



## Trabajo Práctico N<sup>o</sup>3

### Curvas características del transistor MOSFET

CD4007 – N-MOSFET

#### Objetivos del trabajo

- Analizar las principales características de baja frecuencia de transistores MOS canal N a través de mediciones experimentales.
- Familiarizarse con métodos para la obtención de parámetros a partir de curvas experimentales.
- Generar un modelo básico de *Spice* de los transistores medidos y obtener simulaciones para contrastar con las mediciones.
- Comparar los resultados obtenidos en forma experimental con los obtenidos mediante *Spice* y curvas teóricas.

#### Enunciado

En este trabajo práctico se analizarán los modelos del transistor **N-MOSFET**. El modelo teórico utilizado es:

$$I_D = \begin{cases} 0 & V_{GS} < V_T \\ k (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) & V_{GS} > V_T, V_{DS} > V_{DS-sat} \\ 2k \left( V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} (1 + \lambda V_{DS}) & V_{GS} > V_T, V_{DS} < V_{DS-sat} \end{cases} \quad (1)$$

cuyos parámetros son  $k = \frac{\mu C'_{ox} W}{2L}$ ,  $V_T$  y  $\lambda$ . Además del modelo teórico se utilizarán dos modelos de simulación para *Spice*. Uno de los modelos será provisto por la cátedra. Este modelo de simulación es más complejo que el teórico y cuenta con muchos otros parámetros desconocido para el alumno. De todas maneras, aunque no sea preciso, lo trataremos como un modelo que cuenta con los mismos parámetros que el modelo teórico. El otro modelo de simulación será un modelo simple (denominado *Level 1*) y será creado por el alumno. La obtención de los parámetros se realizará de varias maneras:

- Estimación de parámetros iniciales (Par-0): Se analizarán las hojas de datos de los fabricantes y se hará una simulación del modelo de *Spice* provisto, en busca de una estimación inicial de los parámetros del dispositivo.
- Ajuste de los puntos de simulación del modelo Complejo (Par-C): Se realizará una simulación del modelo complejo provisto por la cátedra y se realizará un ajuste de los puntos simulados para obtener un nuevo conjunto de parámetros.
- Ajuste de los puntos de mediciones hechas en el Laboratorio (Par-L): Se realizará mediciones en el laboratorio y se realizará un ajuste de los puntos medidos para obtener un nuevo conjunto de parámetros.
- Ajuste de los puntos de simulación del modelo Propio (Par-P): Se realizará una simulación de un modelo propio y se realizará un ajuste de los puntos simulados para obtener un nuevo conjunto de parámetros. Este ajuste permite validar el método utilizado para la obtención de parámetros.

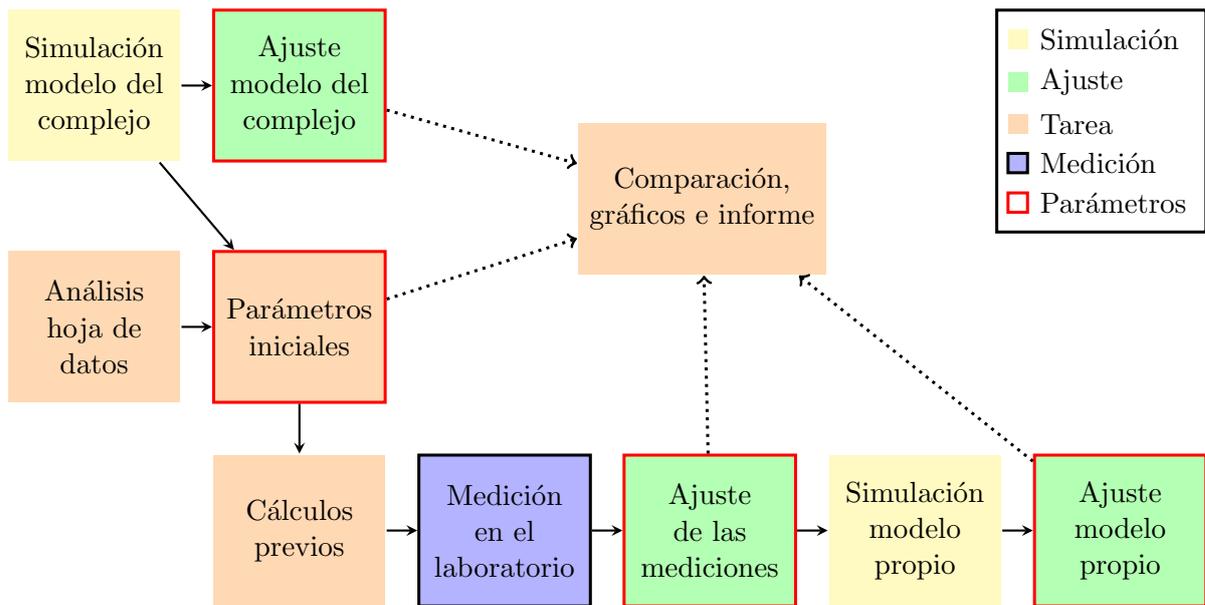


Figura 1: Tareas a realizar en el trabajo práctico.

Para la identificación de cada uno de los conjuntos de parámetros utilizamos la nomenclatura **Par-<X>**. Recomendamos la utilización de esta misma nomenclatura en el informe.

