

## CAPÍTULO 5

### PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

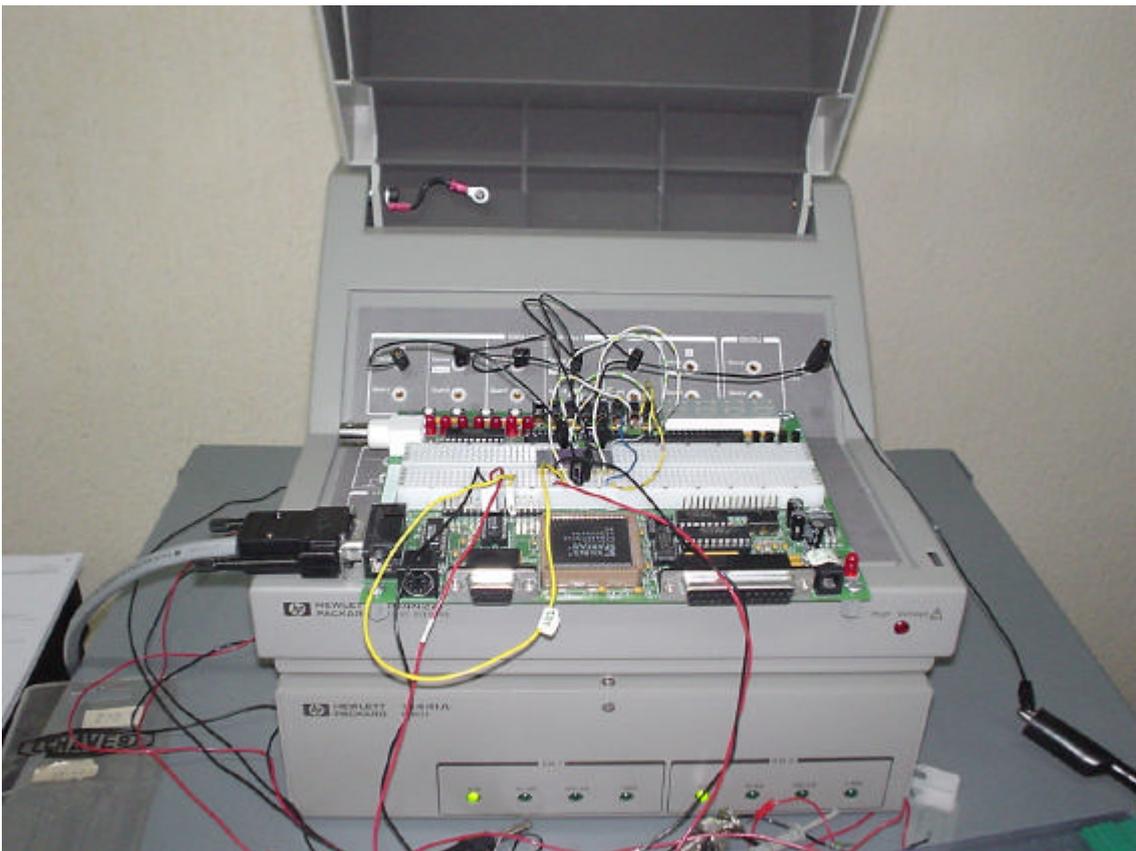
#### 5.1. EL TRAZADOR DE CURVAS: HP 4155A

Para la realización de este proyecto ha sido indispensable la utilización de este elemento, que se muestra en la figura 5.1 y cuyo funcionamiento pasamos a explicar brevemente.



Figura 5.1. Trazador de curvas Hewlett Packard 4155-A.

Se trata de un instrumento que posee 6 canales de entrada (además de los de alimentación y tierra) configurables por el usuario, de tal modo que dichos canales se pueden conectar a cualquier pin de un circuito integrado (ver figura 5.2). Además, estos canales se pueden configurar como fuentes de corriente o como fuentes de tensión. Si se configuran como fuente de tensión, se puede medir la corriente que suministran. Si, por el contrario se configuran como fuente de corriente, se puede medir la tensión que se forma. Los 6 canales se pueden configurar independientemente como fuentes de corriente o tensión. Para nuestras medidas los configuramos como fuente de tensión y medimos sus corrientes.



**Figura 5.2. Canales de entrada del trazador de curvas. Interconexión con un circuito integrado.**

El paso de medida mínimo en el caso de las corrientes es de 10 fA, lo cual hace que podamos tener, si así lo necesitamos, una gran precisión a la hora de recorrer una curva. Además se pueden configurar los valores máximos para las corrientes, de modo que podamos prevenir que la corriente que atraviese un dispositivo sea demasiado elevada y pueda quemar el mismo.

El usuario puede desplazarse manualmente a lo largo de las páginas o pantallas de control de las que dispone este elemento para ir configurando a su gusto todos los parámetros que necesite en sus cálculos.

En el panel frontal del 4155 (ver figura 5.3) encontramos también otros botones, como por ejemplo, teclas alfanuméricas para introducir los parámetros que hemos comentado anteriormente, así como cursores para desplazarnos por la curva una vez que ésta esté ya en pantalla, el botón que inicia la medida y varios más. También posee el instrumento una disquetera para extraer datos [12].



