

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES

# Trabajo Práctico N° 1

## Electrónica I - 2019

Grupo 6:

Farall, Facundo David  
Gaytan, Joaquín Oscar  
Kammann, Lucas Agustín

Profesores:

Alcocer, Fernando  
Oreglia, Eduardo Victor  
Gardella, Pablo Jesús

21 de septiembre de 2019

# Índice

<b>Introducción</b>	<b>3</b>
<b>Marco Teórico</b>	<b>3</b>
Ecuaciones de polarización del MOSFET . . . . .	3
Ecuaciones del modelo incremental del MOSFET . . . . .	3
<b>Desarrollo</b>	<b>5</b>
Cálculo de la polarización en corriente continua . . . . .	6
Cálculo del modelo incremental . . . . .	7
Análisis del circuito incremental . . . . .	7
Impedancia de entrada . . . . .	7
Impedancia de salida . . . . .	8
Ganancia de tensión . . . . .	9
Ganancia de corriente . . . . .	9
Resultados . . . . .	9
Parámetros del amplificador . . . . .	10
Respuesta en frecuencia . . . . .	11
<b>Simulación e implementación</b>	<b>12</b>
<b>Conclusión</b>	<b>14</b>

## Introducción

En el presente informe se analizará una monoetapa de amplificación construida empleando un MOSFET, es decir, un transistor de efecto de campo con tecnología MOS, en configuración Gate Común. Se propone como objetivo analizar a nivel teórico el circuito para poder comprender las cualidades, sean ventajas o desventajas, del funcionamiento de tal configuración y contrastar empíricamente el comportamiento descrito por dicho análisis, con una simulación en software PSpice y la implementación práctica. Finalmente, se buscará concluir describiendo cada uno de los parámetros que se consideren característicos de tal circuito, sea su ganancia de tensión, de corriente, impedancia de entrada y de salida.

## Marco Teórico

En el análisis de circuitos amplificadores haciendo un estudio de la polarización en continua, y el comportamiento para señales alternas pequeñas, considerando para este último el modelo incremental del MOSFET, es necesario tener en cuenta las ecuaciones características que son empleadas para modelar teóricamente el comportamiento de un MOSFET de enriquecimiento. Es importante aclarar, que sólo las ecuaciones empleadas para el análisis posterior son ilustradas, y que se asume que el lector posee un conocimiento base del funcionamiento de un MOSFET.

### Ecuaciones de polarización del MOSFET

Particularmente, considerando para el funcionamiento de amplificador que el MOSFET opera sobre la región de saturación, luego para el análisis en corriente continua se emplean las leyes:

$$V_{DS} \geq V_{DSsat} = V_{GS} - V_{TH} > 0 \quad (1)$$

$$I_D = K \cdot (V_{GS} - V_{TH})^2 \quad (2)$$

$$K = \frac{K_n \cdot W}{2 \cdot L} \quad (3)$$

### Ecuaciones del modelo incremental del MOSFET

Habiendo determinado las condiciones de polarización de un transistor MOS, es necesario determinar su funcionamiento como amplificador caracterizando los parámetros del mismo desde el punto de vista de cuadripolos, para lo cual resulta necesario emplear un modelo equivalente del mismo bajo condiciones de pequeñas señales de alterna. Este modelo se puede ver ilustrado en la Fig. 1 en donde es importante mencionar que se toma una aproximación de frecuencias medias donde las capacidades formadas por la naturaleza constructiva del Gate, Drain y Source no son apreciables y se simplifica el análisis. Para determinar los parámetros de tal modelo se emplean las siguientes expresiones:

$$g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_{TH}} \quad (4)$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} \quad (5)$$

Vale mencionar que la magnitud  $V_A$  utilizada para calcular la resistencia de salida del modelo incremental, es denominada la tensión de Early y para aquellos casos donde el fabricante no provee en la hoja de datos dicha magnitud, y tampoco se puede obtener de las curvas, se propone o supone un valor. Para los fines del análisis realizado en este artículo, se puede utilizar un  $V_A = 90V$ . Generalmente el orden de magnitud de esta resistencia de salida del modelo del MOSFET, en un circuito bien diseñado, provoca que sus efectos no sean apreciables y por ende haber suponado incorrectamente el valor de  $V_A$  no tiene influencia alguna en los resultados.