En la Figura 1 se muestra un diagrama de tareas a realizar por el alumno, entre ellas las necesarias para la obtención de parámetros. Una vez se cuente con los 4 juegos de parámetros se debe realizar una comparación cuantitativa entre ellos. Posteriormente se compararán los puntos medidos, así como las curvas de salida  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  y transferencia (en modo diodo),  $I_D$  vs.  $V_{GS}$ . Las curvas que vamos a graficar y comparar son siete, cuatro teóricas a partir de los parámetros obtenidos y tres conjuntos de puntos simulados o medidos:

1. **Curva Teórica** con parámetros **iniciales** (CT-0): Utilizando (1) y los  $P_0$  se graficarán las curvas de transferencia y de salida.
2. **Curva Teórica** del modelo del **Complejo** (CT-C): Utilizando (1) y los  $P_{MF}$  se graficarán las curvas de transferencia y de salida.
3. **Curva Teórica** del modelo **Propio** (CT-P): Utilizando (1) y los  $P_{MP}$  se graficarán las curvas de transferencia y de salida.
4. **Curva Teórica** con parámetros de las mediciones del **Laboratorio** (CT-L): Utilizando (1) y los  $P_{ML}$  se graficarán las curvas de transferencia y de salida.
5. **Puntos** de la simulación del modelo del **Complejo** (P-C): Se graficarán directamente los puntos obtenidos de la simulación para las curvas de transferencia y salida.
6. **Puntos** de la simulación del modelo **Propio** (P-P): Se graficarán directamente los puntos obtenidos de la simulación para las curvas de transferencia y salida.
7. **Puntos** medidos en el **Laboratorio** (P-L): Se graficarán los puntos medidos en el laboratorio para la curva de salida y para la de transferencia.

Para identificar cada una de las curvas o puntos se utiliza **CT-<X>** para las Curvas Teóricas y para los Puntos medidos o simulados **P-<X>**. Sugerimos utilizar esta nomenclatura en el informe.



## 1. Modelos de *Spice* y simulaciones

En este trabajo se deben realizar simulaciones en dos instancias. Una al principio del trabajo donde se simula el modelo del complejo y otra sobre el final, donde se simula un modelo propio.

**Modelo del complejo:** En la primera de la simulaciones se simula el modelo complejo provisto por la cátedra. La biblioteca con el modelo de los transistores del chip **CD4007** es provisto por la cátedra mediante el archivo `CD4007.lib`. En en mismo se encuentran los modelos tanto de transistor canal N como de canal P, por lo que es necesario buscar el nombre del modelo adecuado dentro del archivo de la biblioteca para utilizarlo. El modelo provisto requiere indicar explícitamente los valores de  $W$  y  $L$  (y otros parámetros) al lado del nombre del modelo, que según la misma biblioteca deben tomar los valores  $W_n = 320 \mu\text{m}$ ,  $W_p = 640 \mu\text{m}$ ,  $L = 2 \mu\text{m}$ , como por ejemplo:

```
<NOMBRE MODELO> L=2u W=320u Ad=750p As=550p Pd=330u Ps=220u nrd=0.1 nrs=0.1
```

En particular reemplazando con el nombre del modelo para el MOSFET tipo N:

```
RIT4007N7 L=2u W=320u Ad=750p As=550p Pd=330u Ps=220u nrd=0.1 nrs=0.1
```

**Modelo propio:** La otra simulación, la del modelos propio, que es una de las últimas tareas que hay que hacer, es necesario generar un modelo de *Spice* elemental (**LEVEL 1**, el más simple de todos) de MOSFETs a partir de los datos  $k$ ,  $V_T$  y  $\lambda$  obtenidos del ajuste de las mediciones experimentales (Ver sección 5). El modelo debe ser único y no puede variar según la simulación a realizar. La directiva de *Spice* para generar el modelo propio es:

```
.model <nombre del modelo> NMOS(LEVEL=1
      +VT0=<valor> KP=<valor> LAMBDA=<valor>
      +W=<valor> L=<valor>)
```

**NOTA:** El parámetro  $KP = \mu C'_{ox}$  y se debe considerar el mismo  $W$  y  $L$  que el modelo provisto.

**Simulaciones:** Al realizar las simulaciones, con cualquiera de los modelos, estaremos relevando dos tipos de curvas, la de transferencia y la de salida. Específicamente las curvas que vamos a relevar son:

- $I_D$  vs.  $V_{DS}$  (curva de salida) para  $V_{GS}$  constante tal que en saturación  $I_D \simeq \{1 \text{ mA}, 2 \text{ mA}, 3 \text{ mA}\}$ , cuando  $V_{DS} \simeq 5 \text{ V}$  (tres curvas en total). Al relevar esta curva  $V_{DS}$  debe variar de  $0 \text{ V}$  a  $5 \text{ V}$ . En la simulación se debe utilizar dos fuentes de tensión, una fija, para  $V_{GS}$  y otra variable para  $V_{DS}$ .
- $I_D$  vs.  $V_{GS}$  (curva de transferencia) con  $V_{DS} = V_{GS}$  (modo diodo). Al relevar esta curva  $V_{GS}$  debe variar de  $0 \text{ V}$  a  $5 \text{ V}$ . En la simulación se debe utilizar una única fuente de tensión variable para  $V_{GS} = V_{DS}$ .