**Figura 5.3. Frontal del trazador de curvas 4155A de Hewlett Packard. Podemos observar los distintos botones del instrumento, así como su pantalla.**

En el desarrollo de este proyecto se ha modificado la configuración por defecto que posee el instrumento para adecuarlo a nuestros objetivos, resumiendo a continuación el menú y los parámetros más importantes de cada página:

1. Página de canales: en este menú podemos habilitar/deshabilitar canales, dar una funcionalidad a los mismos (constante o variable), dar distintos nombres a los puertos, permitir que la tensión del puerto permanezca en el mismo tras la medida o no, y también permite seleccionar el modo de medida entre “sweep” (o continuo) y “sampling” (o muestreado).

2. Página de medida: aquí se permite configurar el tiempo de duración de la medida entre tres valores: corto, medio y largo, según sea o no necesario medir con gran precisión un punto o curva. También se permite en este menú configurar los tiempos de inicio y de fin de la medida, así como el paso de la misma.
3. Página de visualización: este submenú es el que nos ayuda a la hora de observar la curva. Aquí podemos definir las escalas de los ejes: lineal o logarítmica; los puntos de inicio y final de los mismos, poner la rejilla (“grid”) para distinguir mejor los puntos e, incluso, poner un marcador que nos diga en cada instante los valores de cada punto medido.

## 5.2. AUTOMATIZACIÓN DE LA MEDIDA

Una vez que aprendimos a manejar el aparato, nos dispusimos a hacer la automatización de las medidas. Para ello comunicamos el trazador de curvas con un PC mediante el bus GPIB. Lo que faltaba era poder realizar la comunicación con el chip. Por tanto se insertó el chip en la placa de pruebas con una FPGA, de modo que ya pudiéramos comunicarnos gracias al puerto serie de la misma. Toda la comunicación se llevó a cabo gracias a las órdenes generadas en Matlab.

Podemos observar en las figuras 5.4 y 5.5 la interconexión de los distintos elementos que intervienen en la medida.



Figura 5.4. Elementos de trabajo. Vemos el PC y el trazador de curvas.

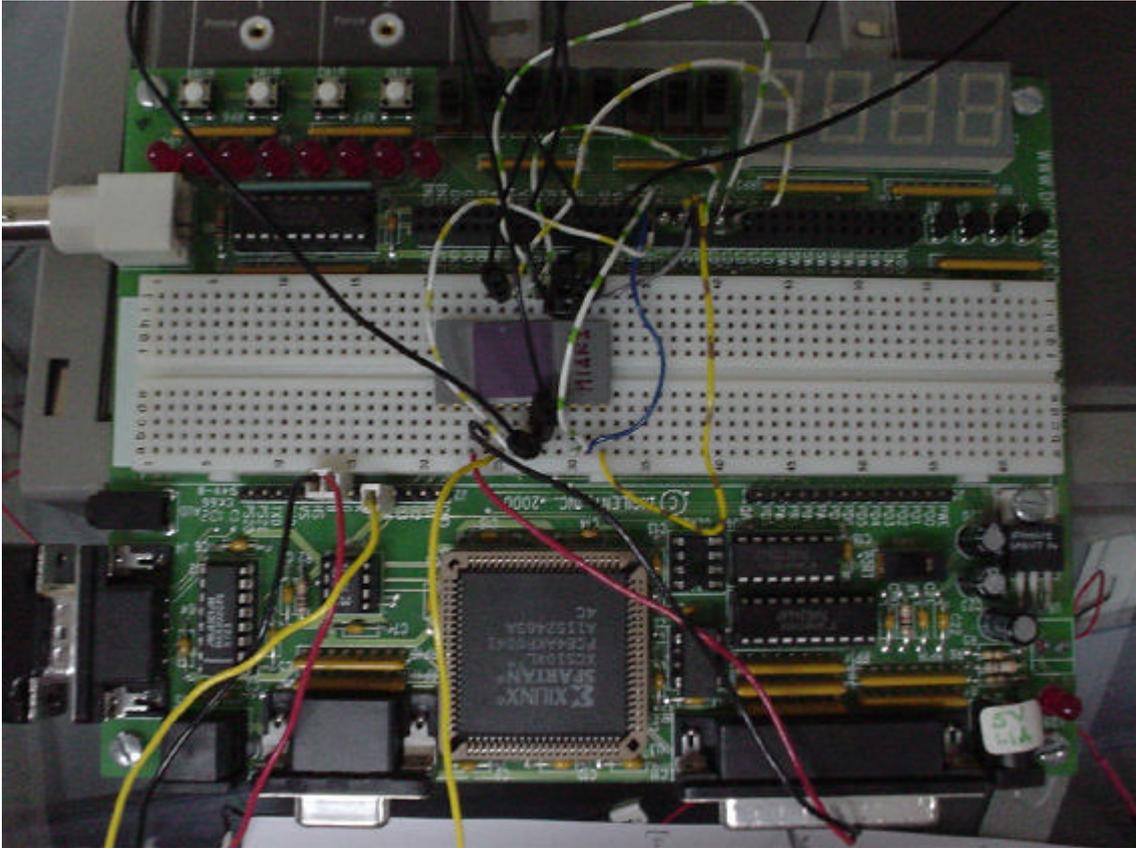


Figura 5.5. Chip insertado dentro de placa de FPGA.

