

**Instituto Tecnológico de Massachussets**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica e Informática**

**6.002 – Circuitos Electrónicos**  
**Otoño 2000**

**Práctica 2: Amplificadores inversores MOSFET y circuitos de primer orden**  
**Boletín F00-37**

**Introducción**

En esta práctica se estudia el comportamiento de un amplificador inversor MOSFET. En primer lugar se estudia la relación estática de la entrada y la salida del amplificador, y por último, el comportamiento dinámico del mismo amplificador cuando se utiliza como inversor analógico digital. Es necesario que complete los ejercicios pre-práctica en su cuaderno de prácticas antes de asistir al laboratorio. A continuación, realice los ejercicios de laboratorio entre el 23 y el 27 de octubre. Una vez completados, muéstreselos al TA para que los compruebe y firme el cuaderno de prácticas. Por último, complete los ejercicios post-práctica en su cuaderno y entréguelo el viernes 3 de noviembre, o antes de esa fecha.

Para el ejercicio de laboratorio 2-3, tráigase su CD favorito, ya que lo utilizará para un divertido experimento. Los resultados de este experimento no serán necesarios para los ejercicios post-práctica.

**Ejercicios pre-práctica**

- (2-1) Considere el amplificador inversor MOSFET de la figura 1. Utilice el modelo SCS y escriba una expresión para  $v_{OUT}$  en función de  $v_{IN}$  para  $0 \leq v_{IN} \leq v_{OUT} + V_{TM}$ . Además, dibuje y marque claramente la forma de  $v_{OUT}$  en función de  $v_{IN}$  sobre la misma selección.

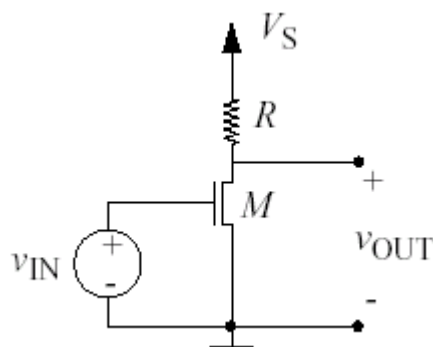


Figura 1: amplificador inversor MOSFET para los ejercicios pre-práctica 2-1 y 2-2.

- (2-2) Escriba una expresión para la ganancia de pequeña señal del amplificador MOSFET de la figura 1, suponiendo que el MOSFET está polarizado en su región de saturación.

- (2-3) Considere la red de la figura 2. Primero, suponga que  $v_{OUT} = 0$  en  $t = 0$ . A continuación, escriba una expresión para  $v_{OUT}(t)$  para  $t \geq 0$ , dados  $v_{IN}$  escalones de  $0V$  a  $V_I$  en  $t = 0$ .
- (2-4) En el caso del transitorio del ejercicio pre-práctica 2-3, determine el tiempo en el que  $v_{OUT}$  alcanza un  $V_T$  dado, donde  $0 < V_T < \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_I$ .

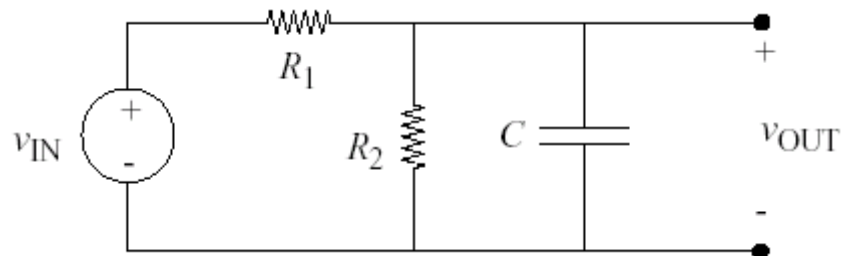


Figura 2: red para los ejercicios pre-práctica 2-3 y 2-4.