## 2. Obtención de parámetros iniciales

En esta tarea se realiza un análisis de las hojas de datos de los diferentes fabricantes, así como también se utilizan simulaciones del modelo del complejo. Todo en busca de un conjunto de parámetros iniciales.

**Hojas de datos:** Para el caso de las hojas de datos, se deben buscar las de varios fabricantes y analizarlas en busca de los parámetros del modelo teórico  $k$ ,  $V_T$  y  $\lambda$ . Para cada hoja de datos, indique si fue posible obtener alguna estimación de un parámetro (o si no fue posible) y el método



utilizado. **IMPORTANTE:** Lo más probable es que no pueda extraer ningún parámetro deseado directamente de las hojas de datos y deba basarse únicamente en las simulaciones.

**Simulación del modelo complejo:** Aquellos parámetros que no se hayan podido obtener a partir de las hojas de datos (posiblemente todos), se deben estimar a partir de la simulación del modelo del complejo (ver sección 1). Se debe utilizar la simulación de la curva de transferencia en modo diodo para estimar los parámetros  $k$  y  $V_T$ . Y posteriormente utilizar las curvas de transferencia para estimar  $\lambda$ . Para esta primera estimación se debe utilizar algún criterio fijado por el grupo. No es necesario que se realice utilizando algún método formal, sino más bien una estimación *a ojo* de los parámetros.

### 3. Mediciones experimentales

En el laboratorio se deben medir las mismas curvas que se relevaron en la simulación.

- $I_D$  vs.  $V_{DS}$  (curva de salida) para  $V_{GS}$  constante tal que en saturación  $I_D \simeq \{1 \text{ mA}, 2 \text{ mA}, 3 \text{ mA}\}$ , cuando  $V_{DS} \simeq 5 \text{ V}$  (tres curvas en total). Al relevar esta curva  $V_{DS}$  debe variar de 0 V a 5 V.
- $I_D$  vs.  $V_{GS}$  (curva de transferencia) con  $V_{DS} = V_{GS}$  (modo diodo). Al relevar esta curva  $V_{GS}$  debe variar de 0 V a 5 V.

Todas las curvas deben medirse para el mismo transistor. Al momento de medir, tomar nota de la marca y modelo de los instrumentos utilizados.

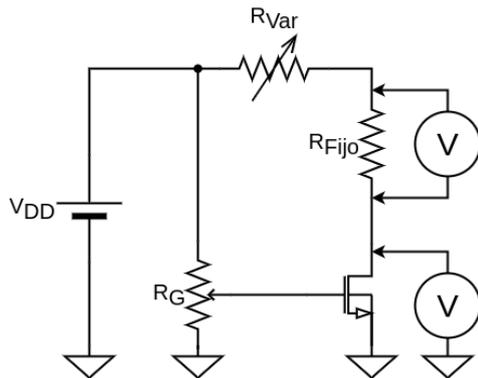
Para realizar las mediciones, es necesario que cada grupo traiga los materiales de la siguiente lista:

- Al menos un circuito integrado **CD4007**.
- Hoja de datos del CD4007 (en formato digital o impresa).
- Un protoboard.
- *Preset* multivuelta 1 k $\Omega$ .
- *Preset* multivuelta cuyo valor debe ser calculado.
- Resistores fijos cuyos valores deben ser calculados.
- Un destornillador de tipo plano para variar el valor de resistencia del *preset* (pequeño similar al tipo relojero).
- Cables unipolares para las conexiones en el protoboard.
- (En caso de disponer) Multímetros digitales.

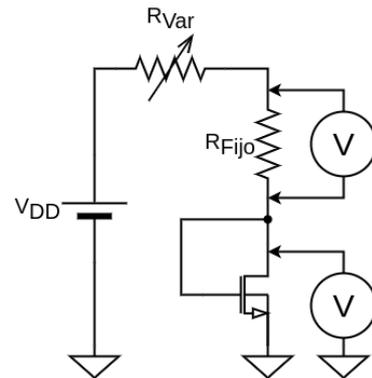
**Curvas de salida:** La primera medición a realizar corresponde a la familia de curvas de salida  $I_D$  vs.  $V_{DS}$ . Para llevar a cabo estas mediciones se debe fijar la fuente en 5 V y luego utilizar el preset de 1 k $\Omega$  para obtener  $V_{GS}$  **constante** correspondiente a la corriente de saturación deseada. Conectar el otro preset en modo *resistor variable* en serie con la el resistor fijo ( $R_{Fijo}$ ) y entre el terminal *Drain* y la fuente de alimentación. Al barrer el valor del resistor se variará la tensión  $V_{DS}$  de forma tal que puedan medirse puntos del transistor operando tanto en modo triodo como en saturación<sup>1</sup>. Un multímetro debe utilizarse para medir la tensión  $V_{DS}$  y el otro para medir la caída de tensión sobre el resistor fijo. A partir de este valor y habiendo medido previamente el valor del resistor se puede obtener el valor de la corriente entrante en el terminal de *Drain*. En la Figura 2a se puede ver el banco de mediciones que se debe utilizar para relevar la curva de salida.

