

BIBLIOTECA SOFTWARE DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Espinosa F., Mazo M., García R., Ureña J., García J.

Universidad de Alcalá de Henares
Escuela Universitaria Politécnica
Departamento de Electrónica
Campus Universitario s/n 28871 Alcalá de Henares (Madrid)

Tfno: (91) 8854810
Fax: (91) 8854805
e-mail: ELDEP@alcala.es

RESUMEN

El objetivo de esta ponencia se centra en la presentación de una alternativa válida al método tradicional con que se aborda el conocimiento y comprensión de dispositivos electrónicos basados en estructuras semiconductoras. La iniciativa que planteamos: Programa de Modelado y Simulación de Dispositivos, tanto por su planteamiento, formativo y atractivo, como por su desarrollo, generando un entorno "amigable" e interactivo, puede servir de pauta para una ambiciosa meta: creación de una "Biblioteca Software de Dispositivos Electrónicos". En cualquier caso, y a modo de muestra, nos serviremos del transistor MOS -MOST- como ejemplo de puesta en práctica de este tipo de herramienta software orientada a la docencia.

1. INTRODUCCIÓN

Si a la necesidad impuesta, en los ámbitos universitario y profesional, de manejar una documentación cada vez más variada y voluminosa, unimos la posibilidad de generar entornos "amigables" e interactivos para el que el usuario acceda a partes específicas de la misma, el resultado es inmediato: una creciente exigencia de medios informáticos como herramienta para el aprendizaje de las más diversas disciplinas.

Centrándonos en el marco de conocimiento de los Dispositivos Electrónicos, ¿por qué no elaborar una solución eficaz, constructiva, rápida y a su vez atractiva, a cuestiones

sobre dispositivos semiconductores como por ejemplo :

- Cuál es su estructura física y qué fenómenos la justifican.
- Qué modelos matemáticos permiten describir su comportamiento para prever y optimizar su respuesta electrónica.
- Cuál es el grado o nivel de aproximación de dicho modelo y factores despreciables para determinarlo.
- Cómo influyen los distintos parámetros en la respuesta eléctrica descrita por la característica tensión-corriente (V-I). Parámetros tanto dimensionales como propios de la naturaleza de los materiales utilizados en el proceso de su fabricación.

entre otras ?.

Con nuestro Programa [1], pretendemos ofrecer una alternativa válida a la vía tradicional de acercamiento a la comprensión de un determinado dispositivo electrónico. Como el abanico tanto de estructuras semiconductoras como de componentes derivados de ellas es amplio, nos hemos inclinado por uno de los componentes activos más representativos: el transistor MOS; no entraremos aquí a justificar las razones de tal decisión. Con todo, el trabajo aquí presentado puede servir de guía, tanto por su planteamiento conceptual como por el modo de desarrollarlo, de lo que podría ser una ambiciosa meta: la confección de una "**Biblioteca Software de Dispositivos Electrónicos**".

2. DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA BASE

Las características básicas que ha de reunir el programa patrón que permita articular al mentada biblioteca quedan reflejadas en el "Programa de Modelado y Simulación del Transistor MOS" que hemos diseñado y cuyas líneas maestras pasamos a describir.

La máxima que se ha seguido para la puesta a punto del producto final no ha sido otra que facilitar la comprensión de los fenómenos físicos confluyentes en el principio de funcionamiento del dispositivo electrónico bajo estudio, en nuestro caso el basado en la estructura Metal-Óxido-Semiconductor-, tratando de justificar así su comportamiento eléctrico en régimen continuo o estático (obtención de curvas características corriente-tensión).

El programa cuenta con una parte fundamentalmente descriptiva, concebida para aliviar el considerable esfuerzo de abstracción al que, tradicionalmente, ha de enfrentarse el alumno, o profesional técnico en general, que trata de acercarse al conocimiento de un dispositivo electrónico. Además, existe otra parte, eminentemente interactiva, en la que el usuario es el protagonista seleccionando los parámetros que determinan el modelado del dispositivo en aras de simular su comportamiento (curvas I-V) en las diferentes regiones de trabajo: corte, óhmica o gradual, y saturación.

El programa está estructurado en base a menús encadenados que permiten guiar al usuario hasta acceder a una información puntual. Los menús responden al esquema global articulado en torno a tres grandes bloques como se muestra en la figura 1.

