



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MÉXICO  
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM  
TEXCOCO

LABORATORIO DE EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

PRESENTA:

RAÚL SANDOVAL TREJO

Tutor académico:

DR. EN C. RODOLFO ZOLÁ GÁRCIA LOZANO

Tutores adjuntos:

M. EN. I.S.C. ALEJANDRA MORALES RAMÍREZ

DR. EN C. JESÚS EZEQUIEL MOLINAR SOLÍS





DICTÁMEN DE AUTORIZACIÓN DE OBTENCIÓN DE GRADO DE MAESTRÍA

Texcoco, Méx. , a 4 de julio de 2011.



TÍTULO DEL PROYECTO:

COPIA

Laboratorio de Extracción de Parámetros



TESISTA:

Raúl Sandoval Trejo



DICTAMEN:

NO. DE REVISIÓN: 3



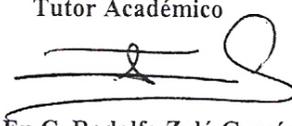
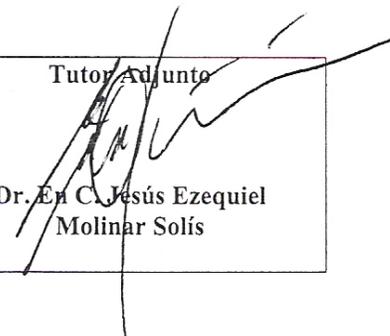
- RECHAZADO
- SUJETO A MODIFICACIONES
- ACEPTADO, CONDICIONADO
- ACEPTADO

OBSERVACIONES GENERALES:

Sin observaciones

Aceptado para la impresión  
Aceptado para la defensa de Grado



<p>Tutor Adjunto</p>  <p>M. en I.S.C. Alejandra Morales Ramírez</p>	<p>Tutor Académico</p>  <p>Dr. En C. Rodolfo Zolá García Lozano</p>	<p>Tutor Adjunto</p>  <p>Dr. En C. Jesús Ezequiel Molinar Solís</p>
--	--	--





## AGRADECIMIENTOS

A mis Padres:

Gracias por cultivar en mi el deseo de superación, por el esfuerzo realizado durante una vida para hacer mi vida mejor, les debo todo.

Laura:

La vida cambia mucho de acuerdo a como vamos avanzando en este camino, me ha costado muchísimo a mi.... Solo deseo que no padezcas lo mismo que yo.

Lili:

Gracias por tu soltura, tu sonrisa, tu vida... me haz enseñado una nueva manera de compartir mi vida y así lo deseo hasta mi fin, Te amo.

Alex:

Yo se que si te separan de mi, te mueres... te quiero amigo.

Dr. Rodolfo:

Tal vez y esto sea lo que le interesa menos y tal ves nunca lea esto, pero de verdad le agradezco tanto y de tantas maneras lo que ha hecho por mi. Gracias y me atrevo a decirle amigo porque solo un amigo me aguantaría tanto.

Amigos:

Noé, Nieves, Memo, Gaby, Pez... ya van muchos años y seguimos siendo los mismos... tiene que haber algo bueno entre nosotros, para ustedes también va esto.



# ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	8
OBJETIVOS .....	9
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES .....	10
DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES .....	10
DIODOS .....	11
TRANSISTORES DE UNIÓN BIPOLAR.....	16
TRANSISTORES MOSFET .....	19
TRANSISTORES DE PELÍCULA DELGADA TFT (Thin - Film Transistor).....	25
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS .....	33
DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA .....	33
Requerimientos funcionales comunes entre los módulos de extracción.....	35
ESTUDIO DE FACTIBILIDAD .....	39
Factibilidad técnica.....	39
Factibilidad económica.....	41
Factibilidad operacional.....	42
CAPÍTULO IV. DISEÑO Y CODIFICACIÓN.....	43
DISEÑO RECOMENDADO.....	43
MÓDULO RESISTENCIA.....	46
MÓDULO DIODO .....	47
MÓDULO BJT .....	50
MÓDULO TRANSISTORES MOSFET.....	53
CODIFICACIÓN, INSTALACION, CAPACITACIÓN Y MANTENIMIENTO .....	59
CAPÍTULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	61
RESISTENCIAS.....	61
DIODOS .....	65
TRANSISTORES MOSFET .....	72
Pruebas variando VT .....	72
Pruebas variando la resistencia de contacto.....	82
Pruebas con dispositivos reales.....	88
CONCLUSIONES .....	91
Trabajos futuros .....	92
BIBLIOGRAFÍA .....	93
ANEXO I.....	96
Anexo II .....	101

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

## JUSTIFICACIÓN

A medida que el campo de la ciencia se ha desarrollado, ha surgido la necesidad de generar nuevas técnicas y procedimientos, que faciliten la solución de las necesidades de generación de nueva tecnologías. Por ejemplo, en el caso de aplicaciones electrónicas tales como microprocesadores, memorias, etc. los circuitos se han desarrollado a tal magnitud que los diseñadores requieren de herramientas que hagan posible el diseño, prueba y fabricación de estas aplicaciones. En la etapa de pruebas, se han desarrollado herramientas como los simuladores eléctricos que permiten reproducir, previo a la fabricación del circuito y en un ambiente virtual, el comportamiento eléctrico de circuitos formados por diferentes tipos de dispositivos tales como resistencias, diodos, transistores, interruptores, etc. Esta situación permite resolver errores de diseño debidos a situaciones no, lo que finalmente impacta positivamente en la reducción de los tiempos y costos de desarrollo del producto.

Los simuladores eléctricos requieren de modelos matemáticos que reproduzcan adecuadamente los fenómenos de conducción presentes en cada dispositivo. Para alcanzar esta condición es necesario que los parámetros (eléctricos o geométricos) utilizados en el modelo correspondan adecuadamente al dispositivo y a las condiciones de polarización en el que va a ser utilizado. En otras palabras, una parte importante del funcionamiento del modelo (y por lo tanto del simulador) depende de la selección adecuada de los valores de los parámetros a utilizar. Existen diferentes formas de obtener los parámetros a utilizar, por ejemplo para dispositivos comerciales, los simuladores cuentan con parámetros previamente cargados en el modelo que, en conjunto con las ecuaciones programadas, emulan satisfactoriamente el comportamiento eléctrico de los componentes de un circuito. Sin embargo en ocasiones es necesario obtener los parámetros a partir de mediciones experimentales. En estos casos existen diferentes técnicas para cada dispositivo que permiten obtener los valores que describen el comportamiento

eléctrico de estos elementos. En el presente trabajo se implementarán en un sistema informático diferentes técnicas de extracción de parámetros para dispositivos electrónicos comunes con el objetivo de desarrollar una herramienta de extracción que facilite las actividades académicas y científicas de los especialistas del área.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Diseñar y desarrollar un sistema que permita la extracción de los parámetros necesarios para realizar el modelado de las características eléctricas de los siguientes dispositivos:

- Resistencias
- Diodos
- BJT
- MOSFET (TFT's)

### **Objetivos particulares**

- Facilitar al estudiante el entender la caracterización de dispositivos.
- Fungir como una herramienta para los desarrolladores de dispositivos electrónicos.
- Permitir la extracción de los parámetros necesarios para que el modelado de las características eléctricas de estos dispositivos.
- El sistema debe de ser amigable y de fácil uso.
- Contar con una retroalimentación visual para que el usuario evalúe si el valor del parámetro extraído corresponde con la medición experimental.
- Permitir la extracción de parámetros basado en los modelos de cada dispositivo.

## CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

### DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES

El estudio de los semiconductores y sus aplicaciones requiere de conocer algunas de las propiedades de metales y aislantes (dieléctricos) (Malvino, 2000). Con base a la resistividad de los materiales, de manera general podemos establecer que los metales tienen resistividades ( $\rho$ ) que pueden ir de  $1 \times 10^{-8}$  hasta  $1 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ . Por otro lado, los aislantes tienen resistividades mucho mayores que pueden ir desde  $1 \times 10^8$  hasta  $1 \times 10^{20} \Omega\text{-cm}$ . En el caso de los semiconductores las resistividades suelen ser mayores a la de los metales y menores a la de los aislantes. Esto no quiere decir que la diferencia entre los semiconductores y los metales sea simplemente el valor de su resistividad. Por ejemplo, una característica fundamental de los semiconductores es que debido a la distribución interna de sus átomos, el comportamiento de su resistividad guarda una relación inversa con la temperatura, situación que es contraria a lo que ocurre en los metales. Es decir, mientras que en los metales al aumentar la temperatura aumenta la resistividad del material, en los semiconductores el incremento de la temperatura genera una mayor cantidad de portadores de carga libres que participan en la conducción eléctrica, lo que tiene como efecto la reducción de la resistividad del material. Existen otros factores que pueden modificar la resistividad de los semiconductores como puede ser el efecto de la luz, el dopaje, entre otros.

El silicio y el germanio son quizá los dos semiconductores más importantes en la historia de la electrónica. Sin embargo, por sus propiedades tecnológicas, el semiconductor más utilizado para el desarrollo de las aplicaciones electrónicas es el silicio (Schroder, 2006).

Actualmente como elementos discretos o en circuitos integrados se fabrican diferentes dispositivos, entre los que podemos destacar:

1. Resistencias
2. Diodos
3. Transistores de unión bipolar (BJT)
4. MOSFET

A continuación se revisan brevemente algunas de las características eléctricas más importantes de estos dispositivos.

## DIODOS

Es un dispositivo formado por la unión de dos materiales semiconductores, uno tipo P (ánodo) y otro tipo N (cátodo). Debido a la interacción de estos materiales, en la primera aproximación del comportamiento eléctrico del diodo se establece que cuando se polariza en directa el dispositivo permite el paso de la corriente, mientras que en condición de polarización inversa se comporta como un aislante (Colinge, 1981). La Fig. 2.1 muestra el símbolo del diodo.

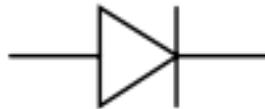


Fig. 2.1 Estructura del diodo

La curva característica de un diodo se muestra en la Fig. 2.2. Como se menciono anteriormente, en la curva característica se pueden observar dos regiones de conducción distintas. Para condiciones de polarización menores al voltaje de umbral del diodo ( $V_T$ ), el dispositivo se comporta como un circuito abierto (no conduce), y por encima de este potencial se comporta como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña. Para voltajes de polarización inversa, en los dispositivos reales, el diodo puede alcanzar la región de ruptura (Tyagi, 1991). En estas condiciones la corriente inversa se incrementa debido a diferentes fenómenos, por ejemplo el fenómeno de avalancha. En la Fig. 2.2  $I_{max}$  representa

la corriente máxima que puede conducir el diodo en polarización directa sin sufrir daños,  $I_S$  es la corriente de polarización inversa del diodo y  $V_r$  representa la tensión de polarización inversa de ruptura.

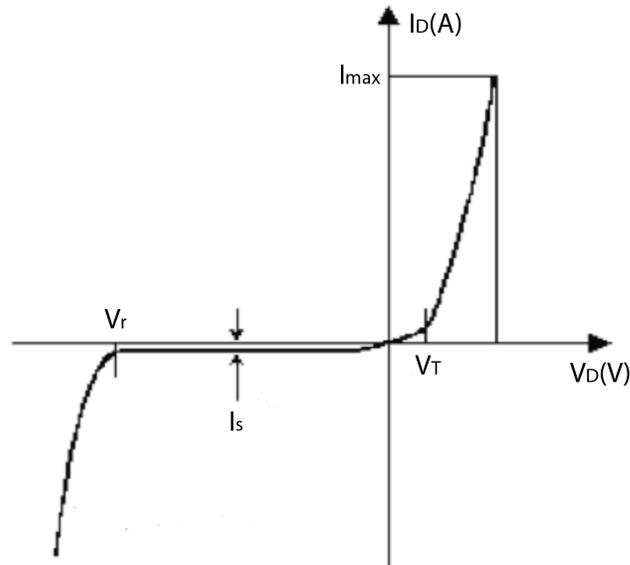


Fig 2.2 Curva característica del diodo (I-V)

**Modelo matemático para diodos P-N**

El modelo matemático del diodo de unión P-N fue desarrollado por Shockley (Tyagi, 1991) y es el que se utiliza con mayor frecuencia. Para estudiar el modelo por simplificación inicialmente consideraremos que la resistencia serie en el diodo ( $r_s$ ) es igual a cero. Bajo esta consideración, el voltaje aplicado a las terminales del diodo será igual al voltaje en la unión P-N, por lo que la corriente del diodo de unión se describe como una función del voltaje aplicado  $V_D$  (Tyagi, 1991):

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{qV_D}{nkT}} - 1 \right) \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $I_S$  es la corriente de saturación,  $n$  es el factor de idealidad del diodo,  $V_D$  es el voltaje a través del la región (carga espacial),  $q$  es el valor de la carga del

electrón,  $k$  es la constante de Boltzmann igual a  $1.38e^{-23} \frac{J}{K}$  y  $T$  es la temperatura de la unión en grados Kelvin (300 K).

Para dispositivos o condiciones de polarización en los que la resistencia serie no puede ser despreciada es necesario utilizar el circuito equivalente del diodo que se muestra en la Figura 2.3. Como se puede observar, el circuito equivalente está formado por un diodo ideal en serie con una resistencia ( $r_s$ ). Al aplicar un voltaje en las terminales del diodo, la ley de voltajes de Kirchhoff puede expresarse como sigue (Schroder, 2006):

$$V = V_D + I \cdot r_s \dots \dots \dots (2)$$

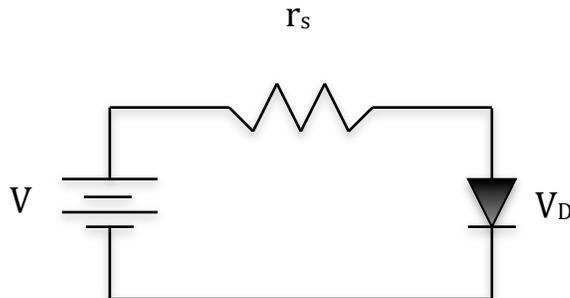


Fig. 2.3 Circuito equivalente del diodo real

De la Fig. 2.3, la caída de potencial en la unión P-N será igual al voltaje aplicado a las terminales del diodo menos la caída de potencial en la resistencia. De esta forma la ecuación de la corriente del diodo quedará de la siguiente manera:

$$I = I_s (e^{q(V_D - I r_s) / nKT} - 1) \dots \dots \dots (3)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de un dispositivo idealizado, en el cual la gráfica de su corriente tendría un comportamiento lineal en una escala semilogarítmica. Para dispositivos reales el comportamiento de los diodos es diferente. Por ejemplo, en la Fig. 2.4 se muestra la corriente del diodo **1N4001** en

polarización directa, con escala semilogarítmica. Como se puede observar, para condiciones de polarización directa, a diferencia del comportamiento ideal, en este dispositivo se presentan dos regiones “lineales” diferentes, las cuales se deben a una de las siguientes componentes:

1. Generación/recombinación en la región de carga espacial (**scr**).
2. Generación/recombinación en las zonas cuasi neutras (**qnr**).

Para representar este comportamiento es necesario que la expresión de la corriente del diodo tome en cuenta los componentes de la corriente debidos a la generación/recombinación en ambas regiones, lo que se puede expresar (Tor A. Friendly, 1998):

$$I = I_0, s_{cr} \left( e^{\frac{q(V-Ir_s)}{nkT}} - 1 \right) + I_0, q_{nr} \left( e^{\frac{q(V-Ir_s)}{nkT}} - 1 \right) \dots\dots\dots(4)$$

Por otro lado, para valores de  $V_D$  altos el efecto de la resistencia serie ( $r_s$ ) se observa con la reducción de la pendiente de la curva (Ver Fig.2.4).

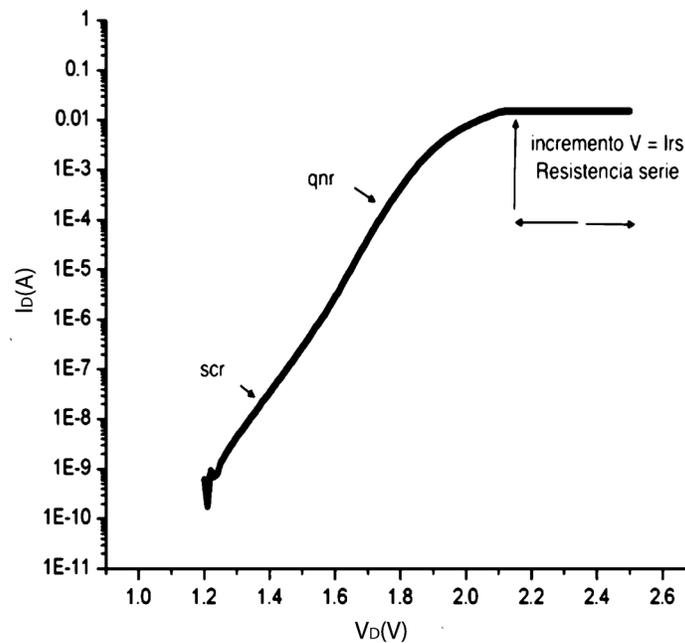


Figura 2.4. Curva I-V del diodo 1N4001

**Procedimiento de extracción de parámetros**

Como mencionamos anteriormente, el funcionamiento adecuado del modelo matemático depende de los parámetros utilizados. Por lo tanto, en esta sección se describirá brevemente una técnica de extracción de parámetros utilizada para el diodo.

Inicialmente el procedimiento de extracción de parámetros considera que:

- Existe solo una de componentes de la corriente y
- El efecto de la resistencia serie del diodo es despreciable para las condiciones de polarización en las que se hará la extracción.

Con base a estas consideraciones puede utilizarse la ecu. 1 para modelar la corriente del diodo. En esta ecuación podemos considerar que para voltajes de polarización del diodo ( $V_D$ ) mayores a 0.1 V el término exponencial de la ecuación será mucho mayor que uno, por lo que la expresión de la corriente del diodo, se puede aproximar a:

$$I_D \cong I_S \left( e^{\frac{qV_D}{nkT}} \right) \dots\dots\dots(5)$$

Calculando el logaritmo natural en ambas partes y aplicando las leyes de los logaritmos se obtiene:

$$\ln I_D = \ln \left( I_S \left( e^{\frac{qV_D}{nkT}} \right) \right) \dots\dots\dots(6)$$

$$\ln I_D = \ln I_S + \ln e^{\frac{qV_D}{nkT}} \dots\dots\dots(6^a)$$

$$\ln I_D = \ln I_S + \frac{qV_D}{nkT} \dots\dots\dots(7)$$

De la ecu. 7 se puede observar que el logaritmo de la corriente del diodo tiene un comportamiento lineal. Recordando la ecuación de la recta:

$$y = mx + b \dots \dots \dots (8)$$

De las ecuaciones 7 y 8 podemos deducir las expresiones de la pendiente y el intercepto con el eje de las “**y**”:

$$m = \frac{1}{nkT} \dots \dots \dots (9)$$

$$b = \ln I_S \dots \dots \dots (10)$$

La importancia práctica de la deducción de las ecuaciones 9 y 10 radica en el hecho de que a partir de la gráfica semilogarítmica de la corriente experimental de un diodo y mediante la utilización de estas ecuaciones es posible calcular la corriente inversa de saturación ( $I_S$ ) y el factor de idealidad del dispositivo ( $n$ ).

### TRANSISTORES DE UNIÓN BIPOLAR.

Los transistores de unión bipolar (BJT) están formados por la unión de tres materiales semiconductores que pueden formar dos tipos de estructuras: PNP o NPN. Son dispositivos de tres terminales definidas como colector (**C**), base (**B**) y emisor (**E**) (Malvino, 2000). La Fig. 2.5 muestran los símbolos de un BJT tipo NPN y PNP.

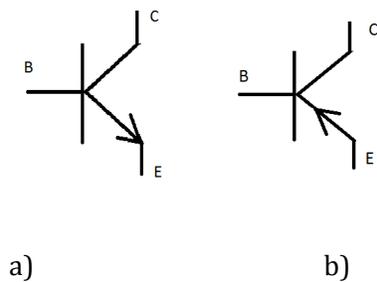


Figura 2.5 Símbolo de los transistores BJT: a) NPN b) PNP

### **Corrientes en un Transistor**

Considerando el sentido convencional de la corriente, para el transistor BJT NPN la ecuación de corrientes de Kirchoff puede expresarse (Tyagi, 1991):

$$I_E - I_C - I_B = 0 \dots\dots\dots (11)$$

De la ecu. 11 podemos deducir que la corriente de emisor es igual a la suma de la corriente de colector más la corriente de base. Teniendo en cuenta que la corriente de base es mucho menor que la corriente de colector, es habitual hacer la aproximación de que la corriente de colector es igual a la corriente de emisor, es decir:

$$I_C \approx I_E \dots\dots\dots (12)$$

En muchos de los circuitos de aplicación de los transistores bipolares, el emisor es usado como una terminal común, usando la base como la entrada y el colector como terminal de salida. La ecuación 13 describe la relación que guardan la corriente de base y la corriente de colector en el transistor de unión bipolar:

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} \dots\dots\dots (13)$$

Donde  $\beta$  está definida como la ganancia de corriente en emisor común. En las hojas de especificaciones de dispositivos comerciales, la  $\beta$  suele representarse con el término “**hfe**”. Para transistores de baja potencia (por debajo de 1 W), la ganancia de corriente típicamente es de 100 a 300. Por otro lado, para transistores de alta potencia (por encima de 1 W) normalmente tienen ganancias de corriente entre 20 y 100.

### **Modelo de Ebers-Moll**

A continuación se describe el modelo de Ebers-Moll (E-M) para transistores BJT. Este es uno de los modelos más utilizados para el estudio de este tipo de

dispositivos. Las ecuaciones 14 y 15 describen las corrientes de colector y emisor de un transistor intrínseco PNP (Tyagi, 1991). Ecuaciones similares pueden ser obtenidas para un transistor NPN:

$$I_E = -I_{ES} \left[ \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] + \alpha_I I_{CS} \left[ \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (14)$$

$$I_C = \alpha_N I_{ES} \left[ \exp\left(\frac{V_{EB}}{V_T}\right) - 1 \right] - I_{CS} \left[ \exp\left(\frac{V_{CB}}{V_T}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots (15)$$

Donde  $I_{ES}$  e  $I_{CS}$  son factores de proporcionalidad los cuales son positivos para un transistor NPN y negativos para los PNP. Los parámetros  $\alpha_N$  y  $\alpha_I$  representan la ganancia de base común de un transistor bajo las condiciones de operación normal e inversa, respectivamente.  $V_T$  es el voltaje térmico dado por  $kT/q$ .

En el tipo de operación inversa de un transistor, los roles del emisor y del colector son intercambiados lo que significa que la unión base colector es directamente polarizado y la unión base emisor es inversamente polarizado. Las ecuaciones anteriores, conocidas como Ecuaciones de Ebers-Moll, son válidas para todas las combinaciones de  $V_{EB}$  y  $V_{CB}$ . Es obvio que para un transistor PNP,  $V_{EB}$  es positivo cuando la unión base emisor es polarizada directamente y negativa cuando es inversamente polarizada. Consideraciones similares son aplicadas para  $V_{CB}$ . En el caso de un transistor NPN, la situación es inversa y las ecuaciones E-M son obtenidas escribiendo  $V_{BE}$  para  $V_{EB}$  y  $V_{BC}$  para  $V_{CB}$ .

**Procedimiento de extracción de parámetros**

Con base a las ecuaciones de E-M, el procedimiento de extracción de parámetros para los BJT requiere de realizar las siguientes mediciones experimentales (Tyagi, 1991).

1. Realizar la medición de la corriente de emisor y de colector con  $V_{CB}=0$ , esto cortocircuitando las terminales de colector y base. Bajo esta condición de polarización, la  $I_E$  descrita por la ecuación 14 se reducirá a:

$$I_E = -I_{ES} [\exp(V_{EB} / V_T) - 1] \dots\dots\dots (16)$$

Esta ecuación muestra que el comportamiento de la unión base-emisor con el colector cortocircuitado a la base, es similar a un diodo de unión p-n con una corriente de saturación  $I_{ES}$ . Por esta razón, la corriente  $I_{ES}$  se puede determinar con el procedimiento de extracción similar al descrito en el diodo de unión.

A partir de los datos experimentales de  $I_C$  e igualando los términos  $I_{ES}$  de las ecuaciones 14 y 15 se obtiene que:

$$\alpha_N = -\frac{I_C}{I_E} \Big|_{V_{CB}=0} \dots\dots\dots (17)$$

2. De manera similar, realizando la medición de las corrientes de emisor y colector con las terminales emisor base en cortocircuito es posible extraer los parámetros  $I_{CS}$  y  $\alpha_I$ .

3. Mediante las ecuaciones de E-M y utilizando los parámetros extraídos en los pasos 1 y 2 es posible modelar las características eléctricas del BJT.

### TRANSISTORES MOSFET

Los transistores MOSFET son dispositivos semiconductores que cuentan con una estructura Metal/Óxido/Semiconductor (Tyagi, 1991) (ver Fig. 2.6). Este tipo de dispositivos basan su funcionamiento en la capacidad de poder controlar la

concentración y el tipo de portadores en la región semiconductor cercana a la interfaz dieléctrico/semiconductor, mediante la aplicación de voltaje en la compuerta. En función del tipo de portadores que participan en la conducción los transistores MOSFET se pueden clasificar en:

- MOSFET canal n (ver Fig. 2.6).
- MOSFET canal p (ver Fig. 2.7).