**IMPORTANTE:** (1) No olvidarse de relevar el valor de  $V_{GS}$  pra cada una de las mediciones. (2) A

<sup>1</sup>Ver Apéndice A para más detalles sobre la Recta de Carga



(a) Banco de medición curva de salida.



(b) Banco de medición curva de transferencia.

la hora de despejar la corriente de *drain*, no confiar en el valor nominal de la resistencia, sino medir su valor utilizando el multímetro y no olvidarse de dejarlo asentado.

**SUGERENCIA:** Medir al menos 30 puntos de cada curva espaciados lo más uniformemente posible. Además medir siempre la tensión con la mayor precisión posible (mayor cantidad de cifras significativas).

**Curva de transferencia - modo diodo** La segunda medición que debe realizarse es la curva  $I_D$  vs.  $V_{GS}$ . Para llevar a cabo estas mediciones se debe fijar la fuente en 5 V. Luego utilizando el preset en modo resistencia variable en serie con el resistor de valor fijo, unir la salida de la fuente con los terminales de *gate* y *drain* (deben estar cortocircuitados). Al variar el valor del preset se podrán observar distintos valores para  $V_{GS} = V_{DS}$  y por lo tanto, distintos valores para  $I_D$  también. Al igual que en la medición anterior el valor de  $I_D$  se obtiene de manera indirecta al despejarlo de la tensión medida sobre el resistor fijo. En la Figura 2b se puede ver el banco de mediciones que se debe utilizar para relevar la curva de transferencia.

**NOTA:** El banco experimental a utilizar en ambas mediciones sólo dispondrá de una fuente de tensión variable (que en todos los casos debe fijarse en 5 V) y dos multímetros que serán utilizados en modo voltímetro, para todas las mediciones.

#### 4. Cálculos previos

Al momento de realizar las mediciones es necesario contar un resistor fijo y uno variable (implementado con un *preset*), cuyos valores deben ser calculados previamente.

**Resistor fijo:** Para calcular el valor del resistor fijo debe considerar:

- El multímetro se utilizará en su escala más pequeña, 200 mV o 2000 mV, según el modelo. Si no tiene el multímetro a mano a la hora de realizar esto cálculos utilice la escala de 2000 mV.
- Se deben poder medir corrientes entre 0 y 5 mA.
- Se debe utilizar el menor valor posible de resistencia que permita alcanzar los valores de corriente deseados.

**Preset:** Para el cálculo del valor del preset, se debe tener en cuenta que para las curvas de salida se debe ser posible medir corrientes de la mitad del mínimo valor de corriente de saturación, o menores, es decir, 5 mA o menos. Para el caso de las curvas de transferencia en modo diodo, se deben poder me-



dir valores de  $100 \mu\text{A}$  o menores. En caso de obtener dos valores distintos para los preset, traer ambos.

**SUGERENCIA:** Para realizar los cálculos utilizar el apéndice A.

## 5. Obtención de parámetros mediante ajuste

Tanto los puntos que se obtienen de las mediciones como de las simulaciones pueden ser ajustados para extraer, a partir de ellos, una estimación de los parámetros del modelos subyacente. En este trabajo no se pretende que el alumno adquiera los conocimientos para la realización de estos ajuste, sino que la cátedra brinda los *scripts* necesarios para su realización, junto con una guía para su utilización. Para aquellos alumnos interesado en el funcionamiento de los *scripts*, se dará una clase extra virtual en dónde se abarcarán estos temas. La cátedra brinda *scripts* para *python* y *octave*, *ajuste.py* y *ajuste.m* respectivamente. Para su utilización se debe:

1. Guardar las simulaciones o mediciones en archivos `.csv` en una misma carpeta, con un formato específico.
2. Descargar el script correspondiente y guardarlo en la misma carpeta que los archivos `.csv`. Modificar algunos valores en el script.
3. Ejecutar el script y observar los resultados.

**Archivos `.csv`:** Los puntos obtenidos mediante mediciones o simulaciones serán guardados en archivos `.csv` con el siguiente formato:

- La primera fila se ignora, puede ser utilizada para identificar las columnas con nombres.
- La primera columna debe contener los valores de tensión  $V_{DS}$ , en V.
- La segunda columna debe contener los valores de corriente  $I_D$ , en A.
- Los valores deben estar separados por una coma, ‘,’ y no con tabuladores como lo entrega el *LTSpice*. Así que el archivo con valores que arroja el *LTSpice* debe ser modificado. Si por el contrario se desean utilizar tabuladores, entonces lo que se debe cambiar es el script.
- Puede tener tantas filas como se desee, pero solo puede tener 2 columnas.

Por cada simulación o medición se van a generar 3 de estos archivos, uno para cada corriente de saturación distinta o equivalentemente para cada  $V_{GS}$  distinta. Un ejemplo reducido de este archivo es el siguiente:

```
1 V, I
2 0.100000, 0.000293
3 0.250000, 0.000580
4 0.400000, 0.000759
5 0.550000, 0.000853
6 0.700000, 0.000890
```

El número a la izquierda sólo está indicando el número de línea. Adicionalmente a estos 3 archivos, se debe generar uno nuevo con:

- Una columna y cuatro filas.
- La primera fila se ignora.
- Las otras tres filas deben contener los valores de  $V_{GS}$  utilizados en cada una de las curvas de salida. El orden de estos valores importa. Esto se explica a continuación, en la sección de modificaciones al script.