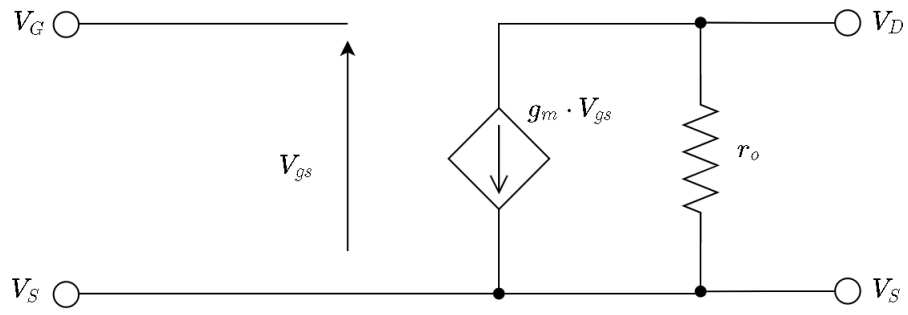


Figura 1: Modelo equivalente de pequeñas señales del MOSFET

## Desarrollo

En la Fig. 2 se puede observar el esquema completo del circuito bajo análisis, el cual consiste en un amplificador en configuración Gate Común con la resistencia del Gate desacoplada. Al mismo se le asignan determinados valores de componentes para poder implementarlo y luego comparar resultados teóricos y prácticos. Estos son,

- $V_{CC} = 15V$
- $R_F = 1k\Omega$
- $C = 100nF$
- $R_S = 2,7k\Omega$
- $R_1 = 10M\Omega$
- $R_2 = 4,7M\Omega$
- $R_D = 10k\Omega$
- $R_L = 10k\Omega$
- $Q_1 = 2N7000$

Para el MOSFET canal N modelo 2N7000, se pueden obtener los parámetros característicos del mismo utilizando la hoja de datos, donde para los valores correspondientes al parámetro transconductancia  $k_n$  para la ecuación característica de corriente-tensión es necesario utilizar la curva provista por tal hoja de datos y aproximar tomando valores y evaluando en el modelo teórico empleado.

Por otro lado, los valores característicos del MOSFET indicados por el fabricante, es decir  $V_{TH}$  y  $K$  presentan una determinada dispersión por la cual lo teórico con lo práctico no lograría contrastarse, es por ello que se tomó un MOSFET 2N7000 y se asumió que su valor de  $V_{TH}$  era el valor típico de la hoja de datos, luego se determinó para ello el valor de  $K$  y se ajustaron los valores empíricamente logrando determinar que los parámetros que lograban describir el mismo comportamiento que el MOSFET medido en un laboratorio, eran:

- $V_{TH} = 2,1V$
- $K = 13,75 \frac{mA}{V^2}$

La experiencia de medición de tales parámetros consiste básicamente en determinar aproximadamente para qué tensión de  $V_{GS}$  la impedancia entre el Drain y el Source deja de ser muy grande y comienza a comportarse como una baja impedancia. Luego para un escenario de polarización según el resultado de la corriente de Drain se puede determinar bajo saturación la constante  $K$ .

