Semiconductor y diferencias en funciones de trabajo  $\phi_M \neq \phi_S$ , podría ocurrir que exista un desplazamiento negativo de  $\Delta V_{gs}$  lo suficientemente grande como para que la  $V_{th}$  ocurra en valores negativos existiendo riesgo de que obtengamos Canal N de Canal Permanente cuando lo queríamos de Canal Inducido. En Canal P eso no ocurre ya que la  $V_{th}$  es negativo desde el principio de estudio.

También vemos que estamos en modo inversión ya que  $V_{gs} > V_{th}$  y en modo saturación ya que  $V_{dsat} = V_{gs} - V_{th} = 10\text{ V} - 2\text{ V} = 8\text{ V}$  tal que  $V_{ds} > V_{dsat}$ , donde  $V_{ds} = 40\text{ V}$ .

La transconductancia será una pendiente de una recta tangente a un punto de la curva de salida  $I_d(V_{gs})$ . Entonces:

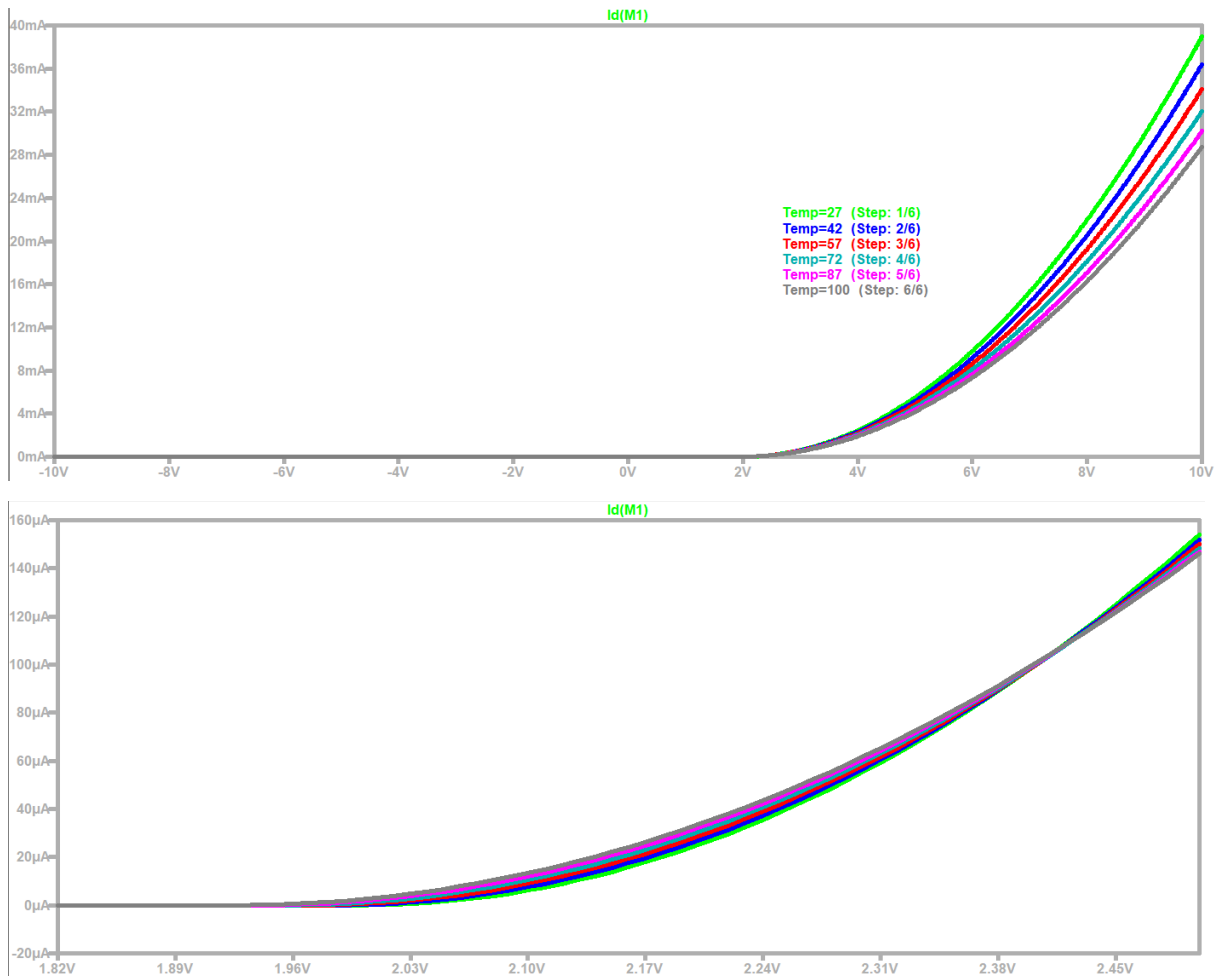


$$\Delta V_{gs} = V_{gsup} - V_{gsinf} = 4,5\text{ V} - 4\text{ V} = 500\text{ mV}$$

$$\Delta I_d = 3,84\text{ mA} - 2,46\text{ mA} = 1,38\text{ mA}$$

$$G_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} = \frac{1,38\text{ mA}}{500\text{ mV}} = 2,76 \cdot 10^{-3}\text{ S}$$

b) Usando la siguiente directiva “. t” y escribiendo: “ temp 27 42 57 72 87 100 “, vemos las curvas de transferencia para esta lista de temperaturas.



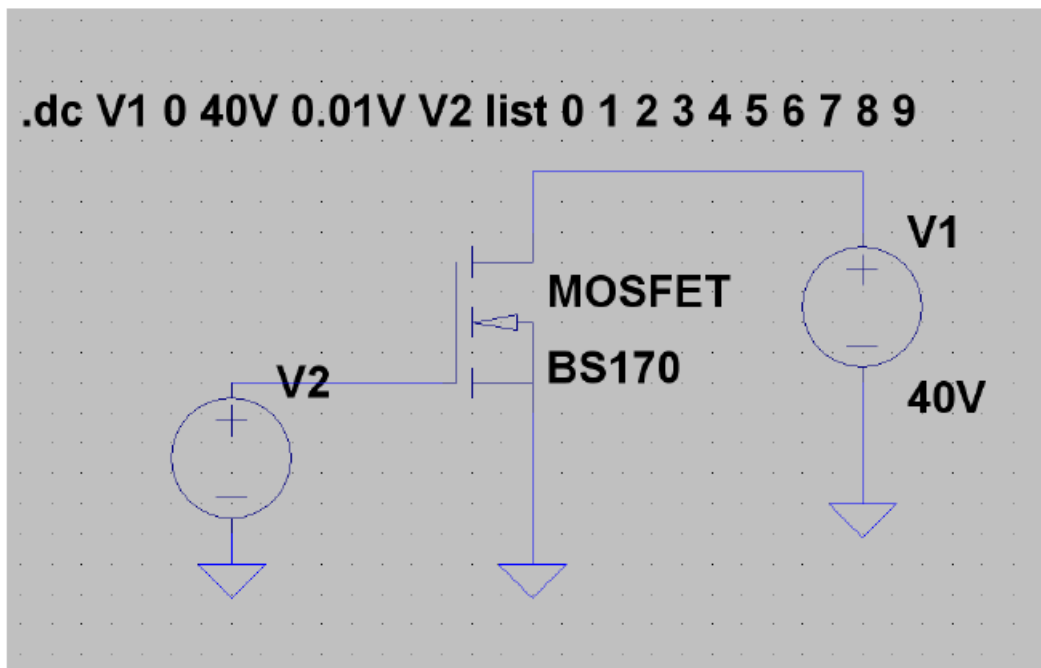
La  $V_{th}$  varía apenas con la temperatura, en el gráfico. Apenas se nota esto para todas las curvas respecto de la vista en a).

