

# Guía 2: Caracterización de Transistores de Efecto de Campo y amplificadores básicos.

Ing. Juan Miguel David Becera Tobar.

Ing. Jose Demetrio Martinez M.

9 de marzo de 2012

## Resumen

El objetivo buscado con la presente práctica, es familiarizarnos con la caracterización y el funcionamiento de los transistores de efecto de campo Fet de metal -óxido - semiconductor, o Mosfet.

Los dispositivos MOSFET, encuentran muchísimas de sus aplicaciones en conmutación como integrados digitales (con diversos grados de integración), aunque en la actualidad han penetrado fuertemente en el campo de las comunicaciones en circuitos de radio frecuencia, sobre todo bajo la tecnología CMOS, es decir dispositivos complementarios MOS tanto de canal N como de canal P en el mismo chip. No es fácil encontrar en presentación discreta transistores MOSFET para señal y aplicaciones lineales, mientras que los fabricados para aplicaciones de potencia, son muy comunes.

Los MOSFET, al encontrarse normalmente éstos dentro de circuitos integrados, la información que se tiene de las hojas de datos, se circunscribe, aparte de los valores límites permitidos de voltaje, disipación de potencia (como pasa con los Jfet), a los datos que conciernen a la aplicación específica del circuito integrado, y no de sus componentes individuales, así que si deseamos conocer los parámetros fundamentales  $V_t$  y  $k_{n,p}$ , es necesario aprender a medirlos, como haremos en esta práctica.

También nos enfocaremos en los amplificadores básicos con MOSFET, utilizaremos para nuestra práctica uno de los transistores MOSFET de canal N del circuito integrado EF4007, o CD40071, que deben estar previamente caracterizados, a saber, el factor de transconductancia  $k_n$  y el voltaje de umbral  $V_t$ . Como habrán podido observar, la hoja de datos del fabricante no proporciona información sobre estos parámetros, ni tampoco sobre la longitud de modulación de canal que de acuerdo con el modelo Spice para este integrado, corresponde a un valor de 0.004V. Los dos primeros (que determinamos experimentalmente), nos permitirán calcular con facilidad la polarización deseada del dispositivo, así como su transconductancia. El parámetro  $\lambda_n$  (que es llamado también voltaje Early inverso y que no determinamos), nos permitirá calcular la resistencia de salida en el modelo de señal pequeña.

## 1. Caracterización MOSFET canal N

En esta parte de la práctica se utilizará un arreglo de transistores MOS complementario, que viene en forma de circuito integrado bajo referencias tales como HEF4007, CD4007, o TC4007, el cual consta de tres MOSFET de canal N y tres de canal P, que aunque vienen interconectados como un doble par complementario y un inversor, permiten el acceso a cada dispositivo. El integrado

Viene en una pastilla DIP de 14 pines y es muy flexible en su utilización. En la figura 1 se muestra la asignación de pines completa, es decir con el sustrato en la parte superior de la misma, y simplificada en la parte de abajo. Esta última es la más conveniente para nuestros propósitos.

Un punto crítico que debe tenerse en cuenta, es que los pines 14 y 7, que son conexiones del sustrato de los transistores de canal P y de los de canal N respectivamente, deben ser conectados de manera apropiada sin importar que uso se le da a cada dispositivo. Así el pin 14 debe ser conectado al voltaje más positivo existente, y el pin 7 al más negativo. También es necesario observar, que la diferencia de potencial entre los pines 14 y 7, debe estar limitada a 18 volts; pues de lo contrario puede presentarse una ruptura de voltaje interna. Por razones de seguridad limitaremos ese valor a 16 volts.