Como ya se comentó en el Capítulo 4, nos encontramos con un array de 4 columnas por 16 filas, con 25 tamaños cada una. Por tanto, basta con emplear 2 bits para la selección de columnas, 4 para la de filas y 5 para la de los tamaños. Así pues se eligieron 3 palabras de la FPGA, de modo que bastaba con escribir en ellas a través del puerto serie, mediante la orden apropiada, para modificar los valores y seleccionar así un transistor específico dentro de una celda determinada.

Para realizar la automatización de la medida se implementó un programa mediante el paquete informático Matlab que seleccionara automáticamente las filas, columnas y tamaños dentro del chip. También se automatizó la selección de la curva específica que se deseaba medir en cada instante.

A continuación se muestra el proceso seguido para la obtención de las medidas.

### 5.3. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

La medida se automatiza como se explica anteriormente de modo que en el bucle principal del programa implementado para la ocasión realizamos un barrido de la siguiente forma:

Para los 25 tamaños  
 Para las 7 curvas  
 Para cada punto de la curva  
 Fijar tensiones analógicas,  $V_S, V_G, V_D$   
 Para las 4 columnas  
 Para las 16 filas  
 Medir la corriente  $I_D$  del transistor n  
 Fin  
 Fin  
 Fin  
 Fin  
 Fin

Lo que se pretendía con la estructura anterior era lo siguiente:

- Tratar de tener los parámetros aleatorios que pudieran afectar a la medida (siendo tal vez el más importante y difícil de controlar la temperatura de la habitación) lo más controlados posible, realizándose por ello el primer bucle por tamaños, de tal modo que para cada transistor del mismo tamaño, la temperatura fuera lo más uniforme posible.
- Tratar de conseguir que el tiempo que transcurriera entre las medidas de dos celdas contiguas fuera lo menor posible. Una vez obtenidas las medidas, el siguiente paso en el estudio es realizar la diferencia entre las medidas obtenidas de una celda y la anterior (por columnas) para tener una medida y su referencia. Por ello, la fiabilidad de la diferencia de los valores es mayor cuanto menor sea el tiempo que transcurra entre las medidas de dichas celdas.
- Independencia de la medida con la configuración del aparato. Según el esquema anterior, el aparato no se vuelve a configurar hasta que medimos el array completo.

Las curvas que se midieron se pueden dividir en dos grandes grupos:

- Por una parte se midieron curvas barriendo  $V_G$  desde 0 a 3.3 V con diferentes valores de  $V_S$ , siendo  $V_{DS}$  fijo.
  - 1 Curva1: barremos  $V_G$  con  $V_S = 0V$  y  $V_{DS} = 1.65V$ .
  - 2 Curva 2: barremos  $V_G$  con  $V_S = 1V$  y  $V_{DS} = 1.65V$ .

Para estas dos primeras curvas nos encontramos con los transistores en saturación.

- 3 Curva 3: el barrido es de  $V_G$  con  $V_S = 0V$  y  $V_{DS} = 0.1V$ .
- 4 Curva 4: en esta ocasión, barreos  $V_G$  con  $V_S = 1V$  y  $V_{DS} = 0.1V$ .

Estas dos últimas configuraciones, por el contrario, obligan a trabajar a los transistores en zona óhmica.

- Por otra parte se miden curvas barriendo  $V_S$ , desde 0V hasta 1.65V, con  $V_{DS}$  constante y con un valor de  $V_G$  diferente según cada curva, ya que, de la curva 1 se extrae una información adicional que nos es útil para las 3 últimas curvas: se miden los valores  $V_{G1}$ ,  $V_{G2}$  y  $V_{G3}$  para los que nos encontramos en inversión débil, moderada y fuerte, respectivamente, de la curva 1. Para obtener el valor  $V_{G1}$  se busca el valor de tensión para el cual cada transistor tiene una corriente de 1nA, habiendo garantizado anteriormente que para ese nivel de corriente todos los transistores del array se hallan en inversión débil. Los otros dos valores,  $V_{G2}$  y  $V_{G3}$ , se obtienen buscando en la curva de corriente el punto de tensión para el que nos encontramos en un nivel de inversión moderada y fuerte respectivamente. Con esos valores son con los que se configura el equipo para la medida de las 3 últimas curvas, de tal modo que tenemos:

- 5 Curva 5: barreos  $V_S$ , con  $V_G = 1.25 * V_S + V_{G1}$  y  $V_D = V_S + 1.65$ .
- 6 Curva 6: se barre  $V_S$  con  $V_G = 1.25 * V_S + V_{G2}$  y  $V_D = V_S + 1.65$ .
- 7 Curva 7: barrido de  $V_S$  con  $V_G = 1.25 * V_S + V_{G3}$  y  $V_D = V_S + 1.65$ .