### Ejercicios de laboratorio

Como parte de estos ejercicios, realizará las mediciones de la tensión de umbral y la capacitancia puerta a fuente de un MOSFET. Estos parámetros se utilizarán para interpretar los resultados de otros ejercicios de laboratorio. Por lo tanto, utilice el mismo MOSFET para el MOSFET con la etiqueta  $M$  en todos los ejercicios de laboratorio que se indican a continuación.

- (2-1) En este ejercicio se mide la relación estática de la entrada y la salida del amplificador MOSFET de la figura 1. Para empezar, construya el amplificador tal y como se indica en la figura 3, y conecte el generador de señales y el osciloscopio tal como se muestra. A continuación, ajuste el generador de señales para producir una onda sinusoidal de 1-kHz con una amplitud pico a pico de 3 V y un offset de 1.5 V. De esta forma, el generador de señales producirá una onda sinusoidal polarizada entre 0 y 3 V. Ajuste el osciloscopio para que funcione en modo X-Y con una sensibilidad de eje X (Canal 1) de 500 mV por división y una sensibilidad de eje Y (canal 2) de 1 V por división. Por último, compare la relación que se visualiza con la del esquema borrador del ejercicio pre-práctica 2-1.

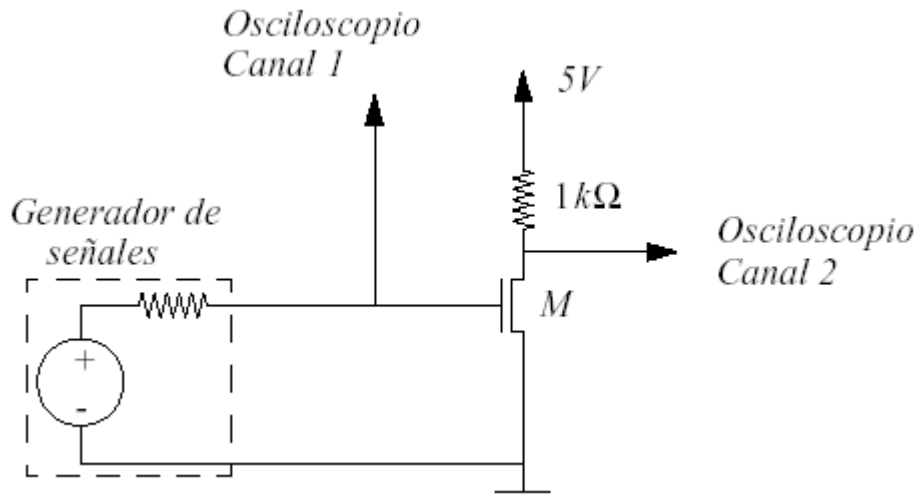


Figura 3: medición de la relación estática de la entrada y la salida del amplificador MOSFET de la figura 1.

Registre los datos siguientes. En primer lugar, registre el valor de  $v_{IN}$  anterior cuyo  $v_{OUT}$  acaba de empezar a caer. Esta es la tensión de umbral  $V_{TM}$  del MOSFET (véase el esquema borrador del ejercicio pre-práctica 2-1). Segundo, registre los valores de  $v_{IN}$  que correspondan a los valores  $v_{OUT}$  de 5, 4, 3, 2 y 1 V. O puede que le resulte más fácil y más preciso utilizar un generador de señales como fuente programable  $v_{IN}$  y medir  $v_{OUT}$  con un multímetro.

(2-2) En este ejercicio se mide la ganancia del amplificador de la figura 1 cuando su tensión de polarización de salida es de 2 V. Para empezar, construya el circuito 1 de la figura 4. Ajuste el potenciómetro hasta que  $v_{OUT} = 2$  V, tal y como se midió con el multímetro. A continuación, conecte el generador de señales y el osciloscopio como se muestra en el circuito 2. Ajuste el generador de señales en cero y reajuste el potenciómetro, de forma que  $v_{OUT} = 2$  V. Posteriormente, ajuste el generador de señales para que produzca una onda sinusoidal sin polarizar de 1-kHz con una amplitud pico a pico de 100 mV. Mida la amplitud de  $v_{in}$  y  $v_{out}$ , que son los componentes sinusoidales de  $v_{IN}$  y  $v_{OUT}$  respectivamente. Utilice un acoplamiento AC en el canal 1 del osciloscopio para medir con precisión  $v_{in}$ . El ratio de las amplitudes es la ganancia de pequeña señal. Conserve este circuito para el ejercicio siguiente.