Además, la corriente  $I_d$  disminuye para un mismo valor  $V_{gs}$  de entrada, por ejemplo, en el primer gráfico para 8 V vemos cualitativamente que la  $I_d$  toma valores más pequeños. Como último detalle, para valores cercanos a  $V_{th}$ , vemos que para las temperaturas más bajas hacia las más altas (curva verde hacia gris), la  $I_d$  crece pero luego para un valor entre 2,38 V y 2,45 V, todas las curvas se cruzan en un punto y la situación mencionada se invierte. Esto es que para temperaturas más bajas hacia más altas (curva verde hacia gris), ahora la  $I_d$  decrece.

c) Aumentos de temperatura resultan en aumentos de los efectos de la agitación térmica lo que provoca un decrecimiento en la movilidad efectiva de los portadores móviles del canal obteniéndose una disminución de  $I_d$  para un determinado valor  $V_{ds}$  y  $V_{gs}$ .

## 2) ii. Obtención de las curvas de Salida de un transistor MOSFET

a) En base al siguiente circuito de un MOSFET BS170 configurado en source común y con polarización  $V_{gs}$  en directa, se estudia una familia de curvas de salida de la corriente de drain siendo  $i_d(v_{ds})$ . La temperatura es la ambiente de 27 °C.

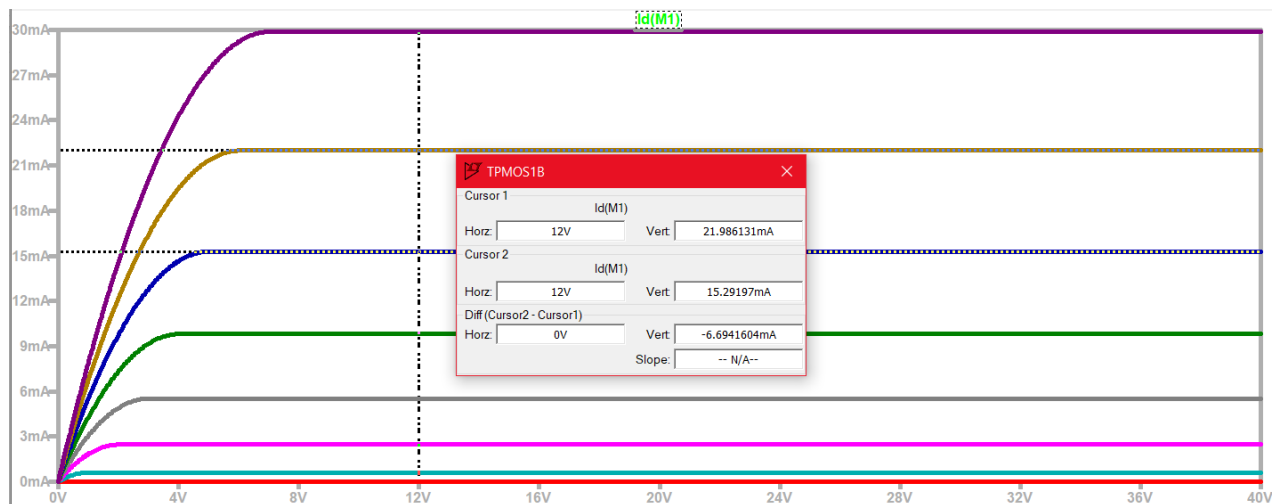


En negro vemos la parábola límite, dibujada de forma aproximada en Word con el lápiz. Esta es la curva que une los puntos de estrangulamiento. A la izquierda, vemos la zona óhmica la cual implica a usar el transistor como  $R = f(v_{gs})$  mientras que a la derecha es la zona de saturación la cual implica usar al transistor como un amplificador y por debajo, marcado por la curva



roja, esa es la zona de corte que implica usar al transistor como llave abierta.

b) Para obtener la transconductancia, vamos a ubicar 2 cursores, uno por cada curva donde medimos el  $\Delta V_{gs}$  y  $\Delta I_d$ . En particular, al utilizar el comando “list” como sigue: “list 0 1 2 3 4 5 6 8 9”, podemos diferir que la  $\Delta V_{gs} = 1\text{ V}$ . Estudio entre la curva marrón y azul en región de saturación.