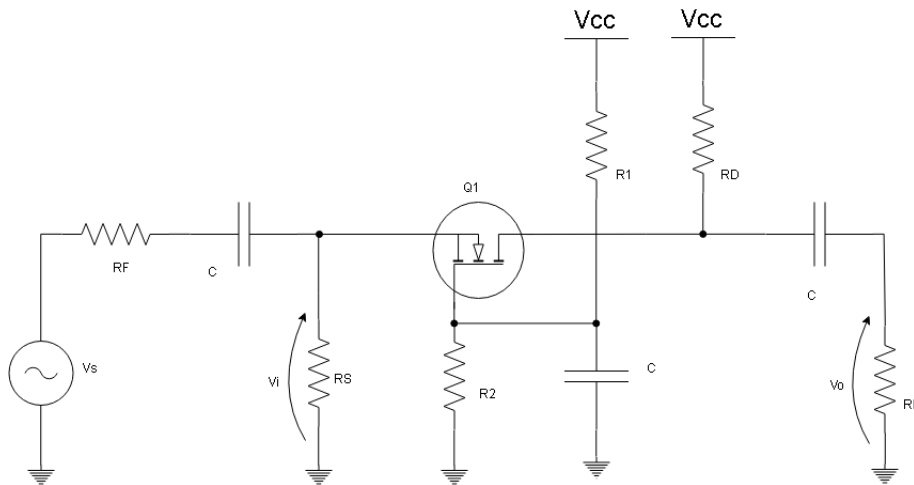


Figura 2: Circuito amplificador Gate Común MOSFET

## Cálculo de la polarización en corriente continua

En la Fig. 3 se muestra el circuito correspondiente al análisis para corriente continua, donde bajo tales condiciones los capacitores en el régimen permanente se comportarán como circuitos abiertos y el circuito resultante presenta un desacople o desconexión de algunas partes del circuito, de ahí el nombre característico de tales capacitores según su función. Asumiendo que la corriente de Gate de un MOSFET puede aproximarse como  $I_G \approx 0$ , y suponiendo que está operando en la región de saturación, luego se obtienen los potenciales sobre el Gate y el Source para hallar  $V_{GS}$ .

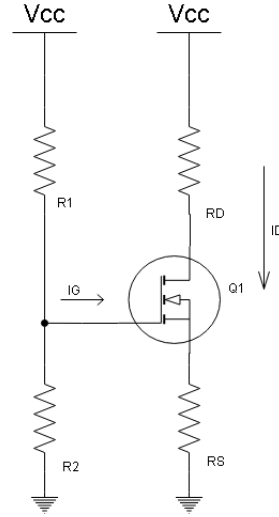


Figura 3: Polarización en continua del MOSFET

$$V_G = \frac{V_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 4,796V$$

$$V_S = I_D \cdot R_S$$

$$\Rightarrow V_{GS} = V_G - V_S = 5V - I_D \cdot R_S$$

Luego se reemplaza en la expresión de la corriente de Drain en región de saturación para el MOSFET, y despejando se obtiene como resultado la siguiente ecuación cuadrática, cuyas dos raíces son soluciones matemática pero no físicas del problema, pues que si se verifica para una de ellas las condiciones de polarización asumidas no estarán dadas y por tanto, el análisis inicial sería inválido. Por esto último, se utiliza únicamente una de tales soluciones.

$$I_D^2 \cdot a + I_D \cdot b + c = 0$$

$$a = R_S^2 \cdot K$$

$$b = -1 - 2 \cdot R_S \cdot K \cdot (V_G - V_{TH})$$

$$c = K \cdot (V_G - V_{TH})^2$$

Entonces, se obtienen dos soluciones, una de ellas como se mencionó antes se descarta porque no establece las condiciones de polarización de las cuales se parte, pero la otra sí lo hará. Por tanto,

$$I_D = 903,57\mu A \quad (6)$$

$$V_{GS} = V_G - I_D \cdot R_S = 4,796V - 903,57\mu A \cdot 2,7k\Omega = 2,356V \quad (7)$$

$$V_{DS} = V_{CC} - I_D \cdot (R_S + R_D) = 15V - 640,04\mu A \cdot (2,7k\Omega + 10k\Omega) = 3,52V \quad (8)$$

## Cálculo del modelo incremental

Para continuar con el análisis de la monoetapa y lograr obtener los parámetros de interés de la misma, es necesario obtener el circuito incremental reemplazando al MOSFET por su modelo equivalente cuando trabaja por pequeñas señales. Resulta interesante mencionar que para poder considerar a una señal pequeña dentro del análisis de corriente alterna para un MOSFET, debe cumplirse la condición  $v_{gs} \ll 2 \cdot (V_{GS} - V_{TH}) \approx 256mV$ . Los parámetros del modelo incremental se obtienen como,

$$g_m = \frac{2 \cdot I_D}{V_{GS} - V_{TH}} = \frac{2 \cdot 903,57\mu A}{3,52V - 3V} = 7,059 \frac{mA}{V} \quad (9)$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_D} = \frac{90V}{903,57\mu A} = 99,6k\Omega \quad (10)$$

## Análisis del circuito incremental

En la Fig. 4 se presenta el circuito resultante de considerar una aproximación donde la frecuencia de operación es media y por tanto los capacitores no tienen un efecto que predomine, con lo cual luego para los análisis posteriores se propone aplicar una transformación de fuentes para el modelo del MOSFET y obtener el circuito correspondiente a la Fig. 5.