Un ejemplo de este archivo es el siguiente:

```
1 VGS_X
2 2.85
3 3.40
4 3.85
```

El número a la izquierda sólo está indicando el número de línea.

**Descarga y modificaciones:** En el caso de utilizar *python* se debe descargar el archivo `ajuste.py` en la misma carpeta que los archivos `.csv` y ajustar la sección de código que se muestra a continuación:

```
1 k0      = 1e-3 # Valor inicial para el parametro k.
2 vt0     = 1.0 # Valor inicial para el parametro VT.
3 lambda0 = 0.1 # Valor inicial para el parametro Lambda.
4 vdd     = 5.0 # Tension VDD utilizada en la fuente.
5 max_vt  = 4.0 # Maximo valor posible que se espera para VT,
6           # debe ser menor que VDD.
7
8 delimiter = ',' # Caracter utilizado para separar valores en
9               # los archivos .csv
10
11 # Nombres de los archivos con los datos en el siguiente orden:
12 # 1. Tensiones vgs (en orden: vgs1, vgs2, vgs3)
13 # 2. Tensiones vds e id para la vgs1 (id=id1=1mA)
14 # 3. Tensiones vds e id para la vgs2 (id=id2=2mA)
15 # 4. Tensiones vds e id para la vgs3 (id=id3=3mA)
16 file_vgs_list = 'CD4007_N1_vgs.csv'
17 file_vds_id_1 = 'CD4007_N1_Salida_VGS1.csv'
18 file_vds_id_2 = 'CD4007_N1_Salida_VGS2.csv'
19 file_vds_id_3 = 'CD4007_N1_Salida_VGS3.csv'
```

De manera similar, en el caso de utilizar *octave* se debe descargar el archivo `ajuste.m` en la misma carpeta que los archivos `.csv` y ajustar la sección de código que se muestra a continuación:

```
1 k0      = 1e-3; % Valor inicial para el parametro k.
2 vt0     = 1.0; % Valor inicial para el parametro VT.
3 lambda0 = 0.1; % Valor inicial para el parametro Lambda.
4 vdd     = 5.0; % Tension VDD utilizada en la fuente.
5 max_vt  = 4.0; % Maximo valor posible que se espera para VT,
6           % debe ser menor que VDD.
7
8 delimiter = ','; % Caracter utilizado para separar valores en
9               % los archivos .csv
10
11 % Nombres de los archivos con los datos en el siguiente orden:
12 % 1. Tensiones vgs (en orden: vgs1, vgs2, vgs3)
13 % 2. Tensiones vds e id para la vgs1 (id=id1=1mA)
14 % 3. Tensiones vds e id para la vgs2 (id=id2=2mA)
15 % 4. Tensiones vds e id para la vgs3 (id=id3=3mA)
16 file_vgs_list = 'CD4007_N1_vgs.csv';
17 file_vds_id_1 = 'CD4007_N1_Salida_VGS1.csv';
18 file_vds_id_2 = 'CD4007_N1_Salida_VGS2.csv';
19 file_vds_id_3 = 'CD4007_N1_Salida_VGS3.csv';
```

En ambos casos la variables que hay que ajustar son:

1.  $k_0$ : Valor del parámetro  $k$  inicial.
2.  $vt_0$ : Valor del parámetro  $V_T$  inicial.
3.  $\lambda_0$ : Valor del parámetro  $\lambda$  inicial.



4. `vdd`: Tensión utilizada en la fuente de alimentación durante las mediciones en el laboratorio, debería ser cercano a 5 V.
5. `max_vt`: Máximo valor que puede tomar  $V_T$ . Debe ser menor que el valor de `vdd`. Un valor entre 3 V y 4 V debería ser adecuado para este trabajo.
6. `delimiter`: Caracter utilizado para separar las columnas en el archivo `.csv`. La coma debería ser el caracter correspondiente.
7. `file_vgs_list`: Nombre del archivo conteniendo los tres valores utilizados para  $V_{GS}$ . Los valores de  $V_{GS}$  deben estar en orden:  $V_{GS1}$ ,  $V_{GS2}$  y  $V_{GS3}$ .
8. `file_vds_id_1`: Nombre del archivo conteniendo las mediciones o simulaciones de  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  correspondiente al primer valor de  $V_{GS} = V_{GS1}$ .
9. `file_vds_id_2`: Nombre del archivo conteniendo las mediciones o simulaciones de  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  correspondiente al primer valor de  $V_{GS} = V_{GS2}$ .
10. `file_vds_id_3`: Nombre del archivo conteniendo las mediciones o simulaciones de  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  correspondiente al primer valor de  $V_{GS} = V_{GS3}$ .

