

ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA LA EXTRACCIÓN DEL VOLTAJE DE UMBRAL EN TRANSISTORES MOS

ANALYSIS OF METHODS FOR THRESHOLD VOLTAGE EXTRACTION IN MOS TRANSISTORS

Edgar Alonso Martínez Hernández

Cinvestav-Unidad Guadalajara, México
edgar.martinez@cinvestav.mx

Federico Sandoval Ibarra

Cinvestav-Unidad Guadalajara, México
federico.sandoval@cinvestav.mx

Recepción: 21/noviembre/2020

Aceptación: 4/febrero/2021

Resumen

El voltaje de umbral se considera un parámetro clave en el modelado y caracterización de un transistor MOS, pues define las regiones de trabajo del dispositivo (sub-umbral y región lineal). Este parámetro se encuentra en los distintos modelos de simulación junto con muchos más parámetros, e incluye características de manufactura, de materiales semiconductores y todos en conjunto describen el desempeño del transistor. Extraer este valor, de sus curvas características, depende de la complejidad del modelo analítico utilizado y del método numérico usado. En la literatura se han reportado distintos procedimientos para obtener el voltaje de umbral y en este artículo se describen los principales procedimientos de extracción y se analizan sus principios básicos de desarrollo. De igual manera se hacen validaciones en herramientas de simulación y de procesamiento numérico. Finalmente, se presentan los datos obtenidos.

Palabras Clave: Voltaje de umbral, extracción, ajuste lineal, transconductancia, MOS.

Abstract

Threshold voltage is considered a key parameter in modeling and characterization of MOS transistors, it defines the device regions of operation (sub-threshold and

linear region). This parameter is found on simulation models along with the other transistor parameters and include manufacturing and semiconductor materials features. Extracting this value, from its characteristic curves, depends of the complexity of the analytic model and the numeric method used. In the literature have been reported different procedures to obtain the threshold voltage and, in this article, the main extraction procedures are described and basic development principles are analyzed. Likewise, validations are made in simulation and numerical processing tools. Finally, obtained data are presented.

Keywords: threshold voltage, extraction, lineal extrapolation, transconductance.

1. Introducción

Uno de los parámetros físicos más importantes de un transistor MOS es el voltaje de umbral también conocido como “*threshold voltage*” (V_{TH}), y es definido como el nivel del voltaje de compuerta-fuente V_{GS} a partir del cual el dispositivo puede comenzar a conducir corriente eléctrica, I_D . En el modelado de un transistor MOS es importante conocer el voltaje de umbral porque, en simuladores eléctricos, se requiere para predecir correctamente el comportamiento de los circuitos bajo diseño debido a que tiene un efecto relevante en el desempeño de otros parámetros del propio modelo del dispositivo [Arora, 2007]. La relación corriente-voltaje de un transistor, por ejemplo, es obtenida para diferentes regiones de operación, y en este artículo se consideran únicamente las regiones lineal y saturación de fuerte inversión. La primera, descrita con el modelo de corriente de drenaje (Ecuación 1) y la segunda denominada ley cuadrada, [Bult, 1987] definida en ecuación 2.

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[(V_{GS} - V_{TH}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \quad (1)$$

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \frac{(V_{GS} - V_{TH})^2}{2} \quad (2)$$

EL voltaje de umbral puede obtenerse de múltiples maneras, desde el nivel intrínseco del semiconductor, hasta un método gráfico con una precisión inherente a la metodología empleada.

En las ecuaciones 1 y 2 que corresponden a un transistor NMOS, μ_n es la movilidad de los electrones en el canal, C_{ox} es la capacitancia del óxido de compuerta, W es el ancho del canal, L es la longitud del canal, V_{DS} es el voltaje de drenaje a fuente. En la sección 2 se despliega la descripción de los métodos tratados en este documento. La sección 3 muestra los resultados obtenidos de la simulación de cada método, en la sección 4 se discuten las características de cada uno y se comparan entre sí. Finalmente, las secciones 5 y 6 muestran las conclusiones observadas en este trabajo y se visualizan las referencias usadas.