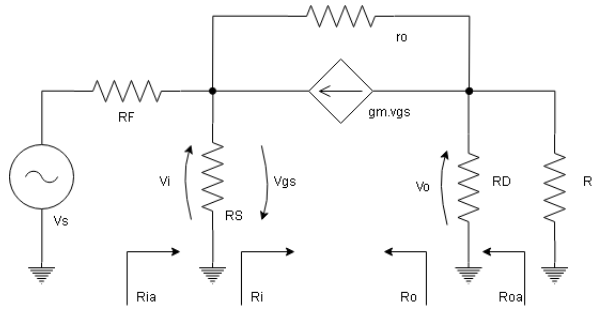


Figura 4: Circuito incremental

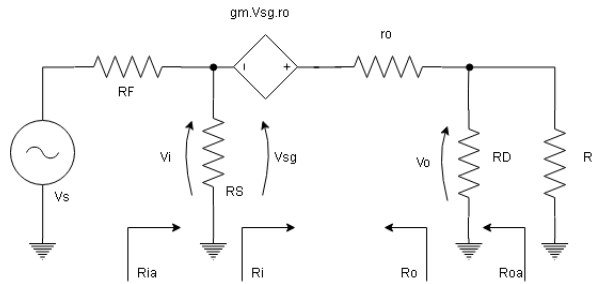


Figura 5: Circuito incremental con transformación de fuentes

## Impedancia de entrada

Se calculan las impedancias de entrada respecto de diferentes puntos de entrada, según la entrada del amplificador o bien de la entrada donde ve señal el transistor MOS. Para ello, y en forma de simplificación, se determina que la  $R_{ia} = R_i / R_S$ . Por lo tanto el análisis siguiente corresponde a buscar la  $R_i$ . Se busca tal impedancia como el cociente de la tensión entrante con la corriente entrante, para esta última se la denota en la ecuación como la corriente que circula por la resistencia  $r_o$ .

$$R_i = \frac{V_{sg}}{I_{ro}} = \frac{V_{sg}}{\frac{V_{sg} \cdot (1 + g_m \cdot r_o)}{r_o + R_D // R_L}} = \frac{r_o + R_D // R_L}{1 + g_m \cdot r_o} = 148,56\Omega \quad (11)$$

$$R_{ia} = R_i // R_S = 140,81\Omega \quad (12)$$

Finalmente, la impedancia de entrada vista desde el generador de señales está dada como:

$$R_{is} = R_{ia} + R_F = 1140,81\Omega \quad (13)$$

Estos análisis realizados son buscando la impedancia de entrada sin considerar aproximación alguna que simplifique la resolución algebraica, con lo cual si consideramos el valor de la impedancia de salida del MOSFET despreciable a los efectos que produce sobre el circuito, luego se reduce el modelo equivalente y se obtienen expresiones aproximadas para las impedancias de entrada.

$$R_i = \frac{V_{sg}}{g_m \cdot V_{sg}} = \frac{1}{g_m} = 141,66\Omega \quad (14)$$

$$R_{ia} = R_i // R_S = 134,6\Omega \quad (15)$$

$$R_{is} = R_{ia} + R_F = 1134,6\Omega \quad (16)$$

### Impedancia de salida

De igual manera que con la impedancia de entrada, la forma simplificada de analizar la impedancia de salida consiste en separar el análisis. Por un lado, se tiene la impedancia  $R_{oa} = R_o // R_D$ . Luego para calcular el valor de  $R_o$  se pasivan las fuentes independientes del circuito y se aplica una señal de prueba  $V_{op}$  y midiendo la corriente correspondiente a través de tal fuente, se puede analizar cuando vale la impedancia de salida  $R_o$ .