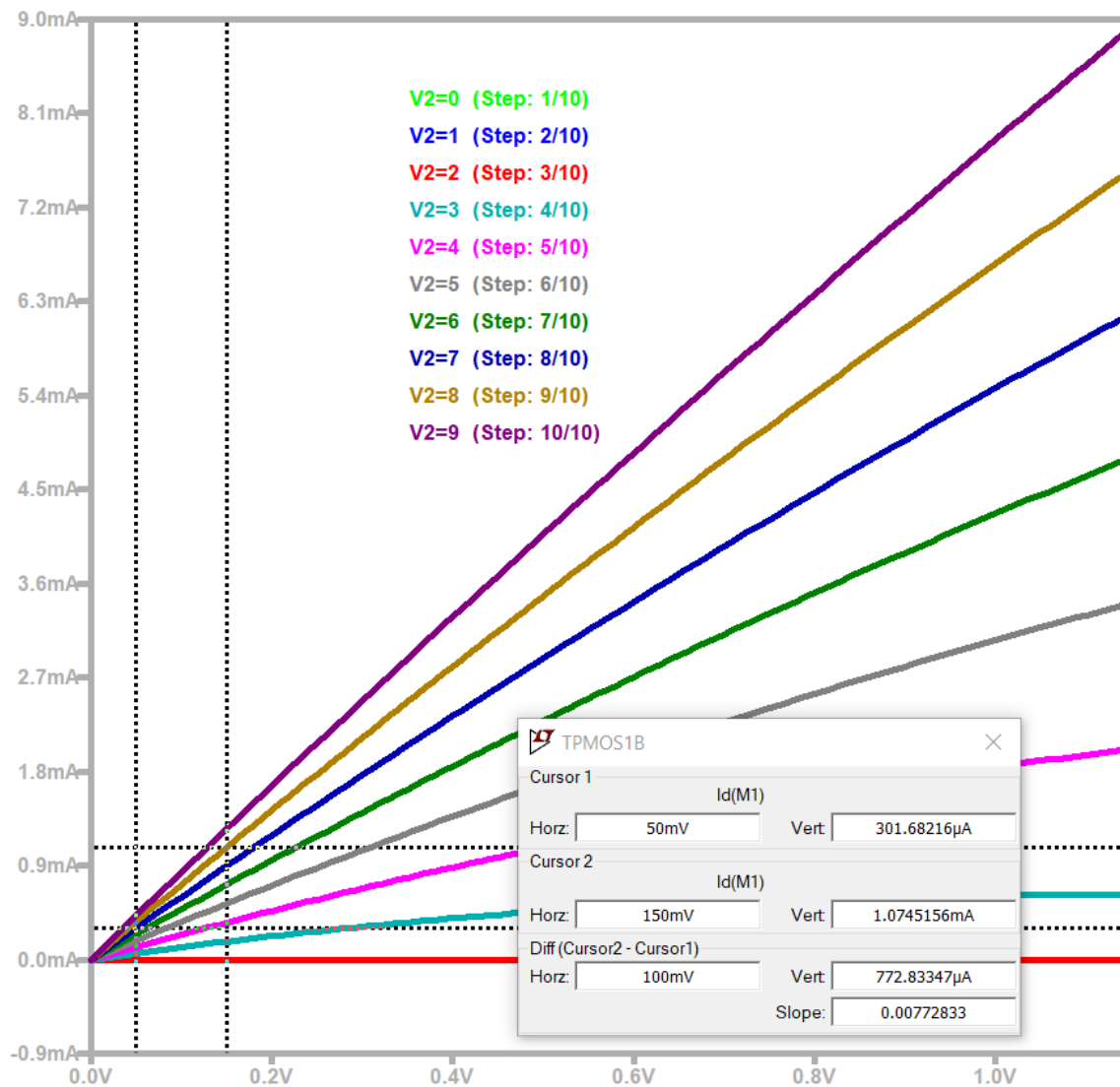


Se observa que para un mismo  $V_{ds} = 12\text{ V}$ , en este caso, obtenemos una  $\Delta I_d = 7\text{ mA}$  aproximadamente. Luego tenemos que la transconductancia es:  $G_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} = \frac{7\text{ mA}}{1\text{ V}} = 7 \cdot 10^{-3}\text{ S}$ . Si comparamos la  $G_m$  de obtenida con aquella  $G_m$  obtenida de 2) i. a) que era  $G_m = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_{gs}} = \frac{1,38\text{ mA}}{500\text{ mV}} = 2,76 \cdot 10^{-3}\text{ S}$ , vemos que es mas pequeña respecto de la obtenida ahora así hubiéramos tomado una  $\Delta V_{gs} = 1\text{ V}$  antes.

La variación provocada entre estos  $G_m$  ocurre porque la forma en que se calculó la  $G_m$  en ambos casos es diferente, en el ejercicio anterior fue al pararnos sobre la curva de transferencia  $I_d = f(V_{gs})$  pero sin tener en cuenta cuál era la región de trabajo, es decir, si de corte, o lineal o de saturación. Ahora nos tomamos 2 curvas consecutivas del gráfico de  $I_d = f(V_{ds})$  y determinando el análisis en la región de saturación aunque podría ser en la lineal también. La variación es pequeña entre ambos por lo que el sistema es el mismo y a temperatura ambiente  $27^\circ\text{C}$  en ambos casos.

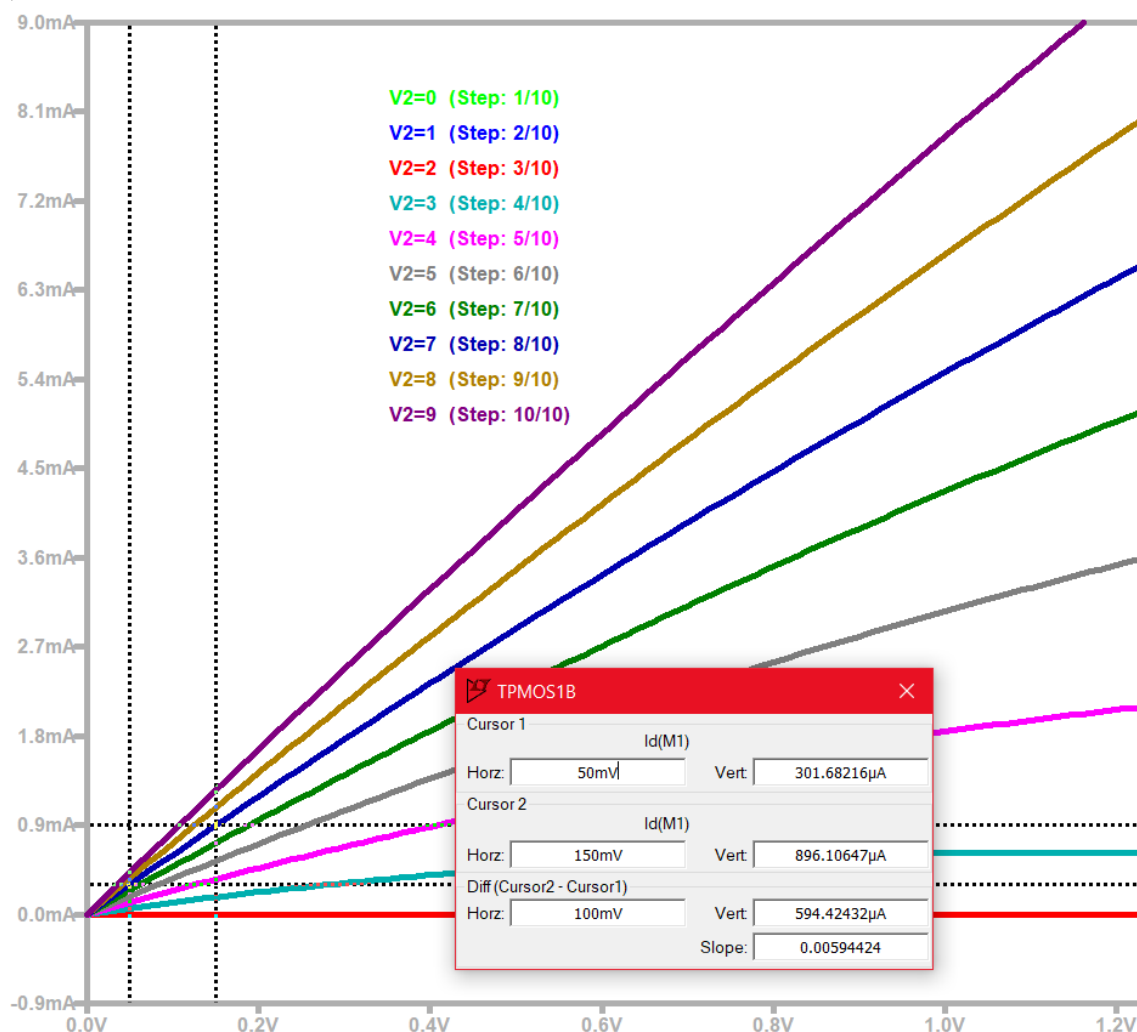
c) Obtenemos la resistencia dinámica “ $r_d$ ” para valores pequeños de  $V_{ds}$  entre 0 y 0,3 V aproximadamente, esto es muy cerca del origen y tomando 2 cursores sobre una misma curva asociada a un valor de  $V_{gs}$ . En este caso

estudio la curva marrón y azul nuevamente para luego comparar las  $r_d$  obtenidas.



De la curva marrón vemos que:  $V_{gs} = 8\text{ V}$ ,  $\Delta V_{ds} = 150\text{ mV} - 50\text{ mV} = 100\text{ mV}$ ,  $\Delta I_d = 1,0745\text{ mA} - 301,68\text{ uA} = 772,83\text{ uA}$  por lo que sucede

$$r_d = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_d} = \frac{100\text{ mV}}{772,83\text{ uA}} = 129,4\text{ }\Omega$$