2. Métodos existentes para extraer el voltaje de umbral

Método de corriente constante

Este método de corriente constante se utiliza ampliamente en la industria debido a su simplicidad y porque el voltaje de umbral puede ser determinado con una sola medición, [Garcia-Sanchez, 1996]. Sin embargo, otros voltajes de compuerta V_G a diferentes corrientes de drenaje I_D podrían considerarse también voltajes de umbral. El método, estrictamente hablando, está fuertemente ligado a la elección de la corriente, y en la industria se define como voltaje de umbral al voltaje aplicado en la terminal de compuerta V_G al cual fluye una corriente de drenaje previamente definida y se denomina corriente umbral (I_{TH}). En la práctica, para que esa corriente sea *independiente* de la geometría W/L del dispositivo, se establece un valor para I_{TH} entre 10 y 50 nA, [Schroeder, 1990] y pudiera entenderse como esa corriente que permite distinguir dos niveles de inversión. La misma referencia indica que usualmente se utiliza 1 μA como I_{TH} , ya que es un valor típico en dispositivos comerciales, porque se manufactura para diseños de propósito general. Desde el punto de vista práctico, la medición del voltaje de umbral se realiza alrededor de la zona de transición entre la región de sub-umbral y la región de inversión moderada porque la ubicación de este punto -en la característica corriente vs voltaje- se entiende como un nuevo valor de V_{TH} , y esa información tiene sentido cuando se grafica la corriente de drenaje como una función logarítmica y dependiente del voltaje V_G . Aún más, hay una región de la gráfica semilogarítmica en la que se aprecia que la corriente I_D depende linealmente de V_{GS} , y se considera al máximo

valor de voltaje para el cual la dependencia sigue siendo lineal como el voltaje de umbral del transistor [Schroeder, 1990]. Determinar ese “valor máximo” es un nicho de oportunidad del punto de vista del análisis de datos.

Método de ajuste lineal

Esta estrategia es muy utilizada en Ingeniería porque es la solución en muchos problemas que implican procesar datos de varias variables, y de las cuales no necesariamente se sabe qué relación inherente tienen entre sí, pero que son susceptibles de representarlas mediante una correlación lineal [Walpole, 2007]. En ingeniería electrónica, por ejemplo, el ajuste lineal sirve para modelar diversas características del transistor MOS e incluye el análisis de elementos intrínsecos y extrínsecos (parásitos), [Dambrine, 1988]. Su desventaja, no como método sino como resultado numérico, es que los datos incluyen la dependencia de las resistencias intrínsecas serie del MOS y también los efectos de degradación en la movilidad de portadores; a esos efectos no deseados se atribuye que la característica corriente-voltaje se desvía del comportamiento lineal para un V_G superior a V_{TH} ; es una práctica común determinar el punto máximo de la pendiente y luego ajustarla a una aproximación lineal que incluya el valor I_D .

Métodos de transconductancia.

La transconductancia es otro parámetro importante en un transistor MOS y es representado físicamente como la capacidad del dispositivo para convertir voltaje a corriente, también se le conoce como conductancia mutua (g_m). Matemáticamente se define como la razón de cambio mostrada de la corriente de drenaje respecto al voltaje de compuerta-fuente y se define en la ecuación 3.

$$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} \quad (3)$$

Donde I_D está dada en la ecuación 2. Gráficamente, la transconductancia es definida como el conjunto de pendientes de distintas rectas tangentes a la gráfica de la corriente I_D en cualquier punto de ésta [Purcell, 2007]. Este método intenta eliminar el comportamiento no lineal de la corriente de drenaje representada por la

ley cuadrada, es decir, pasar de una expresión de segundo orden a una de primer orden como se aprecia en la ecuación 4, donde de la aproximación lineal se obtiene el voltaje de umbral V_{TH} mediante una extrapolación.

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

El método de la segunda derivada, por otro lado, busca evitar la dependencia de las resistencias serie. En esta aproximación se determina el voltaje de umbral V_{TH} a partir del valor máximo obtenido de la segunda derivada de I_D con respecto a V_{GS} o también de la primera derivada de g_m con respecto a V_{GS} , [Liou, 1997]. Es de notar que, para propósitos del modelado y simulación de los dispositivos MOS, es de interés conocer el *potencial de superficie* de al menos un nivel de la polarización de la terminal de compuerta para que los demás potenciales de superficie (para cada nivel de polarización de compuerta) puedan ser calculados. El voltaje de umbral así obtenido corresponde a un nivel de voltaje V_{GS} para el cual el cambio instantáneo de la transconductancia presenta un valor máximo [Wong, 1987]. Las características sobresalientes de este método son su relación con el doblamiento clásico del umbral, además de no ser afectada por mecanismos de degradación.