Como se puede observar en la Fig. 2.6 el MOSFET canal n consiste en un sustrato de silicio tipo p, en el que se han difundido dos regiones tipo n altamente dopadas. Una de estas funciona como el contacto de la fuente (**S**) y la otra como el contacto del drenador (**D**). Una capa delgada de óxido de silicio (**SiO<sub>2</sub>**) se crece térmicamente sobre los contactos de drenador y fuente para formar el óxido de compuerta. Mediante la polarización de la compuerta es posible invertir la región cercana a la interfaz óxido-semiconductor para formar un canal entre los contactos de drenador y fuente. En este tipo de dispositivos cuando no existe voltaje de polarización en la compuerta no existe un canal formado entre el drenador y la fuente por lo que se comporta como un circuito abierto. Para formar el canal y que el transistor empiece a conducir es necesario aplicar un voltaje de compuerta igual o mayor al voltaje de umbral.

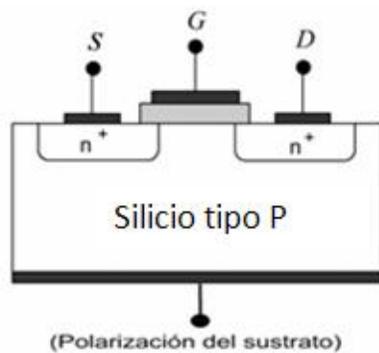


Fig. 2.6. Estructura del transistor MOSFET canal N.

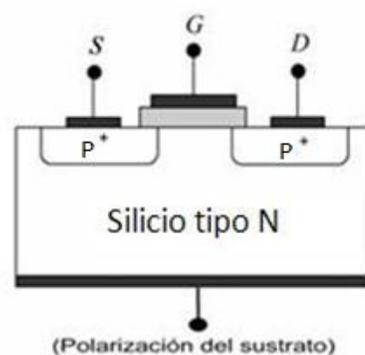


Fig. 2.7. Estructura del transistor MOSFET canal P.

En la Fig. 2.8 se puede observar el efecto del voltaje de compuerta sobre la corriente  $I_{DS}$ .

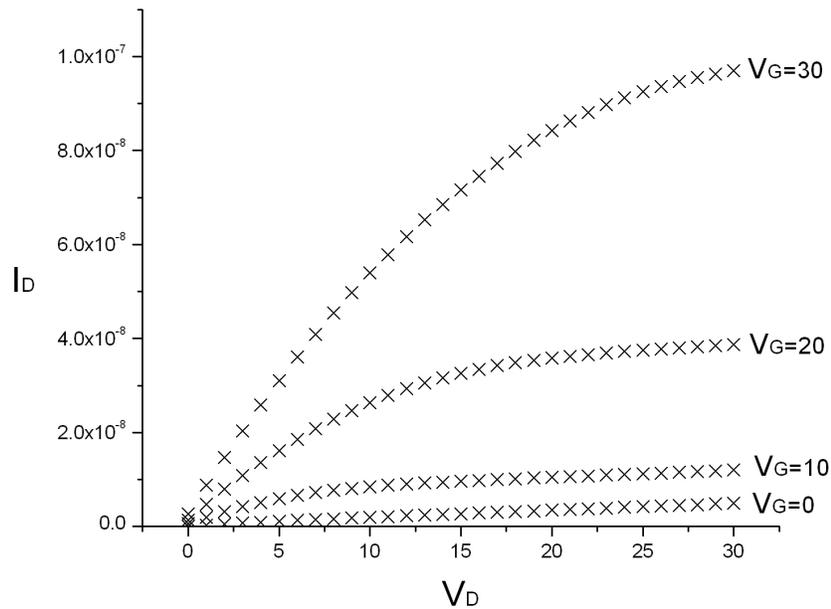


Fig.2.8 Transistor MOSFET canal n

**Principio de funcionamiento**

En este apartado se describirá brevemente la operación en el dispositivo presentado en la fig.2.9 (Tor A. Friendly, 1998) Inicialmente, se asumirá que no existe canal de conducción formado entre la fuente y el drenador (es decir,  $V_G=0$  V). Al aplicar un voltaje de compuerta positivo igual al  $V_T$ , se formará un canal de conducción entre los contactos de fuente y drenador. Supongamos ahora que se aplica al drenador un voltaje positivo  $V_D$ , lo suficientemente pequeño como para no causar una diferencia significativa en potencial superficial cerca de las regiones de fuente y drenador (Dosev, 2003). Bajo estas condiciones, la concentración de electrones a lo largo del canal permanecerá igual, como se muestra en la Fig. 2.9. Por lo tanto, el canal se comportará como una resistencia, es decir tendrá un comportamiento lineal respecto al voltaje aplicado. Para estas condiciones de polarización la resistencia del canal estará dada por:

$$R = - \frac{L}{\mu_n Z Q_n} \dots\dots\dots (18)$$

donde  $L$  y  $Z$  representan la longitud y el ancho del canal,  $\mu_n$  es la movilidad de electrones, y  $Q_i$  es el carga por la unidad de área de la capa de la inversión.

Cuando  $V_D$  se aumenta, la caída de potencial a través del canal reduce el voltaje entre la compuerta y la capa de inversión de la región cercana al drenador. Como resultado de esta situación, la concentración de electrones en la región cercana al drenador disminuirá causando un aumento en la resistencia del canal ( $R$ ). Debido al aumento de la resistencia del canal, la curva de corriente empezará a reducir su pendiente, alejándose del comportamiento lineal que mostraba inicialmente (ver Fig. 2.10). Si  $V_{DS}$  se incrementa en magnitudes suficientemente grandes, la caída de potencial a través del oxido, en la región cercana al drenador continuará disminuyendo, hasta caer por debajo del valor requeridos para mantener una capa de la inversión en esta zona. Cuando esto pasa, cerca del drenador se alcanza la condición de oclusión y por lo tanto la región empobrecida aísla el drenador del canal de conducción. Para esta condición la corriente del drenador alcanza un valor constante.

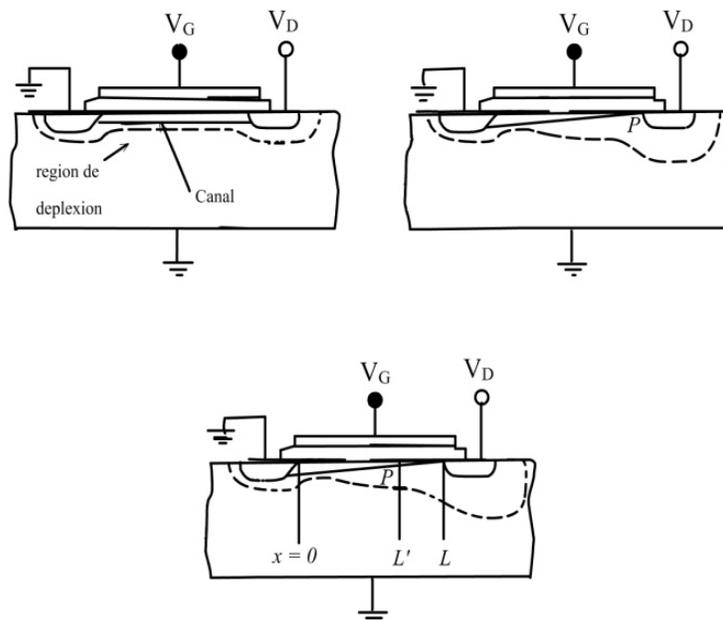


Fig. 2.9 Formación del canal en un MOSFET de enriquecimiento

Un incremento de  $V_D$  por arriba del voltaje de saturación,  $V_{Dsat}$ , causará que el punto oclusión ( $P$ ) se mueva hacia la región de la fuente, y la longitud efectiva del canal disminuirá ligeramente. Sin embargo, el potencial en ( $P$ ) permanecerá igual a  $V_{Dsat}$ , y el voltaje adicional a  $V_{Dsat}$  caerá en la región empobrecida. Así, la corriente del drenador no se alterará mucho cuando  $V_D$  se incrementa por arriba de  $V_{Dsat}$ .

Si la polarización de la compuerta se aumenta a  $V_{G2}$ , causará un aumento en la carga de capa de inversión  $Q_n$ . Debido a la mayor cantidad de portadores en el canal la resistencia del  $R$  del mismo se reduce, causando una corriente de drenador mayor para un valor dado de  $V_D$ . El punto de oclusión ocurrirá ahora a un valor más alto de  $V_D$ . Estos fenómenos son evidentes en la curva característica de salida ( $I_D - V_D$ ) mostrada en la Fig. 2.10.

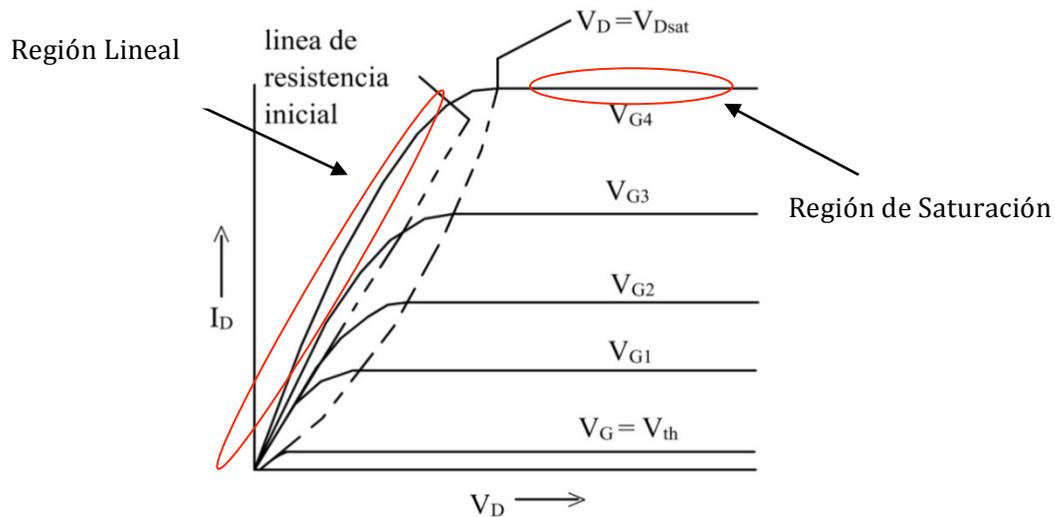


Fig. 2.10 Formación del canal en un MOSFET de enriquecimiento

Dos parámetros importantes que describen el funcionamiento de un transistor MOSFET son la conductancia  $g_D$  y la transconductancia  $g_m$ .

Con el sustrato conectado a tierra, la conductancia ( $g_D$ ) del MOSFET está definida como:

$$g_D = \left. \frac{\partial I_d}{\partial v_g} \right|_{V_D=const} \dots\dots\dots (19)$$

Mientras que la transconductancia ( $g_m$ ) es:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_d}{\partial v_g} \right|_{V_D=const} \dots\dots\dots (20)$$

**Modelo del Transistor MOSFET**

Como se mencionó anteriormente, dependiendo de las condiciones de polarización del transistor MOSFET y en régimen sobre umbral el transistor puede trabajar en región lineal o en saturación (M. Estrada A. C.-C., 2001) (Adelmo Ortiz-Conde, 2001).

**Región Lineal**

Para los valores muy bajos de  $V_D$  tales como  $V_D \ll (V_G - V_T)$  el MOSFET opera en régimen lineal. Según (M. Estrada A. C.-C., 2001) la ecuación de la corriente para el régimen lineal se puede escribir:

$$I_D = \frac{Z\mu_n C_{ox}}{L} (V_G - V_T)V_D \dots\dots\dots (21)$$

Donde  $V_T$  es el voltaje de umbral del transistor el cual representa el voltaje de conducción del un transistor. Para transistores MOSFET convencionales, característica de transconductancia en régimen lineal se realiza aplicando un barrido de voltaje a la compuerta del transistor con una polarización del drenador de 0.1V.

### Región de saturación

Cuando se cumple que  $V_D > (V_G - V_T)$  el transistor MOSFET trabaja en la región de saturación (M. Estrada A. C.-C., 2001). Para esta condición de polarización la corriente entre el drenador y la fuente se expresa:

$$I_{Dsat} = \frac{Z\mu_n C_{ox}}{2L} (V_G - V_T)^2 \dots\dots\dots (22)$$

Como se puede observar en la ecuación (22), la corriente de saturación es independiente de  $V_D$ , como es mostrado por las curvas en la (fig. 2.10) Esta dependencia cuadrática de la corriente respecto al voltaje de la compuerta es válida para todos los valores de  $V_D > (V_G - V_T)$ . La característica de transconductancia en saturación se mide haciendo un barrido del voltaje de compuerta para un voltaje de drenador que cumpla con la condición de polarización  $V_D > (V_G - V_T)$ . Para asegurar esto existen dos posibilidades, conectar el drenador al voltaje de compuerta mayor que se utilizará en la medición o realizar la medición cortocircuitando las terminales de drenador y compuerta.

### TRANSISTORES DE PELÍCULA DELGADA TFT (Thin - Film Transistor)

El TFT es un tipo especial de transistor de efecto de campo que se fabrica depositando los materiales en forma de capas finas. De esta forma se realiza el depósito del semiconductor, del material dieléctrico y de los metales de los contactos (Schroder, 2006).

#### **Estructura TFT**

Como se mencionó anteriormente, los TFT basan su funcionamiento en la estructura MOS (Dosev, 2003). Dependiendo del orden en que sean depositadas

las capas de los materiales con que se fabrica el transistor se pueden clasificar en dos categorías principales:

- a) Estructura Coplanar: Los electrodos de drenador, fuente y compuerta se encuentran del mismo lado del semiconductor.
- b) Estructura Escalonada: Los contactos de la fuente y el drenador están situados en un lado del semiconductor mientras que el electrodo de la compuerta está en el lado opuesto.

En la Fig. 2.11 se muestra un TFT con estructura escalonada.

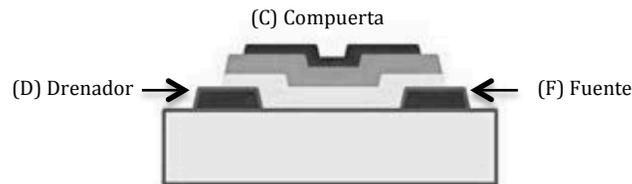


Fig. 2.11 Estructura TFT

El proceso de fabricación de los TFTs tiene una relación muy fuerte entre la temperatura máxima del proceso y el material usado como sustrato. Por un lado, la tecnología del silicio requiere de altas temperaturas (de 800 a 1100°C) para obtener capas semiconductoras con las adecuadas características eléctricas (movilidad). Pero por otro lado, para las aplicaciones de áreas amplias, como LCDs, se requiere que los sustratos sean lo más económicos posibles (como vidrios o plásticos) los cuales soportan temperaturas máximas que van desde unas cuantas decenas de grados centígrados hasta 600°C. Debido a este compromiso entre el funcionamiento-aplicación se hace indispensable buscar nuevas técnicas de depósito, de procesamiento, y/o nuevos materiales que

permitan obtener TFTs con movilidades suficientemente altas sobre sustratos de vidrios convencionales o plásticos (para pantallas flexibles (Smith, 2006)).

**Características eléctricas de los Transistores de Película Delgada**

Existen diferentes modelos que describen el comportamiento eléctrico de los transistores de película delgada, los cuales han sido implementados en programas de simulación eléctrica comerciales tales como Aim Spice, Eldo y Star-HSpice. Sin embargo, probablemente por la flexibilidad de aplicación para TFTs de diferentes materiales y por el reducido número de parámetros utilizados el modelo unificado desarrollado por Shur et. al. es el más difundido (Colinge, 1981). A continuación se describen algunos aspectos generales del modelo unificado, considerando las características aplicables al TFT de a-Si:H.

La ecuación general de la corriente de drenador-fuente que describe el comportamiento de los TFTs de a-Si:H es la siguiente:

$$I_{DS} = \frac{\frac{K}{V_{AA}^\gamma}}{1 + R\left(\frac{K}{V_{AA}^\gamma}\right)(V_{GS} - V_T)^{1+\gamma}} \cdot \frac{(v_{GS} - V_T)^{1+\gamma} V_{DS} (1 + \lambda V_{DS})}{\left[1 + \left[\frac{V_{DS}}{V_{DSSAT}}\right]^m\right]^{\frac{1}{m}}} \dots\dots\dots (23)$$

Donde **K** está definida por :

$$K = \frac{W}{L} C_i \mu \omega \dots\dots\dots (24)$$

Con la ecuación (23) es posible modelar las características eléctricas de los TFTs de a-Si:H en régimen sobre umbral. Dependiendo de las condiciones de polarización en las que trabaja el TFT se pueden hacer algunas simplificaciones para cada región de operación.

### **Régimen lineal**

En el régimen lineal, la polarización del voltaje  $V_{DS}$  es lo suficientemente pequeña como para que efecto el campo longitudinal en la concentración de portadores en la región del canal sea despreciable. Para estas condiciones y asumiendo que la resistencia de contacto del TFT es muy pequeña y despreciable, la ecuación (23) puede expresarse como:

$$I_{Dslin} = \frac{K}{V_{AA}^\gamma} (V_{GS} - V_T)^{1+\gamma} V_{DS} \dots\dots\dots (25)$$

Como se puede observar en la ecuación (25), bajo estas condiciones de polarización, la corriente  $I_{DS}$  depende de forma lineal respecto al  $V_{DS}$ .

### **Régimen de saturación**

Cuando  $V_{DS} > V_{DSAT}$ , donde  $V_{SAT} = V_{GS} - V_T$  el transistor trabaja en régimen de saturación. Para esta condición la corriente  $I_{DS}$  depende de forma cuadrática respecto al  $V_{DS}$ , tal y como se puede observar en la ecuación (26).

$$I_{Dssat} = \frac{K}{V_{AA}^\gamma} \alpha_s (V_{GS} - V_T)^{2+\gamma} \dots\dots\dots (26)$$

Las simplificaciones de la ecuación general del modelo de los TFTs serán utilizadas posteriormente para definir el procedimiento de extracción de parámetros.

### **Procedimiento de extracción de parámetros**

El procedimiento de extracción de parámetros para TFTs de a-Si:H y de otros materiales ha sido presentado en (L. Reséndiz, 2003) (M. Estrada A. C., 2004) (M. Estrada A. C., 2005) (M. Estrada A. C., 2005) (M. Estrada A. C.-C., 2002) (M. Estrada A. C.-C., 2001), para las diferentes regiones de operación de los TFTs. A continuación

se listan los pasos del procedimiento de extracción de parámetros del régimen sobreumbral para TFTs de a-Si:H, sin considerar ningún mecanismo de ruptura.

1. Para iniciar el procedimiento de extracción de parámetros es necesario realizar las siguientes mediciones para cada dispositivo:
  - a. Característica de salida.
  - b. Característica de transconductancia en régimen lineal.
  - c. Característica de transconductancia en régimen de saturación.
2. Es necesario conocer los siguientes parámetros geométricos, de fabricación y polarización del dispositivo:
  - a. Largo y ancho del canal.
  - b. Tipo de dieléctrico, espesor y constante dieléctrica.
  - c. Polarización para la característica de salida:  $V_D$  inicial, final y paso, así como  $V_G$  inicial, final y pasos.
  - d. Polarización para la característica de transconductancia lineal y de saturación:  $V_G$  inicial, final y paso, así como las condiciones de polarización usadas para medir en el régimen lineal (regularmente 1 V) y en el régimen de saturación.
3. La extracción del voltaje de umbral ( $V_T$ ) y del parámetro “ $\gamma$ ” se realiza a partir de la curva de transconductancia en régimen lineal. A los datos experimentales de  $I_{DS}$  se aplica operador  $H(V_{GS})$  dado por la siguiente expresión:

$$H(V_{GS}) = \frac{\int_0^{V_{GS}} I_{DS}(x) dx}{I_{DS}} \dots\dots\dots (27)$$

Simplificando la división de la integral de la corriente  $I_{DS}$  respecto al voltaje de compuerta entre la corriente de drenador se obtiene que:

$$H(V_{GS}) = \frac{1}{2+\gamma} (V_{GS} - V_T) \dots\dots\dots (28)$$

Como se puede observar, el operador **H** tiene un comportamiento lineal respecto al voltaje de compuerta. Considerando al ecuación de la recta  $y=m_1x+b$ , de la pendiente de la curva del operador **H** es posible extraer  $\gamma$ , mientras que el voltaje de umbral ( $V_T$ ) será igual al valor del intercepto con el eje de las abscisas. Las formulas para extraer estos parámetros se pueden expresar:

$$\gamma = \frac{1}{m_1} - 2 \dots \dots \dots (29)$$

$$V_T = -\frac{b}{m_1} \dots \dots \dots (30)$$

4. Para extraer el parámetro  $V_{AA}$  con los datos experimentales de  $I_{DSlin}$  se calcula y grafica  $(I_{DSlin})^{\frac{1}{1+\gamma}}$  vs  $V_{GS}$ . Al elevar la corriente lineal a la potencia  $\frac{1}{1+\gamma}$  nuevamente se obtiene la ecuación de una línea recta:

$$I_{DSlin}^{\frac{1}{1+\gamma}} = \left(\frac{K}{V_{AA}^\gamma} V_{DS}\right)^{\frac{1}{1+\gamma}} (V_{GS} - V_T) \dots \dots \dots (31)$$

De la pendiente de la ecuación (31) se puede despejar  $V_{AA}$ :

$$V_{AA} = \left(\frac{K}{m_2^{1+\gamma}}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \dots \dots \dots (32)$$

De esta manera de la grafica experimental  $(I_{DSlin})^{\frac{1}{1+\gamma}}$  vs  $V_{GS}$  se obtiene el valor de la pendiente  $m_2$  a partir del cual se extrae el valor de  $V_{AA}$ .

5. La resistencia del drenador y la fuente  $R_f$  puede ser calculada evaluando la ecuación (33) en el máximo valor de voltaje de compuerta. Usando este procedimiento "**R**" es extraída para los valores de la corriente en los cuales su efecto es más importante

$$I_{DSLIN} = \frac{\frac{K}{V_{AA}^\gamma}}{1 + R \left( \frac{K}{V_{AA}^\gamma} \right) (V_{GS} - V_T)^{1+\gamma}} \cdot (V_{GS} - V_T)^{1+\gamma} \cdot V_{DS} \dots \dots \dots (33)$$

Extracción parámetros de la curva de transconductancia en saturación.

6. Para extraer el parámetro  $\alpha_s$  de la curva de  $I_{DS}$  en saturación es necesario realizar un procedimiento parecido al que se aplicó en el paso 4. Como podemos observar de la ecuación (26), la  $I_{DS}$  en saturación también depende de forma exponencial con  $V_{GS}-V_T$ , con la diferencia de que en saturación el exponente de la dependencia es  $2+\gamma$ . Para obtener una expresión lineal, se eleva la  $I_{DS}$  medida a la potencia  $1/(1+\gamma)$  y de la región lineal de la representación gráfica de esta se puede extraer el valor de la característica de corriente en saturación  $V_{GS} = V_{DS}$  graficar  $\alpha_s$  mediante la siguiente expresión.

$$\alpha_s = \frac{m_3^{2+\gamma} V_{AA}^\gamma}{K} \dots \dots \dots (34)$$

Donde  $m_3$  es el valor de la pendiente de la región lineal de la curva  $I_{DS}^{2+\gamma}$  vs  $V_{GS}$

7.  $m$  y  $\gamma$  son extraídos de la característica de la salida de la ecuación (23).

Para extraer  $m$  se puede utilizar esta expresión.

8.

$$m = \frac{\log 2}{\log} \left[ \frac{K}{V_{AA}^\gamma} \frac{\alpha_s (V_{GS} - V_T)^{2+\gamma}}{I_{DS} (V_{DS})} \right] \dots \dots \dots (35)$$

Finalmente el parámetro  $\gamma$  es extraído evaluando la ecuación (23) con los valores máximos de los voltajes de  $V_{DS}$  y  $V_{GS}$  a partir de los datos experimentales.

Para obtener el valor de  $\eta$  se evalúa la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{\log^2}{\log \left[ \frac{K}{V_{AA}^\gamma} \cdot \frac{\alpha s (V_{GS} - V_T)^{2+\gamma}}{I_{DSSAT} (V_{GSSAT})} \right]} \dots (36)$$

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS

En el presente capítulo se muestra la etapa de diseño del Laboratorio de Extracción de Parámetros, basados en los requerimientos especificados por el usuario (M. Rodríguez, 2008).

### DETERMINACIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Para poder realizar la determinación de requerimientos se aplicó un cuestionario al usuario para conocer los requerimientos generales del mismo. En el Anexo 1 se presenta el cuestionario aplicado. Posteriormente se realizaron entrevistas para determinar las características de cada módulo. A continuación se presentan las conclusiones resultantes de esta etapa de análisis (Senn, 2000).

Tabla 3.1 Análisis de requerimientos generales

Problema	Propuesta
Las mediciones de dispositivos discretos “comunes” que se realizan en el laboratorio del CU UAEM Ecatepec, por si solas no proporcionan conclusiones definitivos acerca de los las características del mismo. Para obtener esta información regularmente es necesario procesar la información para extraer la información y posteriormente analizar estos resultados.	Desarrollar una herramienta que, de forma sistemática, permita realizar la extracción de los parámetros eléctricos básicos de mediciones experimentales realizadas a dispositivos “comunes”.  La herramienta debe de :
Para realizar la extracción de los parámetros de dispositivos comunes (diodos, BJTs, MOSFET) se invierte mucho tiempo, ya que es necesario que cada usuario desarrolle una aplicación “temporal” para procesar la información experimental.	Mostrar las gráficas de donde se está realizando el proceso de extracción.  Permitir al usuario seleccionar las regiones de extracción de los parámetros.