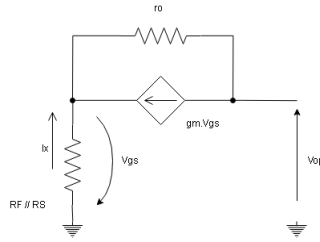


Figura 6: Circuito para medición de impedancia de salida

Como se puede observar en la Fig. 6, se puede aplicar una modificación sobre la fuente controlada cambiando el parámetro que la controla por uno efectivo que verdaderamente la domina, de esa forma se obtiene que:

$$\begin{aligned} V_{gs} &= I_x \cdot (R_F // R_S) \\ \Rightarrow g_m \cdot V_{gs} &= g_m \cdot I_x \cdot (R_F // R_S) = g_m^* \cdot I_x \end{aligned}$$

Luego se puede aplicar el pasaje a nivel de corriente y obtener sencillamente la impedancia de salida del circuito como:

$$R_o = R_F // R_S + r_o \cdot (1 + g_m^*) = R_F // R_S + r_o \cdot (1 + g_m \cdot (R_F // R_S)) \rightarrow R_o = 613,38k\Omega \quad (17)$$

Finalmente, entonces  $R_{oa} = R_o // R_D = 9,84K\Omega$ . Y si se analiza respecto de lo que se ve como impedancia de todo el circuito, se calcula además  $R_{os} = R_{oa} // R_L = 4,959k\Omega$ .



### Ganancia de tensión

En primer lugar se plantea un análisis sin emplear ninguna otra aproximación mas que las antedichas, y luego se compara el valor resultante considerando que la resistencia de salida del MOSFET es mucho más grande que las del circuito y se la desprecia en el circuito. Los resultados y su comparación resulta de interés para obtener una noción de la influencia de la impedancia de salida del MOSFET sobre el circuito y cuan apreciable puede ser.

$$V_o = V_{sg} \cdot (1 + g_m \cdot r_o) \cdot \frac{R_D // R_L}{r_o + R_D // R_L}$$

$$\Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + g_m \cdot r_o) \cdot R_D // R_L}{r_o + R_D // R_L} = 33,65 \rightarrow A_v = 30,54dB$$

$$V_o = -g_m \cdot V_{gs} \cdot (R_D // R_L)$$

$$\Rightarrow A_v \approx g_m \cdot (R_D // R_L) = 35,29 \rightarrow A_v \approx 30,95dB$$

Finalmente, la ganancia de tensión respecto de la entrada provista por el generador de señales.

$$A_{vs} = A_v \cdot \frac{R_{ia}}{R_{ia} + R_F} = 33,65 \cdot 0,118 = 3,9919 \rightarrow A_{vs} = 12,02dB \quad (18)$$

### Ganancia de corriente

Finalmente, para encontrar la ganancia de corriente tanto respecto de la corriente entrante al amplificador como la provista por el generador de funciones, simplemente se plantean las siguientes expresiones. Se considera como corriente de salida aquella que sale del amplificador, y como es una configuración Gate Común, simplemente la misma que entra es la que aproximadamente sale, con la diferencia de la pérdida en la resistencia  $r_o$ . Despreciando el efecto de tal resistencia, entonces:

$$A_i = 1 \quad (19)$$

$$A_{is} = A_i \cdot \frac{R_S}{R_S + R_i} = 0,95 \quad (20)$$

No obstante, estos valores de ganancias de corriente son considerando como salida la corriente que entrega el MOSFET sobre tal malla, con lo cual si se toma como salida la corriente sobre la carga  $R_L$ , luego se obtiene una expresión para tales ganancias que resulta más adecuada al interés de quien es usuario del circuito amplificador.

$$A_i = \frac{I_L}{I_S} = \frac{I_L}{I_D} \cdot \frac{I_D}{I_S} = \frac{R_D}{R_D + R_L} \cdot 1 = 0,5 \quad (21)$$

$$A_{is} = A_i \cdot \frac{R_S}{R_S + R_i} = 0,475 \quad (22)$$

### Resultados

En el siguiente apartado se busca analizar y comparar los resultados obtenidos para los diferentes parámetros del amplificador analizado, tanto desde lo teórico, como lo simulado y lo experimentado prácticamente. Además, se buscará analizar la respuesta en frecuencia del circuito, sin considerar el desarrollo teórico de tal aspecto, dado que se prescinden de las herramientas para tal análisis.