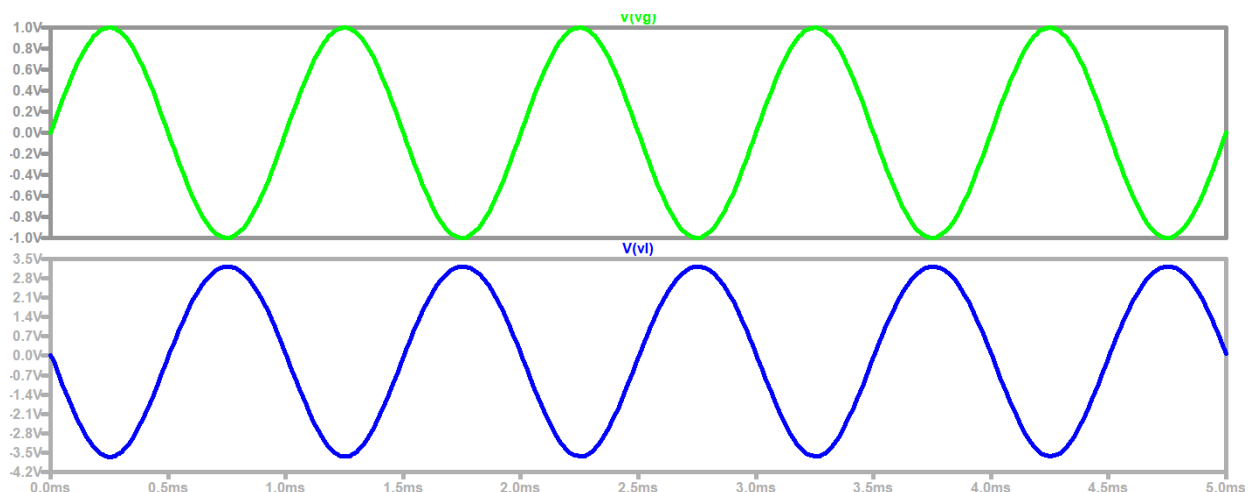
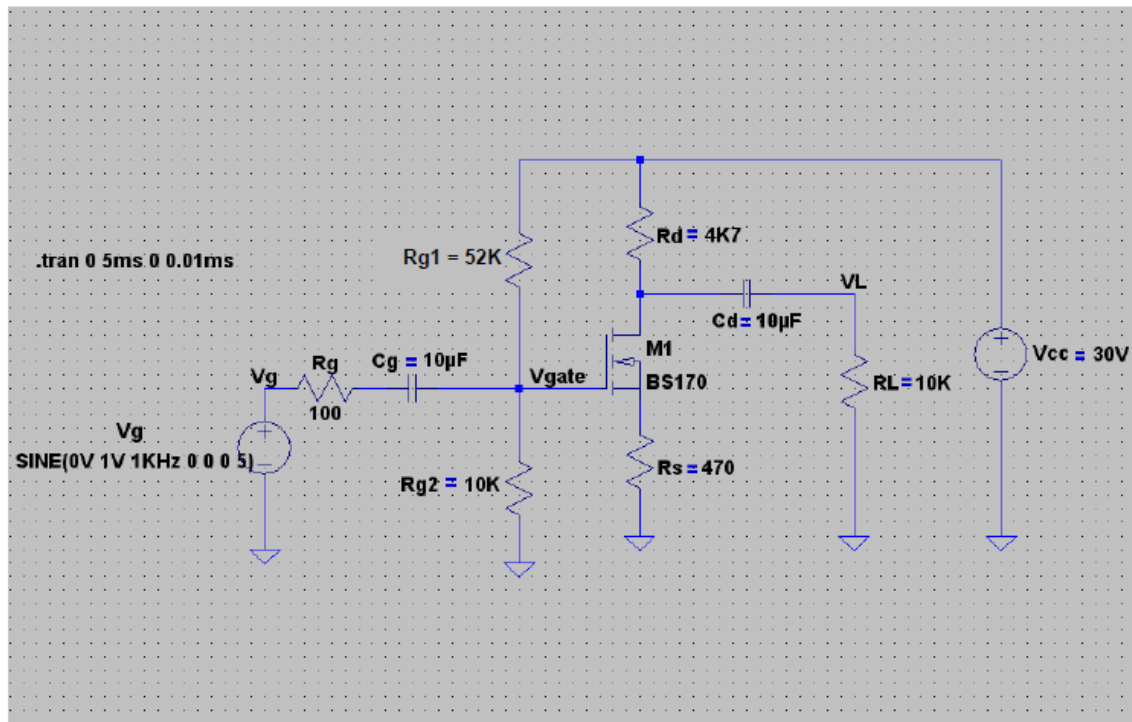
De la curva azul vemos que:  $V_{gs} = 7\text{ V}$ ,  $\Delta V_{ds} = 150\text{ mV} - 50\text{ mV} = 100\text{ mV}$ ,  $\Delta I_d = 896,106\text{ uA} - 301,7\text{ uA} = 594,406\text{ uA}$  por lo que sucede

$$r_d = \frac{\Delta V_{ds}}{\Delta I_d} = \frac{100\text{ mV}}{594,406\text{ uA}} = 168,235\text{ }\Omega$$

d) Por un lado, para valores pequeños de  $V_{ds}$ , la  $r_d$  = resistencia dinámica cambia entre curvas de distinto valor de  $V_{gs}$  así tengamos o no el mismo  $\Delta V_{ds}$  para cada curva. Esto resulta en que el transistor se comporta como una resistencia variable por tensión d entrada  $V_{gs}$ , es decir  $r_d = f(V_{gs})$ . Además, hay la variación de esta resistencia para una misma curva  $i_d(V_{ds})$ , es una variación casi lineal tal que hay una relación casi lineal entre  $I_d$  y  $V_{ds}$ .

## 2) iii. Amplificador Monoetapa con MOSFET. Obtención de la Ganancia de Tensión

a) A partir del siguiente circuito de amplificador monoetapa de un MOSFET BS170 configurado como source común con una polarización  $V_{gs}$  en directa, se busca obtener y estudiar las tensiones de entrada  $V_{gs}$  y la tensión de salida  $V_{RL}$  así como la ganancia de tensión a una frecuencia de 1 KHz.



Para obtener la ganancia de tensión tomamos la relación entre el valor pico de salida respecto del valor pico de la entrada, por lo que:

$$\text{Ganancia tensión} = \frac{V_{pl}}{V_{pg}} = \frac{3,5 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 3,5 \text{ aproximadamente.}$$

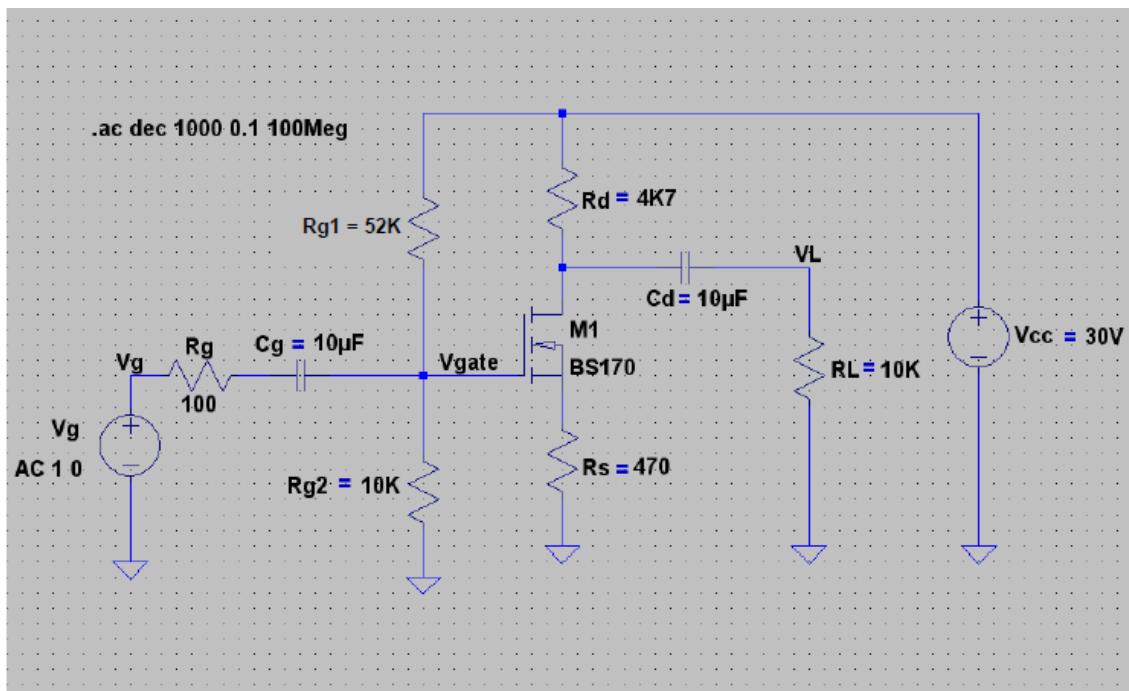
b) Aparece un corrimiento de la fase en una cantidad de  $\pi \equiv 180^\circ$  lo cual es debido a la naturaleza del circuito.