<p>Esté procedimiento de extracción requiere de cierta libertad para que el usuario seleccione las regiones de extracción de parámetros.</p>	<p>Mostrar los parámetros calculados con las configuraciones seleccionadas.</p>
<p>El procedimiento requiere de una etapa de retroalimentación que le permita al usuario identificar si los parámetros obtenidos corresponden con los datos experimentales.</p>	<p>Graficar las variables modeladas utilizando los parámetros extraídos en las etapas anteriores y compararlas, gráficamente con las curvas experimentales para que sirvan de retroalimentación al usuario respecto al adecuado funcionamiento del sistema.</p>
<p>Las aplicaciones desarrolladas por cada usuario regularmente son complicadas de implementar para otros dispositivos. Están limitadas al número de mediciones o son muy susceptibles a errores por omisión en la captura de los parámetros geométricos o de polarización.</p>	<p>Presentar los parámetros extraídos en pantalla y en caso de solicitarlo el usuario creará un archivo electrónico con los datos que identifiquen al dispositivo y las características geométricas y de polarización.</p>
<p>Regularmente los datos proporcionados por los programas desarrollados no son almacenados en forma de archivos electrónicos, o no tienen un formato estándar lo que dificulta su utilización en etapas posteriores de la investigación.</p> <p>En muchos casos la información se pierde y debe de repetirse el proceso de extracción en varias ocasiones.</p>	
<p>Continuamente se requieren realizar procesos de extracción a varios dispositivos al mismo tipo y con las mismas características geométricas y de polarización.</p>	

Con base a las actividades académicas y científicas que se realizan en el Laboratorio de caracterización eléctrica del Centro Universitario UAEM Ecatepec se determinó que los dispositivos que comúnmente se estudian y para los cuales vale la pena desarrollar un módulo de extracción de parámetros son:

- Resistencias.
- Diodos de unión PN
- Transistor de unión bipolar (BJT)
- Transistores MOSFET
- Transistores TFT

#### **Requerimientos funcionales comunes entre los módulos de extracción**

Cada módulo de extracción realizará el proceso de extracción de parámetros mediante las técnicas propias del dispositivo descritas en la sección de antecedentes. A continuación se describen el funcionamiento general de cada uno de los bloques de extracción de los dispositivos y posteriormente se analizan las funciones comunes de los módulos.

#### ***Módulo Resistencia***

En este módulo el sistema realizará el análisis y extracción de parámetros correspondientes a las mediciones experimentales de las resistencias.

***Entrada:*** Datos experimentales de la medición de corriente para un barrido de voltaje ( $V_R$ ,  $I_R$ ).

***Proceso:*** De la gráfica experimental de  $I_R$  vs  $V_R$  y en base a la ley de Ohm se calculará el valor real de la resistencia.

***Salida:*** La resistencia del elemento o dispositivo.

### **Módulo Diodo**

En este módulo el sistema realizará la extracción de parámetros correspondientes a las mediciones experimentales del diodo.

**Entrada:** Datos experimentales de la curva de corriente característica del diodo ( $I_D$  vs  $V_D$ ).

**Proceso:** Se implementará el procedimiento de extracción de parámetros de diodos de unión P-N basados en el modelo desarrollado por Shockley descrito en los antecedentes.

**Salida:** Los parámetros extraídos en este bloque serán la corriente inversa de saturación ( $I_S$ ) y el factor de idealidad ( $n$ ).

### **Módulo Transistor de unión bipolar**

En este módulo el sistema realizará el análisis y extracción de parámetros correspondientes a las mediciones experimentales de los BJT.

**Entrada:** Datos experimentales de las curvas de corriente de emisor y de colector para las condiciones de polarización  $V_{BE}=0V$  y  $V_{BC}=0V$ .

**Proceso:** Se realizará el proceso de extracción de los parámetros del dispositivo utilizando el modelo matemático de Ebers – Moll descrito en la sección de antecedentes.

**Salida:** Los valores extraídos de este bloque serán  $I_S$ ,  $I_{ES}$ ,  $n_F$  y  $n_R$ .

### **Módulo Transistor de película delgada**

En este módulo el sistema realizará el análisis y extracción de parámetros correspondientes a las mediciones experimentales de los transistores de película delgada.

**Entrada:** Condiciones geométricas, condiciones de polarización y datos experimentales de la curva característica de salida y de transconductancia en régimen lineal y de saturación.

**Proceso:** Se realizará el procedimiento de extracción basado en el modelo descrito por Shur.

**Salida:** Los parámetros extraídos a partir de la aplicación del modelo anterior son:  $\gamma$ ,  $V_t$ ,  $\alpha_s$ ,  $V_{aa}$ ,  $R$ ,  $\lambda$ ,  $m$ . Adicionalmente se obtendrán las curvas características modeladas.

### **Funciones comunes de los módulos de extracción.**

#### ***Función: Carga de archivos experimentales.***

Cada módulo tendrá la función seleccionar el archivo de datos experimentales del dispositivo a partir de los cuales se realizará el proceso de extracción de parámetros.

**Entrada:** Archivo de datos experimentales (en formato **.dat**) en donde se almacenan, en dos columnas, las condiciones de voltaje aplicado y la corriente medida.

**Proceso:** Al dar clic en un botón destinado para la carga de archivos, el programa mostrará una interfaz de búsqueda en donde se pueda localizar el archivo deseado y seleccionarlo para que el programa lea el contenido y pueda distribuirlo según las necesidades del módulo.

**Salida:** Los datos almacenados en el archivo experimental serán asignados a una variable para utilizar sus valores durante la ejecución del programa.

#### ***Función: Graficación***

En esta función se visualizan los datos experimentales cargados a las variables, se seleccionan los rangos en los que se realizará la extracción de parámetros, y

se visualizan las comparaciones entre las curvas experimentales y las modeladas con los parámetros extraídos. Al final le sirve al usuario para verificar si, con los parámetros extraídos, se obtienen curvas modeladas que ajusten satisfactoriamente con las experimentales.

**Entrada:** Los datos experimentales almacenados en las variables. Datos de curvas modeladas con los parámetros extraídos.

**Proceso:** Cada módulo del sistema debe contar con un botón o proceso que despliegue la gráfica indicada cuando sea requerido por el flujo del programa o por el usuario. Los valores a graficar son seleccionados desde la programación, el usuario final podrá dar clic en el botón que desplegará los valores de corriente-voltaje (**I-V**) que se extraigan del programa

**Salida:** Gráfico donde se despliega la información experimental o modelada por el programa. En el eje de las ordenadas se representarán los valores de corriente, mientras que el eje de las abscisas representará a los niveles de voltaje. La salida puede estar en escala lineal o semilogarítmica.

#### **Función: Guardar Archivos**

Este módulo permitirá al usuario almacenar los datos extraídos durante el desarrollo del programa en un archivo electrónico con el fin de su posterior análisis.

**Entrada:** Los valores extraídos de las mediciones experimentales, el nombre del archivo definido por el usuario, las características geométricas de los dispositivos, así como los datos de las curvas modeladas.

**Proceso:** Cuando el usuario acciona el botón de guardar datos en archivo, se crea un archivo donde se almacenan los parámetros extraídos, las características geométricas del dispositivo, y los datos de las curvas modeladas. El nombre del archivo será definido por el usuario en la ventana designada para tal efecto.

**Salida:** Se obtendrá un archivo con extensión (**\*.dat**), donde estarán almacenados los valores de corrientes extraídas y parámetros.

## ESTUDIO DE FACTIBILIDAD

El estudio de factibilidad se realizo para poder determinar de manera clara si el proyecto que lleva por nombre “Laboratorio de extracción de parámetros” tendrá la posibilidad de concluirse en tiempo en forma así como había sido planteado desde un inicio. Este estudio consta de tres etapas las cuales son: factibilidad técnica, factibilidad económica y factibilidad operacional.

### **Factibilidad técnica**

Después de realizar el análisis de requerimientos y en base a la aplicación matemática del sistema se consideró que la plataforma adecuada para desarrollar el laboratorio de extracción de parámetros es MATLAB (MathWorks, Programming, 2004) (MathWorks, Using MATLAB® Graphics, 2004). En este sentido, se realizó un estudio de las características mínimas requeridas para la instalación de MATLAB con el fin de analizar la factibilidad técnica de desarrollar el proyecto. En la tabla 3.2 se presentan las características mínimas requeridas, las características del equipo en el que se desarrollará el proyecto y la evaluación del cumplimiento de los requisitos.

Tabla 3.2 Estudio realizado de las características mínimas para la instalación de MATLAB y las características del equipo con el que se cuenta

	<b>Requerimientos mínimos para la instalación de Matlab</b>	<b>Características del equipo en el espacio de medición</b>	<b>Cumple con los requerimientos</b>
<b><i>Procesador</i></b>	Procesadores Pentium II, III y IV, HT, Core y AMD	Pentium 4 a 2.6	Cumple
<b><i>Sistema operativo</i></b>	Windows en sus versiones 2000, XP o Vista	Windows XP con SP 3	Cumple

<b>Memoria RAM</b>	Un mínimo de 256 MB	504 MB	Cumple
<b>Tarjeta de gráficos</b>	Mínimo de 64 MB	124 MB	Cumple
<b>Espacio disponible en el disco duro</b>	La instalación típica requiere un mínimo de 2.7 Gb	31 GB libres	Cumple
<b>Monitor y resolución</b>	Monitor con resolución media de 16 bits	32 bits	Cumple

### **Conclusiones del estudio técnico**

Después de revisar la comparación, en el análisis anterior entre los requerimientos mínimos de instalación y utilización de Matlab y de las características de la computadora que se encuentra en el área de medición, se concluye que:

- El procesador con el que cuenta la computadora del laboratorio de medición es el adecuado para la plataforma de desarrollo.
- Xp es un sistema operativo ideal para la utilización de Matlab, lo único que queda por verificar es que el Service Pack que tiene la computadora cuente con el framework de Microsoft requerido para Matlab.
- La memoria destinada para Ram de la computadora gestionara de manera adecuada las solicitudes de la plataforma Matlab.

- La tarjeta de gráficos es adecuada.
- El espacio en disco duro en el equipo es suficiente para la instalación completa de Matlab para evitar ausencia de alguna librería.
- El equipo cuenta con un monitor de LCD de proporción de resolución auto ajustable.

Con base en las conclusiones que se presentaron a partir del análisis de requerimientos, se considera adecuado el equipo para la instalación de Matlab y todos sus componentes.

#### **Factibilidad económica**

Para este punto es importante dejar en claro que la realización de este proyecto no busca fines de lucro de ningún tipo, el objetivo de este, es el de la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Computación. Para fines de cumplir con la metodología empleada para el desarrollo de este proyecto se debe tomar en cuenta la realización de un estudio de costos (Ver Anexo II).

El modelo elegido para realizar la proyección de costos para este sistema es COCOMO II (B. Boehm, 2000), debido a que engloba todos los aspectos del ambiente de desarrollo del programa y del programador, desde la experiencia con la plataforma de desarrollo, hasta las horas por día que serán dedicadas a la programación del sistema.

#### ***Clasificación del Sistema según COCOMOII***

El Laboratorio de extracción de parámetros siendo analizado con COCOMO, pertenece a una “clasificación orgánica”, debido a que es un sistema que involucra procesamiento con bases de datos y se centra en las transacciones y recuperación de datos.

El sueldo mensual se considero con respecto al promedio que tiene como pago una persona que programa en un lenguaje como C (occ). La conclusión de este

análisis destaca el costo del proyecto según como sería de **70,942 pesos**. Este sería un costo inicial puesto que hay que agregar aun el pago de las licencias de los programas a utilizar, tales como Matlab (MathWorks, Creating Graphical User Interfaces, 2004) (MathWorks, External Interfaces, 2004) (MathWorks, Programming, 2004) (MathWorks, Using MATLAB® Graphics, 2004) y Windows. Aunado a esto faltaría el estudio de los costos de los insumos, tales como el servicio de luz, papel, tinta, etc.

#### **Factibilidad operacional**

El laboratorio de extracción de parámetros será un proyecto que contará con todas las características establecidas por el usuario final en un inicio, será una herramienta completamente funcional que facilitará el trabajo en el laboratorio de medición del **CU UAEM Ecatepec**. El laboratorio de extracción de parámetros se pondrá a disposición de la comunidad de investigación del área.

## CAPÍTULO IV. DISEÑO Y CODIFICACIÓN

### DISEÑO RECOMENDADO

Con base al análisis de requerimientos realizado previamente, en la Fig. 4.1 se presenta el diseño a bloques del “*Laboratorio de extracción de parámetros*”. Como se puede observar, el sistema fue diseñado en base a módulos por dispositivo (resistencia, diodo, BJT o MOSFET), los cuales se seleccionarán a partir de un menú principal. La fig. 4.2 muestra el diagrama de flujo de información del sistema. En esta figura se observa que posterior a la selección del módulo, como datos de entrada se deberán proporcionar los datos geométricos, de polarización y datos de las mediciones experimentales, los cuales serán utilizados en la sección de extracción de parámetros. El procedimiento de extracción de parámetros se realizará en base al modelo matemático de cada dispositivo. Los resultados de cada uno de los pasos de la extracción se desplegarán de forma gráfica o mediante cuadros de texto. Finalmente los módulos permitirán generar un archivo de texto plano con los parámetros extraídos y las curvas modeladas de cada dispositivo. El regreso al menú principal se podrá realizar en cualquier momento a petición del usuario.

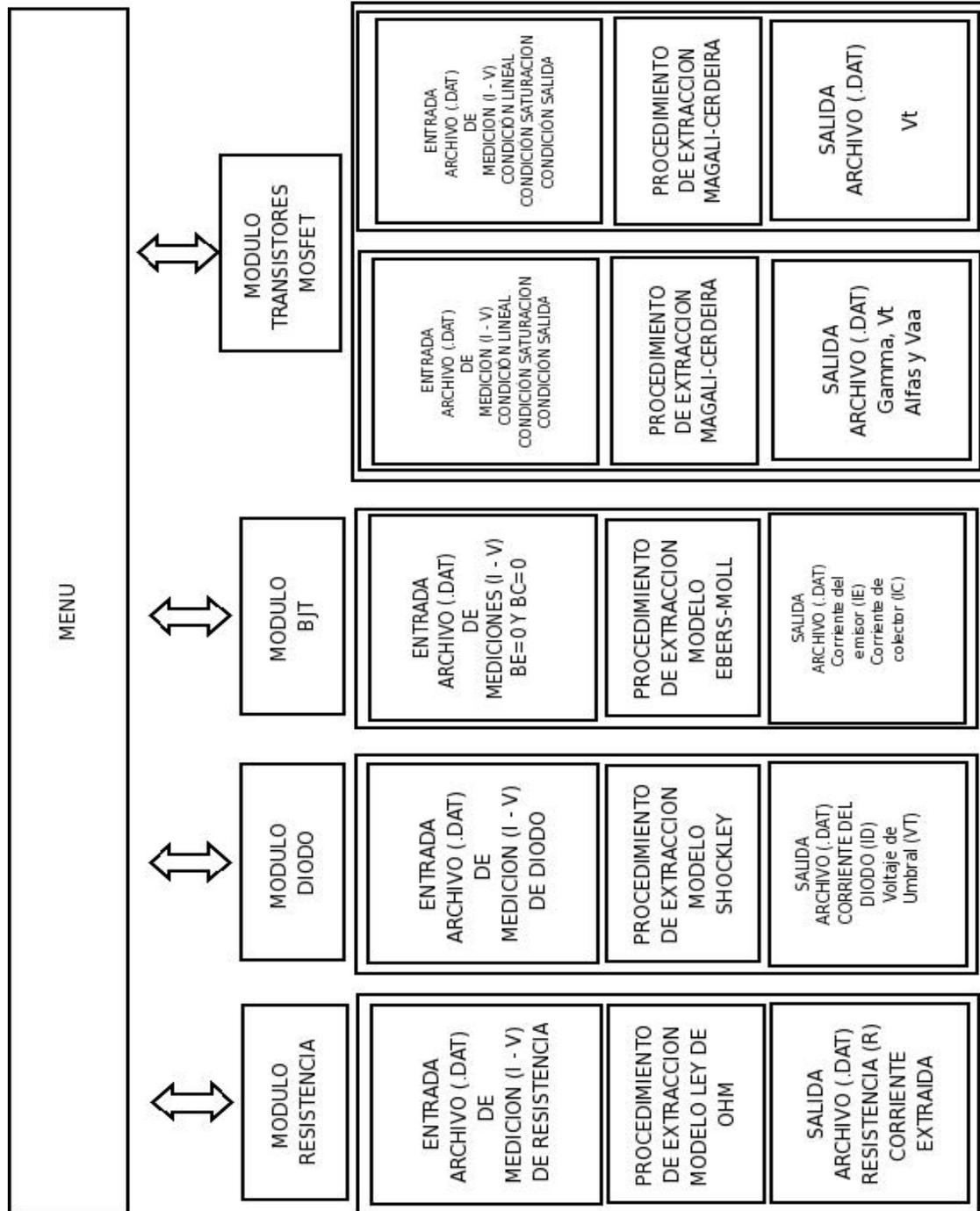


Fig. 4.1 Diagrama de bloques del "Laboratorio de extracción de parámetros"

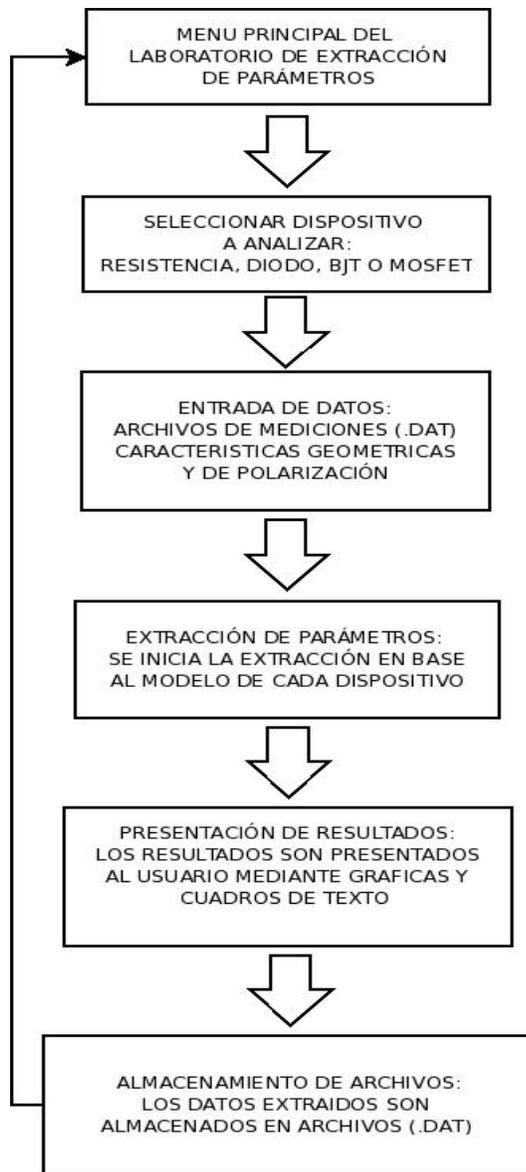


Fig. 4.2 Diagrama de flujo de la información del sistema

En las secciones posteriores se describen los diagramas a bloques de los programas desarrollados para cada uno de los módulos del sistema.

## MÓDULO RESISTENCIA

El bloque de extracción de parámetros de resistencias (lineales) es el módulo más sencillo del sistema. En este se utiliza la ley de Ohm para extraer la magnitud de la resistencia a analizar y modelar su curva de corriente-voltaje del dispositivo. Como se puede observar en la figura 4.3, como entrada de datos se requiere el archivo electrónico que contiene los datos de la medición de la corriente experimental. Los datos experimentales son interpolados por el programa y desplegados a través de una gráfica en pantalla. El ajuste de los datos experimentales a un modelo lineal permite obtener el valor de la pendiente y el intercepto con el eje de las ordenadas. En la curva  $I$  contra  $V$ , el inverso de la pendiente es igual al valor de la resistencia del dispositivo. El valor de esta resistencia es desplegado en pantalla.

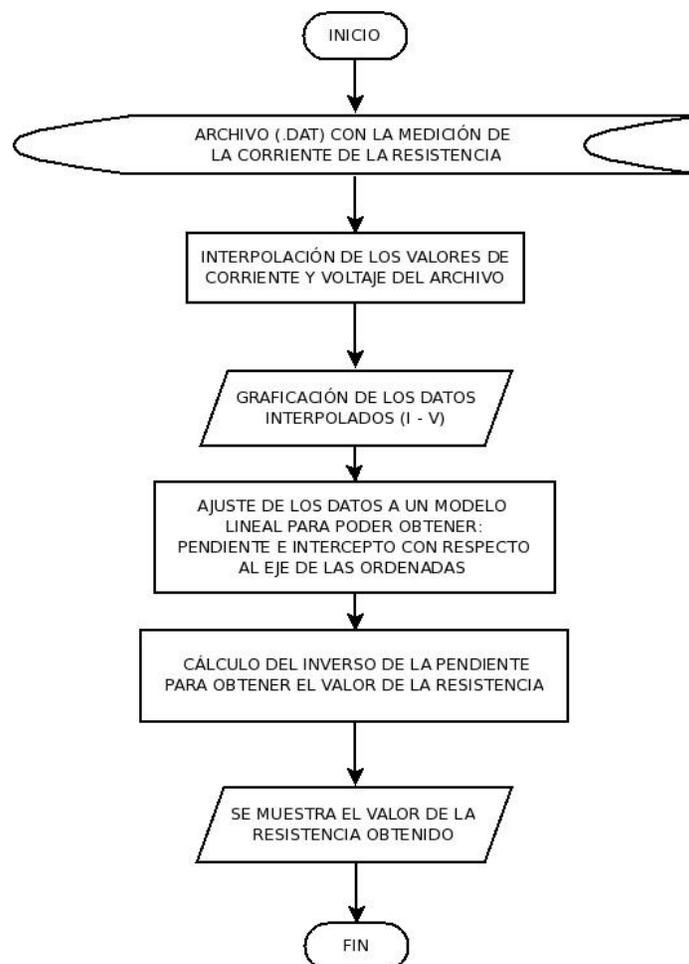


Figura 4.3 Diagrama de flujo del programa de extracción de parámetros de Diodo P - N.

## MÓDULO DIODO

En el siguiente diagrama se muestra el flujo de procesos del programa de extracción de parámetros del diodo (ver Fig. 4.4). El primer paso es la obtención de los datos experimentales mediante la carga de un archivo (con extensión .dat). En este archivo los datos experimentales están ordenados en dos columnas. La primera de las columnas contiene un listado de las condiciones de voltaje aplicado en la medición. La segunda tiene el registro de las mediciones de corriente del diodo para cada condición de polarización aplicada. Una vez asignados los datos experimentales a las variables se realiza una interpolación de los datos para la presentación gráfica en pantalla en escala lineal y semilogarítmica. Para calcular el factor de idealidad del diodo se utiliza el operador H descrito en la sección de los transistores MOSFET. Por lo tanto se requiere calcular la integral de la corriente de forma numérica. El operador H se obtiene dividiendo la integral de la corriente del diodo entre la corriente. Para valores de voltaje de polarización tales que el término exponencial de la expresión de la corriente del diodo es mucho mayor que la unidad, el operador H alcanza un valor constante que es igual al producto del voltaje térmico por el factor de idealidad. El programa de extracción de parámetros calcula la derivada del operador H que servirá de referencia al usuario sobre la región donde el operador H es constante. El usuario selecciona un punto a partir del cual el programa identifica el rango de valores que se encuentran dentro del  $\pm 10\%$  del valor seleccionado. Con este rango de valores el programa hace una regresión lineal para calcular el valor de  $n$ , al cual se le saca el logaritmo natural para poder mediante la fórmula del diodo calcular la corriente  $I_s$ .

Finalmente los datos de la corriente extraída son presentados en una gráfica, en la cual se realiza una comparación entre los datos experimentales con los datos extraídos de la corriente del diodo. Esto con la finalidad de verificar que el procedimiento de extracción de parámetros pueda simular de manera “similar” las condiciones del diodo real.

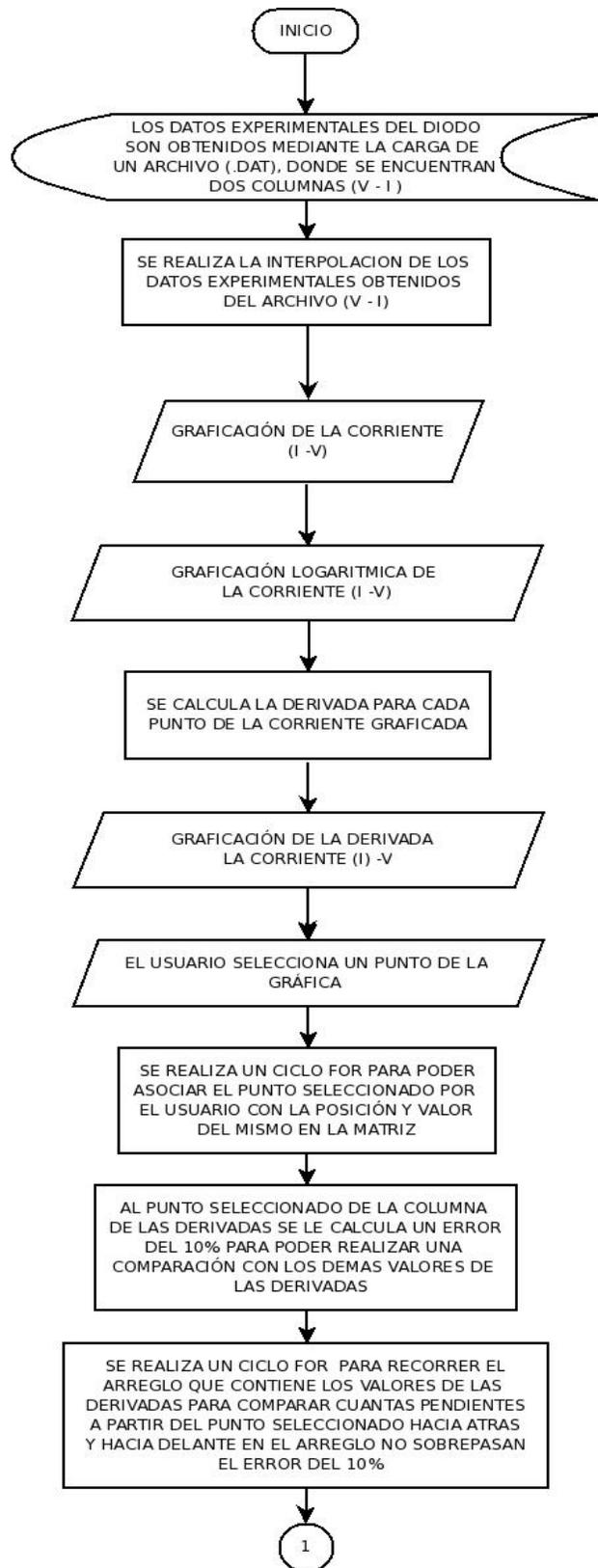


Figura 4.4a. Diagrama de flujo del programa de extracción de parámetros de Diodo P - N.