Método de la relación de corriente-transconductancia

Este método se desarrolló para evitar la dependencia de las resistencias serie y la degradación en la movilidad. El método usa el modelo de corriente I_D en inversión fuerte y de su respectiva transconductancia, ecuaciones 5 y 6.

$$I_D = \frac{WC_{ox}}{L} \frac{\mu_o}{[1 + \theta(V_{GS} - V_T)]} (V_{GS} - V_T)V_{DS} \quad (5)$$

$$g_m = \frac{WC_{ox}}{L} \frac{\mu_o}{[1 + \theta(V_{GS} - V_T)]^2} V_{DS} \quad (6)$$

Donde μ_o es la movilidad de los portadores de carga y θ es el coeficiente de degradación de la movilidad. La idea básica del método sugiere que la razón $\frac{I_D}{\sqrt{g_m}}$ sea una función lineal del voltaje V_{GS} y eliminar así la influencia de la degradación en la movilidad. La ecuación 7 muestra la combinación de las ecuaciones 5 y 6,

donde la intersección de su gráfica con el eje horizontal corresponde al voltaje de umbral [Ghibaud, 1988], [Schroeder, 1990].

$$\frac{I_D}{\sqrt{g_m}} = \sqrt{\frac{WC_{ox}\mu_o}{L}V_{DS}(V_{GS} - V_{TH})} \quad (7)$$

Nótese que en este resultado analítico se ha eliminado la influencia de θ , lo que hace del método, un procedimiento útil para la extracción del voltaje de umbral, y es de resaltar la linealidad del resultado en un amplio rango de valores de V_{GS} .

Método de la raíz cuadrada

Este método, al igual que la primera derivada, busca eliminar el comportamiento no lineal de la corriente y ajustarlo a una expresión de primer orden, es decir extrayendo la raíz cuadrada de la corriente mostrada en la ecuación 2, y obtener el resultado que se muestra en la ecuación 8. Según el modelo de la ley cuadrada, la raíz debe convertir una expresión de segundo orden en una expresión lineal cuya intersección con el eje horizontal corresponde al valor del voltaje de umbral. En la literatura, este método es conocido como la “extrapolación lineal en la región de saturación” [Dobrescu, 2000]. El modo de operación en saturación se logra simplemente cortocircuitando las terminales de compuerta y drenaje.

$$\sqrt{I_D} = \sqrt{\frac{\mu_n C_{ox} W}{2L}}(V_{GS} - V_{TH}) \quad (8)$$

3. Resultados

La comprobación práctica de los métodos descritos puede hacerse mediante simulación, y como ejemplo utilizando un transistor MOS tipo N fabricado por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) Querétaro, el cual proporciona un kit de diseño o PDK de una tecnología de 5 μ m. Se inicia con un barrido en el nivel de voltaje V_{GS} , y dejando un voltaje V_{DS} fijo como se muestra en la figura 1. Aunque no se indique, la terminal de sustrato está conectada al potencial más negativo tal que $V_{SB} = 0$.

En AIM-SPICE se realiza la simulación y se extrae una curva $I_D - V_{GS}$ que representa el comportamiento de I_D ante variaciones de V_{GS} , la cual se muestra en la figura 2. Las características del transistor son, $L=W=16\mu\text{m}$, $V_{DS}=0.05\text{ V}$ y el barrido en el nivel de compuerta fue de 0 a 1.5 V. Debido a cuestiones de confidencialidad el valor numérico (conocido) del voltaje de umbral (incluido en el modelo de simulación) utilizado para este experimento no se muestra en esta contribución.

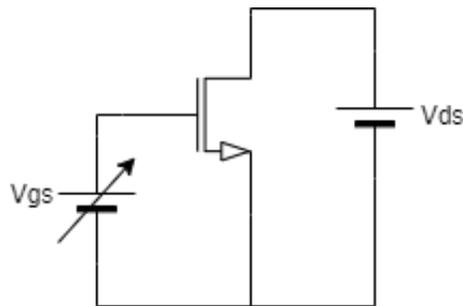


Figura 1 Circuito de prueba del transistor NMOS.