### Parámetros del amplificador

Con el circuito armado y en corriente en continua, primero se midieron los valores que permiten definir el estado de la polarización, se midió las tensiones sobre cada uno de los terminales del transistor MOSFET, la tensión sobre la resistencia  $R_S$  y su valor resistivo para determinar la corriente que circula en continua.

$V_{GS}$	$V_{DS}$	$V_S$	$V_{R_S}$	$R_S$	$I_D$
2,59V	3,61V	2,44V	2,44V	2,69k $\Omega$	907,06 $\mu$ A

Tabla 1: Estado de polarización en continua

Luego se miden los parámetros que caracterizan al amplificador de Gate Común, y para ello se mide con una señal que se encuentra dentro del rango denominado frecuencias medias para este amplificador, esto es con  $f = 50kHz$  y  $v_i = 100mV_{pp}$ . Aclaración, para la medición de la impedancia de entrada se agregó una impedancia auxiliar con lo cual la caída al circuito era menor y debió subirse la tensión del generador.

$A_v$	$A_{vs}$	$A_i$	$A_{is}$
31,1dB	12,9dB	0,62	0,58

Tabla 2: Ganancia del amplificador

$ V_{aux} $	$V_{aux}^\circ$	$ V_{IN} $	$V_{IN}^\circ$	$R_{AUX}$	$R_i$	$R_{ia}$	$R_{is}$	$R_o$
396mV	0	75mV	0	984 $\Omega$	186,36 $\Omega$	174,28 $\Omega$	1158,28 $\Omega$	4,91k $\Omega$

Tabla 3: Impedancia de entrada y de salida

A modo de aclaración, las ganancias dadas en dB corresponden al valor en módulo y el amplificador es de carácter no inversor.

Casos	$R_i$	$R_{ia}$	$R_{oa}$	$A_v$	$A_{vs}$	$A_i$	$A_{is}$
Teórico	141,66 $\Omega$	134,6 $\Omega$	4,959K $\Omega$	30,54dB	12,02dB	0,5	0,475
Simulado	141,85 $\Omega$	134,74 $\Omega$	5,006k $\Omega$	30,91dB	12,41dB	0,5	0,475
Medido	186,36 $\Omega$	174,28 $\Omega$	4,91k $\Omega$	31,1dB	12,9dB	0,62	0,58