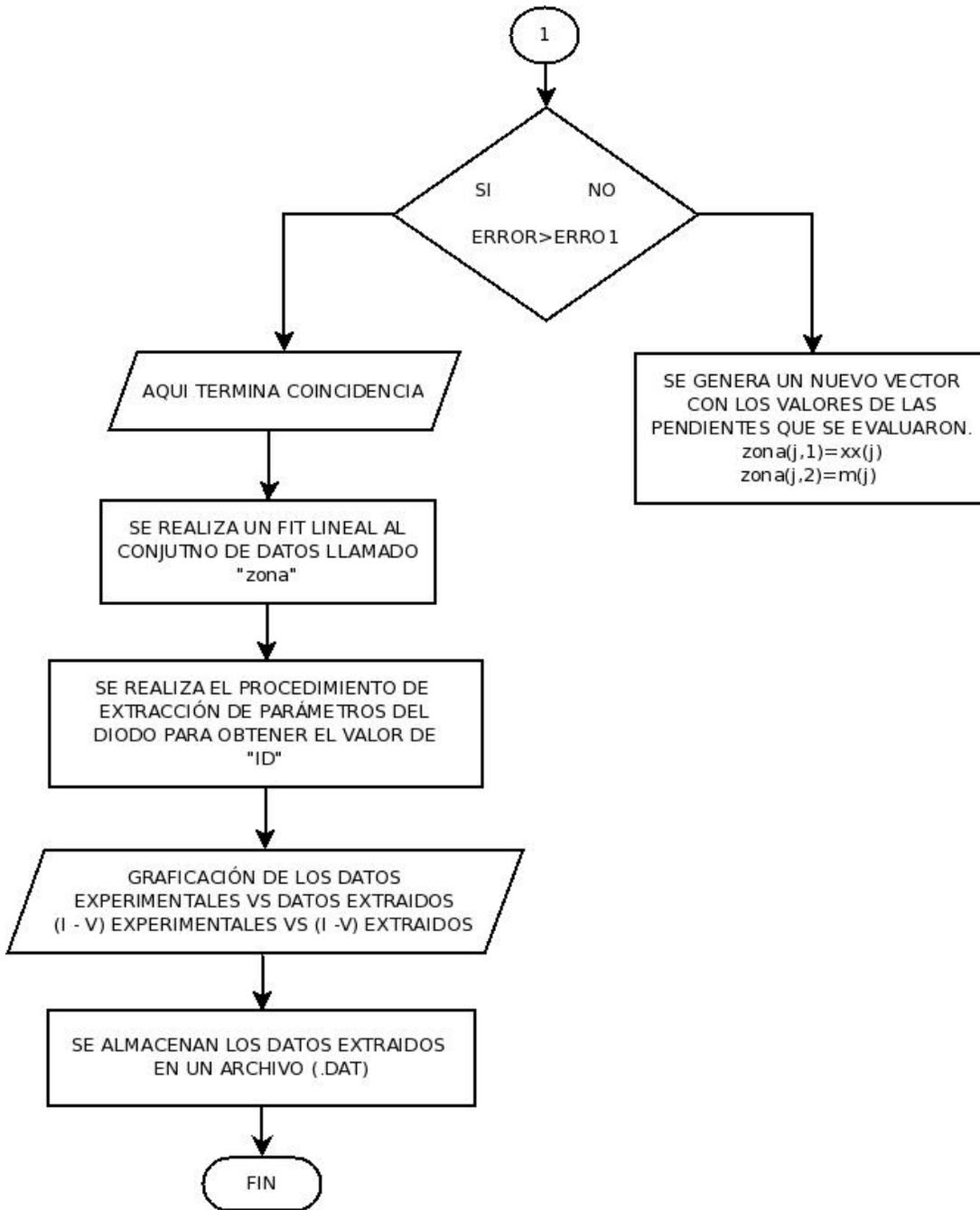


Figura 4.4b. Diagrama de flujo del programa de extracción de parámetros de Diodo P - N.

## MÓDULO BJT

En el diagrama de la fig. 4.5a y 4.5b, se puede ver el desarrollo del proceso de extracción de parámetros del transistor bipolar. El proceso de extracción se realizó dos partes, debido a que es necesario realizar la caracterización de las uniones base-colector y base-emisor utilizando las expresiones del modelo de Ebers-Moll. En el primer paso se cargan los archivos de mediciones de corriente de las uniones base-colector ( $I_{BE}=0$  V) y base-emisor ( $I_{BC}=0$  V). Los datos se grafican en escala logarítmica. En función del número de regiones lineales que se observen en la gráfica de la medición y con la finalidad de que el modelado considere diferentes mecanismos de conducción en el dispositivo, el usuario puede seleccionar una o dos regiones de extracción de parámetros dentro de la curva medida. Cuando están presentes dos mecanismos de conducción, será necesario realizar dos procesos de extracción de los cuales se obtendrán los factores de idealidad y la corriente inversa de saturación para cada región. Una vez extraídos los parámetros el programa modelará las curvas del transistor BJT para compararlas gráficamente con las mediciones experimentales. Finalmente el usuario tiene la posibilidad de guardar los parámetros extraídos en un archivo (.dat).

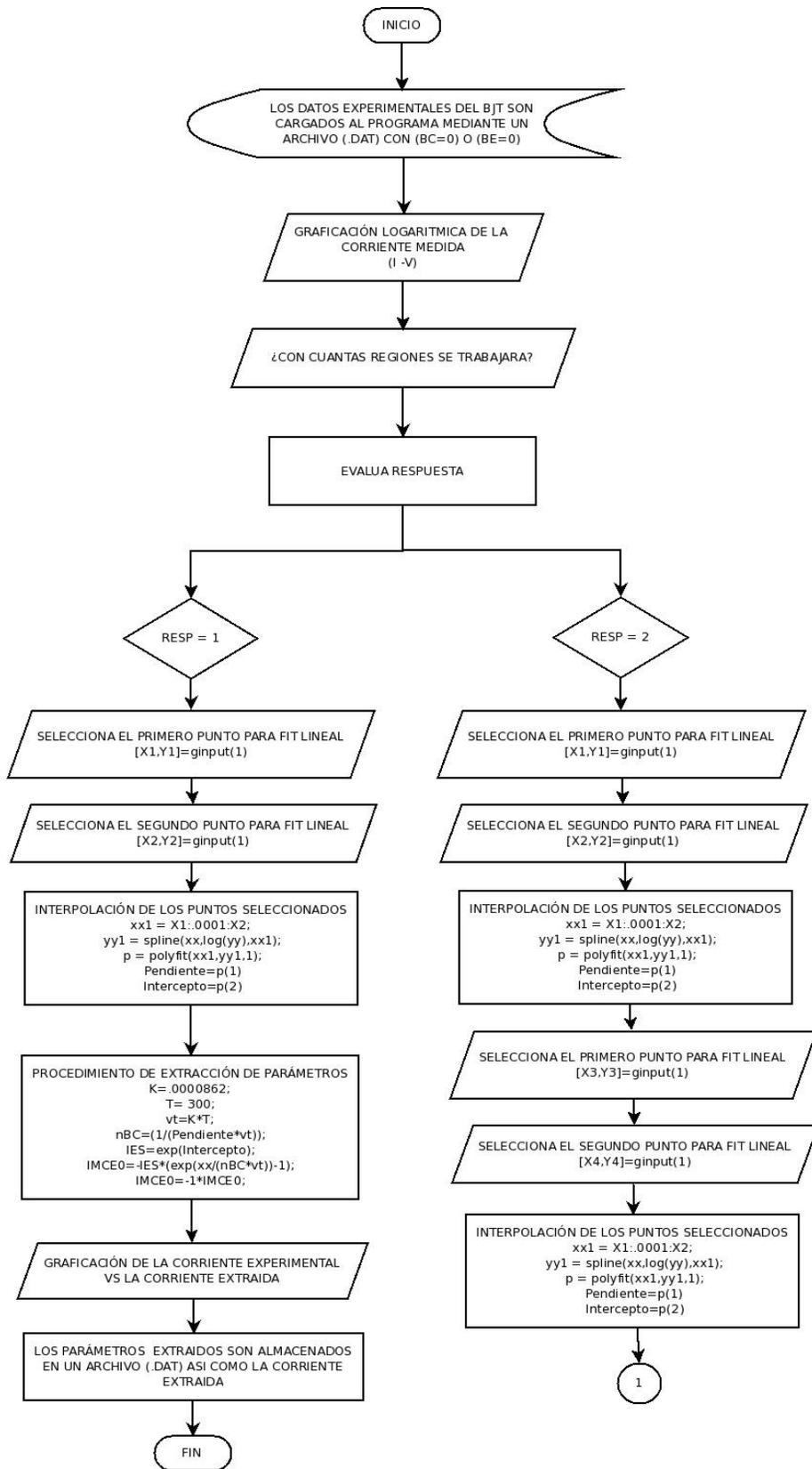


Figura 4.5a. Diagrama de flujo del programa de extracción de parámetros de BJT.

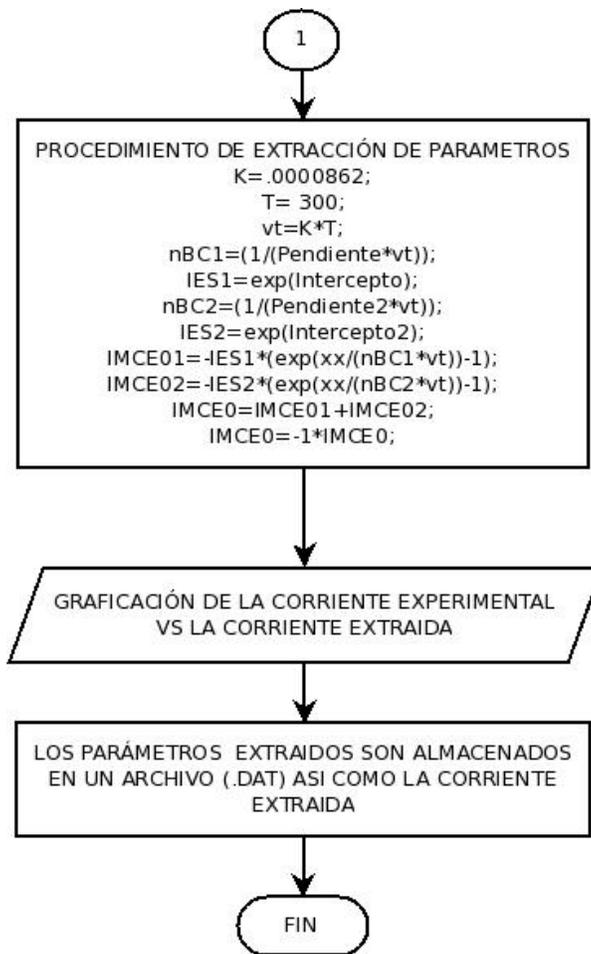


Figura 4.5b. Diagrama de flujo del programa de extracción de parámetros de BJT.

## MÓDULO TRANSISTORES MOSFET

El módulo de MOSFET permite seleccionar la extracción de parámetros para MOSFET convencionales o transistores de películas delgadas TFT.

### *Transistores TFT*

La extracción de parámetros de los TFTs se realiza en tres etapas manteniendo el siguiente orden:

1. Extracción de la característica lineal.
2. Extracción de la característica en saturación.
3. Extracción de la característica de salida.

En la primera etapa, inicialmente almacenará en memoria las variables geométricas y de polarización que se utilizaran a lo largo del procedimiento de extracción. Posteriormente el programa calcula los valores de la capacitancia del dieléctrico y el factor geométrico de la corriente y llamará a ejecución al subprograma de extracción lineal. Esta función se realiza en dos ocasiones más pero para los subprogramas para la extracción en saturación y la extracción de los valores de salida, después de que cada uno de ellos en secuencia terminen su función.

En el bloque de la extracción lineal se realiza la extracción de  $V_T$ ,  $\gamma$  y  $V_{AA}$  a partir de los datos experimentales correspondientes a la característica de transferencia lineal y utilizando el procedimiento de extracción descrito en el capítulo de antecedentes. La figura 4.5, muestra como se cargan los datos de la curva de la corriente experimental medida en régimen lineal, almacenados en el archivo ".dat". Con base a las mediciones experimentales el programa calcula la integral de la corriente la cual posteriormente es utilizada para el cálculo del operador "H". Una vez hecho esto el programa muestra la gráfica del operador "H" para que el usuario seleccione los puntos entre los cuales se realizara una regresión lineal de la curva. El voltaje de umbral ( $V_T$ ) se calcula a partir del intercepto de la regresión lineal del operador "H" y  $\gamma$  se obtiene a partir de la pendiente de la región lineal del operador H.

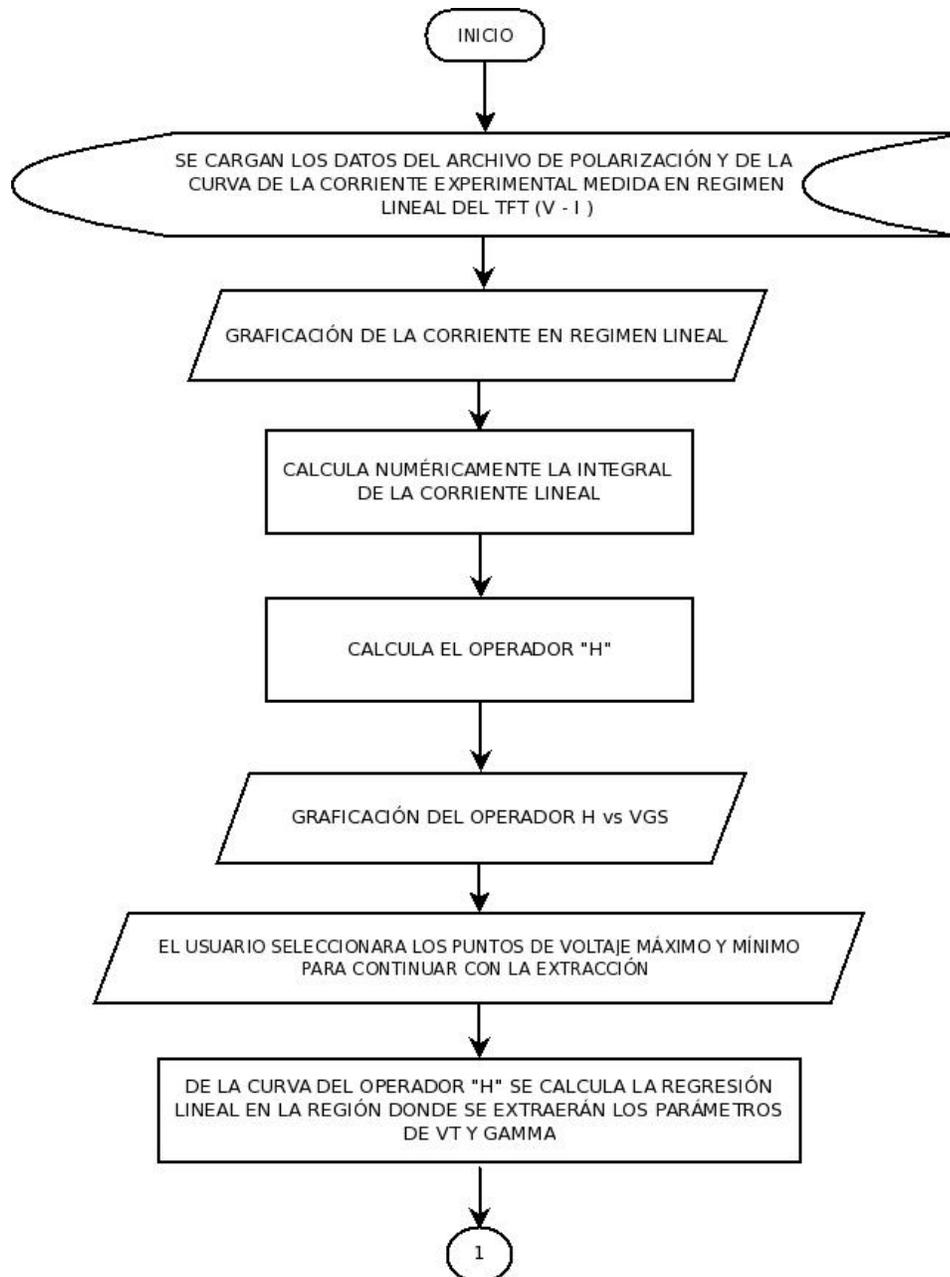


Fig.4.5a Diagrama de flujo del módulo en régimen lineal

Una vez calculado el valor de  $V_T$  y  $\gamma$ , se realiza la extracción de  $V_{AA}$  a partir de la curva  $I_{DS}^{1/1+\gamma}$  vs  $V_{GS}$ . El programa calcula la regresión lineal en la región de la región indicada por el usuario. Con la finalidad de corroborar el adecuado funcionamiento del procedimiento de extracción el programa presenta las gráficas de corriente contra voltaje de compuertas obtenidas de manera experimental y

modelada. En caso de que la curva modelada no ajuste razonablemente bien con la curva experimental, el programa permite modificar la selección de las regiones de extracción.

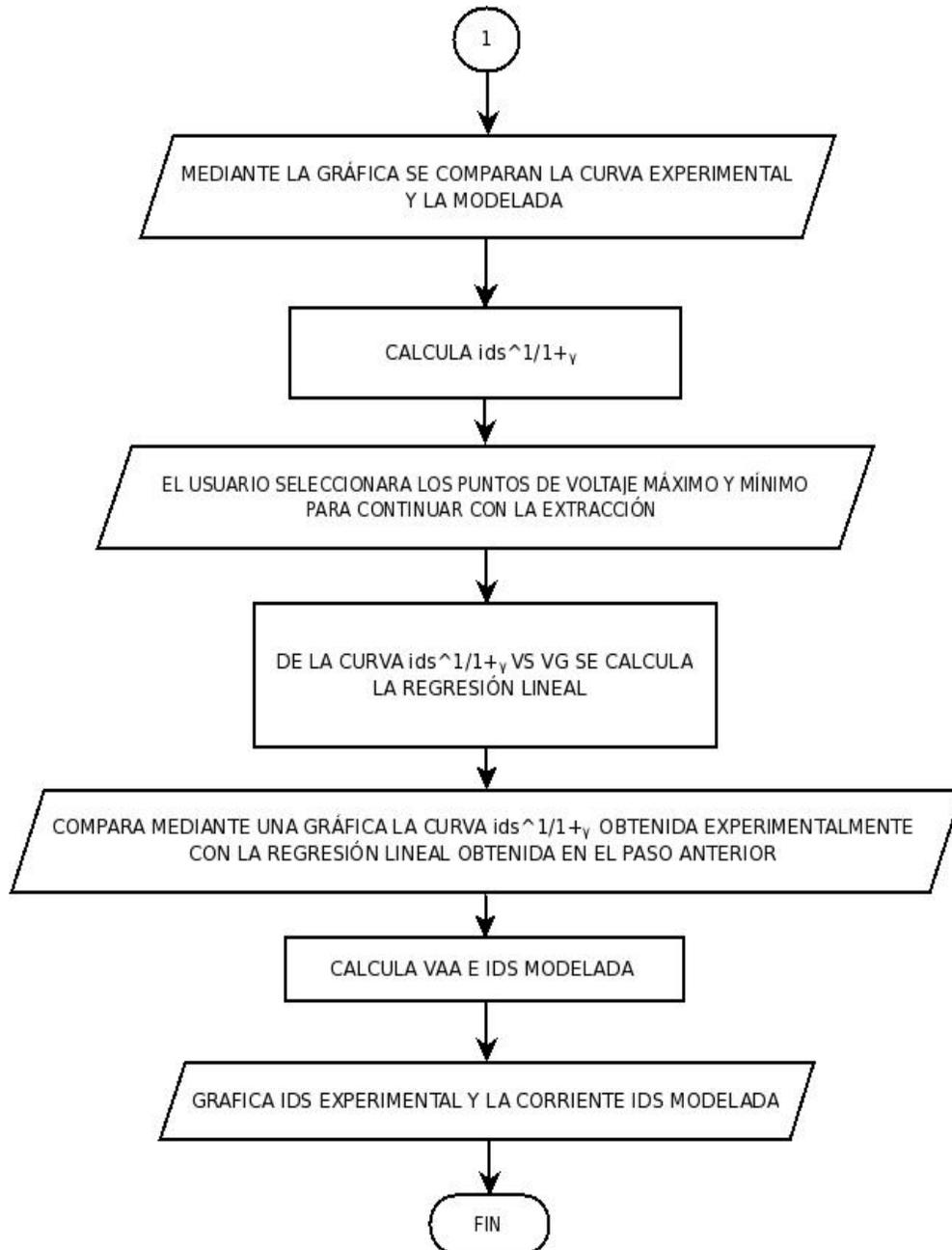


Fig.4.5b Diagrama de flujo del módulo en régimen lineal

En la segunda etapa de extracción se utiliza las mediciones del transistor realizadas en régimen de saturación. El objetivo de este bloque será obtener el valor de  $\alpha_S$  para la región de saturación. El procedimiento de esta etapa requiere de los valores de  $V_T$ ,  $\gamma$  y  $V_{AA}$  previamente calculados en la etapa de extracción lineal.

Inicialmente se carga el archivo de medición en régimen de saturación. Los valores de corriente medidos son graficados y se calcula el valor de  $I_{DSSAT}^{1/2+\gamma}$ . El usuario selecciona la región de donde se desea realizar la extracción de parámetros. El valor mínimo y máximo de polarización de compuerta que define el rango de extracción seleccionado por el usuario serán almacenados en las variables VGSMAX y VGSMIN. El programa calcula el valor de  $\alpha_S$  y utiliza el valor obtenido para calcular la  $I_{DS}$  modelada en saturación. Posteriormente se presentan en pantalla, de forma gráfica, las curvas experimental y modelada (en régimen de saturación). Igual que en la sección lineal, si el usuario no está conforme con los resultados del procedimiento de extracción de la corriente en saturación el programa permite hacer una nueva selección de la región de extracción.

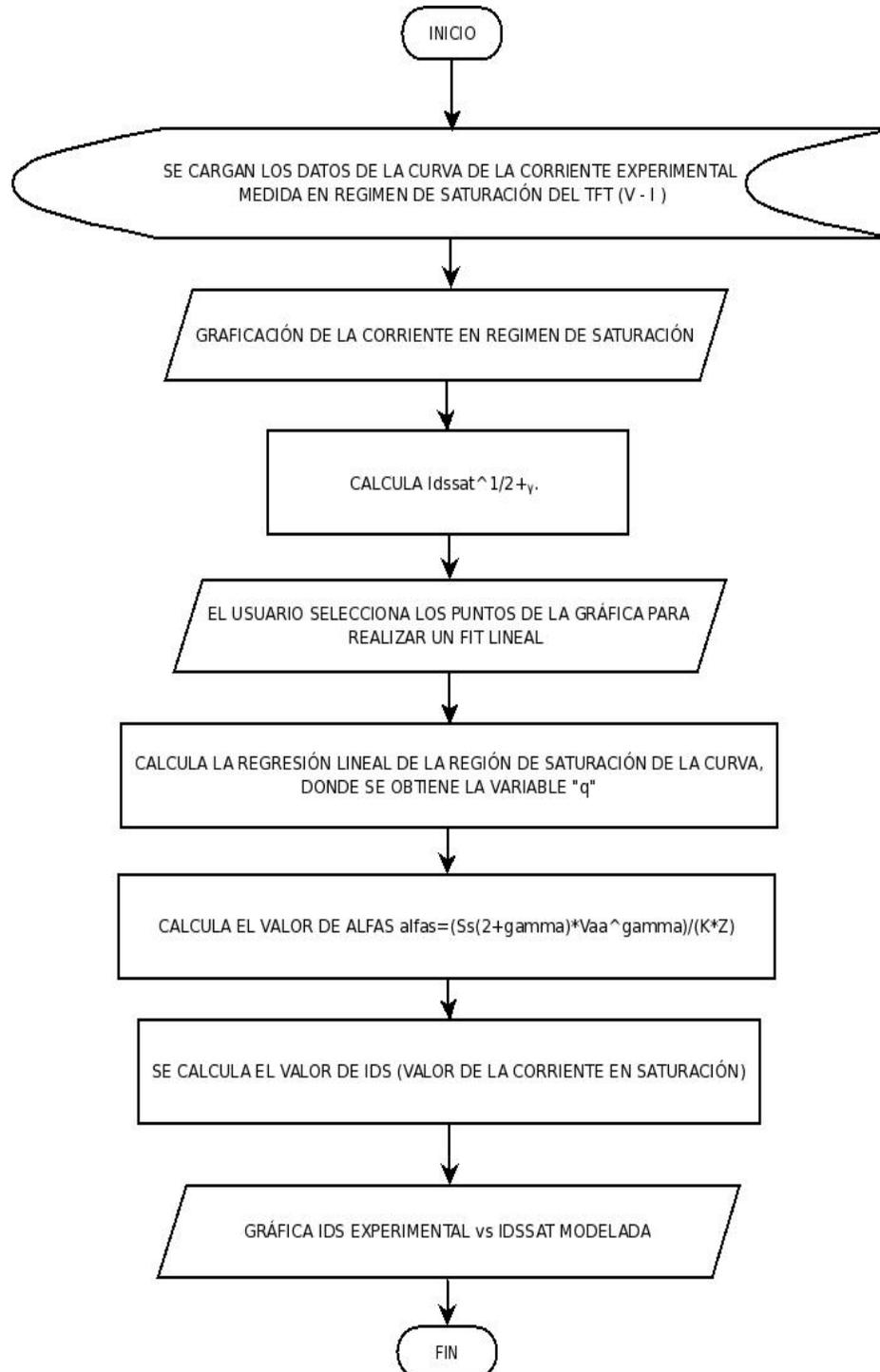


Fig. 4.6 Diagrama de flujo del prototipo en régimen de saturación

Finalmente se realiza la extracción de los parámetros de la característica de salida. En esta etapa se utilizarán los parámetros extraídos de las dos etapas previas. De manera similar, inicialmente será necesario cargar los datos experimentales de la característica de salida almacenados en un archivo “.dat”. En este último bloque del programa, se obtendrán los valores de  $M$ ,  $\lambda$  y  $R$ . Inicialmente el programa utiliza los valores por omisión,  $m=2.5$ ,  $\lambda=0.0008$  y  $R=0$  ohms, los cuales el usuario modifica en la interfaz. Con estos valores se calcula la corriente  $I_{DS}$  modelada para la región de salida, la cual es graficada posteriormente mostrándola junto con la característica de salida experimental. Los valores que se obtienen en todo el proceso son mostrados en este formulario para que el usuario tenga una idea clara de los resultados. En este bloque del programa los parámetros anteriores son obtenidos de forma manual por el usuario, en función del ajuste entre las características de salida modelada y experimental que se presentan en pantalla.