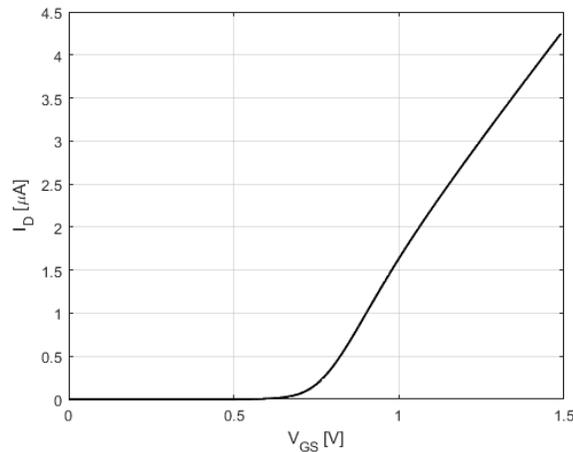


Figura 2 Curva I-V del transistor.

Los datos obtenidos de la simulación se almacenan en hojas de cálculo para ser procesadas según los métodos descritos en la sección 2. Los datos se procesan como vectores y se grafican individualmente de acuerdo con cada uno de los métodos. Entonces, para determinar el valor numérico del voltaje de umbral empleando el método de ajuste lineal de la corriente de drenaje I_D , se identifica en la gráfica (Figura 2) la zona donde la curva presenta un comportamiento lineal. Se

ubicar dos puntos de esta región de manera que se obtiene la pendiente (ver ecuación 9) de una recta que une esos dos puntos. La ecuación punto-pendiente permite obtener la ecuación de una recta con solo dos datos, ecuación 10.

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (9)$$

$$y - y_1 = m(x - x_1) \quad (10)$$

Esa recta es superpuesta con la gráfica de la corriente I_D (Figura 3a) para comprobar que pasa por la zona de comportamiento lineal, después se extiende hacia el eje horizontal considerado la intersección de estas dos líneas como el voltaje de umbral. Un procedimiento similar ocurre en la gráfica (Figura 3b) en donde el eje vertical es mostrado de forma logarítmica de manera que se observa con detalle la zona donde la dependencia de la corriente I_D con respecto del voltaje V_{GS} es lineal. Para aumentar la precisión de este método se realizó un ajuste lineal y se determinó la intersección entre la recta de ajuste y la gráfica, considerando el cruce como el voltaje de umbral.

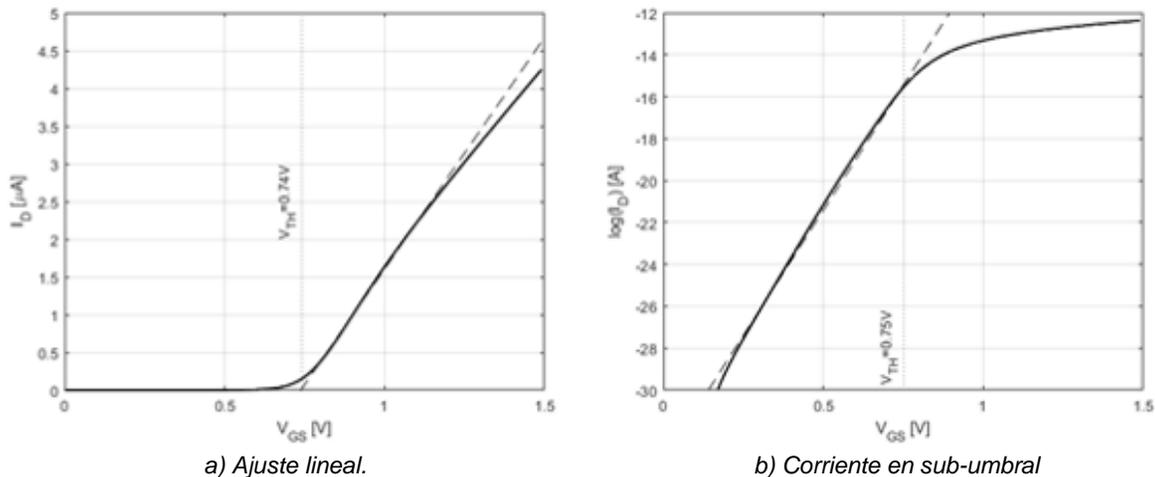


Figura 3 Gráficas del método de ajuste lineal corriente en sub-umbral.

En la figura 4, por otro lado, se muestra la gráfica de la curva corriente-voltaje y para identificar el valor numérico del voltaje de umbral (con el método de corriente constante) se ubica en la tabla de valores de corriente de drenaje, la posición que corresponde a un valor de I_D cercano a $1 \mu\text{A}$, después se busca el dato ubicado en

la misma posición en la tabla de valores de voltaje V_{GS} , y el valor encontrado corresponde al voltaje de umbral.