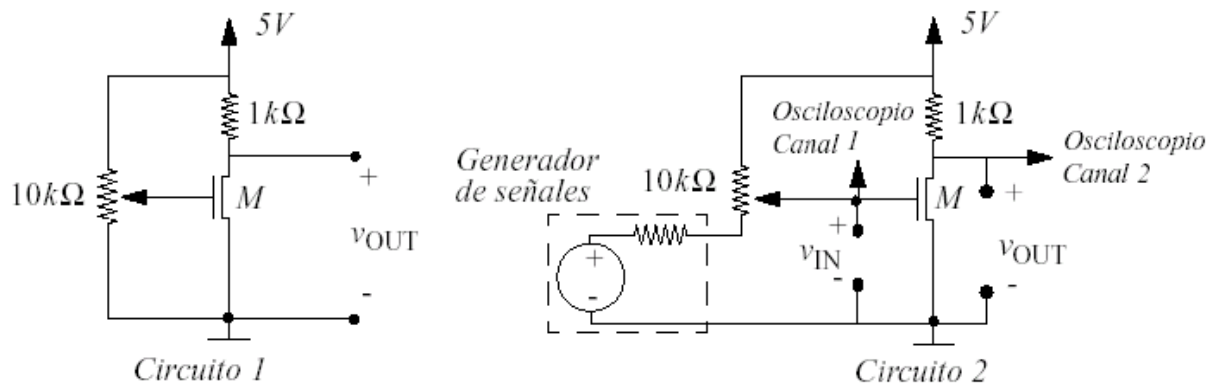


Figura 4: medición de la ganancia de pequeña señal del amplificador MOSFET.

- (2-3) Los experimentos en este ejercicio utilizarán el circuito 2 construido en el ejercicio de laboratorio 2-2 con el fin de explorar el funcionamiento de los límites de saturación del amplificador observando el recorte de una forma de onda de salida y escuchando la distorsión en la salida de música. Comience por ajustar la polarización de entrada con el potenciómetro y observe la variación en  $v_{OUT}$ . A continuación, aumente la amplitud pico a pico de la onda sinusoidal del generador de señales a 300 mV. Observe la salida en el canal 2 del osciloscopio y aumente la tensión de polarización de entrada hasta que observe un recorte en la parte inferior de la salida. Utilice un acoplamiento DC en el canal 1 del osciloscopio para anotar el límite de excursión superior de la tensión  $v_{IN}$ . De igual forma, disminuya la tensión de polarización de entrada hasta que observe un recorte en la parte superior de la salida y anote el límite de excursión inferior de la tensión  $v_{IN}$ . Estos límites superior e inferior de  $v_{IN}$  aproximan los límites de funcionamiento de la entrada del amplificador.

A continuación, sustituya el generador de señales por el reproductor de CD (utilice la salida de auriculares). Ajuste el volumen del reproductor de forma que la amplitud pico a pico de la señal de música  $v_{IN}$  sea de aproximadamente 300 mV. Conecte la señal  $v_{OUT}$  a un altavoz amplificador (deje en su sitio la conexión del osciloscopio) y ajuste el volumen del altavoz para escuchar la música. Modifique la tensión de polarización de entrada con el potenciómetro y escuche el cambio de volumen. Observe  $v_{IN}$  en el canal 1 del osciloscopio (utilice un acoplamiento DC) y aumente la tensión de polarización de entrada hasta que escuche una distorsión. ¿Es el límite de excursión inferior de la tensión  $v_{IN}$  en el comienzo de la distorsión aproximadamente el mismo que se midió con la entrada de onda sinusoidal?