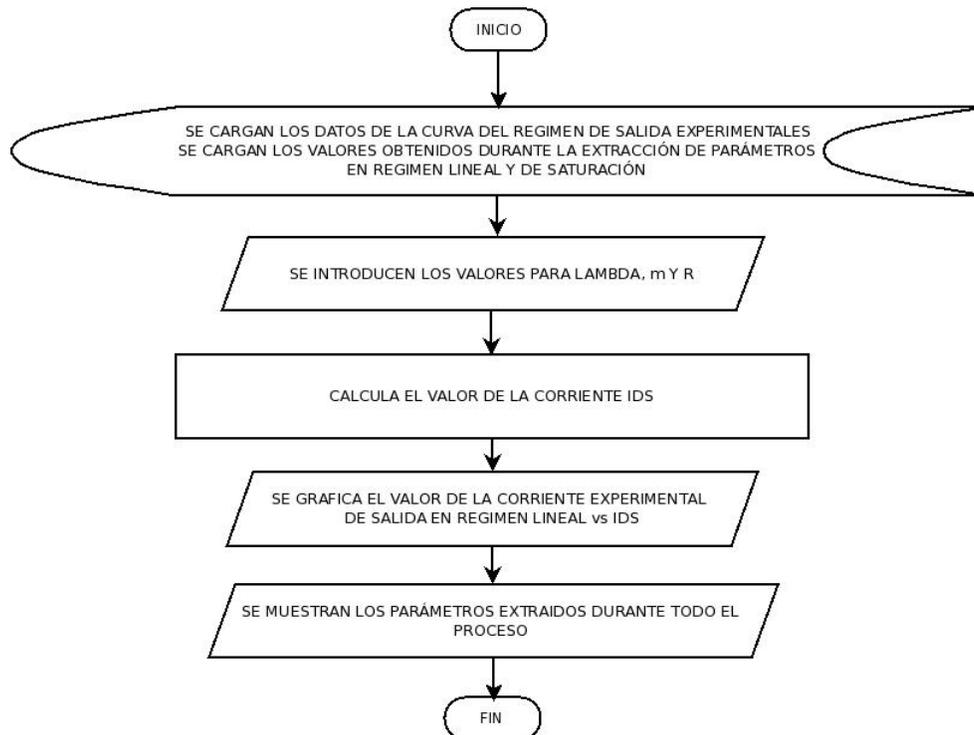


Fig.4.7 Diagrama de flujo del módulo del régimen de Salida

## CODIFICACIÓN, INSTALACION, CAPACITACIÓN Y MANTENIMIENTO

### ***Codificación del sistema***

En la codificación del sistema se programaron 5 módulos principales cuya función es la extracción de parámetros eléctricos para cada dispositivo y 11 submodulos donde se implementan las funciones de cargar y guardar archivos.

Las líneas de código totales del sistema son 3399, de las cuales 475 líneas son de código autogenerado por MATLAB.

### ***Instalación del sistema***

El proceso de instalación del Laboratorio de Extracción de Parámetros requiere de las siguientes condiciones de software y hardware.

### ***Hardware***

- El equipo de cómputo apropiado se describe en el capítulo de análisis de requerimientos, en el subtema de factibilidad técnica.

### ***Software***

- El equipo de cómputo debe contar con el sistema operativo descrito en el estudio de factibilidad técnica.
- Se debe instalar MATLAB en su versión 7.0 (R14) o superior. Durante el proceso de instalación de MATLAB se debe seleccionar la versión completa del software, ya que es necesario contar con todas las herramientas de MATLAB para no provocar algún problema con el sistema.
- Una vez instaladas las aplicaciones descritas, se realiza la instalación del sistema.

### ***Capacitación***

La capacitación al usuario final se realizará en el momento que el sistema sea entregado. Durante la capacitación se realizarán extracciones a diferentes dispositivos, con la finalidad de que el usuario pueda observar cuál es el proceso requerido para poder realizar la extracción de parámetros de cada uno de los dispositivos que el sistema contempla, así como la utilización de las herramientas que el sistema tiene para poder analizar las gráficas.

Esta capacitación será realizada para cada uno de los usuarios del sistema, ya que se planea que el sistema sea utilizado no solo por los investigadores del centro universitario, si no también por alumnos del plantel.

### ***Mantenimiento***

Para el sistema se plantean dos fases de mantenimiento, ya que los errores en el sistema son corregidos durante la etapa de pruebas. Las fases contempladas de mantenimiento para el sistema son:

#### **Corrección de Errores:**

- Los errores que no se hayan detectados durante las fases anteriores en el desarrollo del sistema o errores que hayan surgido por algún mal funcionamiento del software o hardware descrito en la etapa de instalación, serán corregidos directamente en la aplicación que está utilizando el usuario final, buscando que las correcciones realizadas no afecten el funcionamiento del sistema.

#### **Actualización de Versión:**

- Considerando que durante el uso del programa pueden surgir nuevas necesidades del usuario final, el sistema fue desarrollado de forma modular con el objetivo de facilitar, a futuros desarrolladores, la modificación o actualización del mismo.

## CAPÍTULO V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo se presentan resultados del funcionamiento del laboratorio de extracción de parámetros para cada uno de los módulos del sistema.

### RESISTENCIAS

Para la realización de las pruebas del módulo de resistencia se utilizaron resistencias comerciales a las cuales se les extrajo su magnitud de la característica eléctrica medida experimentalmente. Posteriormente se comparo el valor obtenido por el Laboratorio de extracción de parámetros con el reportado por el fabricante mediante el código de colores y medido a partir del electrómetro.

La fig. 5.1 se presenta la curva de I-V de una resistencia con una magnitud, según el código de colores, de 3.9 ohms  $\pm 5\%$ . La medición de la magnitud de la resistencia realizada utilizando el electrómetro Keithley 2400 reporto una magnitud de 4.2 ohms. Utilizando el programa de extracción de parámetros se obtiene el valor de la resistencia de 4.15 ohms. Como se puede observar, con el programa de extracción de parámetros el ajuste de la curva experimental y modelada, a lo largo de todos los puntos de la medición es muy bueno. El valor obtenido de este procedimiento es 6.4% mayor que el valor especificado por el código de colores, situación que está fuera del rango de tolerancia indicado por el fabricante ( $\pm 5\%$ ). Debido a que el electrómetro mide el valor de la resistencia para un solo punto, consideramos que la extracción del valor de la resistencia utilizando el programa de extracción de parámetros es más exacta, aunque requiere de un procedimiento más laborioso.

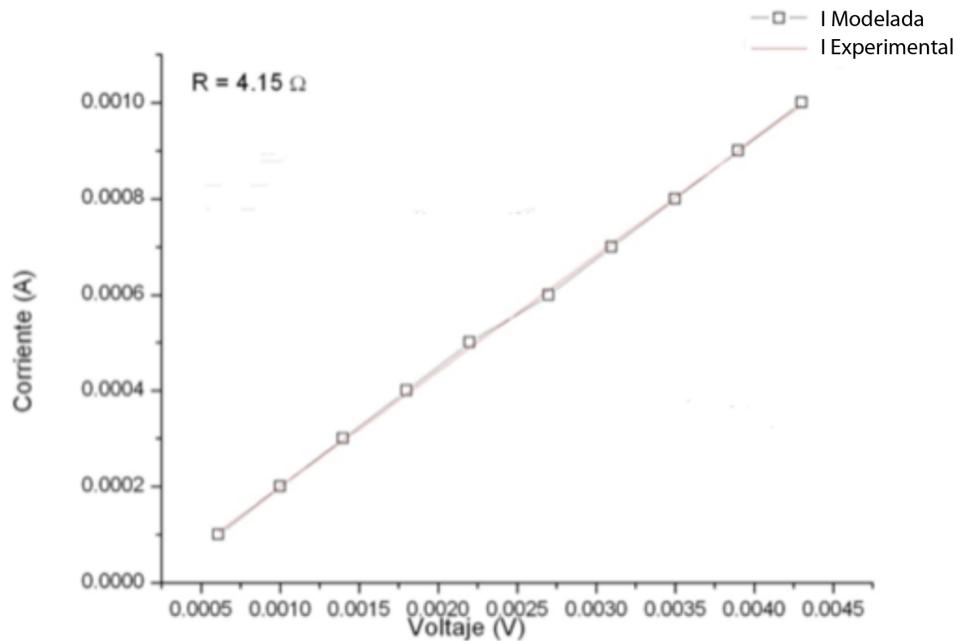


Fig. 5.1 Gráfica I – V experimental y modelada de la resistencia de 3.9 Ω

En las figuras 5.2 y 5.3 se presentan las curvas obtenidas de la medición experimental y modelada para resistencias de 1k y 10k Ohms respectivamente. Como se puede observar en ambas figuras las curvas experimentales y modeladas ajustan satisfactoriamente. La tabla 5.1 presenta los valores de tres resistencias reportadas en este trabajo. Como se puede observar, el error en la magnitud de la resistencia es crítico para valores de resistencia bajos, mientras que para resistencias grandes (en este caso 1k y 10k Ohms) el porcentaje de error esta cercano al 1%.

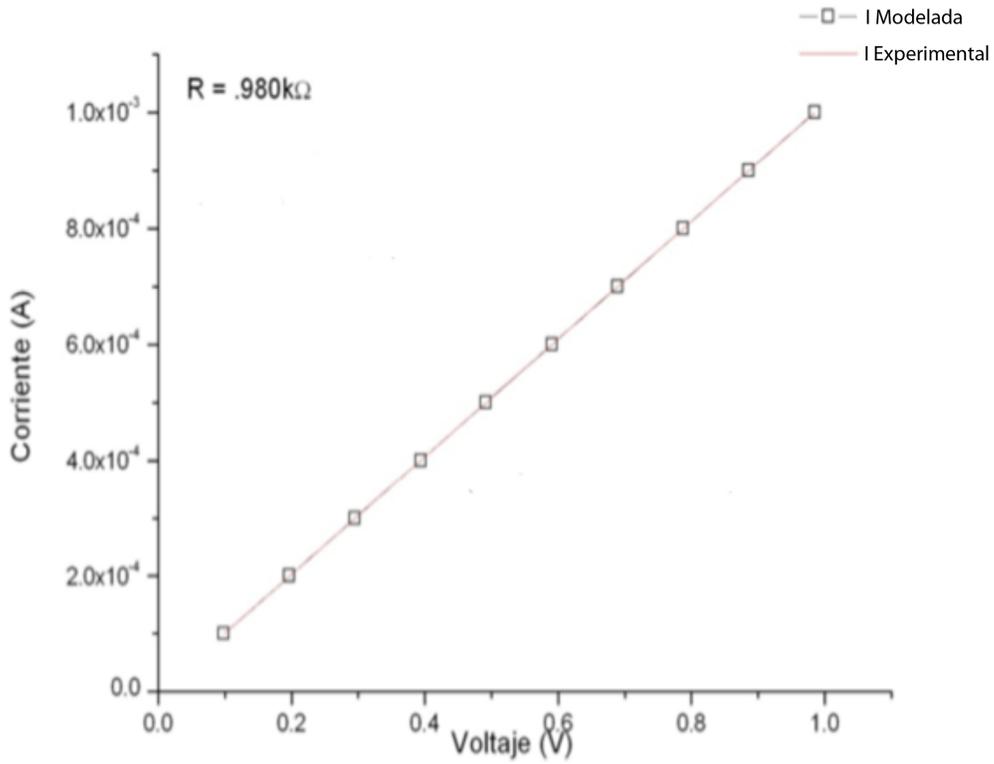


Fig. 5.2 Gráfica I – V experimental y modelada de la resistencia de 1 kΩ

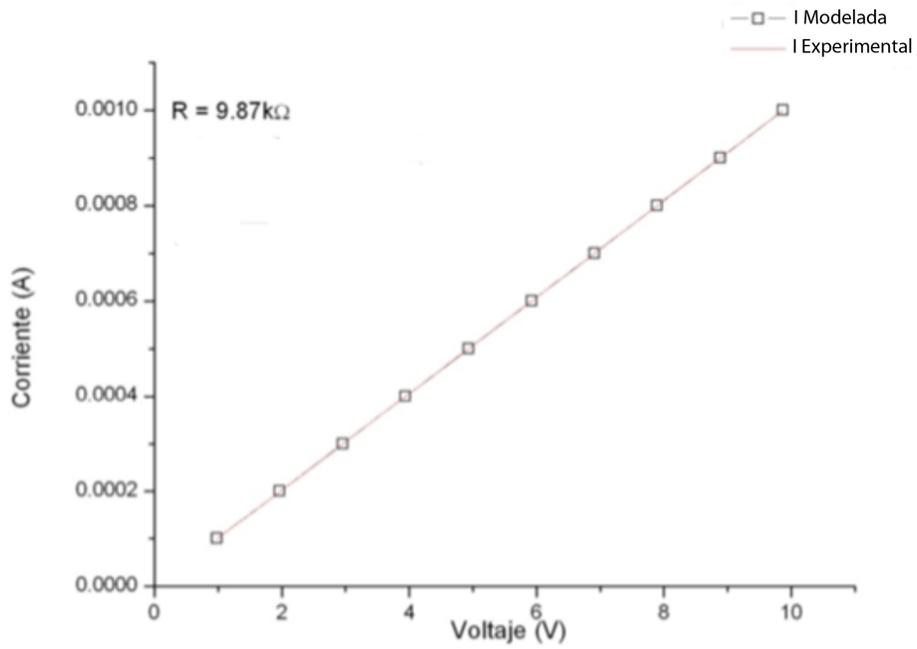


Fig. 5.3 Gráfica I – V experimental y modelada de la resistencia de 10 kΩ

Los resultados de estas pruebas se enlistan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Tabla comparativa de mediciones de resistencia

	<b>Resistencia código de colores  (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Resistencia extraída  (<math>\Omega</math>)</b>	<b>error</b>	<b>Resistencia medida con electrómetro  (<math>\Omega</math>)</b>	<b>error</b>
<b>Resistencia 1</b>	3.9	4.15	+6%	4.2	+6%
<b>Resistencia 2</b>	$10 \times 10^3$	$9.88 \times 10^3$	-1%	$9.88 \times 10^3$	-1%
<b>Resistencia 3</b>	$1 \times 10^3$	$0.990 \times 10^3$	-1%	$0.985 \times 10^3$	-1%

## DIODOS

El procedimiento de extracción de los parámetros del diodo se aplicó a las mediciones eléctricas de uniones PN de diferentes materiales. La tabla 5.2 presenta los dispositivos y las características eléctricas reportadas por los fabricantes en las hojas de especificaciones.

Tabla 5.2. Dispositivos y características

Dispositivo	Características
<b>Diodo 1N4001</b>	- Diodo rectificador de propósito general - Voltaje: 400 Vcc - Corriente: 1 A
<b>Diodo 1N4003</b>	- Diodo rectificador de propósito general - Voltaje: 200 Vcc - Corriente: 1 A
<b>Diodo Zener</b>	- Reguladores de Tensión - 1 Watt - 5 % de tolerancia
<b>Diodo Luminoso Rojo</b>	- Voltaje: 2,1 Vcc - Potencia: 31,5 mW - Luminosidad: 80 mcd - Corriente: 15 mA - Diámetro: 5 mm
<b>Diodo Luminoso Verde</b>	- Voltaje: 2,1 Vcc - Potencia: 31,5 mW - Luminosidad: 80 mcd - Corriente: 15 mA - Diámetro: 5 mm

La caracterización eléctrica de los diodos se realizó solamente por polarización directa. El rango de voltaje de polarización se definió para cada dispositivo en función del material del que está fabricado. De tal forma que los diodos de silicio se polarizaron hasta valores cercanos a 0.7 V, mientras que para los diodos emisores de luz (LED) fue necesario aplicar voltajes de polarización mayores.

La tabla 5.3 muestra los parámetros extraídos para cada uno de los diodos analizados. En la Fig. 5.4, 5.5, 4.6, 5.7 y 5.8 se presentan las curvas I-V experimentales y modeladas en escala lineal y semilogarítmica. Como se puede observar, las curvas modeladas por la ecuación del diodo, utilizando los parámetros extraídos, corresponden satisfactoriamente con las mediciones experimentales.

Tabla 5.3. Parámetros obtenidos por el módulo del diodo para cada dispositivo

<b>Dispositivo</b>	<b>n</b>	<b>Is Amperes (A)</b>
D4001	1.5015	4.82e-10
Diodo 4003	1.53148	9.25e-10
Diodo Zener	1.96588	6.19e-9
Diodo Rojo	1.93843	5.52e-20
Diodo Verde	2.05892	5.34e-19

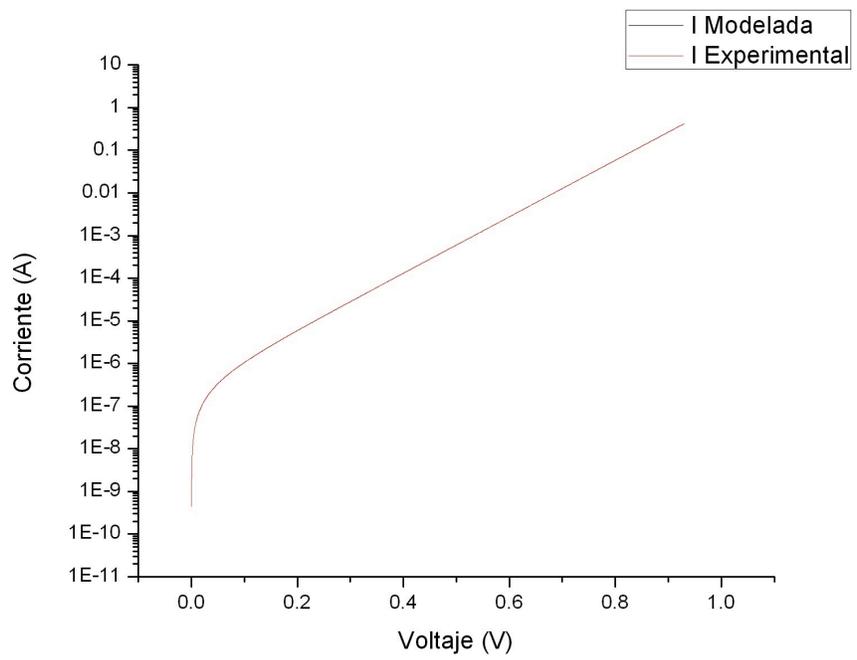
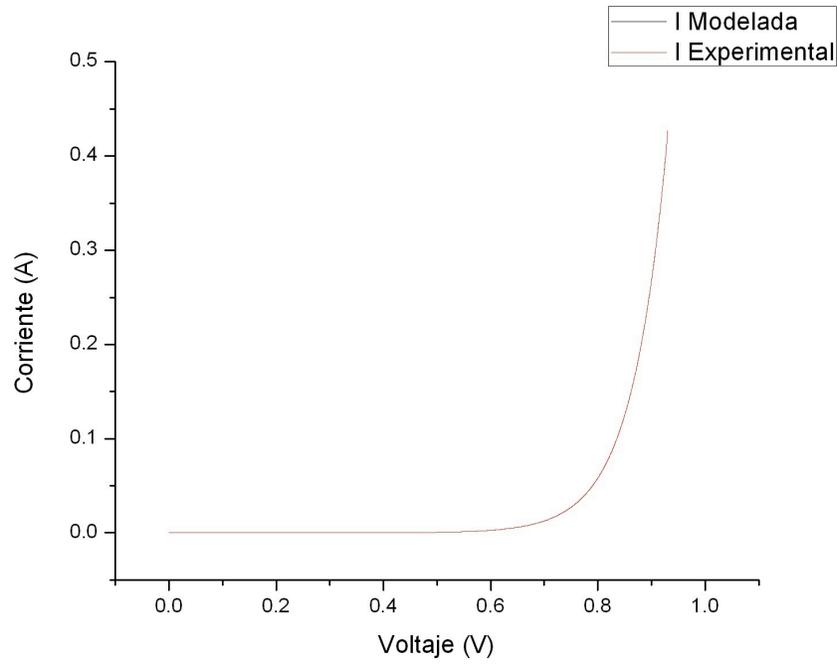


Figura 5.4. Gráficas Diodo 4001 comparación I – V Modelada y Medida, logaritmica y lineal.

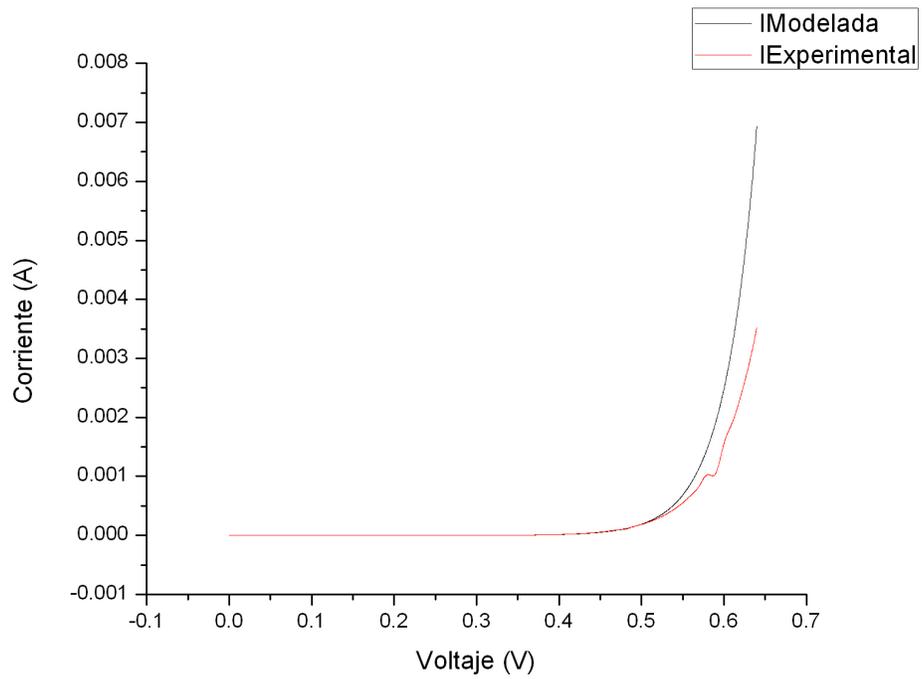
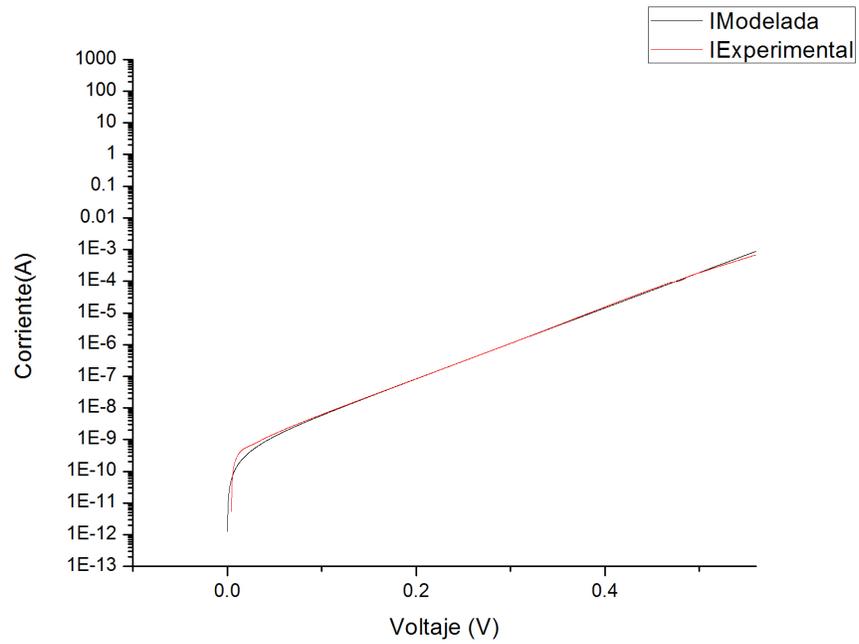


Figura 5.5. Gráficas Diodo 4003 comparación I – V Modelada y Medida, logaritmica y lineal.