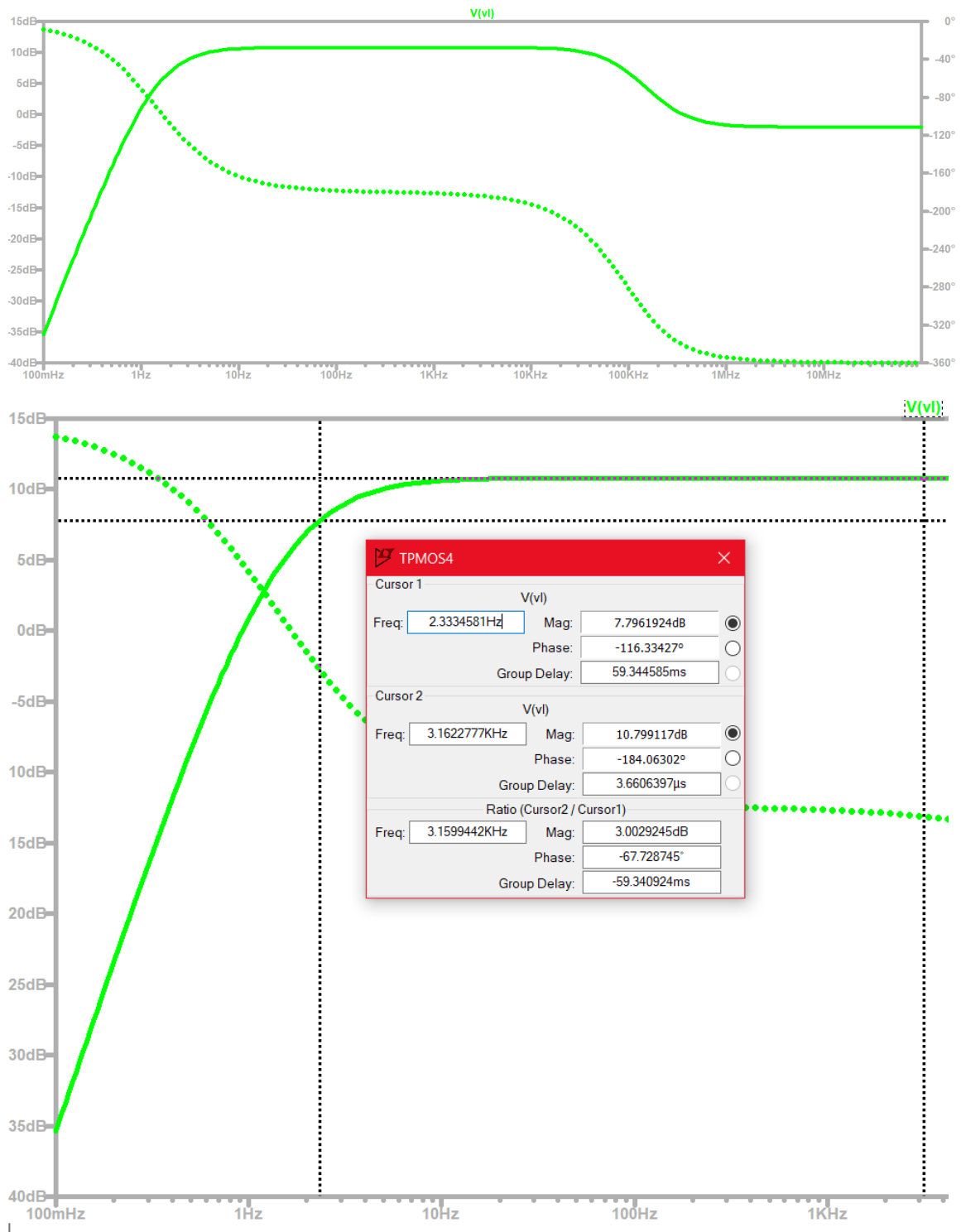
c) Para concluir, podemos entender la aparición del desfase de 180 grados entre la señal de entrada  $V_g$  y la señal de salida  $V_L$  como consecuencia de la relación inversa entre la corriente  $I_d$  y la tensión de salida  $V_L$ .

- Aumentos de  $V_g$  provocan incrementos de  $I_d$  lo que incrementa caída de tensión en  $r_d$  (resistencia dinámica) disminuye  $V_L$ .
- Decrementos de  $V_g$  disminuyen  $I_d$  y por ende baja la caída de tensión en  $r_d$  (resistencia dinámica) aumentando  $V_L$ .

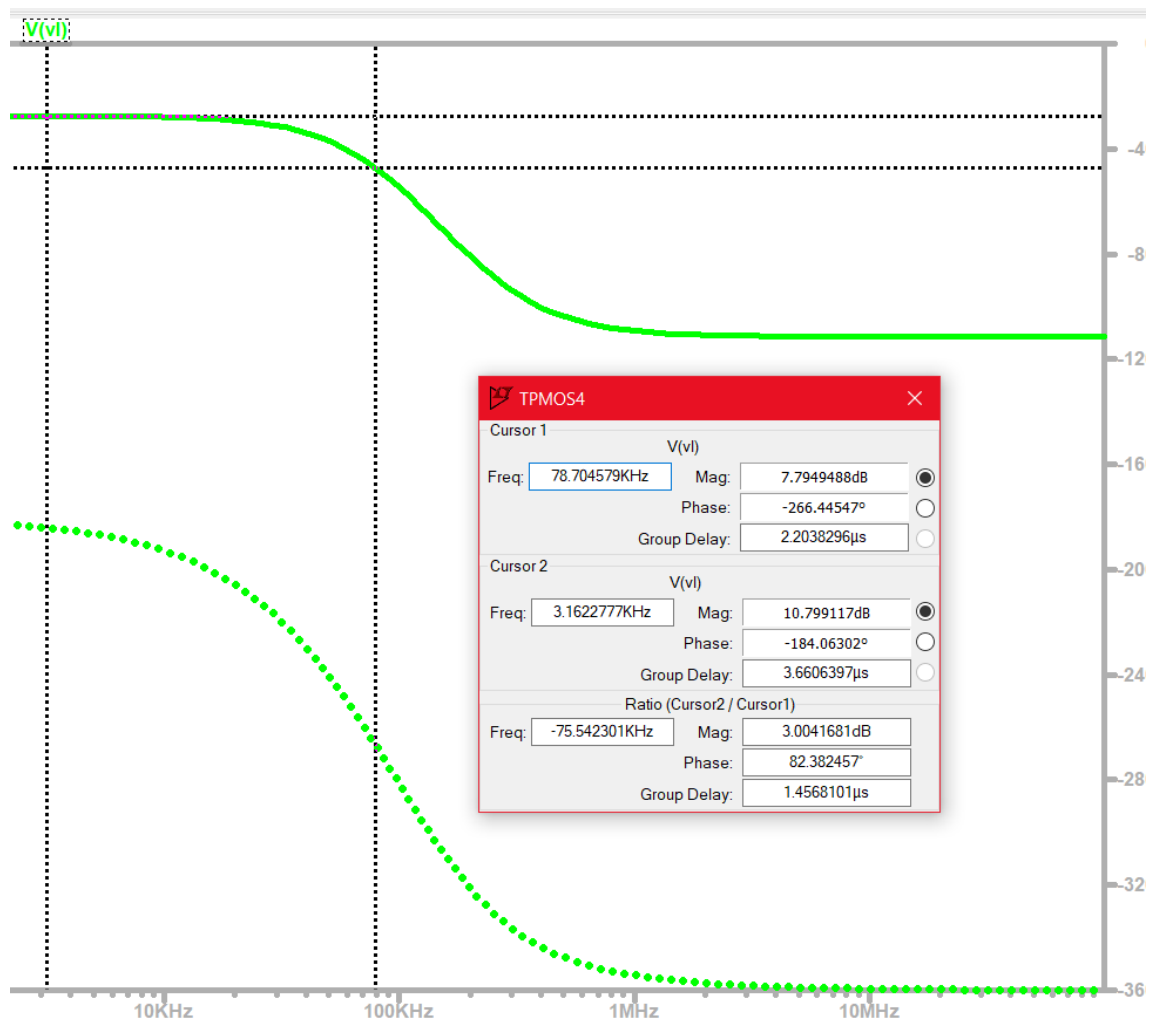
## 2) iii. Amplificador Monoetapa con MOSFET. Obtención de la Respuesta en frecuencia del circuito