Las cuatro primeras curvas se miden barriendo logarítmicamente las corrientes, fijando el número total de puntos para el barrido en 12. Para ello, para un solo transistor de cada tamaño, se calcula cuál es el valor máximo de la corriente, obtenido para un punto de tensión  $V_G = 3.3V$  y se fija un valor mínimo de corriente de 800pA. Entre esas dos corrientes  $I_{min}$  e  $I_{max}$  se obtienen los 12 valores de corriente equidistantes en escala logarítmica. Posteriormente, mediante interpolación no lineal, se calculan los valores de  $V_G$  que el instrumento ha de fijar para que resulten los valores de corriente equidistantes en escala logarítmica. Estos valores de  $V_G$  obtenidos son los que se emplean para medir las curvas de todos los transistores del array del mismo tamaño. Por el contrario, para las 3 últimas curvas se hace un barrido con un paso fijo en la tensión de barrido,  $V_S$ .

Se han medido las anteriores curvas en 12 puntos, tomando este valor como compromiso entre velocidad y precisión. Además hemos configurado el trazador de curvas de tal modo que cada punto es el resultado medio de 256 medidas, para eliminar en la mayor parte posible el ruido que introduce el propio equipo y el montaje.

### 5.3.1. CURVAS EN GRAN SEÑAL MEDIDAS

Podemos ver los valores de las corrientes para los 64 transistores para cada tamaño y curva en las figuras 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, 5.14, 5.16 y 5.18; los valores medios para los 64 transistores se muestran en las figuras 5.7, 5.9, 5.11, 5.13, 5.15, 5.17 y 5.19 para las curvas 1 a 7 respectivamente.

En cada subfigura se representa en el eje X la tensión  $V_G$  de barrido, desde 0V hasta 3.3V, mientras que en el eje Y, se muestra la corriente  $I_{DS}$  en escala logarítmica. Las subfiguras están ordenadas por tamaños, de modo que las filas se corresponden con las anchuras ( $10\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$ ,  $2.5\mu\text{m}$ ,  $1.2\mu\text{m}$  y  $0.6\mu\text{m}$  respectivamente), mientras que las columnas se corresponden con las longitudes ( $10\mu\text{m}$ ,  $4\mu\text{m}$ ,  $1.5\mu\text{m}$ ,  $0.7\mu\text{m}$  y  $0.3\mu\text{m}$ )

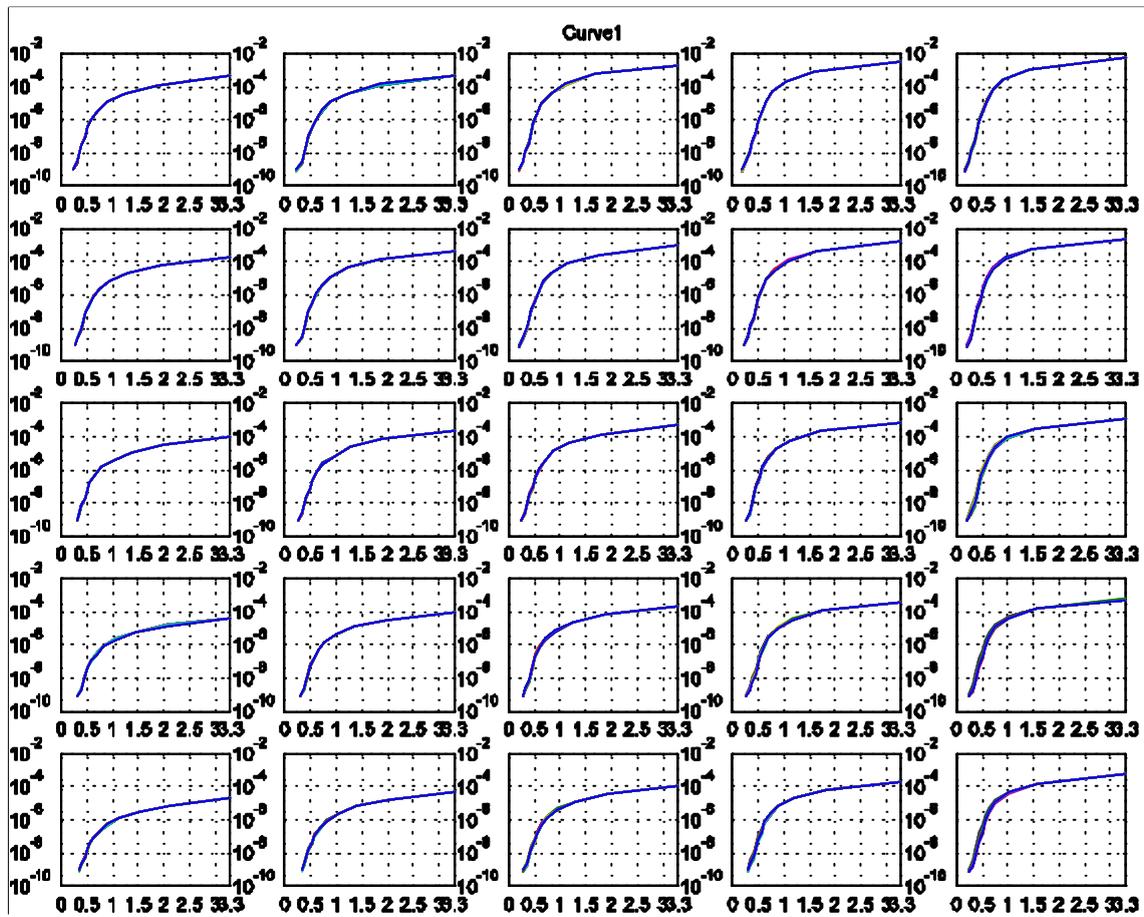


Figura 5.6. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array, para los 25 tamaños del mismo y para la configuración de la curva 1.