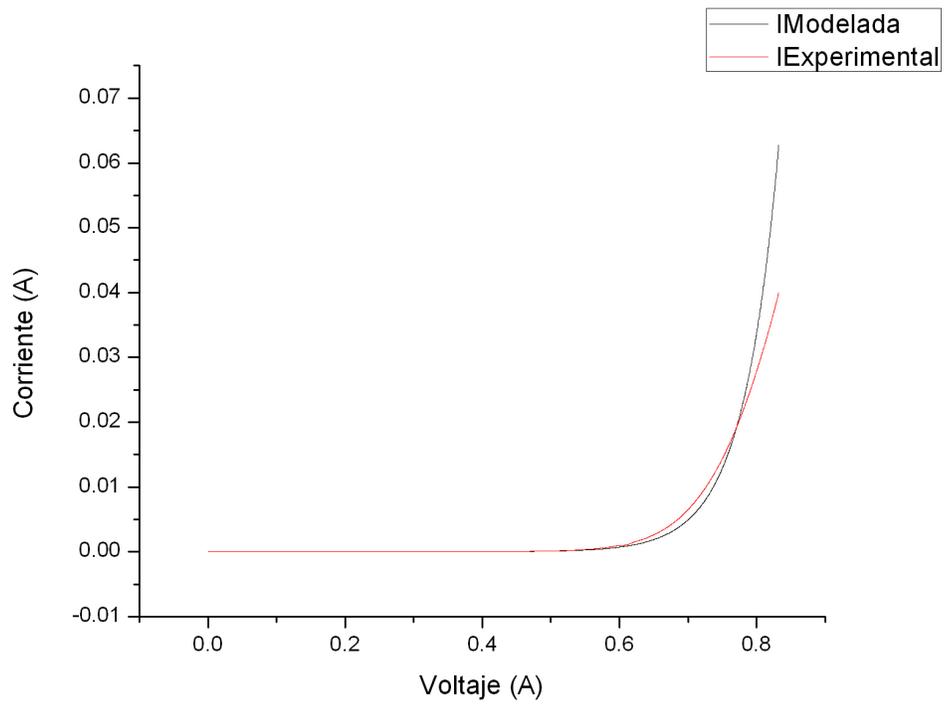
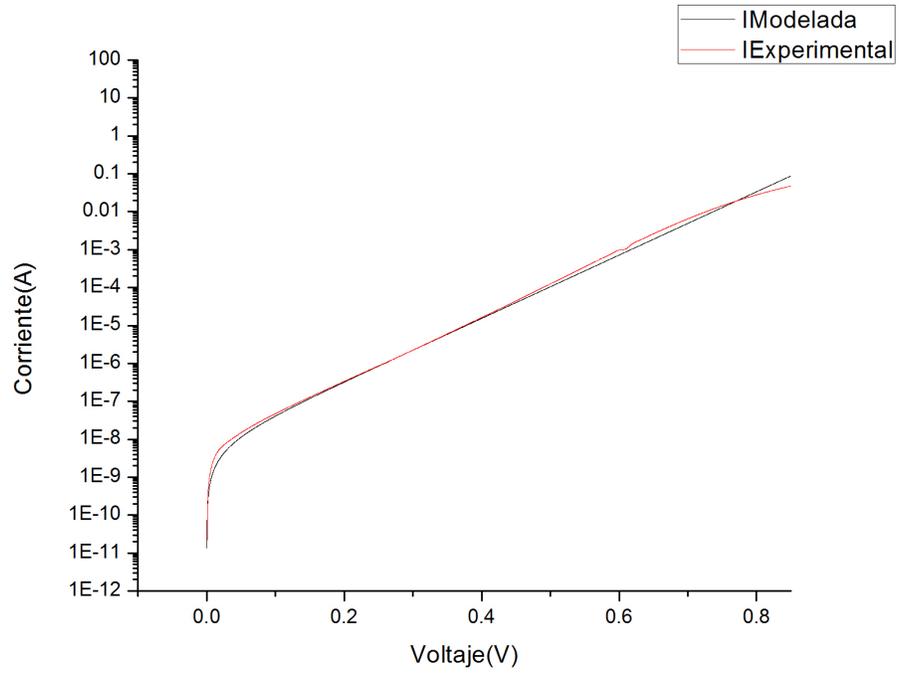


Figura 5.6 Gráficas Diodo Zener comparación I – V Modelada y Medida, logaritmica y lineal.

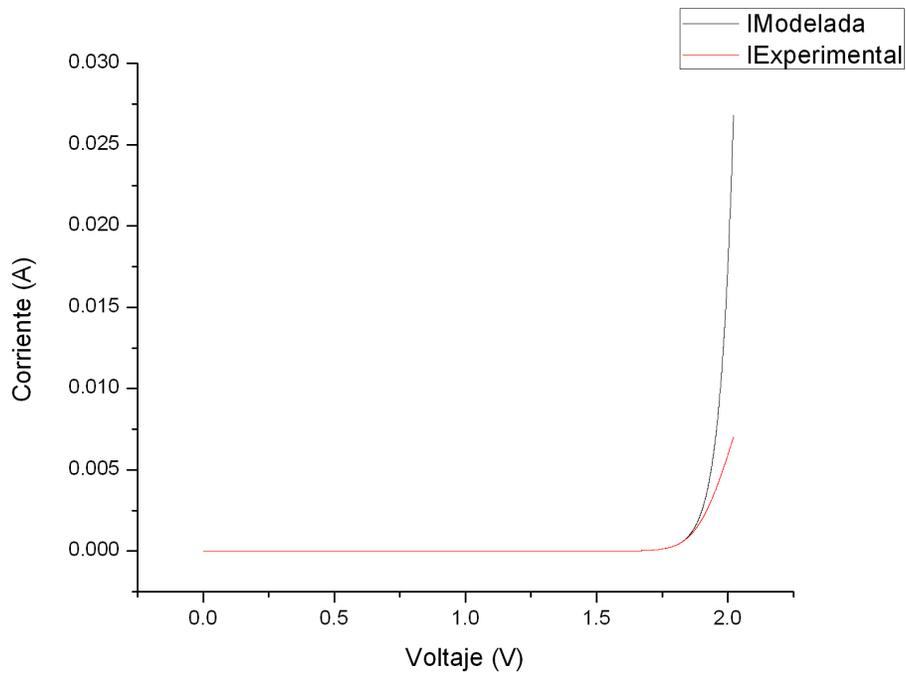
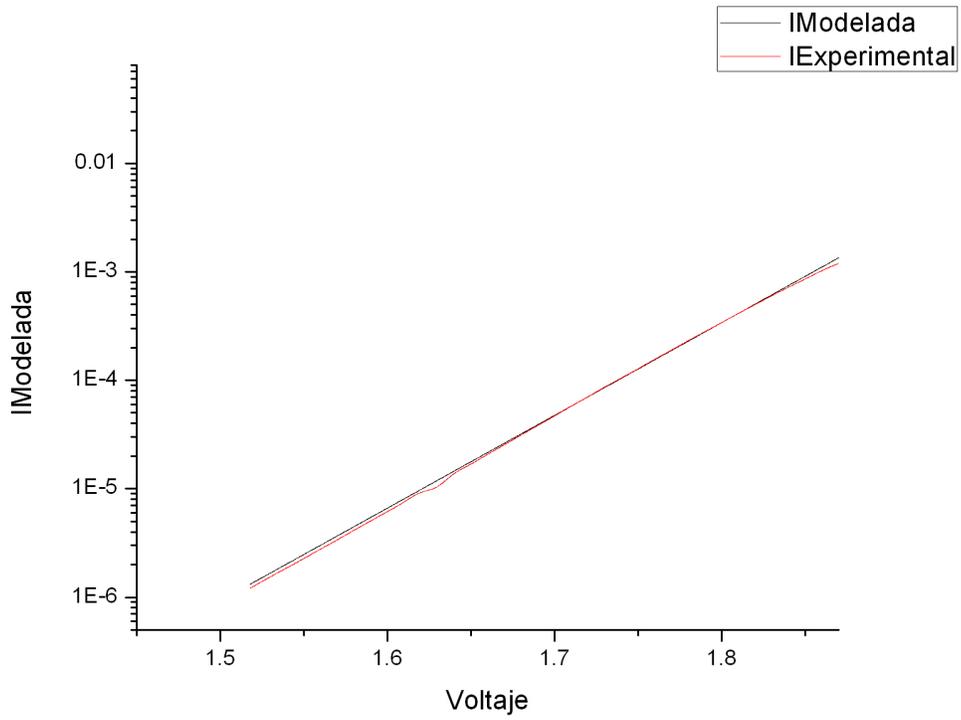


Figura 5.7 Gráfica Diodo Rojo comparación I – V Modelada y Medida, logaritmica y lineal.

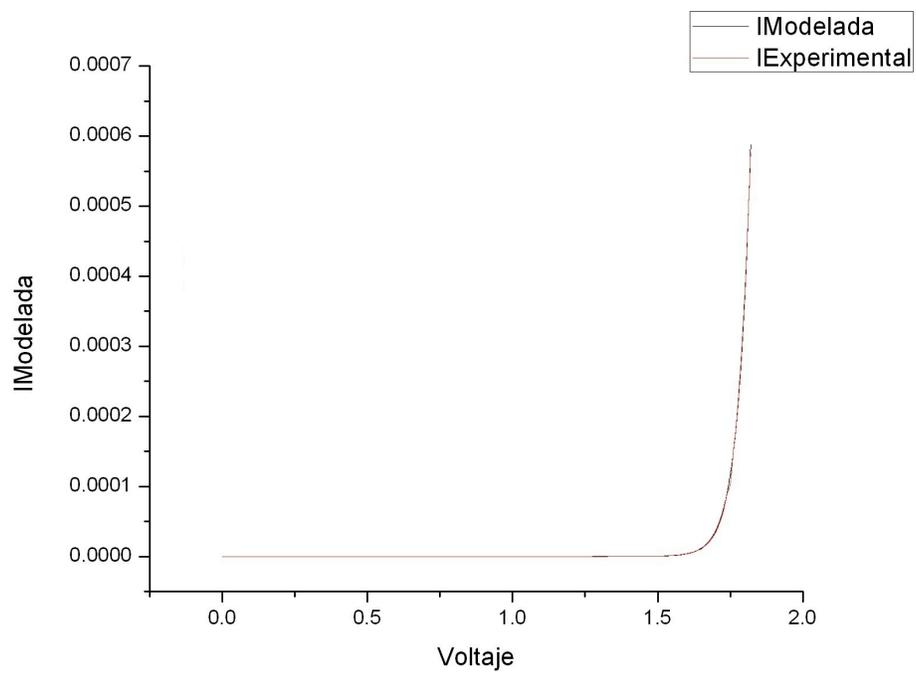
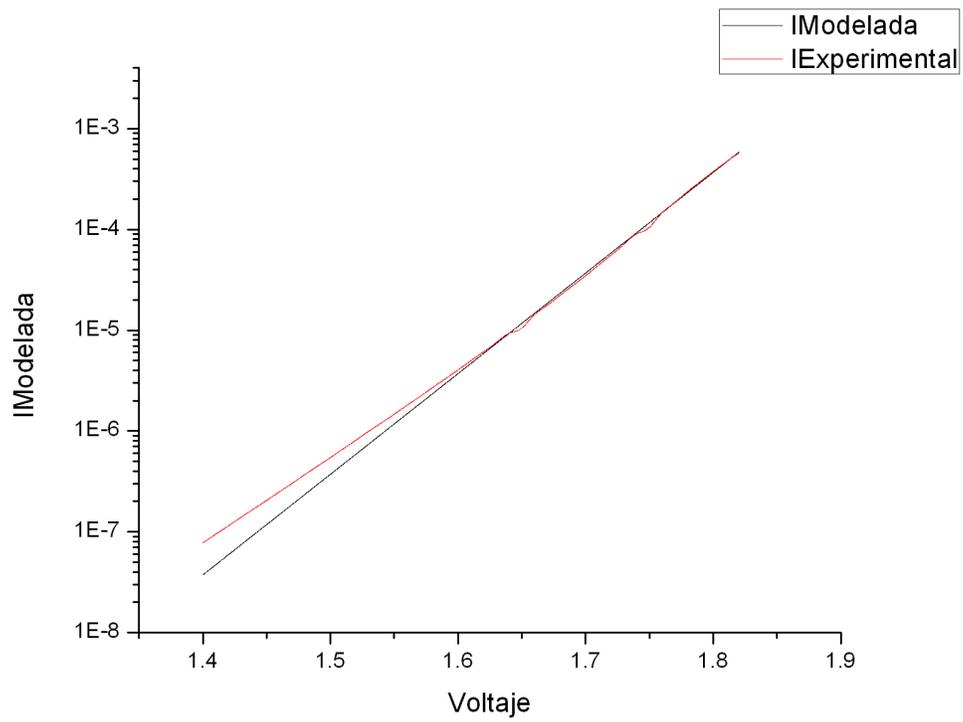


Figura 5.8 Gráfica Diodo Verde comparación I – V Modelada y Medida, logarítmica y lineal.

## TRANSISTORES MOSFET

Se realizaron un conjunto de simulaciones utilizando un grupo de parámetros conocidos. De las curvas resultantes de la simulación fueron extraídos los parámetros mediante el módulo de los TFT's. Como es evidente, en este conjunto de pruebas en lugar de extraer los parámetros eléctricos a partir de mediciones experimentales se realizó este proceso a partir de datos simulados. Es importante resaltar que el objetivo de esta etapa es validar el funcionamiento del sistema mediante la comparación entre los parámetros extraídos con los parámetros utilizados en las simulaciones de partida. Adicionalmente nos permitirá observar las condiciones para las cuales esta versión del programa de extracción de parámetros es aplicable.

Dos de los parámetro que comúnmente afectan fuertemente el funcionamiento de los TFTs y el procedimiento extracción son el voltaje de umbral y la resistencia de contacto. Con la finalidad de estudiar el efecto de estas variables se realizó a un conjunto de simulaciones en donde se varió el voltaje de umbral y la resistencia de contacto. En la Fig. 5.9 se presenta un cuadro sinóptico donde se resume el conjunto de pruebas realizadas.

### **Pruebas variando VT**

En todas las simulaciones las dimensiones geométricas del canal y del dieléctrico fueron:

$$W=110\mu\text{m}$$

$$L=30\mu\text{m}$$

$$T_{ox}=120\text{ nm}$$

Para obtener este conjunto de datos se realizaron las simulaciones eléctricas variando el voltaje de umbral desde -10 V hasta 30 V. Para el resto de los parámetros se utilizaron los valores que por omisión que trae el simulador.

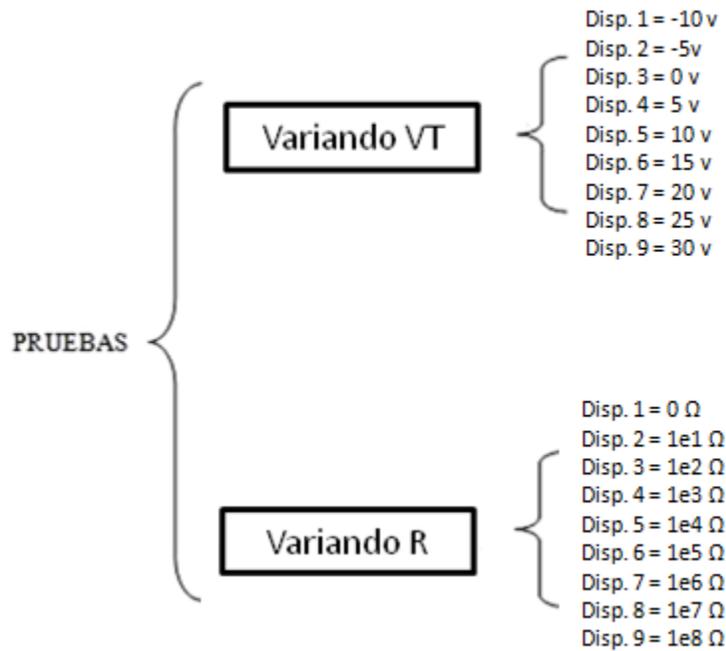


Fig. 5.9 Pruebas realizadas al módulo de TFT

En las figuras 5.10 a la 5.15 se muestran con (línea y un triángulo) los valores utilizados para la simulación de cada uno de los dispositivos, mientras que las curvas negras representan los parámetros extraídos utilizando el laboratorio de extracción de parámetros.

De la Fig. 5.10 observamos que los mejores ajustes del  $V_T$  extraído se presentan para los dispositivos del 3 al 9. Es decir, el proceso de extracción presenta problemas para los dispositivos que fueron simulados utilizando valores de  $V_T$  negativos. No obstante, en las Fig. 5.11 y 5.12 observamos que el error de extracción de  $\Gamma$  y  $V_{aa}$  se incrementa también en los dispositivos 7, 8 y 9. En resumen el módulo de extracción de parámetros del TFT tiene un mejor funcionamiento para los dispositivos 3, 4, 5 y 6, donde las condiciones polarización son adecuadas para aplicar el procedimiento de extracción de parámetro de los datos eléctricos del dispositivo. En el caso de los primeros dispositivos, los voltajes para los cuales se hicieron las simulaciones, el valor del  $V_T$  negativo hacen que las

curvas no operen en régimen lineal, por lo que al aplicar el programa la extracción de parámetros se analiza para una región donde las aproximaciones utilizadas en la técnica no son válidas y por lo tanto resultan en valores extraídos erróneos. Una situación similar ocurre para los dispositivos 8 y 9, en donde las curvas que se están considerando que trabajan en régimen lineal, en realidad operan en régimen subumbral, nuevamente las condiciones que se asumen para realizar la extracción de los parámetros no son válidas. Posteriormente analizaremos como estos errores afectan a las curvas modeladas a partir de los parámetros extraídos.

En la Fig. 5.13 se presentan los valores de **AlfaS**. Podemos observar que el porcentaje de error de esta variable en la mayoría de los casos su magnitud es menor que el  $\pm 5\%$ . esto significa que aparentemente la etapa de extracción de los parámetros lineales es donde se debe tener especial cuidado para extraer adecuadamente los parámetros eléctricos del dispositivo..

Las Fig. 5.14 y 5.15 presentan las curvas de los valores extraídos para **M** y **Lambda** respectivamente. Debido a que estos parámetros son ajustados por el usuario de forma manual, consideramos que el error presente en los mismos es mas una cuestión de práctica del usuario que error del programa. Por este motivo no analizaremos con mayor detenimiento el efecto de estas variables sobre el procedimiento de extracción. Sin embargo debemos resaltar que para versiones futuras del laboratorio de extracción de parámetros es necesario implementar una forma analítica o un algoritmo matemático que nos permita extraer estos parámetros de forma automática sin la intervención del usuario.

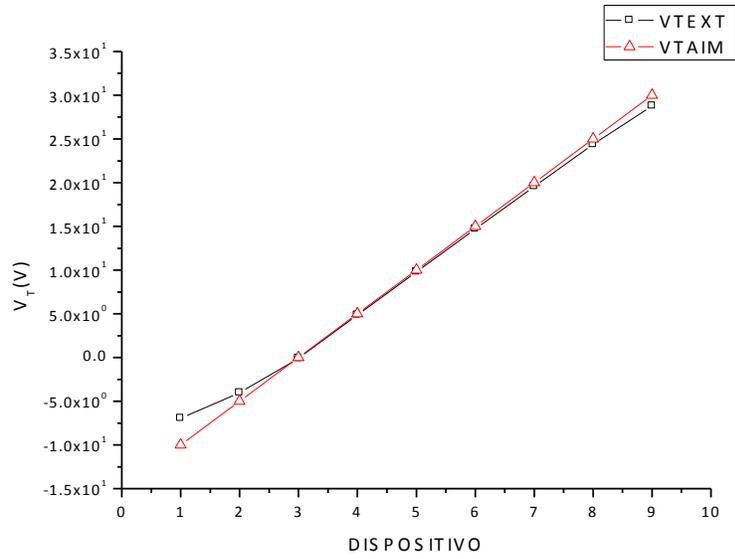


Fig. 5.10 Voltaje de umbral utilizado en cada simulación comparado con el voltaje de umbral extraído por el laboratorio de extracción de parámetros.

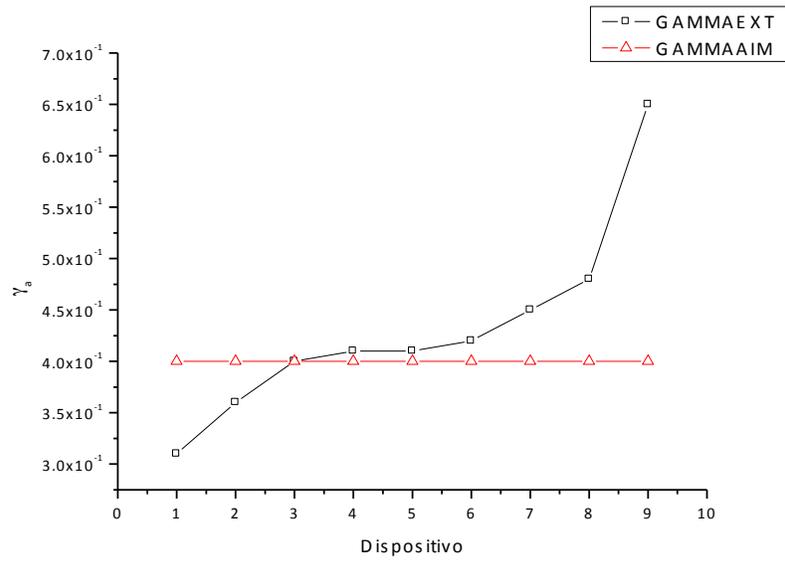


Fig. 5.11 Comparación del valor de Gamma extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

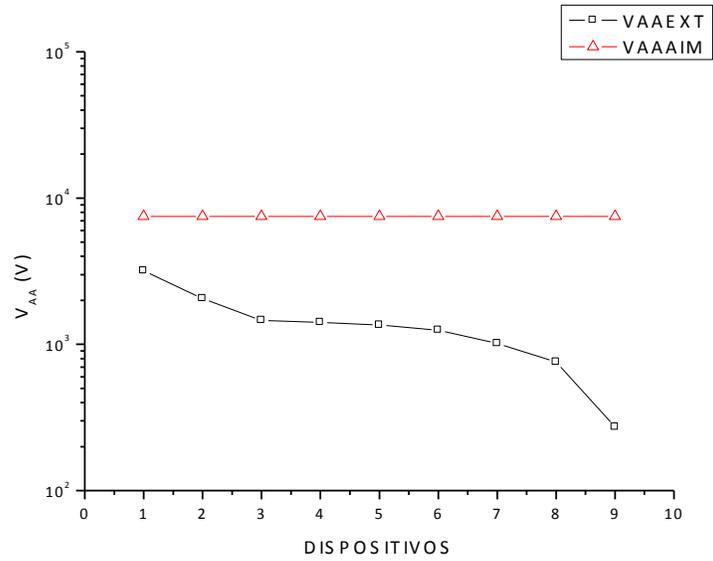


Fig. 5.12 Comparación del valor de  $V_{AA}$  extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

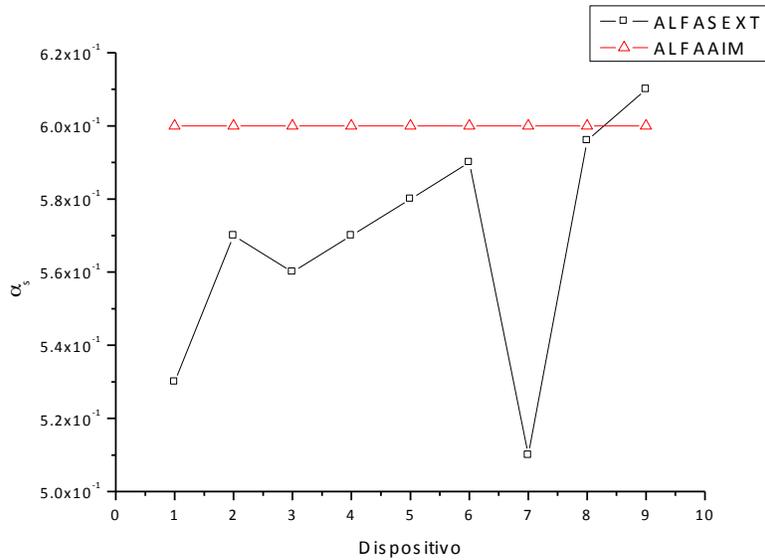


Fig. 5.13 Comparación del valor de  $\alpha_s$  extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

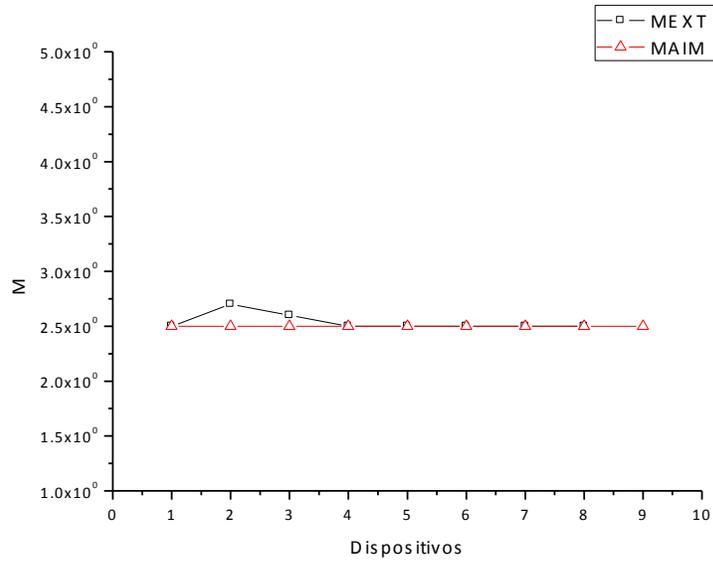


Fig. 5.14 Comparación del valor de M extraído con el valor que se ocupa desde un inicio en Aim-Spice

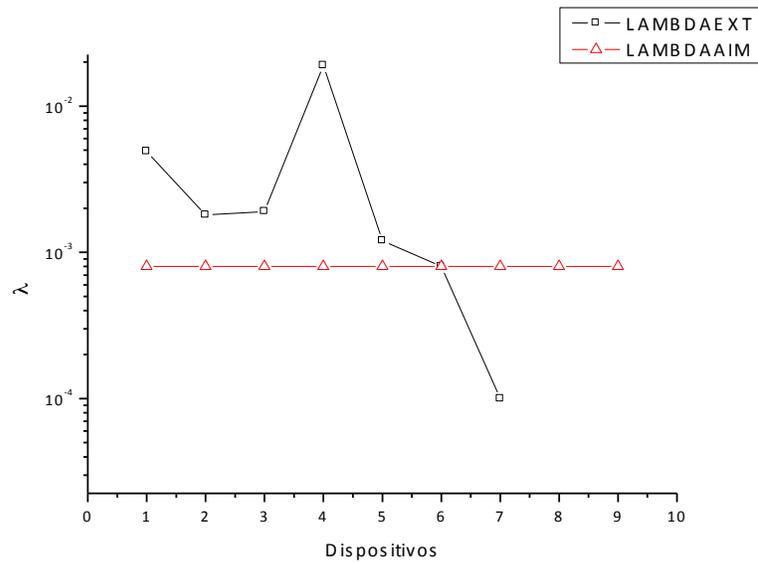


Fig. 5.15 Comparación del valor de Lambda extraído con el valor que se ocupa desde un inicio en Aim-Spice

En las Fig. 5.16 y 5.17 presentamos las características de transferencia en régimen lineal y de saturación de los dispositivos 1, 3, 5, 7 y 9.