En los dos ejercicios siguientes se analizará el retardo del amplificador MOSFET cuando se utiliza como inversor lógico digital. En concreto, mediremos el retardo de un inversor accionado por otro inversor, tal y como se indica en la figura 6.

- (2-4) Dado que el retardo de un inversor está relacionado con la capacitancia del nodo accionado por su salida, en este ejercicio se mide la capacitancia observada por la salida de un inversor que acciona la puerta de un MOSFET. En primer lugar, construya el circuito de la figura 5 y mida la capacitancia  $C_P$  observada en el nodo  $P$  del circuito.  $C_P$  es la capacitancia en el nodo  $P$  e incluye  $C_{GS}$ , que es la capacitancia de puerta del MOSFET  $M$ , en paralelo con la capacitancia de entrada del osciloscopio y una capacitancia parásita de cableado. Ajuste el generador de señales para que produzca una onda cuadrada de 20-kHz con una amplitud de 5 V pico a pico y un offset de 2.5 V. El canal 2 del osciloscopio debería mostrar una respuesta a escalón ascendente de primer orden y una respuesta a escalón descendente de primer orden. Mida la constante de tiempo de la respuesta a escalón ascendente. Puesto que la resistencia ON del MOSFET es muy pequeña, la respuesta descendente posee una constante de tiempo muy pequeña que resulta difícil medir. Por consiguiente, nos centraremos en la respuesta a escalón ascendente.

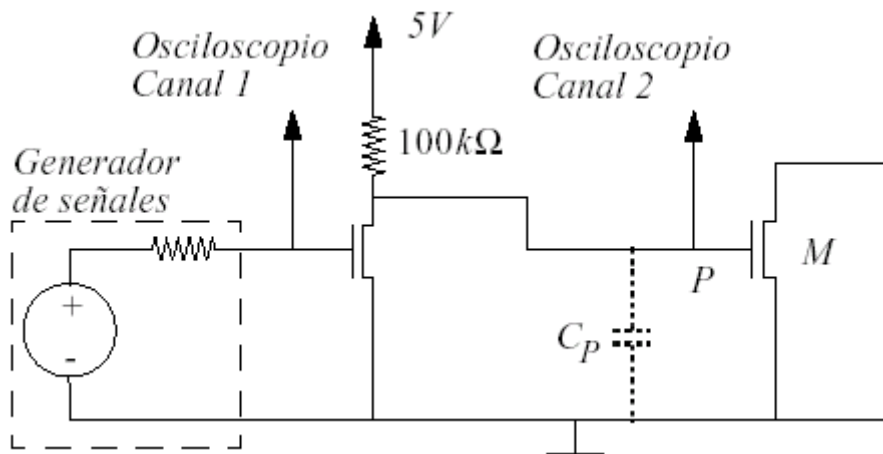


Figura 5: medición de la capacitancia puerta a fuente del amplificador MOSFET.

- (2-5) En este ejercicio se mide el retardo del amplificador MOSFET cuando se utiliza como un inversor lógico digital. Construya el circuito de la figura 6. Al igual que en el ejercicio anterior, ajuste el generador de señales para que produzca una onda cuadrada de 20-kHz con una amplitud de % V pico a pico y un offset de 2.5 V. Por último, utilice el osciloscopio para medir el retardo desde el tiempo en el que el generador de señales cambia a bajo hasta el tiempo en el que la salida del par inversor comienza a cambiar a bajo. (Observe que una transición de alto a bajo del generador de señales corresponde a una transición ascendente en el nodo  $P$ ).