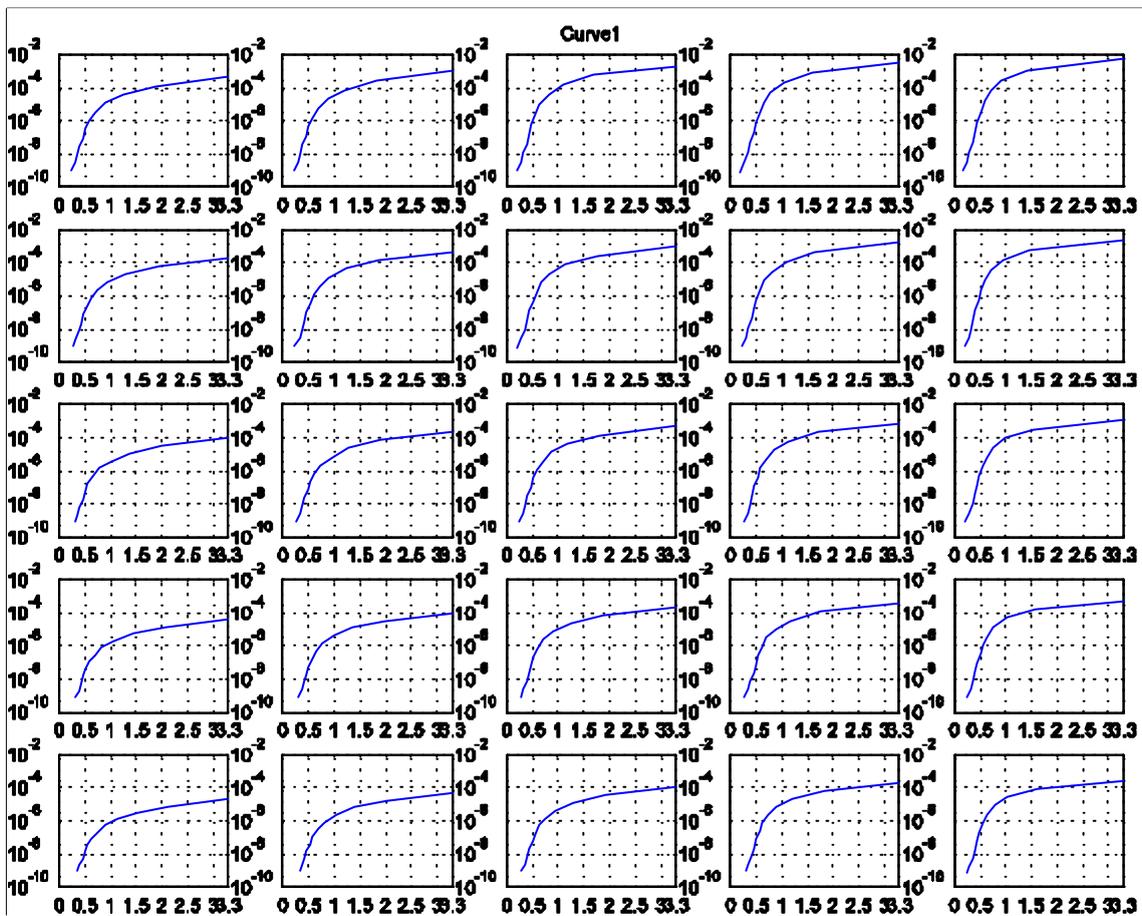


Figura 5.7. Intensidades medias para los 25 tamaños del array para transistores nmos y para la curva 1.