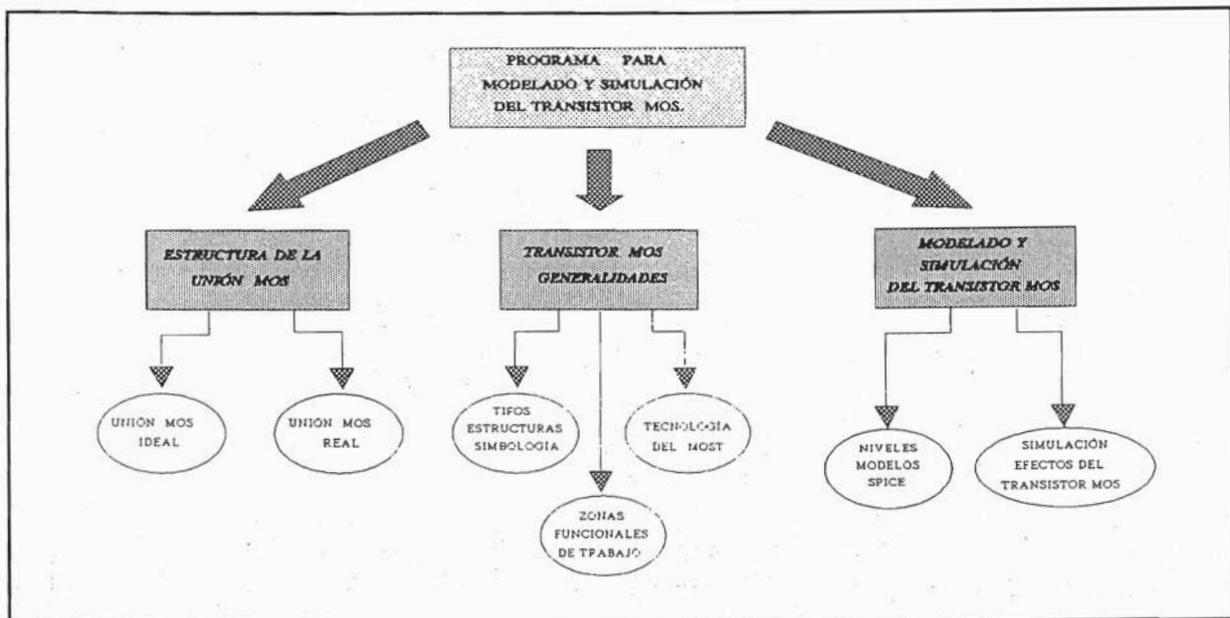


Figura 1. Estructura del "Programa de Modelado y Simulación del Transistor MOS"

En el primero de ellos, se trata de abordar, con cierto detalle, los mecanismos físicos que justifican el comportamiento de la unión MOS (estructura de dos terminales representada en la figura 2) como conocimiento previo fundamental para la comprensión del principio de funcionamiento del transistor MOS (estructura de cuatro terminales que engloba a la anterior, concretamente la región del canal, que permite el flujo de portadores entre fuente y drenador, se construye a partir de la unión MOS) [2].

Los diferentes submenús van dejando constancia de la acción de la polarización externa sobre aspectos de la unión como: el diagrama de bandas de energía; distribución de carga, campo y potencial eléctrico en las diferentes zonas de funcionamiento (acumulación, depleción e inversión); aspectos secundarios a considerar en la unión MOS real (cargas en la capa de óxido, en la interfase Si-SiO₂, etc). De esta forma se ilustra, gráfica y simbólicamente, cómo se ha de polarizar la puerta (metal) V_G con respecto al sustrato (semiconductor) V_S para conseguir una inversión de portadores en la región de éste próxima al óxido, situación perfectamente trasladable a la consecución de canal en un transistor MOS de acumulación.

En el segundo bloque temático, descriptivo como el anterior, aprovechamos los conocimientos adquiridos de la unión MOS para presentar la estructura de cuatro terminales (fuente, drenador, puerta y sustrato) del transistor MOS básico -MOS de acumulación de canal n-, ver figura 3. El estudio de este dispositivo se realiza desde diferentes puntos de vista: a) tecnológico (fases y procesos implicados en la fabricación del transistor a partir de una oblea de silicio), y b) electrónico (corriente por el canal en función de la polarización puerta-sustrato y drenador-fuente, haciendo hincapié en los diferentes modos de respuesta eléctrica, del mismo dispositivo, según la zona de trabajo: corte, óhmica y saturación), [2] y [3].