En las figuras 5.16 y 5.17 se comparan las curvas “experimentales” de los dispositivos 1, 3, 5, 7 y 9, en régimen lineal y en saturación, contra las curvas modeladas mediante el sistema y simuladas introduciendo los parámetros extraídos en el AIM-Spice. Como podemos observar en estas figuras, los dispositivos 1, 7 y 9 son los que presentan peor ajuste, lo cual corresponde con a la situación descrita anteriormente en referencia a la Fig. 5.10. Sin embargo es importante desatacar que en la Fig. 5.16 y 5.17 podemos distinguir que cuando la causa del problema es que el voltaje de umbral del dispositivo experimental es negativo, no existe un adecuado ajuste de las curvas a lo largo de todos los valores de  $V_{GS}$ . Por otro lado, cuando el problema es que el TFT experimental tiene un  $V_T$  muy grande, comparado con los valores a los que se realizó la medición, entonces el desajuste en la curva se presenta para los valores bajos de  $V_{GS}$ . Para resolver esta situación, es recomendable realizar la extracción de parámetros a partir de curvas experimentales medidas para rangos mayores de  $V_{GS}$ .

Las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 muestran las características de salidas de los dispositivos 1, 5 y 8. Como se puede observar, para los dispositivos 5 y 8, las curvas para  $V_{GS}$  bajo ( $V_{GS} < V_T$ ), modeladas a partir del uso del sistema no corresponden las características “experimentales” ni a las curvas obtenidas por el AIM-Spice. Esta situación es consecuencia de que actualmente el modelo utilizado para el módulo de los transistores MOSFET solo incluye la característica en régimen sobreumbral de los TFT. Por esta razón en curvas con  $V_{GS}$  menores al  $V_T$ , las aproximaciones asumidas en el modelo no son validas, por lo que el resultado no corresponde con los valores “experimentales”. Es importante resaltar que las curvas simuladas, con los parámetros extraídos, ajustan adecuadamente con las curvas experimentales. Esto es consecuencia que aunque en las simulaciones solamente se están incluyendo los parámetros necesarios para modelar la característica sobreumbral, el simulador toma por omisión todos

aquellos parámetros necesarios para calcular las características eléctricas del dispositivo en régimen subumbral. En resumen, los parámetros extraídos por el módulo de los MOSFET del laboratorio de extracción de parámetros permiten una adecuada simulación de las características eléctricas de los TFTs analizados para el régimen sobreumbral.

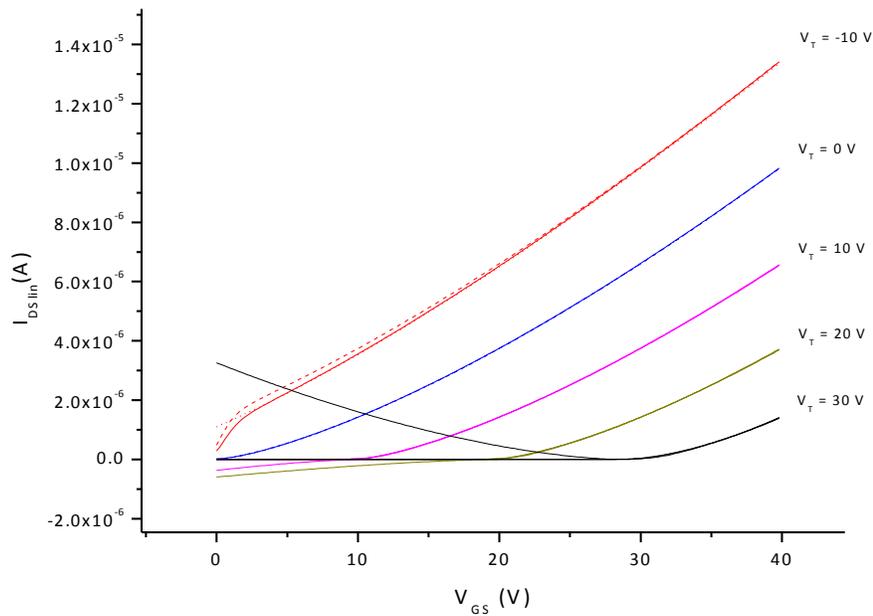


Fig. 5.16 Características de transferencia lineal de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

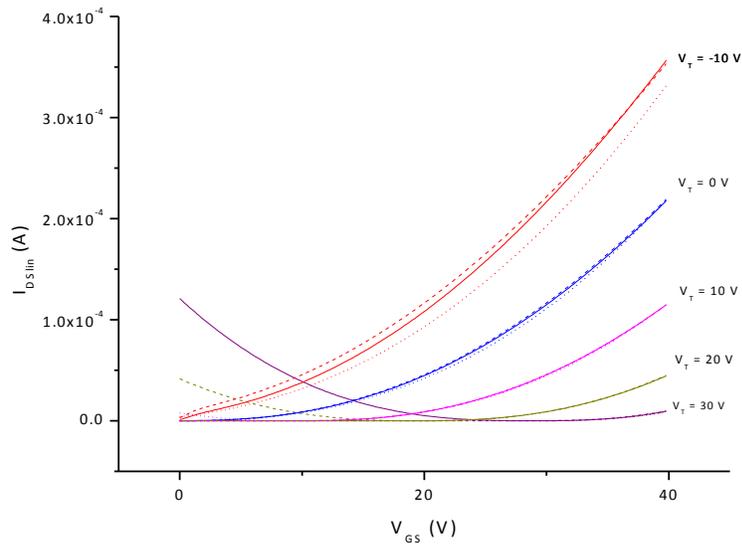


Fig. 5.17 Características de transferencia de Saturación de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

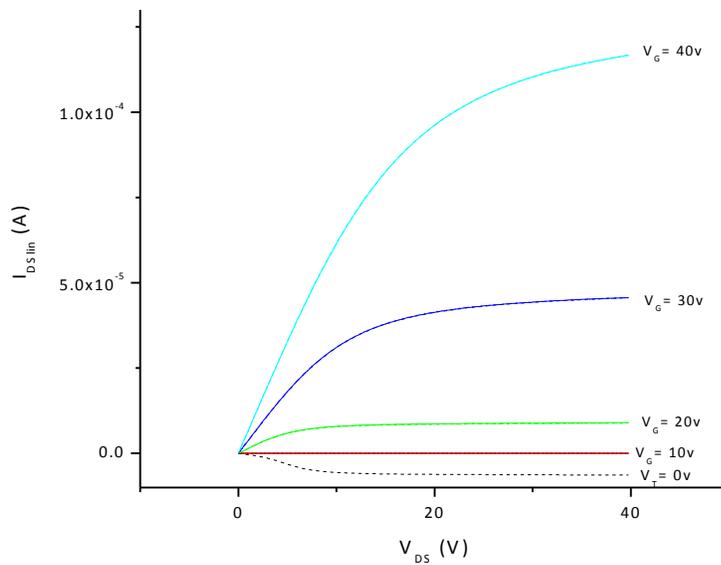


Fig. 5.18 Características de transferencia de Salida con un  $V_T$  de -10v de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

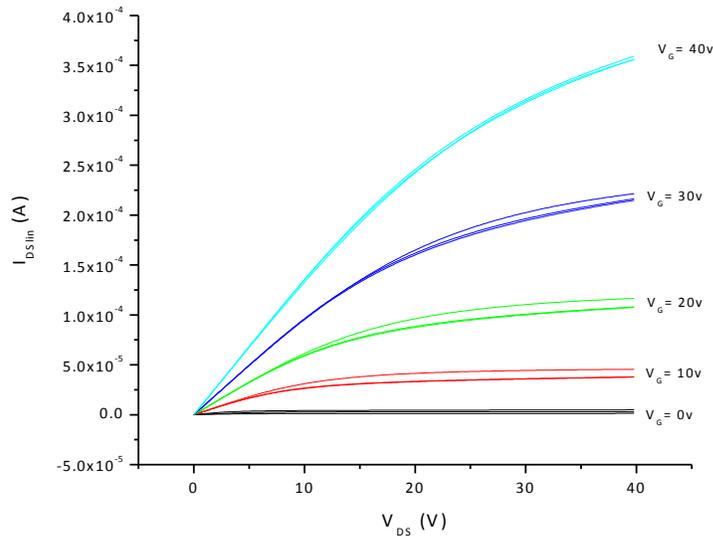


Fig. 5.19 Características de transferencia de Salida con un  $V_T$  de 10v de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

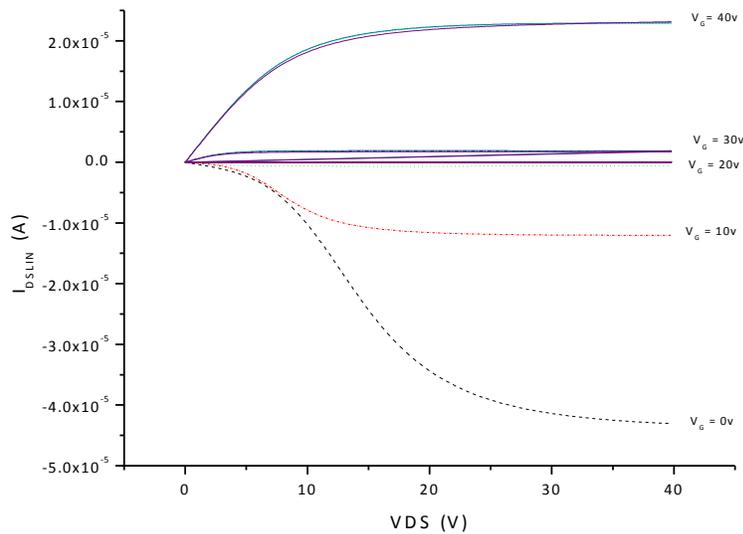


Fig. 5.20 Características de transferencia de Salida con un  $V_T$  de 25v de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

### Pruebas variando la resistencia de contacto

De forma similar que en el apartado anterior los parámetros geométricos utilizados en las diferentes simulaciones son:

$$W=110\mu\text{m}$$

$$L=30\mu\text{m}$$

$$T_{ox}=120\text{ nm}$$

En este análisis el parámetro a estudiar fue el efecto de la resistencia de contacto, la cual se varió desde  $1\Omega$  hasta  $100\text{ M}\Omega$ . En las figuras de la 5.21 a la 5.24 se comparan los parámetros extraídos por el laboratorio de extracción de parámetros y los valores iniciales de la simulación.

Para poder entender mejor la situación que ocurre en las siguientes pruebas será necesario el retomar el modelo unificado, y de esta manera poder entender los resultados.

En las figuras de la 5.21 a la 5.24 se muestra la comparación realizada entre los valores extraídos por el módulo de TFT y los valores utilizados en las simulaciones en Aim-Spice ( $V_T$ , **Gamma**, **Vaa** y **AlfaS**) respectivamente. En la figura 5.21 y 5.22 es visible como en los primeros cinco dispositivos el voltaje  $V_T$  y **Gamma** extraído por el laboratorio, tiene un ajuste aceptable con los valores utilizados en la simulación con Aim-Spice, esto significa que mientras el valor de la resistencia de contacto "**R**" se encontraba en los valores  $1\Omega$  hasta  $10\text{K}\Omega$  el valor de los parámetros extraídos por laboratorio corresponde razonablemente bien a los parámetros utilizados en las simulaciones iniciales. El dispositivo 5 muestra una ligera variación pero consideramos que el ajuste aún es satisfactorio. Para los valores en los dispositivos 6 y 7 el porcentaje de error aumenta considerablemente, esto es resultado de que para estas condiciones asumir que la resistencia de contacto es despreciable ya no es válido. Finalmente, para los dispositivos 8 y 9 debido a que la resistencia de contacto es muy grande, no es

posible extraer los parámetros eléctricos mediante el laboratorio de extracción de parámetros.

En la figura 5.23 se muestra el comportamiento del parámetro  $V_{AA}$ . Como podemos observar, igual que en el caso de  $V_T$  y  $\Gamma$ , el ajuste de  $V_{AA}$  es mejor para los primeros dispositivos. En la figura 5.24 muestra que en **AlfaS**, aunque aparentemente la presencia de la resistencia de contacto no afecta notablemente la extracción de este parámetro, debemos considerar que debido a que el procedimiento de extracción es secuencial, cuando existen errores en la extracción de los parámetros anteriores estos se reflejan en todas las variables calculadas posteriormente.

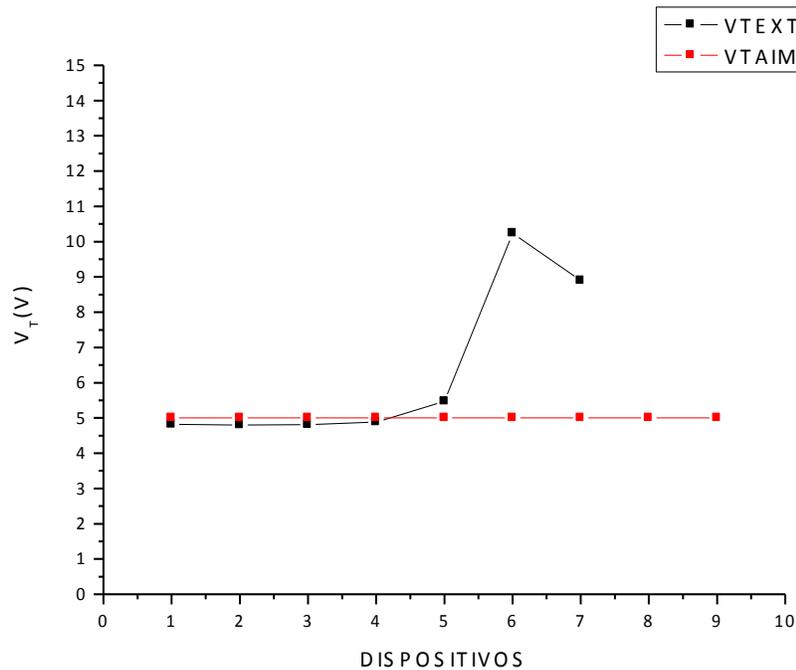


Fig. 5.21 Voltaje de umbral utilizado en cada simulación comparado con el voltaje de umbral extraído por el módulo de MOSFET.

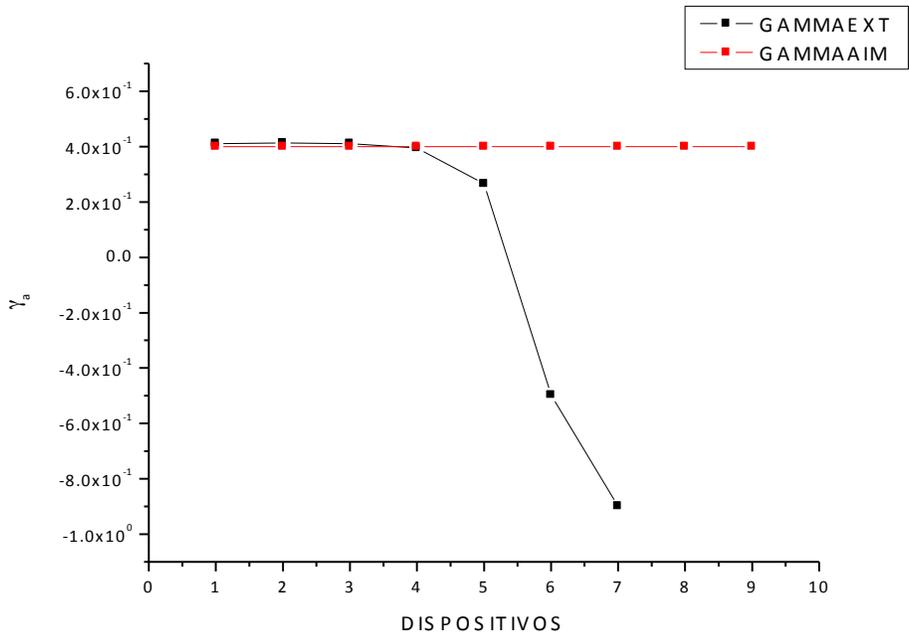


Fig. 5.22 Comparación del valor de Gamma extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

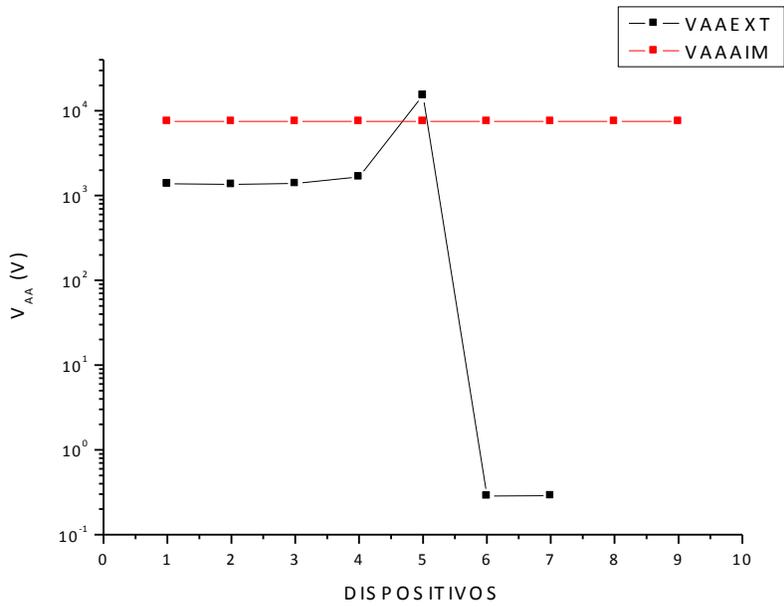


Fig. 5.23 Comparación del valor de Vaa extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

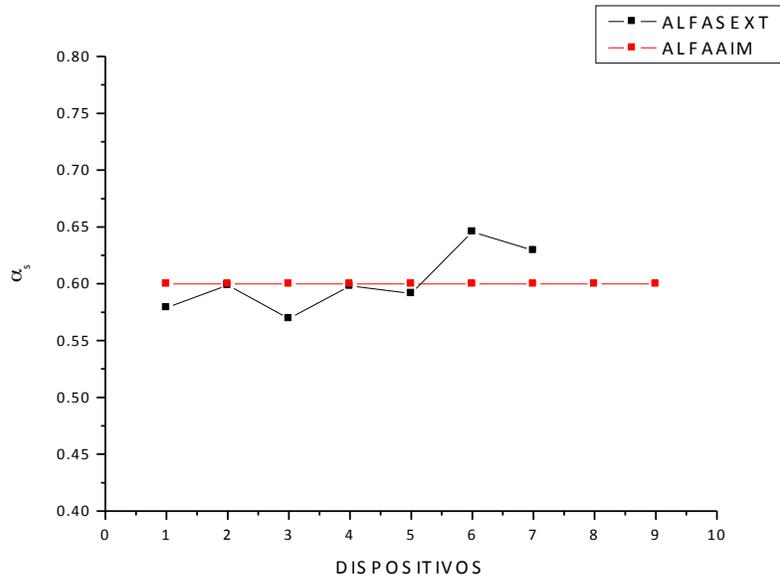


Fig. 5.24 Comparación del valor de AlfaS extraído con el valor que se ocupó desde un inicio en Aim-Spice

En las figuras 5.25, 5.26, 5.27. y 5.28 , están representadas las características de transferencia en régimen lineal y de saturación de los dispositivos 1, 3, 5, 7 y 9, así como la característica de salida para los dispositivos 1 y 5 respectivamente.

En estas figuras se comparan las curvas “experimentales” de los dispositivos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7, en régimen lineal y en saturación así como la característica de salida, contra las curvas modeladas mediante el laboratorio de extracción de parámetros y simuladas introduciendo los parámetros extraídos en el AIM-Spice. Como se observa en estas gráficas el ajuste de todas las curvas es razonablemente bueno. Una conclusión que se puede sacar de este punto es que, aunque se presente una condición de resistencia bastante grande el programa permite modelar las características del dispositivo aun cuando la extracción de los parámetros no sea la óptima. Esto quiere decir que si la finalidad de la simulación es solo modelar las características, el módulo lo hará razonablemente bien bajo estas condiciones. Sin embargo, aunque los parámetros extraídos permitan modelar las curvas eléctricas de los dispositivos, estos valores no son los “reales”. Por lo tanto, para dispositivos que son de resistencias de contacto grandes

( $R > 1 \times 10^4 \Omega$ ), cuando se desee hacer un estudio detallado de los parámetros extraídos será necesario utilizar algún método alternativo que permita hacer la extracción de parámetros tomando en cuenta la resistencia de contacto

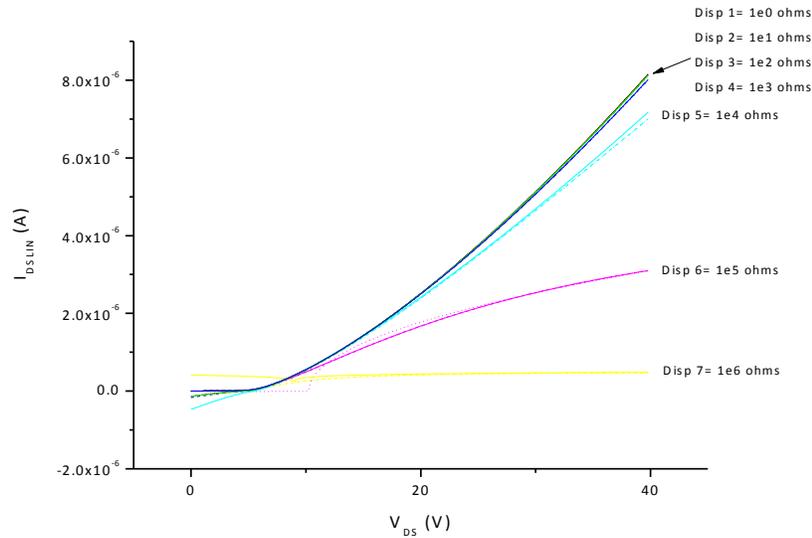


Fig. 5.25. Características de transferencia lineal de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

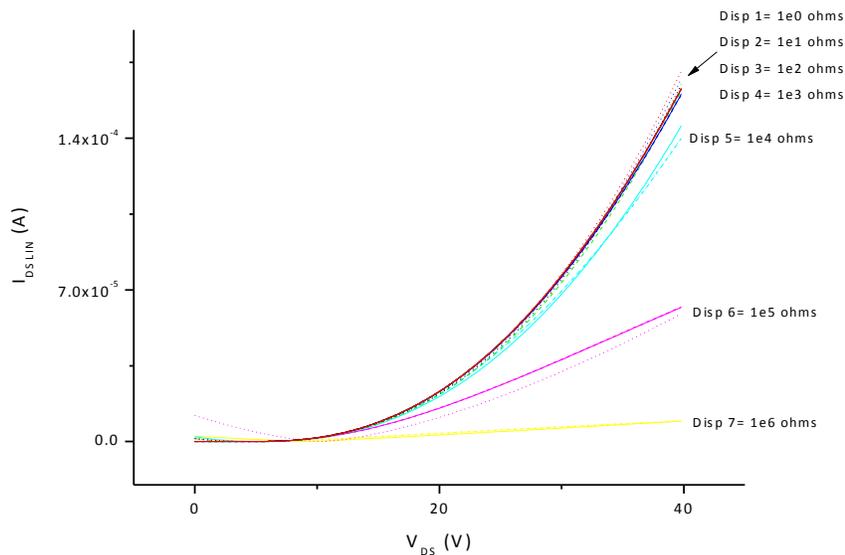


Fig. 5.26. Características de transferencia de Saturación de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

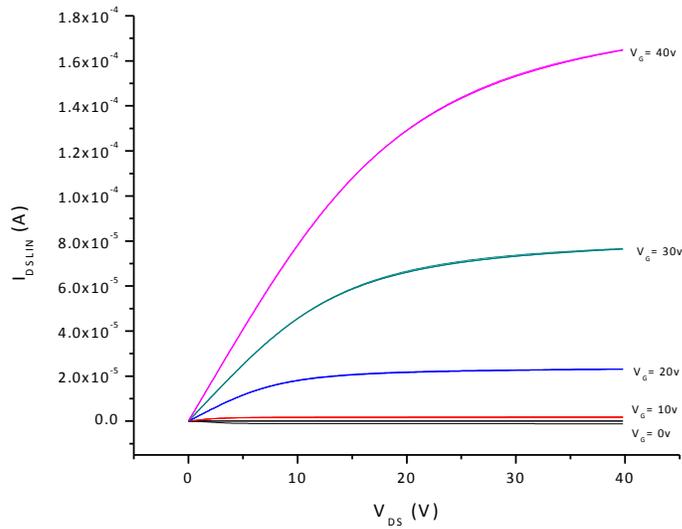


Fig. 5.27. Características de transferencia de Salida con una R de 1e0 de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua).