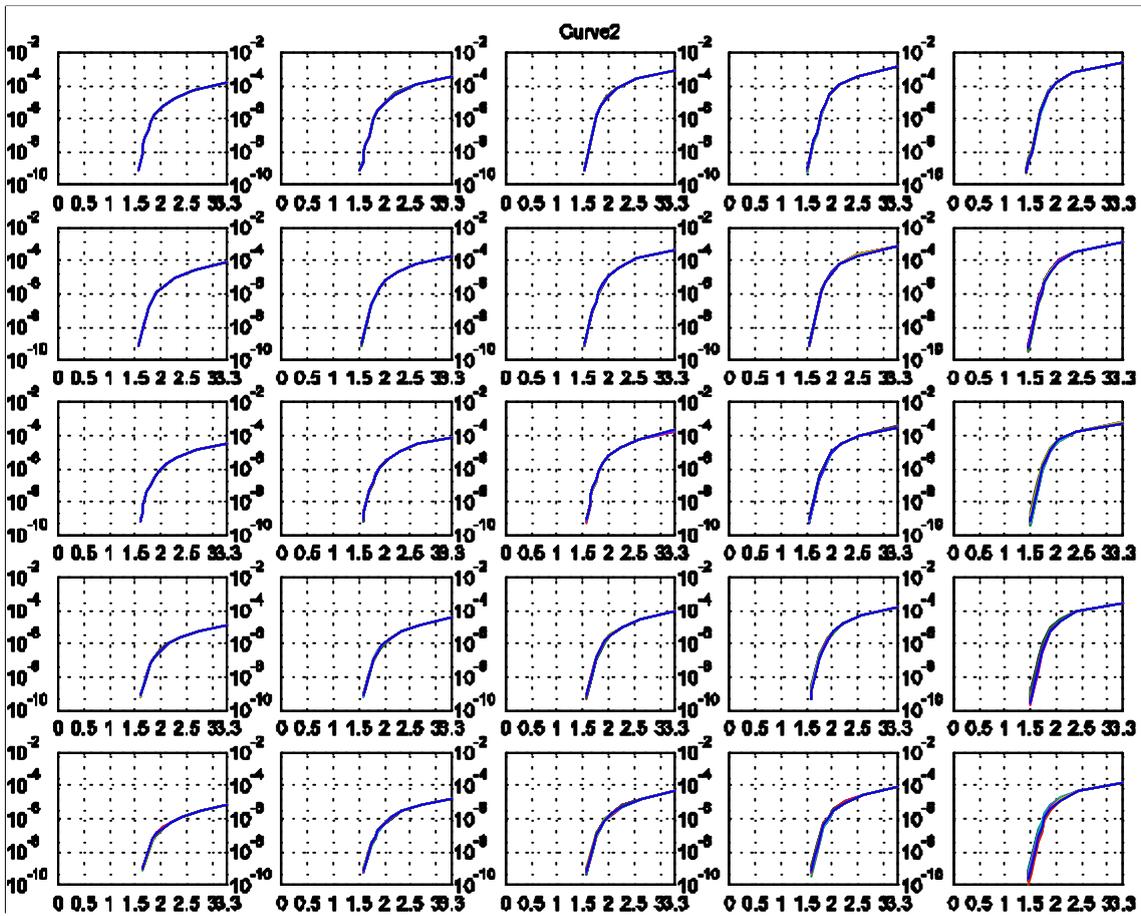


Figura 5.8. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 2.

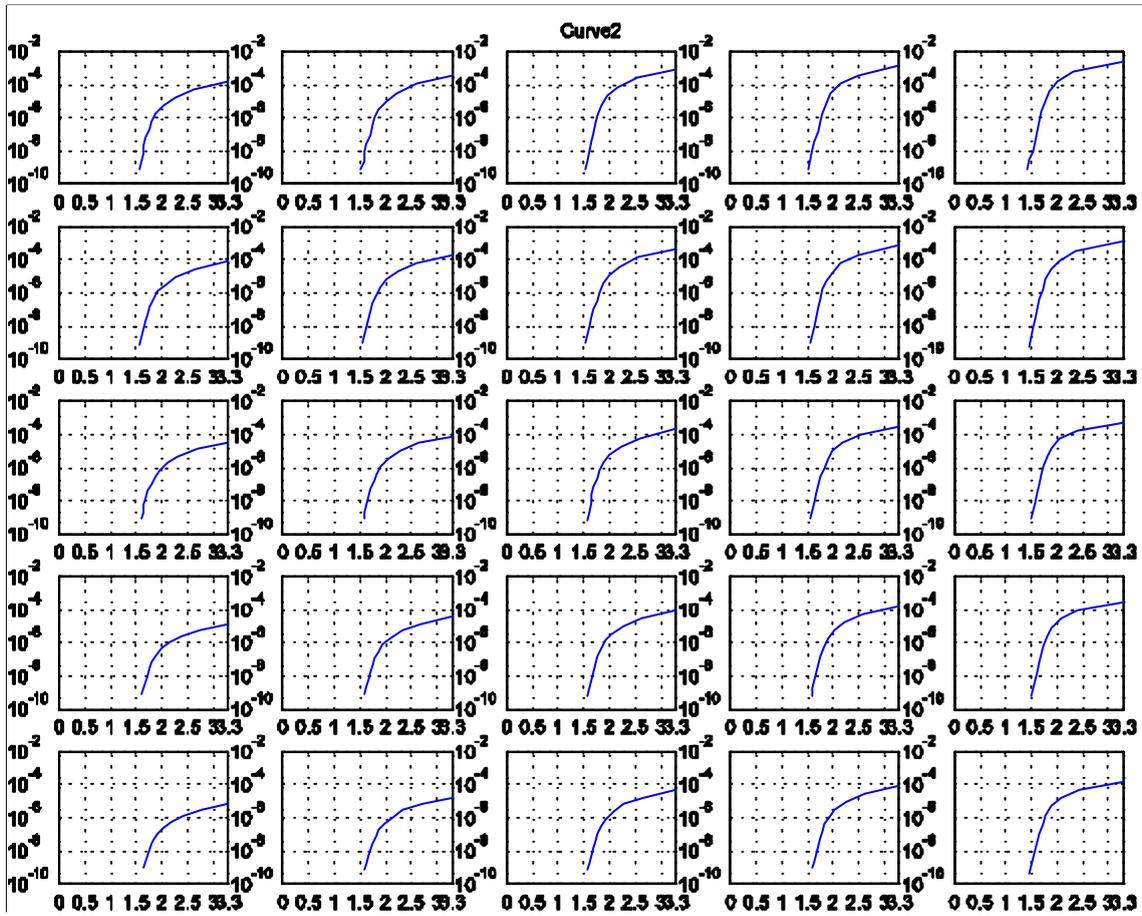


Figura 5.9. Intensidades medias para los 25 tamaños y para todo el array, con la configuración de la curva 2 para transistores nmos.