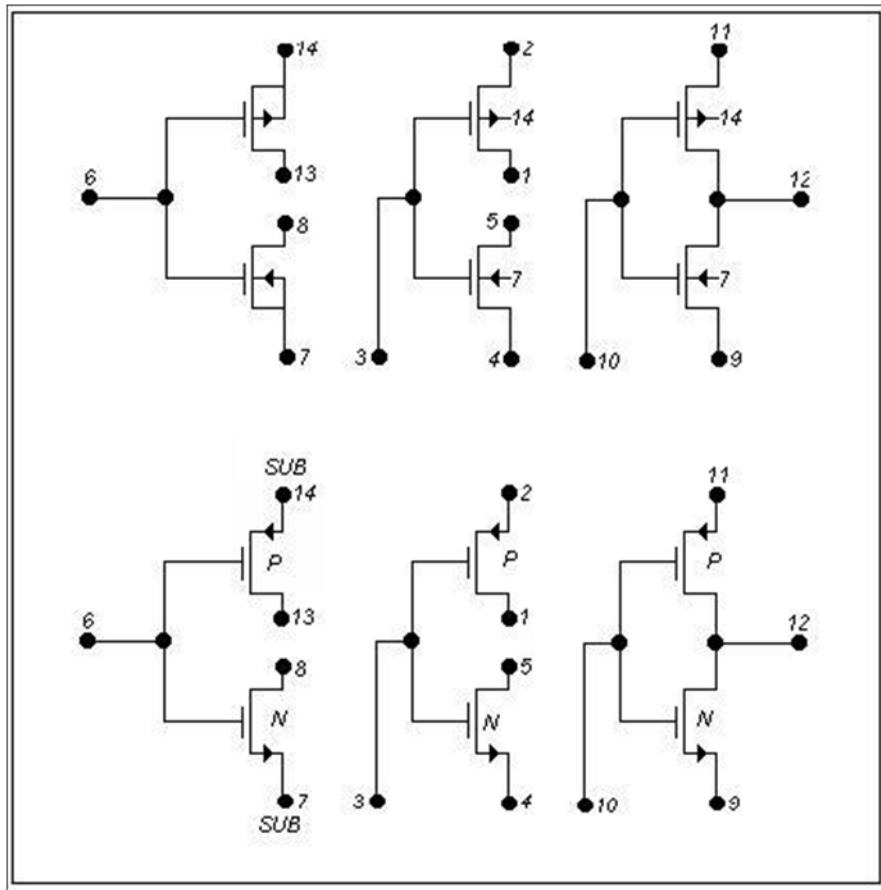


Figure 1: El arreglo MOS 4007: Asignación de pines completa y simplificada.

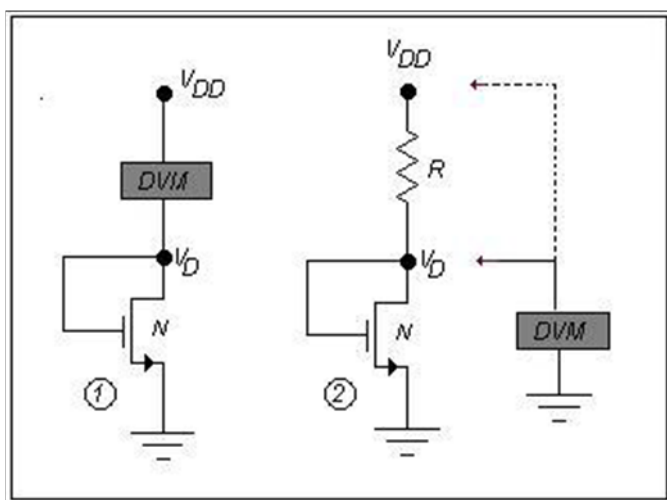


Figura 2: Cálculos de  $V_t$  y  $k_n$  en los MOSFETS canal N.

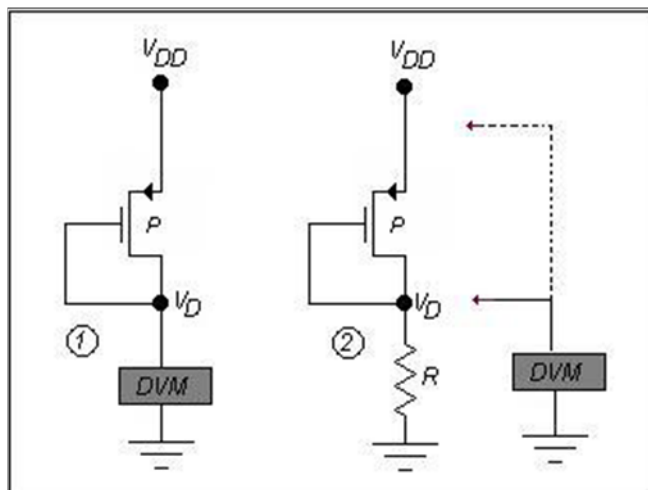


Figure 3: Arreglo de transistores NPN de Silicio.