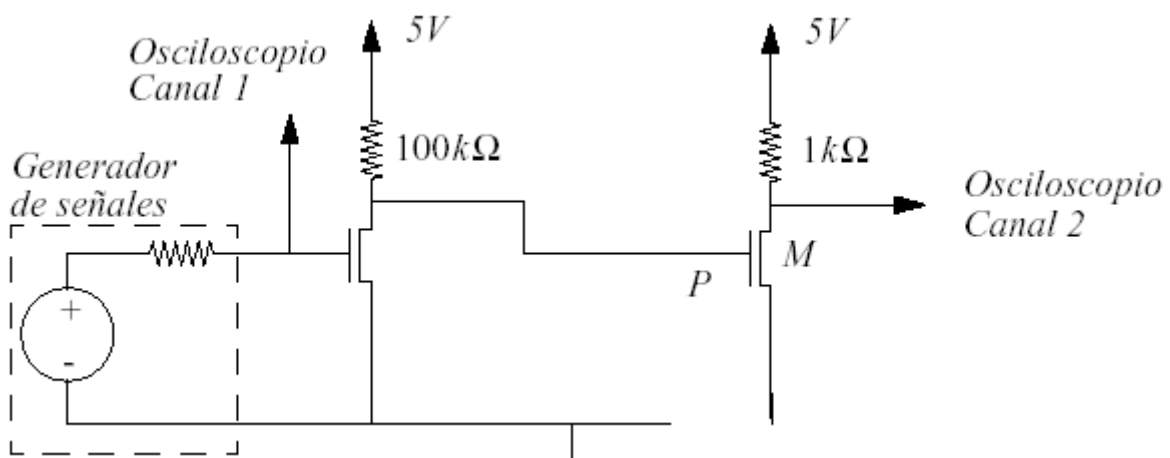


Figura 6: medición del retardo de un amplificador MOSFET cuando se utiliza como puerta lógica digital.

### Ejercicios post-práctica

- (2-1) En este ejercicio se estudia cómo el modelo de amplificador MOSFET desarrollado durante el ejercicio pre-práctica 2-1 explica de forma adecuada la relación de la entrada y la salida medida durante el ejercicio de laboratorio 2-1. El modelo contiene cuatro parámetros necesarios para evaluar numéricamente las relaciones de la entrada y la salida:  $V_S$ ,  $R$ ,  $V_{TM}$  y  $K$ . De la figura 3,  $V_S = 5\text{ V}$  y  $R = 1\text{ k}\Omega$ . Además, como  $V_{TM}$  se midió durante el ejercicio de laboratorio 2-1, solamente se desconoce el valor de  $K$ .

Utilice el valor de  $V_{IN}$  registrado para  $V_{OUT} = 1$  V para determinar  $K$ . A continuación, utilice los parámetros numéricos y el modelo para realizar el gráfico de  $V_{OUT}$  en función de  $V_{IN}$  para  $1 \text{ V} \leq v_{OUT} \leq 5 \text{ V}$ . *Nota: le animamos a que utilice Matlab para trazar el gráfico, aunque no es necesario. Consulte la fotocopia de Matlab al final del paquete de laboratorio.* Trace además en este gráfico los datos medidos durante el ejercicio de laboratorio 2-1. ¿Explica bien los datos el modelo?