a) A partir del siguiente circuito de amplificador monoetapa de un MOSFET BS170 configurado como source común con una polarización  $V_{gs}$  en directa, se busca obtener y estudiar la respuesta en frecuencia así como las frecuencias de corte inferior y superior.



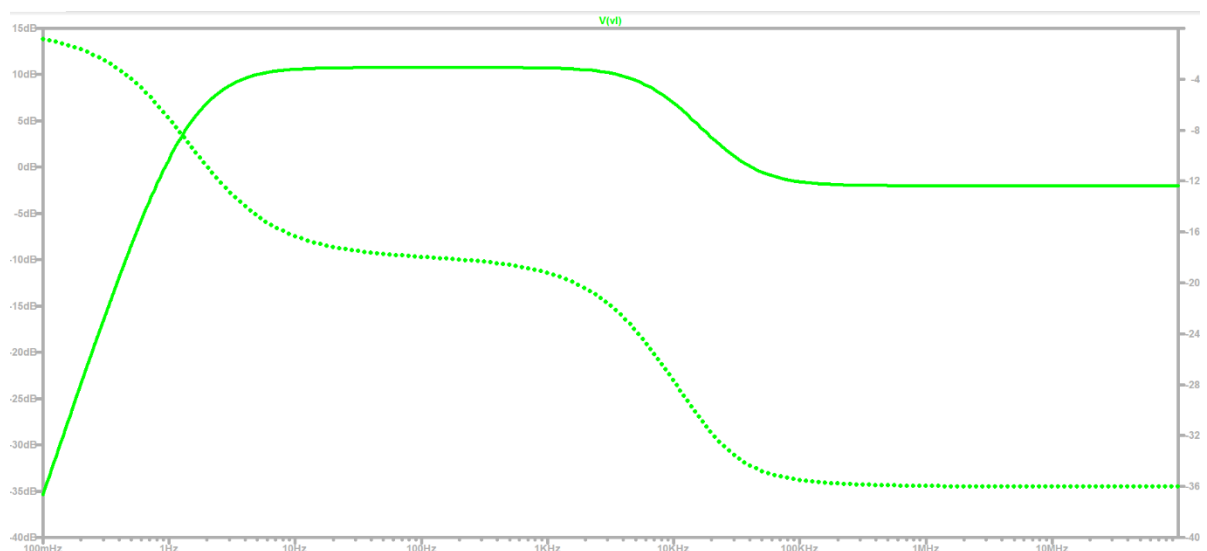


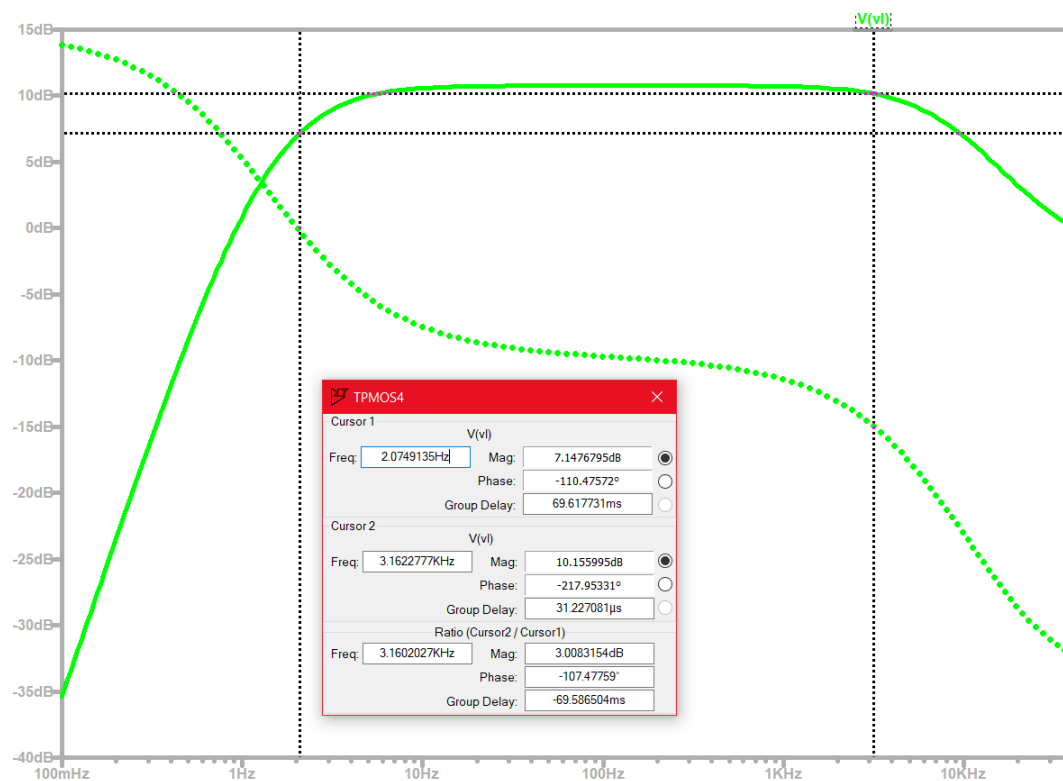
Vemos que la frecuencia de corte inferior se da para  $f_{ci} = 2,33 \text{ Hz}$