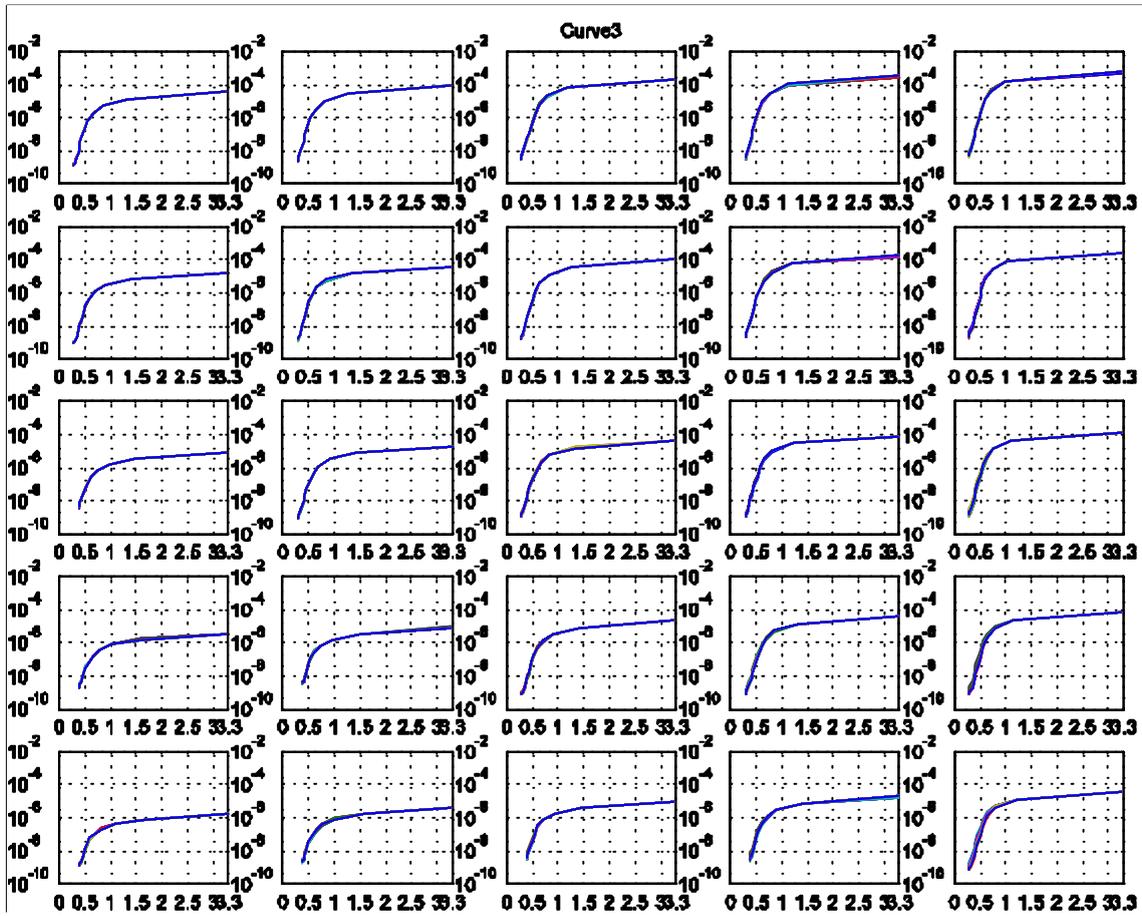


Figura 5.10. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 3.