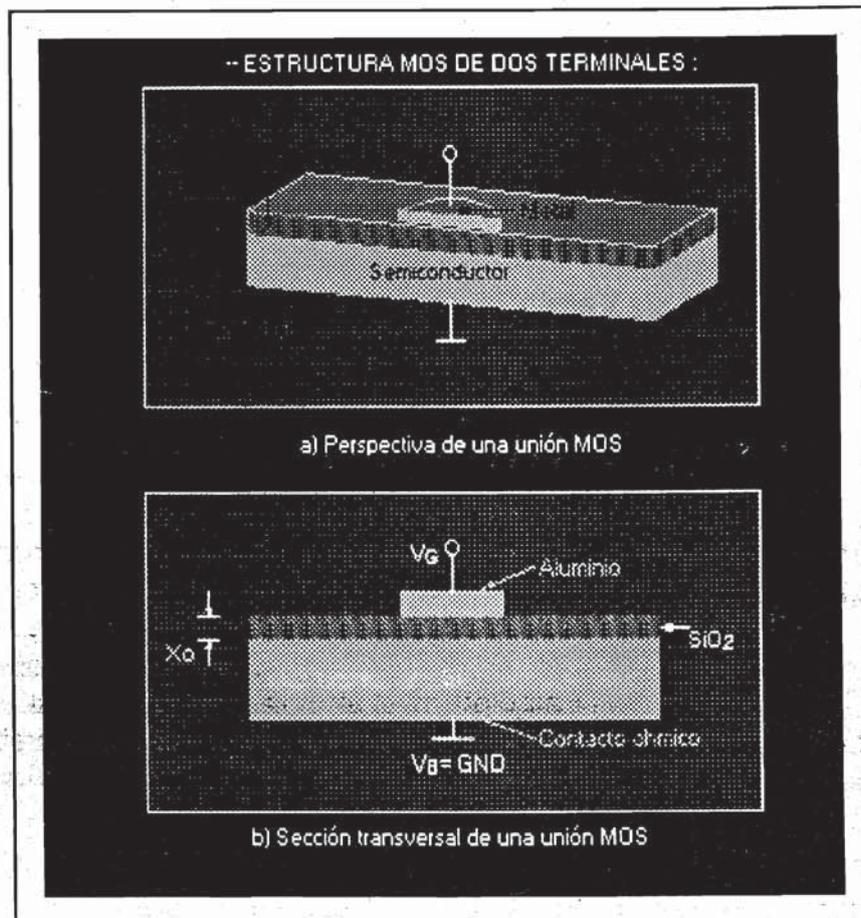


Figura 2. Estructura de la unión MOS

En el tercer y último bloque se persiguen dos objetivos: que el usuario sea consciente de cómo se contemplan los diferentes fenómenos físicos, ya comentados en los bloques temáticos previos, en parámetros (ligados a la naturaleza del sustrato, tipo y concentración de dopado de fuente y drenador, longitud y anchura del canal, espesor de la capa de óxido, etc) incluidos en las ecuaciones de comportamiento –modelo matemático del dispositivo–, y cómo actuando sobre esos parámetros se modifica la respuesta eléctrica –simulación del dispositivo–. Para el modelado se ha recurrido a los niveles 1, 2 y 3 utilizados en SPICE –Simulator Program with Integrated Circuit Emphasis–, programa de simulación, de propósito general, considerado como estándar en el diseño electrónico. En el nivel 1, se trabaja con relaciones matemáticas relativamente sencillas, obviando todos los efectos de segundo orden que afectan al comportamiento del transistor; por tanto, este modelo simplificado es apropiado para un primer acercamiento al conocimiento y simulación del transistor. En el nivel 2, se introducen ecuaciones de comportamiento más elaboradas, aumentando considerablemente el número de parámetros, que reflejan aspectos físicos como: variación de la movilidad de los portadores con el campo eléctrico de puerta, conducción en la región de inversión débil, influencia de la geometría del canal en la tensión umbral de conducción, velocidad límite de los portadores, etc). En el nivel 3 se cuenta con un modelo más empírico que el anterior, salvando así la complejidad del nivel 2 y, por

ende, la carga operativa asociada al nivel 2 (lo que dificulta la posterior simulación del dispositivo en base a este modelo, no obstante es capaz de proporcionar resultados bastante aceptables; con el inconveniente de que el ajuste de parámetros es más crítico [3], [4], [5] y [6].