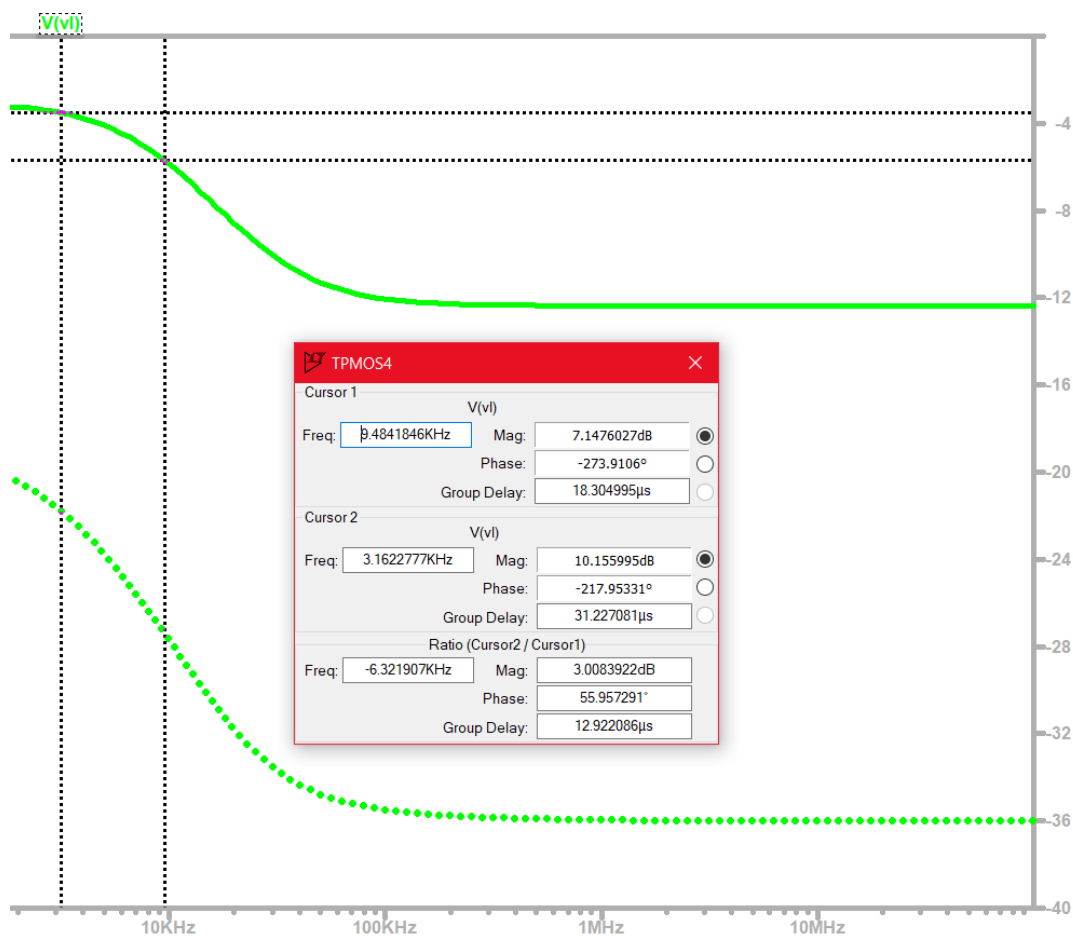
Vemos que la frecuencia de corte superior se da para  $f_{cs} = 78,7$  KHz

b) Grafico con  $C_{gdmax} = 100n$   $C_{gdmin} = 2,5n$   $C_{gs} = 40n$





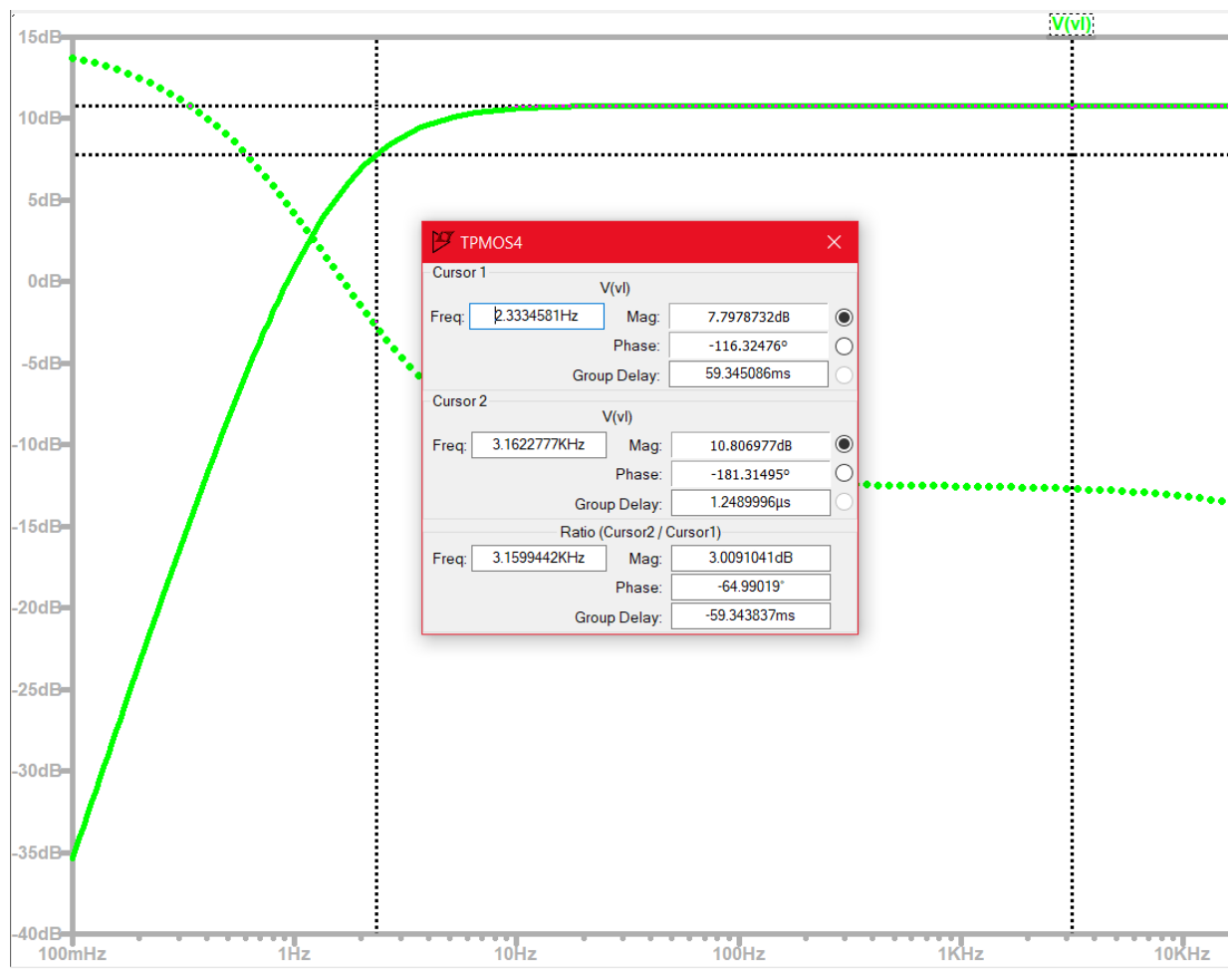
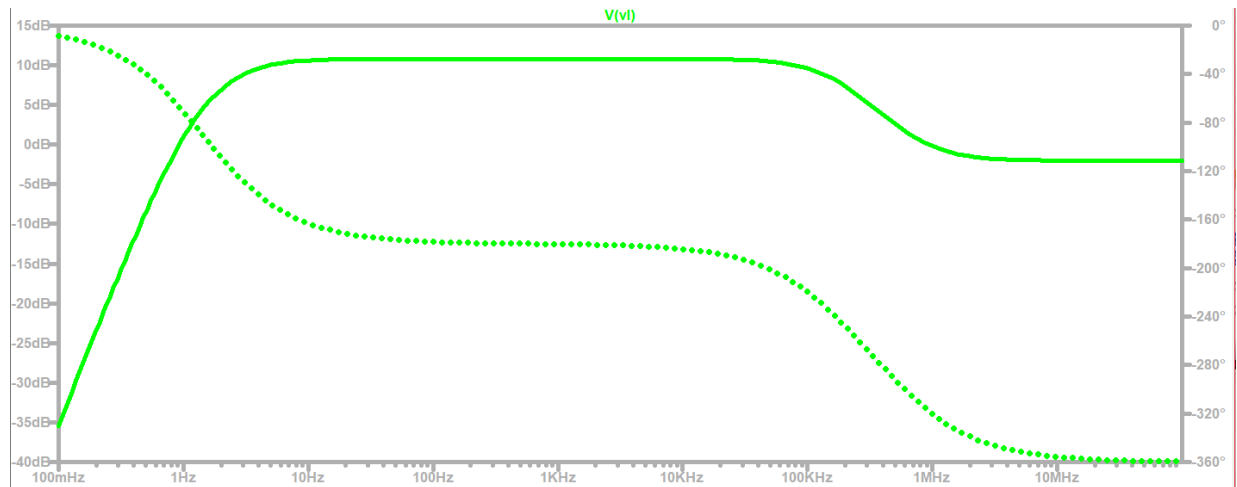
Vemos que la frecuencia de corte inferior se da para  $f_{ci} = 2,08 \text{ Hz}$