Respecto de los nombres utilizados para los archivos, no hay ninguna restricción, pero se recomienda utilizar los siguientes, que ya están semi-preparados en los *scripts*:

- Mediciones:
  - `med_vgs.csv`
  - `med_salida_vgs1.csv`
  - `med_salida_vgs2.csv`
  - `med_salida_vgs3.csv`
- Simulación del modelo complejo:
  - `sim_vgs.csv`
  - `sim_salida_vgs1.csv`
  - `sim_salida_vgs2.csv`
  - `sim_salida_vgs3.csv`
- Simulación del modelo del propio:
  - `simpropio_vgs.csv`
  - `simpropio_salida_vgs1.csv`
  - `simpropio_salida_vgs2.csv`
  - `simpropio_salida_vgs3.csv`

### Ejecución del script:

Una vez abierto el *prompt* de *ipython* se debe ejecutar el comando `%run ajuste.py`. A continuación se muestra un ejemplo:

```
In [1]: $run ajuste.py
0: k = 0.1000000000; V_T = 1.000000000; Lambda = -0.0000000000
1: k = 0.1000000000; V_T = 1.000000000; Lambda = 0.0000000000
2: k = 0.1000000000; V_T = 1.000000000; Lambda = 0.0000000000
Los parámetros finales son:
-> k = 0.10000000000000000000;
-> V_T = 1.0000000000000000;
-> Lambda = 0.0000000000000000;
```

Mientras que desde la consola de *octave* se debe ejecutar directamente el script introduciendo su nombre `ajuste`. A continuación se muestra un ejemplo:



```
octave:1> ajuste
1: k = 0.100000; V_T = 1.000000; Lambda = -0.000000
2: k = 0.100000; V_T = 1.000000; Lambda = 0.000000
3: k = 0.100000; V_T = 1.000000; Lambda = 0.000000
Los parámetros finales son:
-> k = 0.100000;
-> V_T = 1.000000;
-> Lambda = 0.000000;
```

## Comparaciones, gráficos e informe

En particular para este trabajo práctico se debe cumplir con los siguientes puntos.

### 6. Desarrollo

- Presentar los circuitos esquemáticos correspondientes a cada una de las simulaciones realizadas, indicando en cada caso todos los parámetros utilizados en la simulación.
- Presentar los circuitos esquemáticos de los bancos de medición empleados, indicando no sólo la conexión del transistor, fuentes de tensión y resistencias, sino también de los instrumentos empleados. Incluir los valores de los resistores fijos y variables.
- Indicar marca y modelo de los instrumentos utilizados.
- Presentar el detalle del modelo de *Spice* generado.
- Presentar los parámetros resultantes de **TODOS** los ajustes realizados.
- Se deben presentar los valores de  $V_{GS1}$ ,  $V_{GS2}$  y  $V_{GS3}$  correspondientes a los valores de corrientes de saturación  $I_{D1} = 1 \text{ mA}$ ,  $I_{D2} = 2 \text{ mA}$  e  $I_{D3} = 3 \text{ mA}$  utilizados en cada una de las simulaciones y/o mediciones de las curvas de salida.
- Utilizar tablas para presentar los resultados numéricos y sus errores (o diferencias) por ejemplo al comparar los distintos conjuntos de parámetros obtenidos a lo largo del trabajo.
- Las imágenes o gráficos que se incluyan en el trabajo deben ser claras, aportar información, estar correctamente rotuladas e incluir un epígrafe con una explicación.
- Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado.

### 7. Análisis y comparación de los resultados

Todo resultado presentado en el informe debe estar analizado. Se espera que en este trabajo se incluyan resultados y/o análisis de los siguientes puntos:

**Parámetros ajustados:** Se debe realizar una comparación **cuantitativa** sobre todos los conjuntos de parámetros. Se recomienda la utilización de una tabla para resumir los valores de los parámetros y sus errores o diferencias.

**Valores de  $V_{GS}$ :** Se deben relevar y comparar **cuantitativa** todos los valores de  $V_{GS}$  utilizados para las curvas de salida (tanto en simulaciones como en mediciones). Se recomienda la utilización de una tabla para resumir los valores de  $V_{GS}$  y sus errores o diferencias.

**Curvas de salida:** Se deben comparar **cualitativamente** las curvas de salida entre los distintos modelos y/o parámetros. Se deben identificar las zonas de las curvas que corresponden a los diferentes



regímenes de funcionamiento del transistor. Además, en cada uno de los casos, se deben extraer a ojo los valores de las  $V_{DS}$  de saturación. Estos valores deben ser comparados **cuantitativamente**. Se recomienda la utilización de una tabla para resumir los valores de  $V_{DS}$  y sus errores o diferencias.

**Curvas de transferencia:** Se deben comparar **cualitativamente** las curvas de transferencia entre los distintos modelos y/o parámetros. Se deben identificar las zonas de las curvas que corresponden a los diferentes regímenes de funcionamiento del transistor.

**Conclusiones:** Se deben analizar todos los resultados y se debe elaborar una conclusión sobre las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos. Además de debe incluir un análisis cuál es el mejor modelo y conjunto de parámetros y porqué, y sobre cuál es el modelo y conjunto de parámetros que mejor se ajusta a la realidad y porqué.

## 8. Sugerencias para la elaboración de gráficos

La comparación debe hacerse superponiendo en un único gráfico todos los resultados obtenidos para cada curva. Los gráficos deben ser claros y compactos. Es importante utilizar escalas adecuadas para que la presentación sea fácilmente comprensible. Debe analizarse si los resultados son compatibles o no. De existir diferencias éstas deben ser cuantificadas.