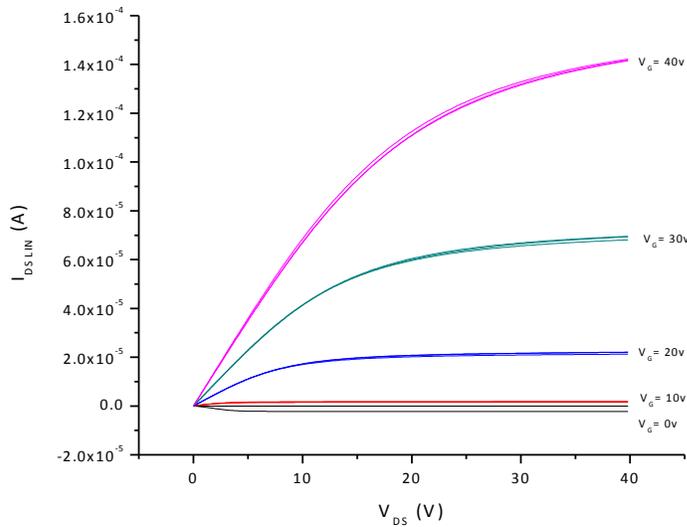


Fig. 5.28. Características de transferencia de Salida con una R de 1e4 de la simulación inicial (línea en segmentada), curva modelada con el laboratorio de extracción de parámetros (línea punteada), simulada con AIM-Spice (línea continua)

### Pruebas con dispositivos reales

Para finalizar se realizó la extracción de parámetros de un TFT fabricado en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). En este caso se pretende comprobar si el Laboratorio de Extracción de Parámetros funciona adecuadamente para dispositivos y mediciones experimentales. El dispositivo en estudio presenta características ambipolares, esto significa que el transistor se puede comportar tanto como canal N como canal P, dependiendo de las condiciones de polarización. Por esta razón, aunque, no estaba considerado en los objetivos iniciales del sistema, fue necesario realizar la extracción de parámetros de ambas características. En la tabla 5.4 se presentan los parámetros extraídos de las curvas experimentales de este dispositivo.

En las figuras 5.29 y 5.30 se presentan las características de salida y de transferencia (experimentales y simuladas) utilizando los parámetros extraídos por el PEPTFT) respectivamente. Para realizar las simulaciones con AIM-Spice fue necesario diseñar un circuito equivalente del TFT ambipolar. Para esto se conecto un TFT canal P con otro canal N en paralelo, para de esta forma emular el comportamiento ambipolar del dispositivo experimental.

Tabla 5.4 Parámetros eléctricos extraídos del TFT experimental

Parámetro	Canal N	Canal P
$V_T$ (V)	18.97	45.2
$\gamma$	-0.67	10.70
$V_{aa}$ (V)	$1.45 \times 10^{-5}$	296.5
$\alpha_s$	0.9	0.298
$m$	2.6	3.5
$\lambda$	$7 \times 10^{-4}$	$-1 \times 10^{-3}$
$\mu_{FET}$	0.001	0.001

Como se puede observar en las Fig. 5.29, para el canal N (a) el ajuste de las curvas simuladas con las experimentales es satisfactorio. Cabe resaltar que incluso para las curvas con voltajes de compuerta bajos, la simulación describe el comportamiento ambipolar del dispositivo experimental. Como se puede observar en la Fig. 5.29 b) el dispositivo experimental tiene contactos no óhmicos que hacen que la resistencia de contacto sea muy elevada. Esta situación hace que los parámetros extraídos permitan simular el comportamiento pero se debe tener en cuenta que en el módulo de los MOSFET hasta el momento no se han incluido los algoritmos que permitan extraer y modelar los parámetros que se ven afectados por esta resistencia.

Aun así, se observa que las curvas simuladas describen, cualitativamente, el comportamiento del TFT. En la Fig. 5.30 observamos que el ajuste entre las curvas de transferencia (lineal y en saturación) experimentales y simuladas del dispositivo canal N es satisfactorio. Sin embargo, para las características del canal P, se observa que aunque las curvas en régimen de saturación tienen un buen ajuste, las curvas de transferencia lineal tienen problemas.

Nuevamente consideramos que esta situación es consecuencia de los errores que presentan los parámetros extraídos en la rama P, introducidos por la resistencia de contacto.

En conclusión de estas pruebas observamos que el módulo funciona eficazmente incluso en la extracción de parámetros de dispositivos para los cuales no fue diseñado.

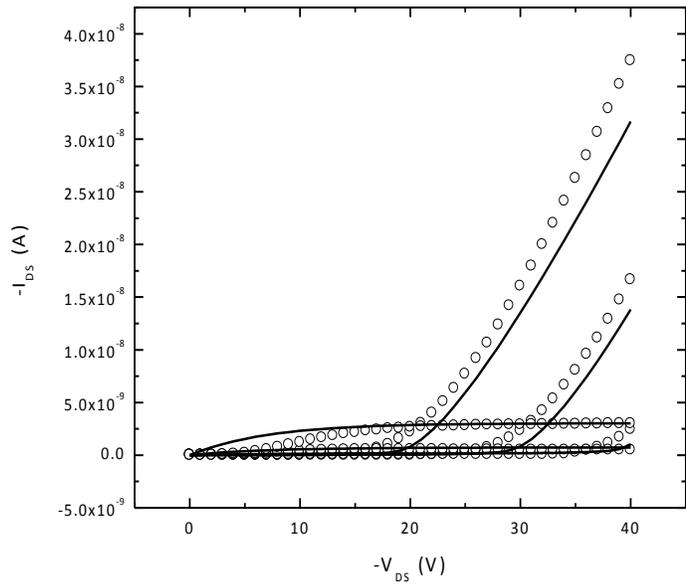
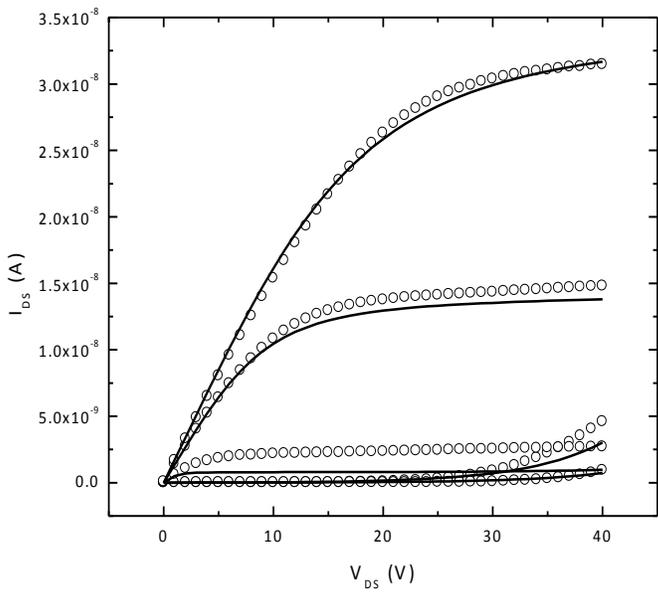


Fig. 5.29 Curvas de salida (o) experimentales y (-) Simuladas.

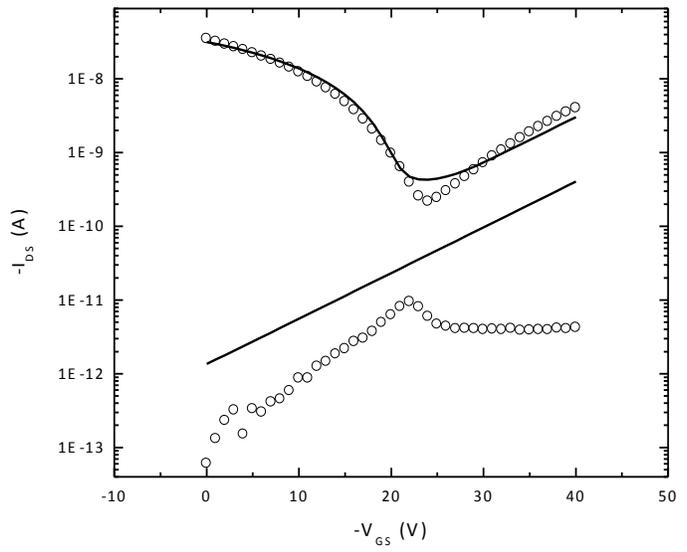
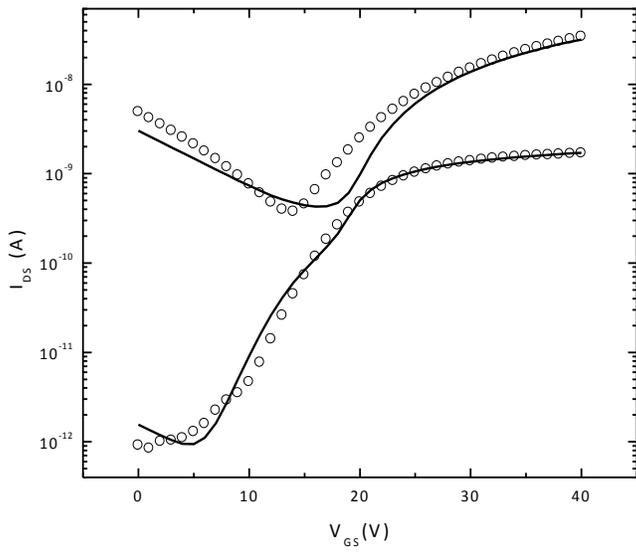


Fig. 5.30 Curvas de salida (o) experimentales y (-) Simuladas.

## CONCLUSIONES

- Se desarrollo e implemento una herramienta que permite realizar la extracción de los parámetros básicos de los siguientes dispositivos: Resistencias, diodos, transistores de unión bipolar, transistores MOSFET (TFTs).
- A partir de los parámetros extraídos por el sistema es posible modelar las características eléctricas básicas de los dispositivos de interés.
- El programa muestra una comparación de las curvas experimentales y modeladas (con los parámetros extraídos) lo que sirve de retroalimentación al usuario del funcionamiento del proceso.
- El laboratorio de extracción de parámetros desarrollado se está utilizando para las investigaciones sobre dispositivos orgánicos realizadas en el Centro Universitario UAEM Ecatepec facilitando las actividades de análisis de dispositivos.
- El programa puede ser utilizado por estudiantes interesados en aspectos funcionales de los dispositivos semiconductores para analizar dispositivos comerciales, situación que consideramos puede servir de base para un mejor entendimiento del funcionamiento de los dispositivos.
- En el caso del diodo se aplico en el procedimiento de extracción de parámetros el operador H lo que permite determinar las regiones donde existe una componente de conducción particular y el valor de la constante de idealidad para esta región.
- El proceso de extracción de parámetros en conjunto con la simulación de los TFTs ofrece la posibilidad de analizar las condiciones y los factores de operación que pueden afectar el funcionamiento del programa.

### **Trabajos futuros**

- Integrar la herramienta en las actividades docente con la finalidad de fortalecer la formación académica de los estudiantes de Ingeniería en computación.
- Integrar el Laboratorio de extracción de parámetros con el laboratorio de caracterización eléctrica para implementar una herramienta que permita la caracterización y análisis de los resultados al momento de la medición.
- Incluir los procedimientos de extracción necesarios para contemplar la resistencia serie en los diferentes dispositivos.

## BIBLIOGRAFÍA

M.S. Tyagi, "INTRODUCTION TO SEMICONDUCTOR MATERIALS AND DEVICES", John Wiley & Sons Inc. Singapore, 1991.

Dosev, Dosi Konstantinov, "FABRICATION, CHARACTERISATION AND MODELLING OF NANOCRYSTALLINE SILICON THIN-FILM TRANSISTORS OBTAINED BY HOT-WIRE CHEMICAL VAPOUR DEPOSITION", 2003, España.

M. Estrada, A. Cerdeira, R. García, A. Ortiz-Conde, F.J. García Sánchez, "NEW PROCEDURE FOR THE EXTRACTION OF BASIC A-SI:H TFT MODEL PARAMETERS IN THE LINEAR AND SATURATION REGIONS", Solid-State Electronics, Vol. 45, 1077-1080, 2001.

M. Estrada, A. Cerdeira, B. Iñiguez, J. Pallares, L.F. Marsal, "MODELING AND PARAMETER EXTRACTION PROCEDURE FOR NANOCRYSTALLINE TFTS", Solid-State Electronics, Vol. 48, 103-109, 2004.

M. Estrada, A. Cerdeira, B. Iñiguez, Ortiz-Conde, F.J. García Sánchez, "EXTRACTION METHOD FOR POLYCRYSTALLINE TFT ABOVE AND BELOW THRESHOLD MODEL PARAMETERS", Solid-State Electronics, Vol. 46, 2295-2300, 2002.

M. Estrada, A. Cerdeira, B. Iñiguez, L.F. Marsal, L. Reséndiz, J. Pallares, "EFFECT OF LOCALIZED TRAPS ON THE ANOMALOUS BEHAVIOR OF THE TRANSCONDUCTANCE IN NANOCRYSTALLINE TFTS", Microelectronics Reliability, Vol. 45, 1161-1166, 2005.

L. Reséndiz, M. Estrada, A. Cerdeira, "NEW PROCEDURE FOR THE EXTRACTION OF A-SI:H TFTS MODEL PARAMETERS IN THE SUBTHRESHOLD REGION", Solid-State Electronics, Vol. 47, 1351-1358, 2003.

Adelmo Ortiz-Conde, Antonio Cerdeira, Magali Estrada, Francisco J. García Sánchez, Rodolfo Quintero, "A SIMPLE PROCEDURE TO EXTRACT THE THRESHOLD VOLTAGE OF AMORPHOUS THIN FILM MOSFETS IN THE SATURATION REGION", Solid-State Electronics, Vol. 45, 663-667, 2001.

M. Estrada, A. Cerdeira, B. Iñiguez, L.F. Marsal, L. Reséndiz, J. Pallares, J. Poigdollers, C. Voz, "ACCURATE MODELING AND PARAMETER EXTRACTION METHOD FOR ORGANIC TFTS", Solid-State Electronics, Vol. 49, 1009-1016, 2005.

M. Rodríguez, V. Nieves, "SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CONTRATACIÓN DE BIENES Y SERVICIOS DE LA SUBGERENCIA DE ABASTECIMIENTO DEL CORPORATIVO DE PETRÓLEOS MEXICANOS (PEMEX)", 2008, México.

B. Boehm, C. Abts, A. Brown, S. Chulani, B. Clark, E. Horowitz, R. Madachy, D. Reifer, B. Steece, "SOFTWARE COST ESTIMATION WITH COCOMO II". Prentice-Hall, 2000.

[www.occ.com](http://www.occ.com)

Senn, J., "ANÁLISIS Y DISEÑO DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN", Mc Graw Hill. 2000.

The MathWorks, "CREATING GRAPHICAL USER INTERFACES", The MathWorks, Inc., 2004.

The MathWorks, "EXTERNAL INTERFACES", The MathWorks, Inc., 2004.

The MathWorks, "USING MATLAB® GRAPHICS", The MathWorks, Inc., 2004.

The MathWorks, "PROGRAMMING", The MathWorks, Inc., 2004.

Malvino A. P. "PRINCIPIOS DE ELECTRONICA", Mc Graw Hill, 2000.

Franco S. , "DISEÑO CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES Y CIRCUITOS INTEGRADOS ANALÓGICOS", Mc Graw Hill, Tercera edición , México, 2005

J. P. Colinge, "PHYSICS OF SEMIDUCTOR DEVICES" , Murray Hill, New Jersey, Printed in the United States of America 1981

Tor A. Friendly, Trand Ytterdal, Michael Shur, "INTRODUCTION TO DEVICE MODELING AND CIRCUIT SIMULATION", A Wiley Interscience Publication, 1998.

Dieter K. Schroder, "SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION", A Wiley Interscience Publication IEEE, Printed in the United States of America 2006

Adel S. Sedra y Kenneth C. Smith, "CIRCUITOS MICROELERTRONICOS", Mc Graw Hill, Quinta edición México, 2006

## **ANEXO I**

### **ENTREVISTA PARA LA DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTOS DE SISTEMA**

1.- ¿Cuál es el problema?

En el CU UAEM Ecatepec se hace investigación referente a las características eléctricas de materiales y dispositivos semiconductores. Contamos con equipo de medición sofisticado para realizar estas actividades. En el caso de la investigación de materiales y dispositivos electrónicos, el resultado de las mediciones por sí solo no permite obtener conclusiones trascendentes. Para realizar análisis detallados es necesario efectuar la extracción y comparación de los parámetros eléctricos que caracterizan a los materiales o a los dispositivos en estudio. Actualmente el Centro Universitario UAEM Ecatepec cuenta con el equipo de caracterización eléctrica necesario para estudiar una gran variedad de dispositivos y en todos los casos el procesamiento de la información es necesario que sea realizado por cada uno de los usuarios interesados. Esta actividad requiere de una gran cantidad de tiempo y esfuerzos considerando que regularmente es necesario desarrollar en la computadora aplicaciones “temporales” que faciliten la extracción de parámetros.

2.-¿Haga un breve listado de los detalles mas sobresalientes del problema, tiempo, costos, capacitación, etc.?

No existen en el mercado programas que permitan la extracción de parámetros de manera eficiente.

El procedimiento de extracción requiere de una gran cantidad de cálculos y sin embargo muchos de los procedimientos utilizados se repiten a lo largo del proceso de extracción de parámetros para TFT

Algunos investigadores han desarrollado herramientas que permiten la extracción de parámetros a partir de las curvas experimentales de los TFT. La desventaja común de entre estos programas es que no son de fácil uso para cualquier persona.

### 3.-¿Importancia del problema?

Este es un problema al que de manera particular se enfrentan algunos investigadores del CU UAEM Ecatepec, pero al que de forma general se enfrentan todos los interesados en área de dispositivos electrónicos, tanto científicos como estudiantes. De ahí la importancia del mismo.

### 4.-¿Cuál cree que sea la solución?

Desarrollar una herramienta que, de forma sistemática, permita realizar la extracción de los parámetros eléctricos básicos a partir de las características eléctricas experimentales (o teóricas) de estos elementos a analizar.

### 5.-¿En que forma será de ayuda otra herramienta?

Contar con una herramienta que realice de forma automática y en corto tiempo los procesos de extracción de parámetros de mediciones experimentales de dispositivos permitirá a los investigadores del área reducir los tiempos “perdidos” en dichos procesamientos.

Adicionalmente, el programa de extracción de parámetros (PE) puede ser una herramienta de apoyo a la actividad docente considerando que en la currícula de la carrera de Ingeniería en Computación existen diferentes unidades de aprendizaje enfocadas al estudio de dispositivos electrónicos.

6.-¿Qué otras personas tiene conocimiento del problema?

Del CU UAEM Ecatepec al Dr. J. Ezequiel Molinar Solís, y existe un gran número de investigadores a nivel mundial que realizan investigación a este respecto.

7.-¿Cuál es el volumen de las actividades que se presentan?

Por estar enfocado a la actividad científica, el volumen de las actividades es muy variable, en alguna temporada puede requerirse realizar 20 extracciones de parámetros y en otras algunos cuantos.

8.-¿Con qué frecuencia ocurren las actividades?

Es muy variable, como puede ser diario como puede ser semanal o mensual.

9.-¿Ocurren las actividades de acuerdo a un ciclo?

Posterior a la medición de las características eléctricas se realiza el proceso de extracción de parámetros.

10.-¿Cuáles son los métodos de control utilizados?

La comparación de las simulaciones eléctricas de los dispositivos simulados (o modelados) utilizando los parámetros extraídos con los datos experimentales (o teóricos)

11.-¿Qué criterios se utilizan para medir y evaluar el desempeño, tiempo de ejecución, fiabilidad de los resultados, etc.?

Igual que la pregunta 10.

12.-¿Qué pasos o funciones constituyen el proceso?

Depende de cada material o dispositivo.

13.-¿Cuánto tiempo dura cada actividad? ¿Qué factores intervienen en la duración de las actividades?

Realizarlas de forma manual puede requerir de horas o días de trabajo para realizar e investigar las técnicas de extracción, programar el algoritmo de extracción, diseñar y desarrollar una herramienta provisional que permita hacer la extracción.

14.-¿Qué retrasos pueden ocurrir ?

Que no se cuente con los algoritmos de extracción o que no se cuente con las bases computacionales necesarias para desarrollar los programas

15.-¿Qué datos entran al sistema y cual es su origen?

Entran los datos de cada uno de los proceso de medición realizados (y necesarios), los datos geométricos y físicos de los dispositivos y los materiales.

Para los datos geométricos y físicos su origen es el proceso de fabricación, hojas de especificaciones, diagramas, etc.

En el caso de los datos su origen son las mediciones realizadas o los datos (teóricos, simulados, modelados, etc.) proporcionados por el usuario.

16.-¿En que forma se reciben los datos en el sistema?¿En que forma son almacenados?

Se reciben en formato electrónico, regularmente como un documento de texto. En esta misma forma son almacenados.

17.-¿Cuáles son los datos almacenados?

Los mismos de la pregunta 17

18.-¿Quiénes utilizan la información generada por el sistema?¿Con que finalidad se utilizan?

Investigadores. Para analizar fenómenos, situaciones o características de los dispositivos electrónicos.

19.-¿Qué datos faltan con mayor frecuencia?

Las mediciones de la característica de salida del TFT

20.-¿Cómo están codificados o abreviados los datos de las actividades?

Depende del dispositivo en uso.

21.-¿Quiénes son las personas claves del sistema?¿Porque son importantes?

Solo el usuario, ya que el es el unico responsable de la extracción de parámetros. El sistema debe trabajar en función de las necesidades del usuario final, proveeyendolo de las herramientas adecuadas para realizar su trabajo.

22¿Desde hace cuanto que trabaja con estos materiales?

10 años

23.- Liste sus prioridades máximas para el área en la cual se encuentra

Mis prioridades sobre el trabajo son:

Que el programa

- Sea eficaz al momento de extraer los parámetros.
- Cuento con la posibilidad de evaluar los parámetros extraídos durante las etapas del proceso y al final del mismo.
- Genere archivos de texto con los parámetros resultantes del proceso de extracción, así como de las curvas modeladas utilizando dichos parámetros.
- Que sea de fácil uso.
- Que no requiera de la intervención del usuario.
- Que permita que el usuario realice adecuaciones manuales a las regiones de extracción.

## Anexo II

### DESARROLLO DE LA ESTIMACIÓN DE COSTOS COCOMO II

En la tabla 1 se muestran las diferentes categorías de desarrollo de software, para poder determinar el tamaño y duración de nuestro proyecto, el laboratorio de extracción de parámetros se propondrá en un principio como un programa de categoría pequeña, para la cual se requiere que haya un programador, que desarrolle el código en 6 meses como máximo, se planea que las líneas de código del laboratorio de extracción no sobrepasen las 3 mil.

Tabla 1. Determinador de líneas de código de un programa

Categoría	Programadores	Duración	Líneas de código
Trivial	1	0 – 4 semanas	< 1k
Pequeño	1	1 – 6 meses	1k – 3 k
Medio	2 -5	0.5 – 2 años	3k – 50k
Grande	5 - 20	2 – 3 años	50k – 100k
Muy grande	100 – 1000	4 – 5 años	100k – 1M
Gigante	1000 - 5000	5 – 10 años	> 1M

De acuerdo a la clasificación que se ha elegido, se le asigna una ponderación a diferentes variables que serán utilizadas para realizar el estimado de costo de la realización del proyecto. Tabla 2.

Tabla 2. Valor de variables de a cuerdo con la clasificación

Clasificación	a	b	c	d
Orgánico	3.2	1.05	2.5	0.38
Embebido	3.0	1.12	2.5	0.35
Semi-embebido	2.8	1.20	2.5	0.32

## Desglose de procedimiento

Cálculo del esfuerzo, donde las unidades son personas :

$$E = a \cdot (KLDC^b)$$

$$E = 3.2(2.5^{1.05}) = 8.37 \text{ personas}$$

Cálculo del tiempo de desarrollo:

$$TD = c \cdot (PM^d)$$

$$TD = 2.5(8.37^{.38}) = 5.6 \text{ meses}$$

Calculo de personas:

$$PM = E/TD$$

$$PM = 8.37/5.6 = 1.49 \text{ personas}$$

Cálculo del costo total del programa:

$$C_{total} = (\text{Salario mensual})(PM)(TD)$$

$$C_{total} = (8,500)(1.49)(5.6)$$

$$C_{total} = 70,942 \text{ pesos}$$

El sueldo mensual se considero con respecto al promedio que tiene como pago una persona que programa en un lenguaje como C. La conclusión de este análisis destaca el costo del proyecto según como seria de 70,942 pesos. Este seria un costo inicial puesto que hay que agregar aun el pago de las licencias de los programas a utilizar, tales como Matlab y Windows. Aunado a esto faltaría el estudio de los costos de los insumos, tales como el servicio de luz, papel, tinta, etc.