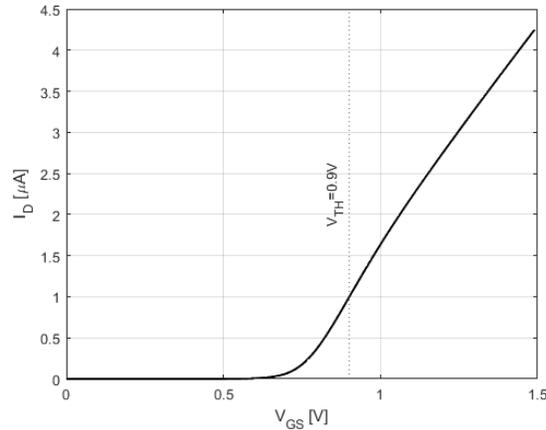
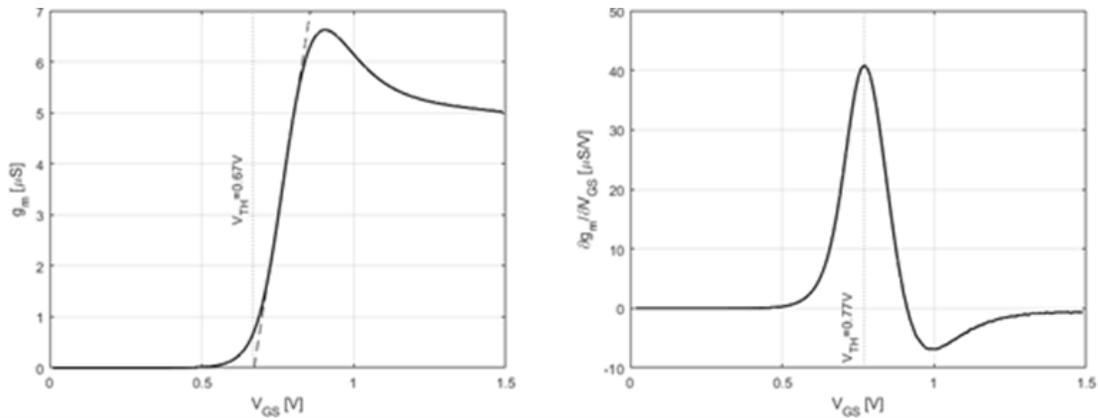


Figura 4 Grafica del método de corriente constante.

Para los métodos derivativos el proceso de diferenciación no toma en cuenta la primera posición de cada vector, debido a que en la derivada se requieren dos puntos de la función, al no haber un punto I-V anterior al primero, no se puede obtener la derivada de este punto, por esta razón la derivada comienza a partir del segundo punto I-V. Un proceso similar ocurre cuando se toma un punto y se realiza la derivación con el punto siguiente. Lo mismo sucede con el método de la segunda derivada, es decir la derivada de la transconductancia comienza a partir del segundo punto g-V o también el tercer punto I-V. En la figura 5a se muestra la derivada de la corriente de drenaje. Nótese la región que presenta una dependencia lineal con el voltaje V_{GS} , se realiza un ajuste lineal. La intersección con el eje horizontal corresponde al voltaje de umbral. En la figura 5b se muestra la segunda derivada de I_D , donde el valor del voltaje de umbral será el V_{GS} que corresponde al valor máximo de corriente de drenaje.

Las gráficas de los métodos de relación $I_D - \sqrt{g_m}$ y la raíz de I_D se muestran a continuación. Para el método de la relación $I_D - \sqrt{g_m}$ se divide cada dato de la corriente de drenaje con el valor correspondiente a la raíz cuadrada de su transconductancia y se obtiene la gráfica mostrada en figura 6a.