El informe debe contener al menos 2 gráficos:

1. Curvas de salida del transistor:  $I_D$  vs.  $V_{DS}$ , para cada uno de los casos pedidos (1 mA; 2 mA; 3 mA). Este gráfico debe incluir todas las curvas teóricas y puntos mencionados en la sección “*Enunciado*”. En el caso de incluir las curvas (o puntos) para todas las corrientes de saturación, este gráfico tendrá 21 curvas (o puntos). Si esto hace que el gráfico quede muy cargado y sea ilegible, entonces puede dividirlo en 3 gráficos distintos, uno para cada corriente de saturación.
2. Curva de transferencia del transistor:  $I_D$  vs.  $V_{GS}$  en modo diodo. Este gráfico debe incluir todas las curvas teóricas y puntos mencionados en la sección “*Enunciado*”.

En todos los gráficos debe figurar una leyenda indicando a qué corresponde cada curva (medición y simulación), se puede utilizar la misma nomenclatura que en este enunciado. Ubicar esta leyenda dentro del gráfico de forma que no dificulte la visualización de las curvas.

Se deben graficar los puntos medidos o simulados con *markers*, mientras que las curvas teóricas deben graficarse con línea continua. Si una curva teórica se corresponden con un conjunto de puntos, ambos deben llevar el mismo color. **SUGERENCIA:** Los puntos de simulación pueden ser demasiados y solaparse entre sí, haciendo que el gráfico no se vea correctamente. En estos casos limitar la cantidad de puntos saltando algunos, por ejemplo, graficar 1 de cada 10 puntos. Se recomienda utilizar entre 30 y 50 puntos.

## 9. Otras sugerencias

- Realizar las simulaciones de LTSpice del modelo complejo previamente al día de las mediciones. Esto en realidad es obligatorio, porque estas simulaciones se deben utilizar para la estimación inicial de parámetros.
- Realizar las simulaciones de LTSpice del modelo propio previamente al día de las mediciones, utilizando un conjunto de parámetros inventado. De esta manera, podrán consultar en caso de tener alguna dificultad.
- Realizar el ajuste del modelo complejo previamente al día de mediciones. De esta manera, podrán consultar en caso de tener alguna dificultad.



- Leer el documento *Guía para la elaboración de informes* que se encuentra disponible en el campus de la materia.
- Al finalizar el informe, leerlo para encontrar cualquier incoherencia en la continuidad del texto, problema de redacción, y/o falta de ortografía.



# Apéndices

## A. Recta de carga

El circuito de la Figura 3a permite medir las curvas de salida  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  (para  $V_{GS}$  constante). La tensión  $V_{GS}$  es seleccionada, para cada una de ellas, a partir del resistor variable  $R_G$ . Por otro lado,  $R_D$  es la resistencia con la cual es posible ir modificando la tensión  $V_{DS}$  para conseguir barrer su valor dentro de cierto rango en el cual se quiera estudiar las curvas. La tensión que caiga en dicha resistencia dependerá del régimen de operación del transistor y del valor de la misma.

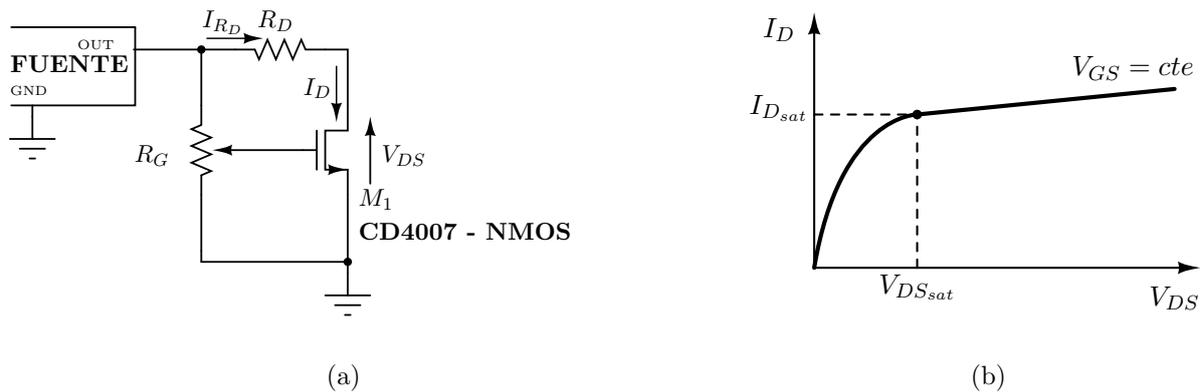


Figura 3: (a) Circuito sugerido para la medición de la curva  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  de los transistores del circuito integrado **CD4007**. (b) Esquema del resultado que se espera obtener.

Para calcular el valor adecuado de  $R_D$  se plantea la condición  $I_D = I_{R_D}$  y la *mallita de salida*

$$V_{DD} - I_{R_D} \times R_D - V_{DS} = 0 \Rightarrow I_D = \frac{V_{DD}}{R_D} - \frac{V_{DS}}{R_D}$$

y se resuelve gráficamente, como se muestra en la Figura 4.