### 1.1. Prelaboratorio

En esta práctica vamos a utilizar alimentaciones sencillas, y un voltaje  $V_{DD}$  de unos 12 Volts. A continuación procederemos a caracterizar los transistores MOS de canal N (3,4,5), (9,10,12), y (6,7,8) utilizando para ello los montajes indicados en la figura 2 (1) y (2). El montaje de la parte (1) de dicha figura sirve para la determinación del voltaje de umbral  $V_t$  correspondiente a cada transistor, el cual se obtiene simplemente restando el voltaje de la alimentación  $V_{DD}$  del voltaje que indica el voltímetro digital intercalado en el circuito del drenador. Este montaje se hará con los tres transistores mencionados arriba y sus resultados se anotarán cuidadosamente en la bitácora.

El montaje (2) se utiliza para medir  $k_n$ , a travez del conocimiento de la corriente que cruza por  $R$  y debido a que ya se conoce el valor de  $V_t$  el cálculo de  $k_n$  será directo.

### 1.2. Laboratorio

Den una explicación clara en su bitácora, de las razones por las cuáles consideran Uds que la determinación del voltaje de umbral  $V_t$  puede hacerse con el montaje de la figura 2 (1).

Calculen para todos los MOSFET canal N los valores de  $k_n$  y de  $V_t$  organizándolos en su bitácora, junto con las medidas, en tablas. Justifiquen igualmente en su bitácora, porqué se afirma que el montaje de la figura 2 (2) garantiza la operación en saturación del MOSFET. Demuestren que el factor de transconductancia para los MOSFETS de canal N de acuerdo a ése montaje es igual a:

$$k_n = \frac{V_{DD} - V_D}{R(V_D - V_t)^2}$$

## 2. Caracterización MOSFET canal P

### 2.1. Prelaboratorio

Ahora procederemos a caracterizar los transistores MOSFET de canal P (6,14,13), (1,2,3), y (10,11,12). Los montajes a utilizar para la determinación de  $V_t$  y  $k_p$  se indican en la figura 3 (1) y (2), y como pueden darse cuenta son similares en su topología a los de canal N. La medición mostrada en (1) permite calcular el voltaje de umbral simplemente como la diferencia entre el de alimentación  $V_{DD}$  y el que marca el voltímetro digital entre el drenador y tierra.

Las razones son las mismas de las del circuito usado para los MOS de canal N. Deberán montar los tres transistores y tomar las lecturas cuidadosamente. No se olviden de medir incluso la de alimentación. Después de esas medidas están en posesión del  $V_t$  (aunque con el signo cambiado), de los MOS de canal P. El circuito de la figura 6.4 parte (2) permite calcular la corriente de drenador por cada transistor mencionado arriba, y de

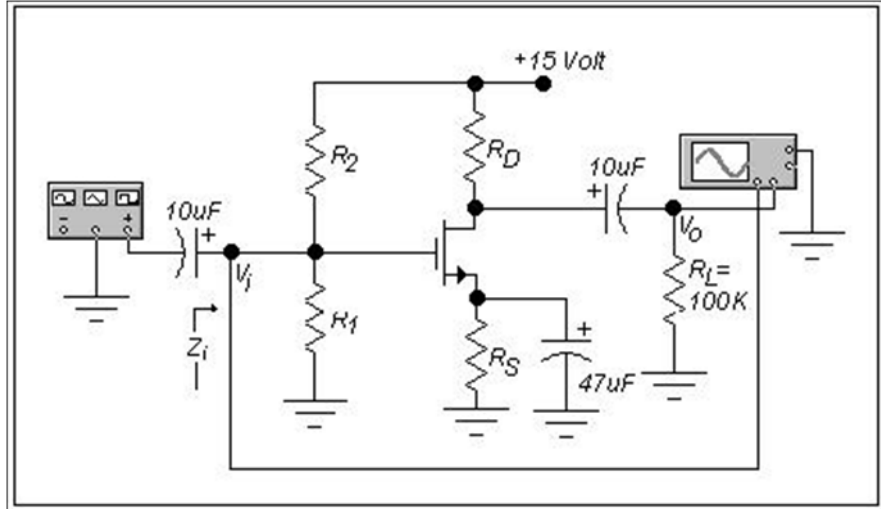


Figure 4: Amplificador de Fuente común con MOSFET canal N.

esta manera llegar al valor del  $k_p$  correspondiente. Nuevamente el montaje garantiza operación en saturación. Se deben tomar las medidas de VDD, VD, y del valor exacto de R para los tres transistores canal P.