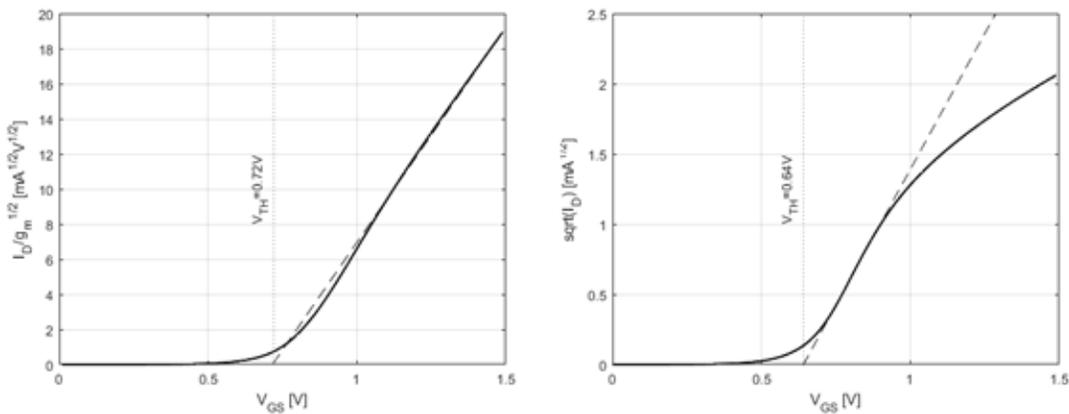


a) Primera Derivada.

b) Segunda Derivada

Figura 5 Gráficas de los métodos de transconductancia.

Nótese la zona de comportamiento lineal similar a la presentada en figura 2, donde se puede realizar un ajuste lineal para extrapolar este comportamiento más allá del eje horizontal; la intersección corresponde a el valor numérico del voltaje de umbral. Un procedimiento similar se muestra en figura 6b donde se grafica la raíz cuadrada de cada valor de corriente de drenaje y se observa una pequeña región lineal. Ahí se superpone una recta a dicha región y el punto donde cruza con el eje horizontal se considera el valor del voltaje de umbral.



a) Relación I_D/g_m .

b) Raíz de I_D

Figura 6 Gráfica de la relación $I_D/\sqrt{g_m}$ y $\sqrt{I_D}$.

4. Discusión

El método más sencillo es el de la corriente constante, ya que, tanto en simulación como en el análisis de datos, se debe detectar un nivel de corriente de

drenaje ($1 \mu\text{A}$) y ubicar el voltaje al cual se presenta ese valor, y justo ese es el voltaje de encendido del transistor. Por su sencillez puede considerarse que es un método analítico que se basa puramente en la medición que entregaría el equipo de caracterización, por lo que la presencia de un error en esta propuesta se debería a variaciones en los instrumentos de medición. El método de ajuste lineal, por otro lado, puede considerarse gráfico y matemático. Se utilizan técnicas de regresión lineal que permiten reconstruir una curva I-V que se ajusta a la aproximación de una línea recta y la intersección con el eje horizontal arroja un valor de voltaje que se considera el voltaje de encendido. Sin embargo, queda a criterio del diseñador, elegir y utilizar todos los valores de corriente de drenaje medidos o sólo una región de comportamiento lineal, el cual replica el patrón buscado. Esa circunstancia puede considerarse una desventaja del método pues no existe una regla de mérito que defina la frontera entre una región y otra. Por lo anterior, definir un criterio propio es una consideración que deberá tomarse en cuenta. Aún más, una manera de disminuir los efectos del criterio de selección de la zona lineal es la manipulación algebraica del modelo de corriente en fuerte inversión, pues al extraer la raíz cuadrada (de la expresión de I_D) se tiene una ecuación que representa una línea recta, matemáticamente hablando se pueden extraer diversos parámetros del dispositivo como la constante de amplificación intrínseca K_P (derivado de la pendiente), así como el voltaje de umbral implícito en el término independiente del modelo lineal. Se ha observado en la figura 6b, que esta manipulación algebraica, una vez graficada no corresponde a un comportamiento lineal, pero se asemeja, por lo que se recurre entonces a técnicas de extrapolación para ajustar la ecuación a un modelo que permita determinar con mayor exactitud el voltaje de encendido. El método de la corriente en el sub-umbral es un procedimiento similar al descrito, primeramente, con la diferencia del formato de escala en el eje vertical de la gráfica I-V del transistor, en la que se aprecia con mayor detalle el comportamiento en la región por debajo del umbral. Esta región es lineal por lo que se usan las técnicas ya vistas para determinar una expresión que corresponde a una línea recta que pasa por la zona antes descrita, y al ubicar el punto donde la curva I-V graficada y la extrapolación comienzan a diferir, se obtiene un nivel de tensión que corresponde a

un voltaje de encendido. En la figura 7 se muestra una comparación de los tres métodos descritos. Nótese que existe una diferencia notoria en los valores del voltaje V_{TH} para cada método.

Recuérdese que el propósito del método de la transconductancia es convertir una expresión de segundo orden en otra de primer orden, sin embargo, la simulación muestra que el comportamiento de la transconductancia no es lineal, por lo que se utiliza la región aparentemente lineal para realizar una extrapolación hacia el eje horizontal que corresponde al valor de V_{TH} .