- (2-2) A partir de los datos registrados durante el ejercicio de laboratorio 2-2, calcule la ganancia de pequeña señal del amplificador para  $v_{OUT} = 2$  V, y a partir de los datos del ejercicio 2-1, calcule de nuevo la ganancia de pequeña señal calculando la pendiente de la relación de la entrada y la salida en  $v_{OUT} = 2$  V. Por último, calcule la ganancia de pequeña señal a partir del análisis del ejercicio pre-práctica 2-2, utilizando los parámetros determinados durante el ejercicio post-práctica 2-1. ¿Existe una buena correspondencia entre estas ganancias?
- (2-3) La figura 2 imita el comportamiento del nodo  $P$  de la figura 5 cuando el MOSFET de la etapa del primer inversor está desconectado (OFF):  $R_1$  es la resistencia de 100 k $\Omega$ ,  $R_2$  modela la resistencia de entrada del osciloscopio y  $C$  modela a  $C_P$ . Recuerde que  $C_P$  es la capacitancia del nodo  $P$  e incluye a  $C_{GS}$ , que es la capacitancia de puerta del MOSFET  $M$ , en paralelo con la capacitancia de entrada del osciloscopio y la capacitancia parásita de cableado. Suponga que la resistencia y la capacitancia de entrada del osciloscopio tienen unos valores de 100 M $\Omega$  y 10 pF respectivamente. Combine el análisis del ejercicio pre-práctica 2-3 y la constante de tiempo medida durante el ejercicio de laboratorio 2-3 para determinar  $C_P$ .
- (2-4) Con  $V_1 = 5$  V y  $V_T = v_T$ , el análisis del ejercicio pre-práctica 2-4 modela el retardo medido durante el ejercicio de laboratorio 2-5. Utilice los parámetros calculados en el ejercicio post-práctica 2-3, pronostique el retardo y compare esta predicción con la medición. Observe que el osciloscopio, su resistencia de entrada y su capacitancia no estaban conectados a la puerta del MOSFET en el nodo  $P$  cuando se midió el retardo. Véase la figura 6.

## Cómo utilizar MATLAB en la práctica 2

No es necesario utilizar Matlab, pero les animamos a que lo hagan cuando tracen el gráfico del ejercicio post-práctica 2-1. *Nota: este documento es específico para este ejercicio. En Athena existen distintos recursos de ayuda general para Matlab. Consulte la página web: <http://web.mit.edu/olh/Matlab/>. Para utilizar Matlab, primero debe teclear “add matlab” (añadir matlab) en el aviso de Athena y, a continuación, recurrir a Matlab tecleando la orden “matlab” en el aviso de Athena.*

Comience introduciendo los valores para  $V_S$ ,  $R$ ,  $V_{TM}$  y  $K$ .

```
VS = 5;  
R = 1000  
VTM = el valor que midió durante el ejercicio de laboratorio 2-1;  
K = el valor que calculó para K;
```

Su objetivo final es generar un diagrama de  $v_{OUT}$  en función de  $v_{IN}$  para  $1\text{ V} \leq v_{OUT} \leq 5\text{ V}$ . En el ejercicio de laboratorio 2-1 midió  $v_{IN}$  para  $v_{OUT} = 1\text{ V}$ . Ahora utilizará este valor de  $v_{IN}$  para generar un vector  $v_{IN}$  de valores separados equitativamente entre  $V_{TM}$  y el valor de  $v_{IN}$  para el que  $v_{OUT} = 1\text{ V}$ .

```
vIN = linspace (VTM, valor medido para vIN cuando vOUT = 1V, 50);
```

Teclee “help linspace” en el aviso de matlab para obtener más detalles sobre el comando linspace. A continuación, desea generar un vector  $v_{OUT}$  de tensiones de salida correspondientes a las tensiones de entrada en  $v_{IN}$ . Para ello utilizará la expresión para  $v_{OUT}$  en función de  $v_{IN}$  que obtuvo en el ejercicio pre-práctica 2-1.

```
vOUT = VS - 0.5 * R * K * (vIN - VTM).^2;
```

En este momento debería tener dos vectores,  $v_{IN}$  y  $v_{OUT}$ , que puede utilizar para trazar las características de entrada y de salida de su MOSFET en saturación. Utilice ahora el comando “plot” para generar un diagrama.

```
plot(vIN, vOUT);
```

Debe tener en cuenta que  $v_{OUT} = 5\text{ V}$  para  $v_{IN} \leq V_{TM}$ . Para incluir estos datos en el diagrama necesita otro punto más de datos.

```
plot([0 vIN],[5 vOUT]);
```

El comando anterior adjuntará el punto de datos (0,5) al diagrama.

Ya ha terminado. Si desea utilizar otros comandos para formatear mejor el diagrama, pruebe con los siguientes comandos: “title”, “xlabel”, “ylabel”, “axis” y “grid”. Si necesita ayuda sobre cualquier comando de matlab, teclee “help[command]” en el aviso de matlab.