## 2.2. Laboratorio

Explique cómo el segundo montaje garantiza la operación en la región de saturación. Calculen para todos los transistores el valor de  $k_p$  y de  $V_t$ : Demuestren que el factor de transconductancia para los MOSFETS de canal P de acuerdo al montaje de la figura 3 (2) es igual a:

$$k_p = \frac{V_D}{R(V_{DD} - V_D - V_t)^2}$$

## 3. Amplificador de fuente común

### 3.1. Prelaboratorio

Diseñen la polarización por voltaje fijo de compuerta para una corriente de drenador de aproximadamente  $I_D = 2.6\text{mA} + X \cdot 0.2\text{mA}$ , donde X es el número de su grupo, calculen los valores de  $R_S$  y  $R_D$ , así como de  $R_1$  y  $R_2$ , teniendo en cuenta para estas últimas que la impedancia de entrada no sea menor de 50K. El voltaje de alimentación VDD que se utilizará será de 15V. Los condensadores electrolíticos son de 16V, y deben tener cuidado con su polaridad al montarlos.

Una vez completado todo lo anterior, recalculen con los valores normalizados el punto de operación teórico del amplificador. Utilizando el modelo híbrido de baja frecuencia por transconductancia del MOSFET, en la configuración de fuente común, calculen sus parámetros y evalúen la ganancia de voltaje en señal. Para la resistencia de salida  $r_0$  de dicho modelo, utilicen el valor de  $\lambda = 0.004 \text{ volt}^{-1}$  que propone el modelo Pspice del integrado 4007. Calculen también la impedancia de entrada que presenta el amplificador a la fuente de señal. Midan con el multímetro digital, el valor exacto de  $R_D$  y anótenlo en su bitácora, pues les servirá para calcular la verdadera corriente de polarización del MOSFET en el laboratorio. Monten el circuito en el protoboard utilizando alambres cortos y lo más directos posibles. Prevean puntos de prueba rígidos como ya se ha explicado, para leer voltajes DC así como para conectar las sondas del osciloscopio y del generador de señales.

### 3.2. Laboratorio

En el laboratorio deben empezar por conectar primero la alimentación DC sin usar señal, y tomar las medidas de VDD, VD, VS y VG, con lo cual y utilizando el valor real de  $R_D$  pueden calcular  $I_{DQ}$ ; así

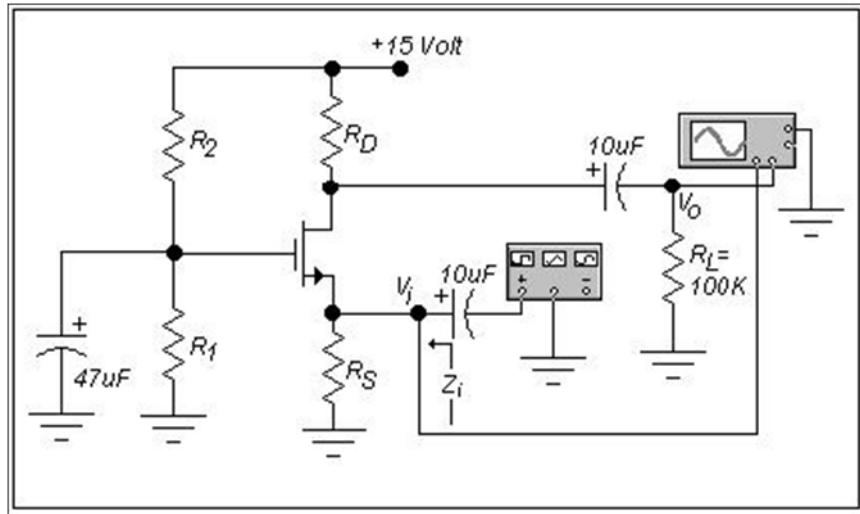


Figura 5: Amplificador de Compuerta común con MOSFET canal N.

como VGSQ y VDSQ. Esto les permitirá conocer los verdaderos valores de polarización. Si el MOSFET está polarizado en su región de saturación los anotarán y pueden continuar el experimento. De lo contrario deben revisar sus cálculos y corregir los errores antes de seguir.

Una vez corroborada la correcta polarización del MOSFET, se procederá a conectar el osciloscopio y a inyectar señal sinusoidal a 10Khz con el generador. Deben observar en el osciloscopio, antes que nada, la señal de salida y corregir la amplitud del generador usando el control de amplitud y si se requiere los atenuadores, para obtener la onda sinusoidal mas grande posible, sin distorsiones.