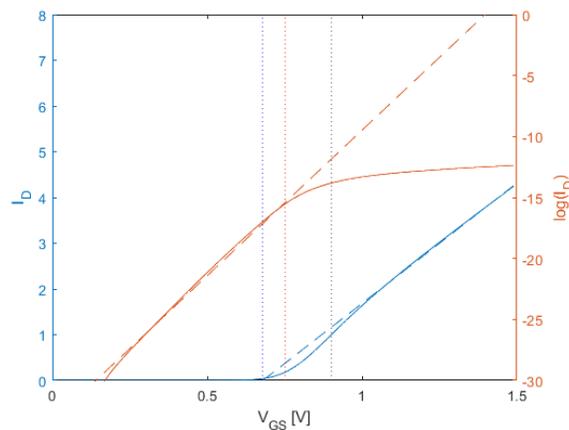


Figura 7 Gráfica de los métodos de corriente constante y ajuste lineal.

La aparente no linealidad de la corriente de drenaje está asociada al modelo de simulación empleado, pues se puede apreciar que en figuras 5a y figura 6b ni la transconductancia ni su raíz son funciones lineales, lo cual descarta que la expresión de la corriente I_D sea una función de segundo orden en el modelo de SPICE utilizado. La gráfica observada en figura 5b, por otro lado, es muy parecida a los resultados que se muestran en la referencia [Wong, 1987], por lo que no es difícil concluir que el voltaje de umbral obtenido con este método es el valor de V_{GS} que corresponde al máximo de la derivada de la transconductancia. Como se aprecia en la figura 8, donde se traslapan las gráficas de los dos métodos derivativos, el punto máximo de la segunda derivada de la corriente corresponde al punto medio de la región lineal que describe a la transconductancia.

Se puede apreciar en la figura 6a que la expresión correspondiente a la gráfica tiene

un comportamiento muy lineal en un amplio rango, lo cual refuerza la eficiencia del método, aun así se usa un ajuste lineal para eliminar la zona no lineal comprendida entre 0 y 5 mA^{1/2}V^{1/2}, esto se describe mejor en la literatura [Schroeder, 1990]. Se observa en figura 5b, por otro lado, que el propósito de convertir la no linealidad de I_D en una función de primer orden no se cumple, pues como se dijo anteriormente, el modelo no se basa en una expresión cuadrática, si no que existen términos de orden superior que dan forma a ese modelo y que al extraer la raíz cuadrada siguen siendo de un orden mayor a dos. Aun así, todo diseñador dispone de la extrapolación para aprovechar las regiones lineales de las gráficas y obtener una aproximación para el voltaje de umbral.

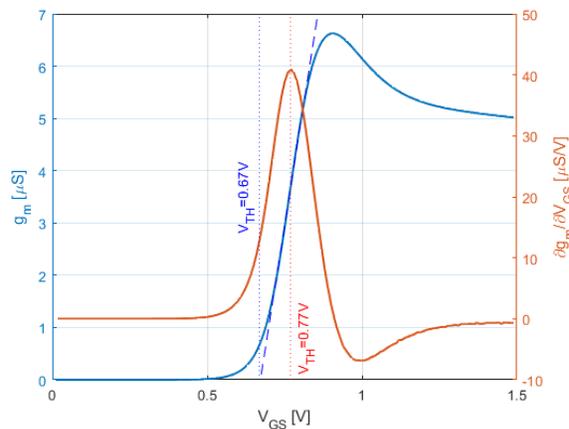


Figura 8 Gráfica de los métodos derivativos.

5. Conclusiones

Se analizaron y simularon los principales métodos de extracción del voltaje de umbral reportados en la literatura. Se describió su fundamento físico, los recursos matemáticos necesarios y se presentaron las ecuaciones que describen a cada método. Se realizó la simulación de las características I-V de un transistor MOS tipo N, y los datos obtenidos se guardaron en forma de vectores tabulados de manera que pudieran ser procesados por una herramienta de análisis numérico utilizando los valores de I_D y V_{GS} en las ecuaciones de cada método. Se compararon algunos métodos entre sí para definir características en común y diferencias notables, tal es el caso de los métodos de corriente constante (1 μ A y sub-umbral) y el ajuste lineal.