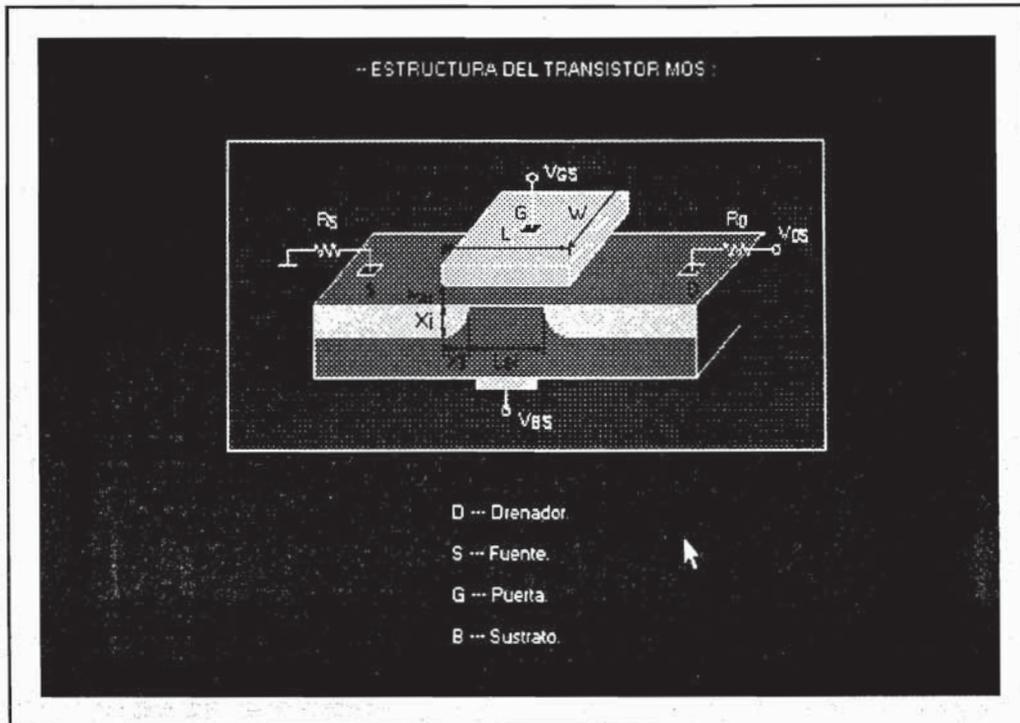


Figura 3. Estructura del transistor MOS de acumulación y canal N

En las figuras, de la 4 a la 6, se da una visión general del aspecto que presenta el Programa de Modelado y Simulación del Transistor MOS en lo que atañe a la respuesta de simulación del comportamiento estático de dichos dispositivos electrónicos.

3. EL PROGRAMA BASE COMO HERRAMIENTA DOCENTE

Adviértase que, amén de la carga novedosa, atractiva y de rigurosidad de contenidos, el mayor potencial de este Programa Orientado a la Docencia del Transistor MOS radica en la capacidad de conjugar aspectos **informativos** (descripción de estructuras semiconductoras) y **formativos** (interactividad del usuario para decidir los cambios a introducir en el modelo a simular), aspectos ambos esenciales en la preparación técnica de cualquier discente.

Con todo, y dadas las propiedades de la herramienta presentada, ésta parece abocada a su utilización dentro de un contexto eminentemente docente. No obstante, y en aras de un máximo aprovechamiento del producto, habría que fijar algunas pautas sobre su puesta en práctica:

- Titulaciones y materias apropiadas para la inclusión de esta herramienta de trabajo y estudio. Al respecto pueden servir de referencia las Nuevas Titulaciones de Ingeniería ligadas a la Electrónica y Telecomunicaciones que recientemente han iniciado su andadura por toda España. Concretamente una de las materias troncales contempladas en sus Planes de Estudio: Componentes Electrónicos y Fotónicos, podría ser el marco adecuado.