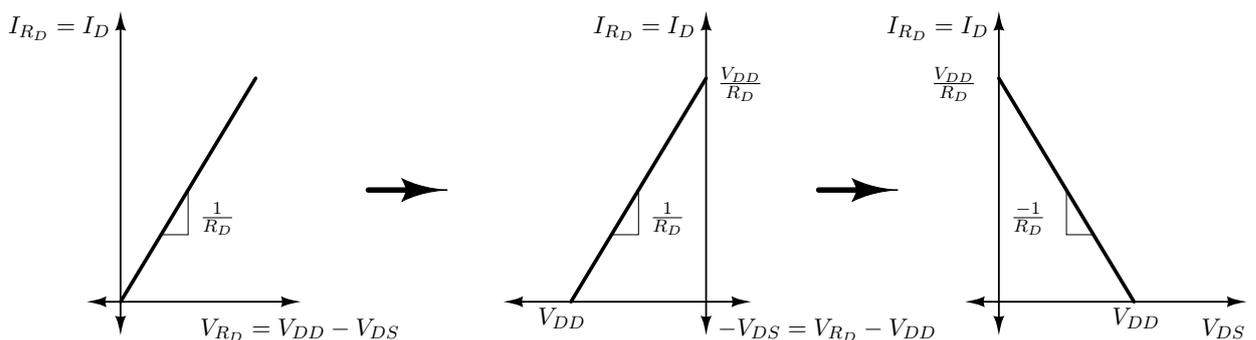


Figura 4: Resolución gráfica de los valores posibles de  $I_D$  y  $V_{DS}$  de acuerdo al resistor  $R_D$  utilizado.

Superponiendo la curva de la Figura 4 con la curva de salida característica del transistor se obtiene el valor de  $I_D$  resultante, es decir, se resuelve la tensión  $V_{DS}$  que satisface  $I_D = I_{R_D}$ , como se ilustra en la Figura 5a. Entonces, para medir la curva  $I_D$  vs.  $V_{DS}$  (para  $V_{GS}$  constante) lo que se hace es elegir un rango de valores de  $R_D$  apropiado, tal que al variarla se consiga relevar tanto la región de codo como la región de saturación de la curva  $I_D$  vs.  $V_{DS}$ , como se ilustra en la Figura 5b.

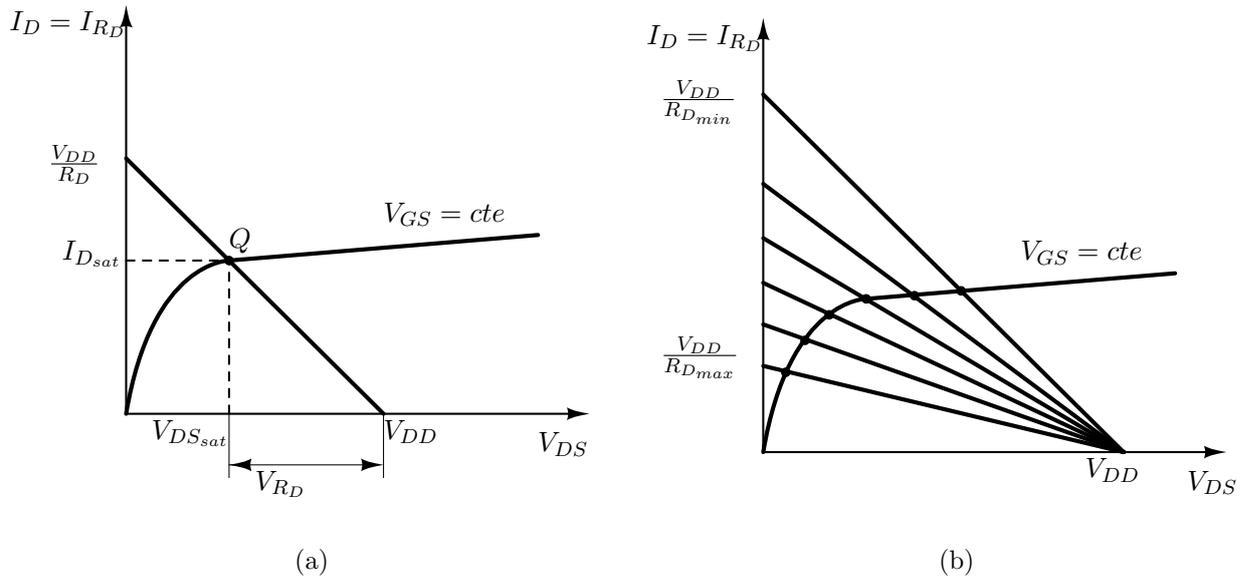


Figura 5: Resolución gráfica del valor de  $I_D$  y  $V_{DS}$  de acuerdo a la variación del resistor  $R_D$  y a la tensión  $V_{DD}$ .

La dificultad del circuito de la Figura 3a está en calcular el valor de  $R_D$  apropiado a partir de los datos de  $V_T$  y de  $I_{D(sat)}$  obtenidos en la medición experimental de la curva  $I_D$  vs  $V_{GS}$ , el posterior cálculo del rango razonable de valores a utilizar para  $R_D$ , y finalmente obtener el valor de  $R_D$  que permita obtener mejores resultados en la medición de la curva  $I_D$  vs  $V_{DS}$  mediante el método de prueba y error.