Logrado esto, no se actuará mas con la amplitud del generador. Se tomarán la medida de la amplitud pico de la onda tanto de entrada como de salida y se anotarán en la bitácora. Se observará también el desfase que se presenta entre las dos ondas y se medirá, anotando el resultado.

Después, y como hicimos en las prácticas anteriores, partiremos de la onda de salida obtenida a 10Khz, y sin cambiar la amplitud de la señal de entrada, iremos aumentando la frecuencia hasta que la amplitud de pico de la salida sea 0.707 veces la inicial. La correspondiente frecuencia se anotará como frecuencia superior de la banda media del amplificador.

En su casa y utilizando los valores reales de la polarización, calculen a partir del modelo de señal pequeña, la ganancia de voltaje  $A_v = v_o/v_i$ , y compárenla con la obtenida en las mediciones hechas con el osciloscopio en el laboratorio.

¿Cuál fue el error porcentual en su cálculo? Traten de explicar las razones de las divergencias, si las hay.

¿Cómo se explica la inversión de fase en señal de este amplificador?

¿Por qué razón la ganancia de voltaje empieza a disminuir por encima de una determinada frecuencia de operación? ¿Cuál fué el valor medido para la frecuencia superior de la banda media de este montaje?

¿Cuál es la impedancia de entrada de este amplificador? ¿Cómo se compara esta con la del amplificador de emisor común?

## 4. Amplificador de Compuerta Común

La polarización de este montaje es la misma del montaje anterior, por esta razón no es necesario recalcularla.

### 4.1. Pre-laboratorio

Utilizando el modelo híbrido de baja frecuencia por transconductancia del MOSFET, en la configuración de compuerta común<sup>4</sup>, calculen los parámetros necesarios y la ganancia de voltaje en señal. Para la resistencia de salida  $r_0$  de dicho modelo, utilicen el valor de  $\lambda = 0.004V^{-1}$  que propone el modelo Pspice del integrado

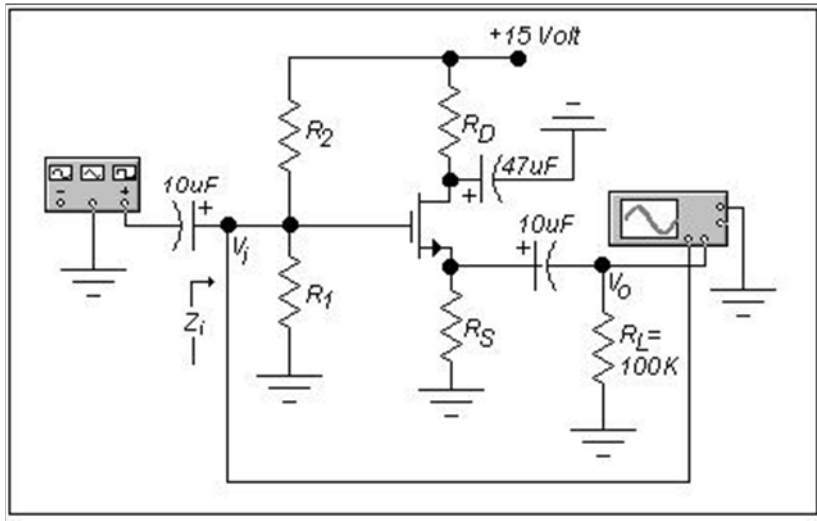


Figura 6: Figura 5. Seguidor por Fuente con MOSFET canal N.

4007. Calculen también la impedancia de entrada que presenta el amplificador, a la fuente de señal. Monten el circuito en el protoboard haciendo los cambios necesarios, para configurar la nueva topología y utilizando conexiones cortas y lo más directas posibles. Prevean como antes puntos de prueba rígidos como ya se ha explicado, para leer voltajes DC así como para conectar las sondas del osciloscopio y el generador de señales.

## 4.2. Laboratorio

En el laboratorio empezarán por conectar primero la alimentación DC sin usar señal, y tomarán las medidas de VDD, VD, VS y VG; con lo cual y utilizando el valor real de RD, pueden calcular IDQ; así como VGSQ y VDSQ. Anoten las medidas en su bitácora. Una vez realizado el paso anterior se procederá a conectar el osciloscopio y a inyectar señal sinusoidal a 10Khz con el generador. Deben observar en el osciloscopio la señal de salida y corregir la amplitud del generador usando su control correspondiente, y actuando sobre los atenuadores si se requiere, para obtener la onda sinusoidal más grande posible sin distorsiones. Logrado esto, no se moverá más la amplitud del generador. Se medirá entonces la amplitud pico de la onda de entrada así como la de salida, y se anotarán las medidas en la bitácora. Se medirá también el desfase presente entre las dos ondas anotando el resultado.