Tabla 4: Tabla con parámetros del amplificador según contexto de análisis

## Respuesta en frecuencia

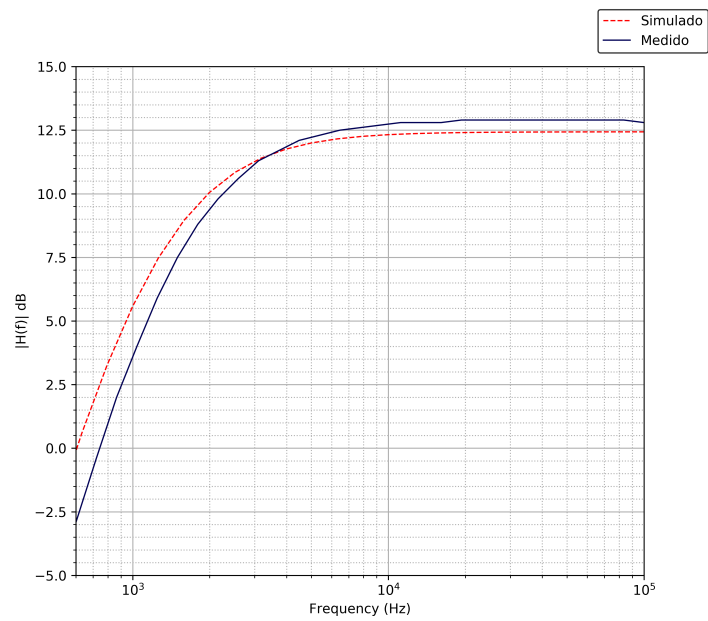


Figura 7: Diagrama de bode en módulo de la respuesta en frecuencia del circuito

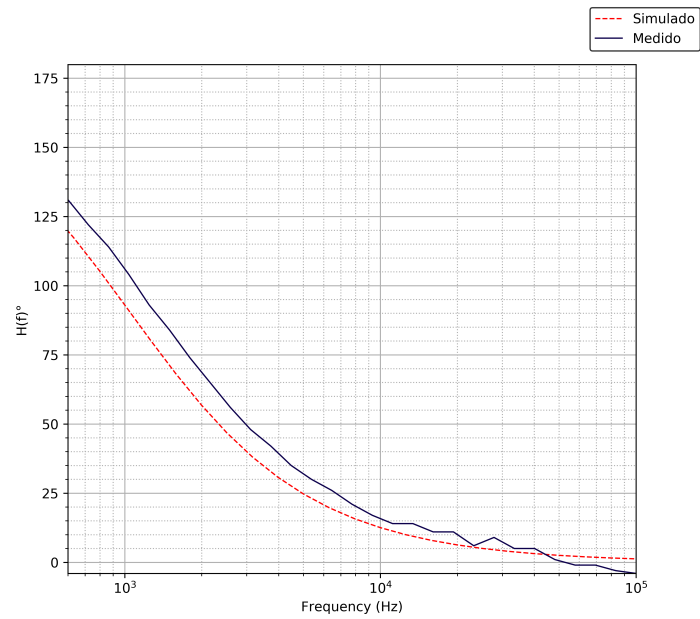


Figura 8: Diagrama de bode en fase de la respuesta en frecuencia del circuito

## Simulación e implementación

En este apartado se presentan ilustraciones sobre el proceso de simulación así como de las mediciones realizadas en la implementación práctica del circuito.