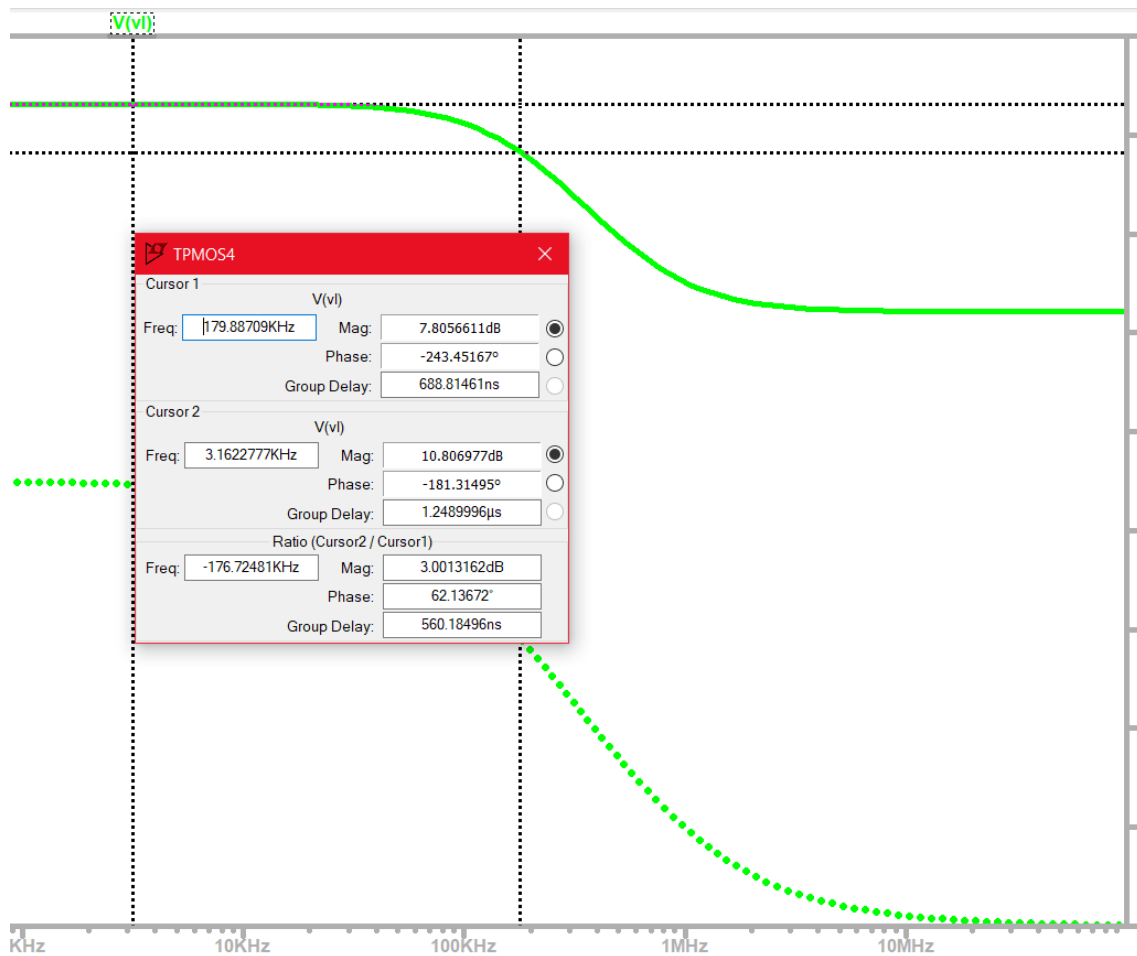


Vemos que la frecuencia de corte superior se da para  $f_{cs} = 9,48 \text{ KHz}$

Grafico con  $C_{gdmax} = n$   $C_{gdmin} = 2,5n$   $C_{gs} = 40n$



Vemos que la frecuencia de corte inferior se da para  $f_{ci} = 2,33 \text{ Hz}$



Vemos que la frecuencia de corte superior se da para  $f_{cs} = 179,88 \text{ KHz}$

C) Como conclusión podemos decir que la frecuencia de corte inferior casi no varía al variar los capacitores internos del dispositivo, solo depende de las capacitancias externas al MOSFET. Por otro lado, la frecuencia de corte superior si varía significativamente al variar los valores de  $c_{gs}$  y  $c_{gd}$ .

## **Conclusión**

A partir de todo lo estudiado, podemos decir que en el estudio de la curva de transferencia sucede que aumentos de temperatura resultan en aumentos de los efectos de la agitación térmica lo que provoca un decrecimiento en la movilidad efectiva de los portadores móviles del canal obteniéndose una disminución de  $I_d$  para un determinado valor  $V_{ds}$  y  $V_{gs}$ . La  $V_{th}$  no varía casi nada para diferentes curvas manteniendo la naturaleza del tipo de canal, así como su tipo de contaminación. Ahora al estudiar las curvas de salida  $I_d$  en función de  $V_{ds}$  para valores pequeños de  $V_{ds}$ , vemos que la  $r_d$  = resistencia dinámica cambia entre curvas de distinto valor de  $V_{gs}$  así tengamos o no el mismo  $\Delta V_{ds}$  para cada curva. Esto resulta en que el transistor se comporta como una resistencia variable por tensión de entrada  $V_{gs}$ , es decir  $r_d = f(V_{gs})$ . Además, la variación de esta resistencia para una misma curva  $i_d(V_{ds})$ , es una variación casi lineal tal que hay una relación casi lineal entre  $I_d$  y  $V_{ds}$ .

Por otro lado, al estudiar un circuito amplificador monoetapa en source común como el dado, apenas hay algo de ganancia de tensión en un factor de 3,5 pero donde aparece un desfase de  $180^\circ$  grados. Podemos entender la aparición del desfase de 180 grados entre la señal de entrada  $V_g$  y la señal de salida  $V_l$  como consecuencia de la relación inversa entre la corriente  $I_d$  y la tensión de salida  $V_l$ . Además, en el estudio de la respuesta en frecuencia para el mismo circuito podemos decir que la frecuencia de corte inferior casi no varía al variar los capacitores internos del dispositivo, solo depende de las capacitancias externas al MOSFET. Por otro lado, la frecuencia de corte superior si varía significativamente al variar los valores de  $c_{gs}$  y  $c_{gd}$ .