A continuación, y como se hizo con el montaje de fuente común, partiremos de la onda de salida obtenida a 10Khz, y sin cambiar la amplitud de la de entrada, iremos aumentando la frecuencia hasta que la amplitud de pico de la primera sea 0.707 veces la inicial. La correspondiente frecuencia se anotará como frecuencia superior de la banda media del amplificador.

Comparen la ganancia calculada a partir del modelo por transconductancia, y la ganancia medida en el laboratorio para esta topología.

¿Cuál es el error presente entre sus cálculos y sus medidas? ¿Cómo se compara la ganancia de voltaje del montaje de compuerta común con el de fuente común?

¿Qué pueden decir sobre la fase de la señal de entrada y la de salida?

¿Qué valor obtuvieron para su impedancia de entrada? ¿Cómo se compara dicha impedancia con la del montaje en fuente común?

¿Qué pueden decir de la frecuencia superior de la banda media de este montaje en comparación con la obtenida para el anterior montaje?

¿Cómo se compara la configuración de compuerta común con MOSFET, con la configuración base común?

## 5. Seguidor por Fuente

Este montaje tiene la misma polarización de los circuitos anteriores entonces no es necesario recalcularla.

## 5.1. Pre-laboratorio

Calculen los parámetros necesarios y la ganancia de voltaje en señal. Para la resistencia de salida  $r_0$  de dicho modelo, calculen también la impedancia de entrada que presenta el amplificador, a la fuente de señal. Midan con el multímetro digital, el valor exacto de  $R_D$  y anótenlo en su bitácora, pues les servirá para calcular la verdadera corriente de polarización del MOSFET en el laboratorio. Monten el circuito en el protoboard haciendo los cambios necesarios para configurar la nueva topología, y utilicen conexiones cortas y lo más directas posibles. Prevean como antes puntos de prueba rígidos como se ha explicado, para leer voltajes DC así como para conectar las sondas del osciloscopio y del generador de señales.

## 5.2. Laboratorio

En el laboratorio empezarán por conectar primero la alimentación DC, y tomarán las medidas de VDD, VD, VS y VG con lo cual y utilizando el valor real de  $R_D$ , pueden calcular  $IDQ$ ; así como  $VGSQ$  y  $VDSQ$ . Anoten las medidas en su bitácora.

Una vez comprobada la correcta polarización del amplificador, se procederá a conectar el osciloscopio y a inyectar señal sinusoidal a 10Khz con el generador. Deben observar en el osciloscopio la señal de salida y corregir la amplitud del generador para obtener la onda sinusoidal más grande posible, sin distorsiones. Logrado esto, no se moverá más la amplitud del generador. Se medirá entonces la amplitud pico de la onda de entrada así como la de salida, y se anotarán las medidas en la bitácora. Se medirá también el desfase presente entre las dos ondas y se anotará el resultado.

A continuación y como se hizo con los montajes de fuente común y de compuerta común, empezamos con la onda de salida obtenida a 10Khz, y sin cambiar la amplitud de la de entrada, iremos aumentando la frecuencia hasta que la amplitud de pico de la primera sea 0.707 veces la inicial. La correspondiente frecuencia se anotará como frecuencia superior de la banda media del amplificador.

Comparen para el seguidor por fuente, la ganancia calculada con el modelo de señal pequeña, y la ganancia medida en el laboratorio.

¿Cuál es el error porcentual entre sus cálculos y sus medidas?

¿Cómo se comparan las ganancias de voltaje de los montajes de compuerta común y el de fuente común, con la ganancia del seguidor por fuente?

¿Qué pueden decir sobre la fase de la señal de entrada y la de salida?

¿Qué valor obtuvieron para la impedancia de entrada del seguidor por fuente?

¿Cómo se compara esta con la del montaje de fuente común y el de compuerta común?

¿Qué pueden decir de la frecuencia superior de la banda media de este montaje en comparación con la obtenida para el anterior montaje?

¿Cómo se compara el seguidor por emisor, con el seguidor por fuente con MOSFET? Hagan una tabla comparativa de los tres montajes estudiados en esta práctica en su bitácora, desde el punto de vista de la ganancia de voltaje, la impedancia y la frecuencia superior de la banda media.