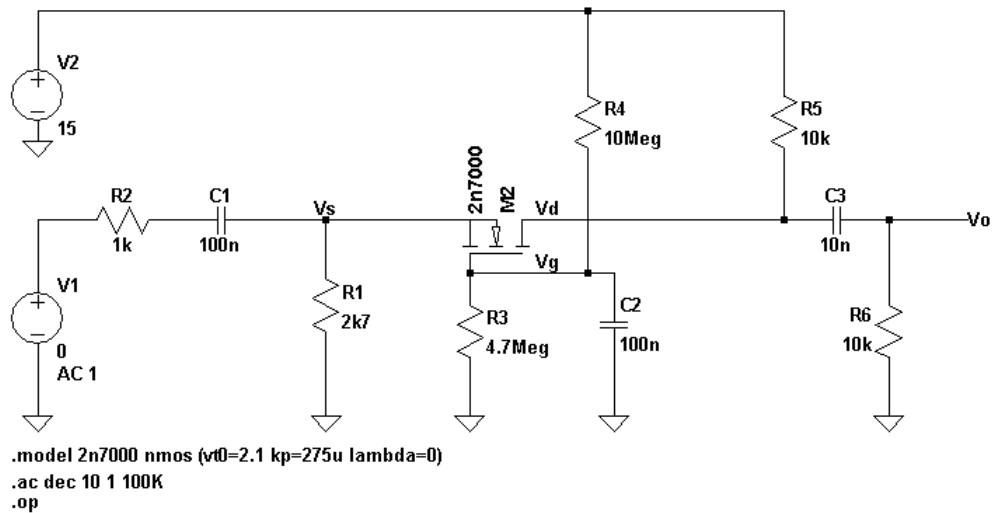
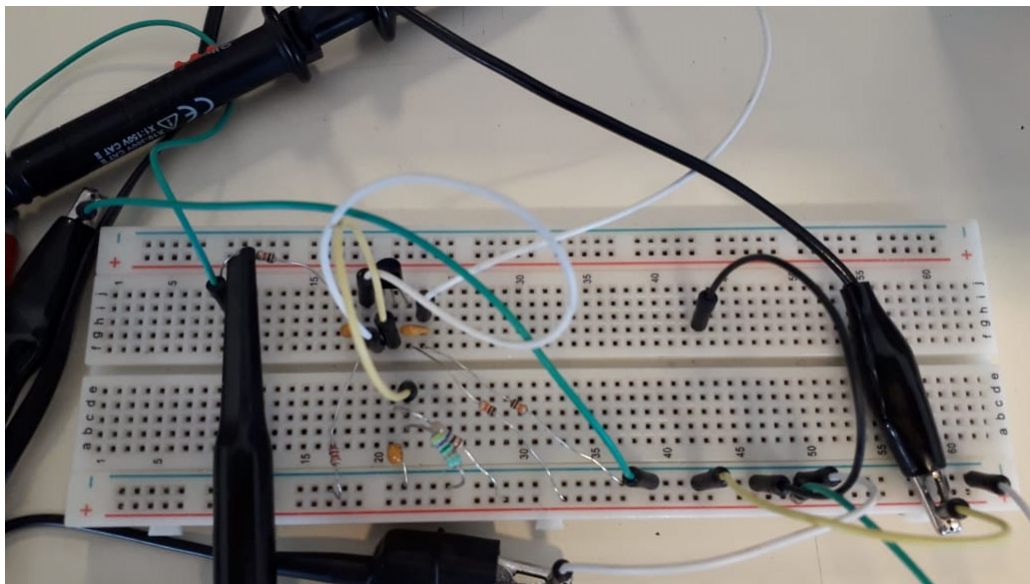
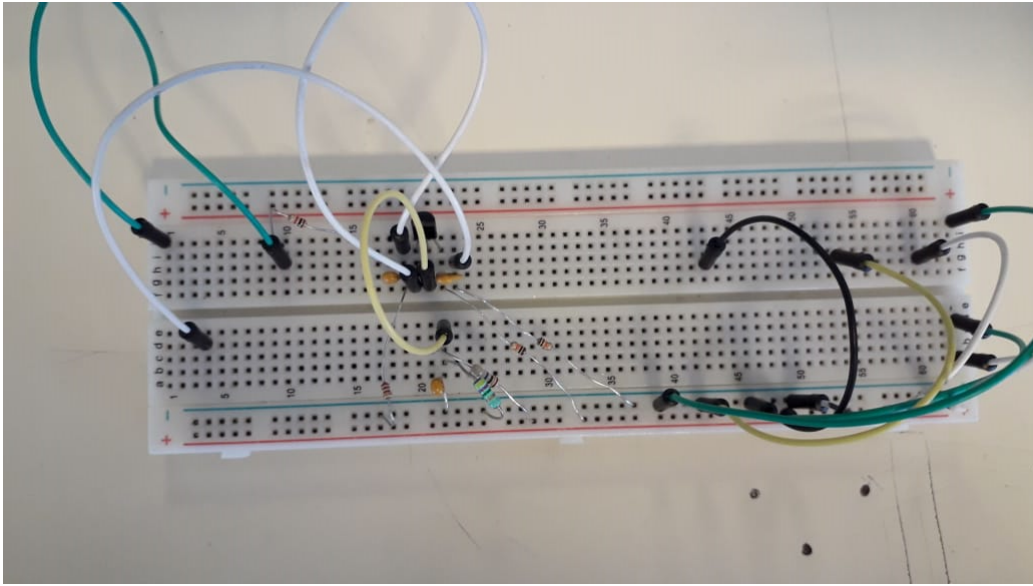


Figura 9: Circuito de la simulación en LTSpice XVII

Luego el armado en la práctica del circuito se ilustra a continuación con dos imágenes del Protoboard, sin y con conexión de las puntas de osciloscopio.





## Conclusión

La monoetapa amplificadora empleada con MOSFET en configuración Gate Común, según las cualidades analizadas, tiene un buen comportamiento como seguidor de corriente ya que su valor de ganancia para tal magnitud es cercano a la unidad, no obstante se esperaría de un circuito con tales virtudes que posea una impedancia de entrada baja y una impedancia de salida alta para poder funcionar correctamente como un adaptador de impedancias. Es por esto último que se considera que la implementación utilizada, con los valores asignados, no es la mejor u óptima, ya que su impedancia de entrada si bien es pequeña, es comparable a la de posibles generadores de funciones o señales utilizados, y luego la impedancia de salida no es tan alta como bien podría serlo si no se viera limitada por el valor de la  $R_D$  utilizada. En conclusión, implementando este circuito con valores óptimos, podría ser empleado como un seguidor de corriente, adaptando impedancias entre dos etapas. Por otro lado, también tiene una buena ganancia de tensión, no obstante para tales propósitos sus impedancias de entrada y salida producen pérdidas y no se logra aprovechar al máximo las capacidades del amplificador según lo denota el valor de  $A_v$ .