- Riesgos y limitaciones derivadas de su incorrecto uso. Obviamente el Programa bajo estudio no está exento de carencias, lagunas que conviene tenerse presentes para, entre otras cosas, seguir trabajando en esta línea de Tecnologías aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica. Por una parte, la excesiva concentración de la atención del usuario en el transistor MOS de acumulación de canal n, puede ir en detrimento de una visión más generalista de transistores MOS, adviértase que los hay no sólo de canal P, sino algunos con principio de funcionamiento bastante diferenciando -MOS de deplexión-. Por otra parte, el producto presentado está orientado al comportamiento en régimen estático del dispositivo en cuestión, pero no se aborda el comportamiento en régimen dinámico, ni aspectos como el modelado del ruido y distorsión en el transistor MOS. En cualquier caso, estas carencias esenciales, que podrían deformar el aprendizaje del usuario autodidacta, pueden quedar subsanadas con la labor de un tutor que contribuya a enmarcar los contenidos del programa en el contexto apropiado.

Por último, cabe hacer mención a posibles modificaciones que mejoren la calidad del producto final conservando el espíritu formativo e informativo original. Nos referimos tanto a la parte descriptiva (incorporación de movimiento a las presentaciones de cargas, potenciales, estructura geométrica, etc, en función de variables internas o externas) como a la de simulación (inclusión de modelos para análisis en régimen dinámico, ruido, distorsión, etc, no sólo del MOS de acumulación de canal N, sino de otros dispositivos afines).

4. DESCRIPCIÓN COMPLETA DE MENÚ DEL PROGRAMA DE MODELADO Y SIMULACIÓN ORIENTADO A LA DOCENCIA DEL TRANSISTOR MOS

- 1.1.- Presentación.
- 1.2.- Unión MOS ideal. Diagrama de bandas de energía, sin polarizar.
- 1.3.- Unión MOS ideal. Diagrama de bandas de energía, con polarización.
- 1.4.- Unión MOS ideal. Zonas de funcionamiento.
- 1.5.- Unión MOS ideal. Distribución de carga, campo y potencial eléctrico.
 - 1.5.1.- Acumulación.
 - 1.5.2.- Deplexión.
 - 1.5.3.- Inversión.
 - 1.5.4.- Comparación de funciones en las distintas zonas.
- 1.6.- Unión MOS real. Condición de banda plana.
 - 1.6.1.- Efecto de la diferencia de funciones de trabajo.
 - 1.6.2.- Representación de cargas en la capa de óxido.
 - 1.6.3.- Efecto de la carga en la interfase Si-SiO₂.
 - 1.6.4.- Carga en la superficie del semiconductor debida a la distribución de carga

en el óxido.

- 1.6.5.- Condición de banda plana. Superposición de efectos.
- 1.7.- Funciones significativas de la unión MOS.
 - 1.7.1.- Balance de carga y potencial para una polarización V_{GB} arbitraria.
 - 1.7.2.- Concentración de portadores en la capa de inversión en función del potencial de superficie.
 - 1.7.3.- Componentes de la carga acumulada en la superficie del semiconductor.
 - 1.7.4.- Relación entre el potencial de polarización y el potencial en la superficie del semiconductor.
 - 1.7.5.- Carga en la capa de inversión en función de la tensión de polarización.
- 1.8.- Capacidad equivalente en pequeña señal.

- 2.1.- Presentación de la estructura del transistor MOS básico.
- 2.2.- Tipos de MOST. Estructura y simbología.
- 2.3.- Aspectos sobre la Tecnología del MOST.
 - 2.3.1.- Organigrama de fabricación de Circuitos Integrados MOS VLSI.
 - 2.3.2.- Procesos de fabricación:
 - 2.3.2.1.- Deposición, litografía y grabado.
 - 2.3.2.2.- Implantación iónica y difusión.
 - 2.3.2.3.- Ilustración de la estructura básica de la tecnología NMOS.
 - 2.3.3.- Secuenciamiento de máscaras características del inversor NMOS.
- 2.4.- Regiones de trabajo del MOST.
 - 2.4.1.- Zonas ON-OFF.
 - 2.4.2.- Zona gradual.
 - 2.4.3.- Zona de saturación.