Como se aprecia en tabla 1, los tres procedimientos tienen resultados muy alejados, una razón se debería a la elección arbitraria de la corriente como estándar de corriente constante [Garcia-Sanchez, 1996], por lo que se concluiría que el método de ajuste lineal, al tomar en cuenta el comportamiento propio de la corriente de drenaje del transistor, se acerca más al valor establecido en la sección 3.

Tabla 1 Comparación cuantitativa de los métodos.

Método	V_{TH} [V]
Corriente Constante	0.9
Ajuste Lineal	0.68
Corriente en sub-umbral	0.75
Primera Derivada	0.67
Segunda Derivada	0.77
Relación corriente-transconductancia	0.72
Raíz cuadrada	0.64

Los métodos derivativos, a pesar de su diferencia cuantitativa, no difieren por más de una décima, por lo que se consideran métodos eficientes, sin embargo, se logra ver en tabla 1 que los métodos más eficientes y precisos para extraer el voltaje de umbral son la raíz cuadrada, el ajuste lineal y la primera derivada comparando los valores obtenidos con el valor encontrado en el modelo de SPICE del transistor. Es importante comentar que se debe tomar en consideración el método de Ghibaudo pues éste elimina la dependencia de la movilidad y sus variaciones, de manera que el valor obtenido con este procedimiento no difiere tanto de los tres métodos más precisos. Otra consideración del análisis es la región de operación. Mientras unos métodos usan datos del transistor que operan en la región lineal y otros más en la región de saturación, se puede apreciar en la literatura la diferencia de resultados entre estas dos regiones, [Dobrescu, 2000], [Ortiz-Conde, 2012]. Por lo anterior, en este documento se ha optado por superponer ambas regiones con el fin de demostrar el funcionamiento y exactitud de cada método. Finalmente, es de interés contar con documentación referente a los procedimientos de extracción que indique el proceso de caracterización no solo del voltaje de umbral si no para cualquier parámetro del dispositivo. Estos procedimientos deben ser independientes de la tecnología empleada así como del elemento a caracterizar y de esta manera

construir un modelo de simulación que permita realizar diseño de celdas analógicas y digitales con mayor precisión.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arora, N., MOSFET Modeling for VLSI Simulation: Theory and Practice, World Scientific, 2007.
- [2] Bult, K. & Wallinga H., A Class of Analog CMOS Circuits Based on the Square-Law Characteristics of an MOS Transistor in Saturation, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 22, 357-365, 1987.
- [3] Dambrine, G., Cappy, A., Heliodore, F., & Playez E., A new method for determining the FET small-signal equivalent circuit, IEEE Transactions on Microwave, Theory and Techniques, 36, 1151-1159, 1988.
- [4] Dobrescu, L., Petrov, M. & Ravariu, C., Threshold voltage extraction methods for MOS transistors, International Semiconductor Conference 23rd Edition. CAS 2000 Proceedings, 2000.
- [5] Garcia-Sanchez, F. J., Ortiz-Conde, A. & Liou, J. J. Parasitic series resistance-independent method for device model parameter extraction, IEE Proceedings – Circuits, Devices and Systems, 143, 68-70, 1996.
- [6] Ghibaudo, G., New method for the extraction of MOSFET parameters, Electronic Letters, 24, 543-545, 1988.
- [7] Jain, S., Measurement of threshold voltage and channel length of submicron MOSFET's, IEE Proceedings I - Solid-State and Electron Devices, 135, 162-164, 1988.
- [8] Liou, J. J., Ortiz-Conde, A. & Garcia-Sanchez, F. J., Extraction of the threshold voltage of MOSFET's: An overview, IEEE Hong Kong Proceedings Electron Devices Meeting, 31-38, 1997.
- [9] Ortiz-Conde, A. *et al*, Revisiting MOSFET threshold voltage extraction methods, Microelectron Reliab: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2012.09.015>, 2012
- [10] Purcell, Varberg & Rigdon, Cálculo Diferencial e Integral, 9^{na} Edición, Pearson Education, 2007.

- [11] Schroeder, D. K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, Wiley, New York, 1990.
- [12] Tsuno, M., Physically-based threshold voltage determination for MOSFET's of all gate lengths, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 46, 1429 – 1434, 1999.
- [13] Walpole, R. E., Raymond, H. & Myers, S. L., *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, Octava edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México, 2007.
- [14] Wong, H., White, M., Krustick, T., Booth, R. Modeling of transconductance degradation and extraction of threshold voltage in thin oxide MOSFET's, *Solid-State Electronics* 30, 953-968, 1987.