- 3.1.- Modelo Nivel 1.
- 3.2.- Modelo Nivel 2.
 - 3.2.1.- Modelo Nivel 2, básico.
 - 3.2.1.1.- Representación del Modelo 2 básico.
 - 3.2.1.2.- Comparación entre Modelo 1 y 2 básico.
 - 3.2.2.- Modelo Nivel 2, completo.
 - 3.2.2.1.- Variación de la movilidad con el campo eléctrico de puerta.
 - 3.2.2.2.- Conducción en la región de inversión débil.
 - 3.2.2.3.- Efectos de la longitud y anchura del canal en la tensión umbral.
 - 3.2.2.4.- Efecto de la velocidad límite de los portadores.
- 3.3.- Modelo Nivel 3.
 - 3.3.1.- Efecto de la longitud y anchura del canal sobre la tensión umbral.
 - 3.3.2.- Variación de la longitud del canal en la región de saturación.
 - 3.3.3.- Comparación entre Niveles 2 y 3.

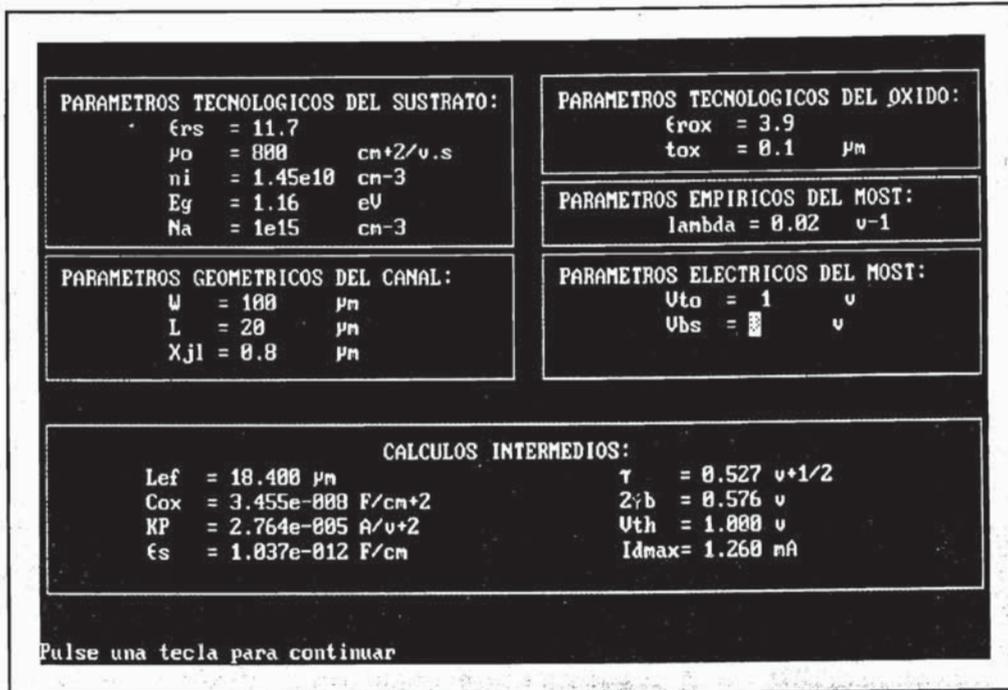


Figura 4. Ejemplo de pantalla interactiva, condiciones de simulación

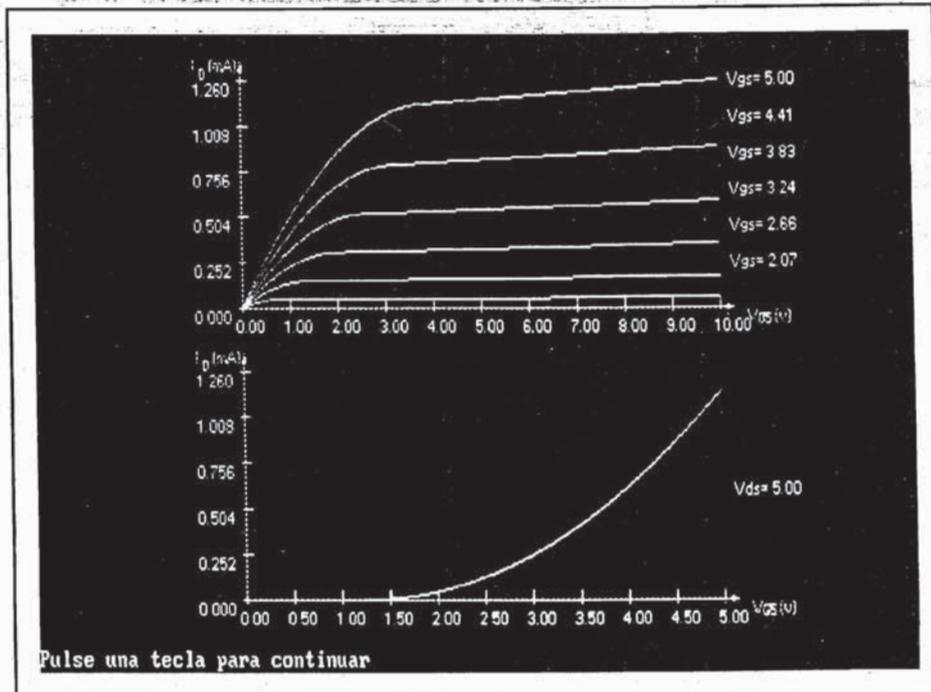


Figura 5. Ejemplo de simulación, MOS Nivel 1

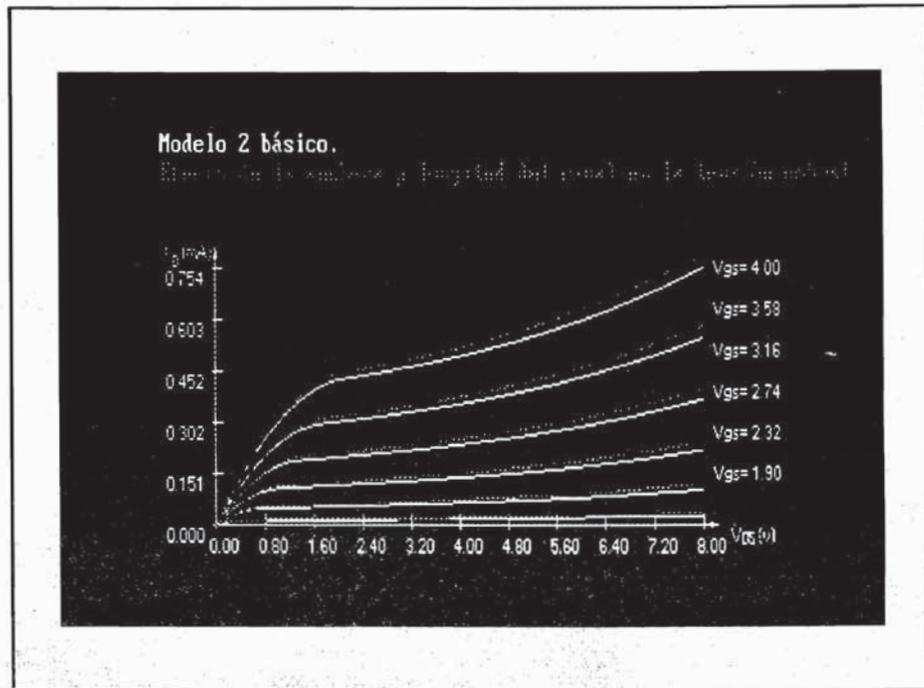


Figura 6. Ejemplo de simulación, MOS Nivel 2

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Espinosa Zapata: "Programa de Modelado y Simulación Orientado a la docencia del transistor MOS". Proyecto Fin de Carrera conducente a la obtención del título de Ingeniero de Telecomunicación por la E.T.S.I.T. de la U.P. de Madrid. 1991.
- [2] Y.P. Tsividis. "Operation and Modeling of the MOS transistor". McGraw-Hill, 1987.
- [3] P. Antognetti & G. Massobrio, "Semiconductor Device Modeling with SPICE". McGraw-Hill. 1988
- [4] G.T. Wright. "Simple and continuous MOSFET models for the computer-aided design of VLSI". IEE Proceedings. Vol. 132, nº 4, 1985.
- [5] P.K. Chatterjee, B. Tech, P. Yang and Hisashi Shichijo. "Modelling of Small MOS Devices and Device Limits". IEEE Proc., Vol. 130, Pt. I, Nº 3, June 1983.
- [6] W. Fichtner, D. J. Rose and R. E. Bank. "Semiconductor Device Simulation", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-30, Nº 9, Sep. 1983.