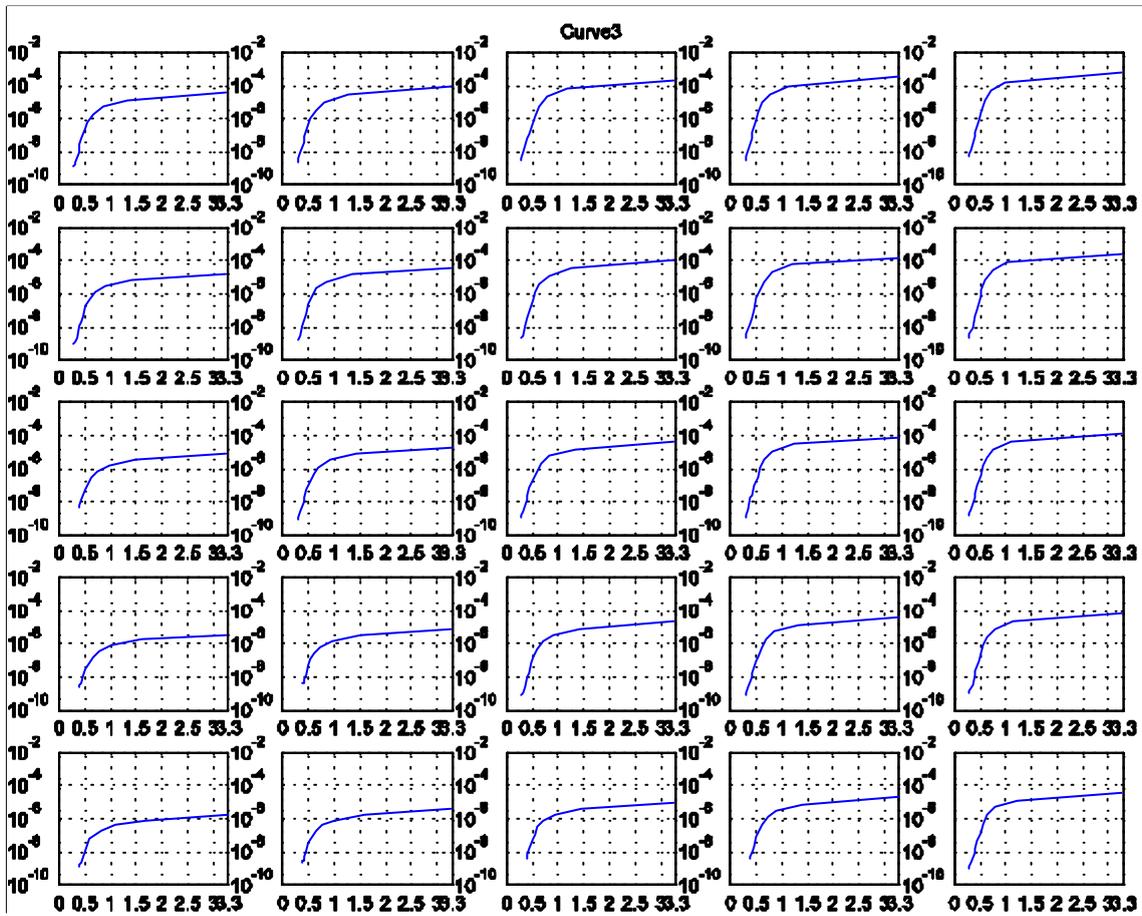


Figura 5.11. Valores medios de las intensidades para los 25 tamaños del array y para la configuración de la curva 3 para transistores nmos.

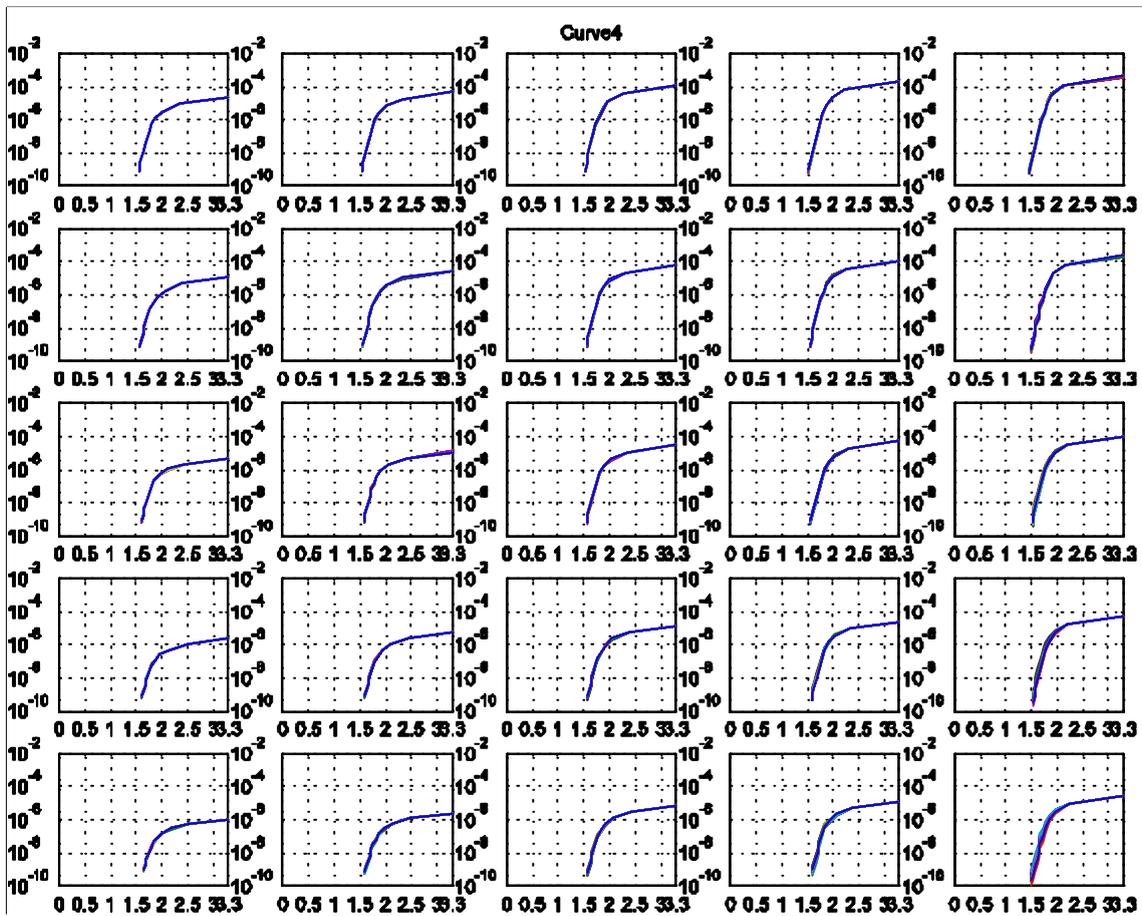


Figura 5.12. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 4.

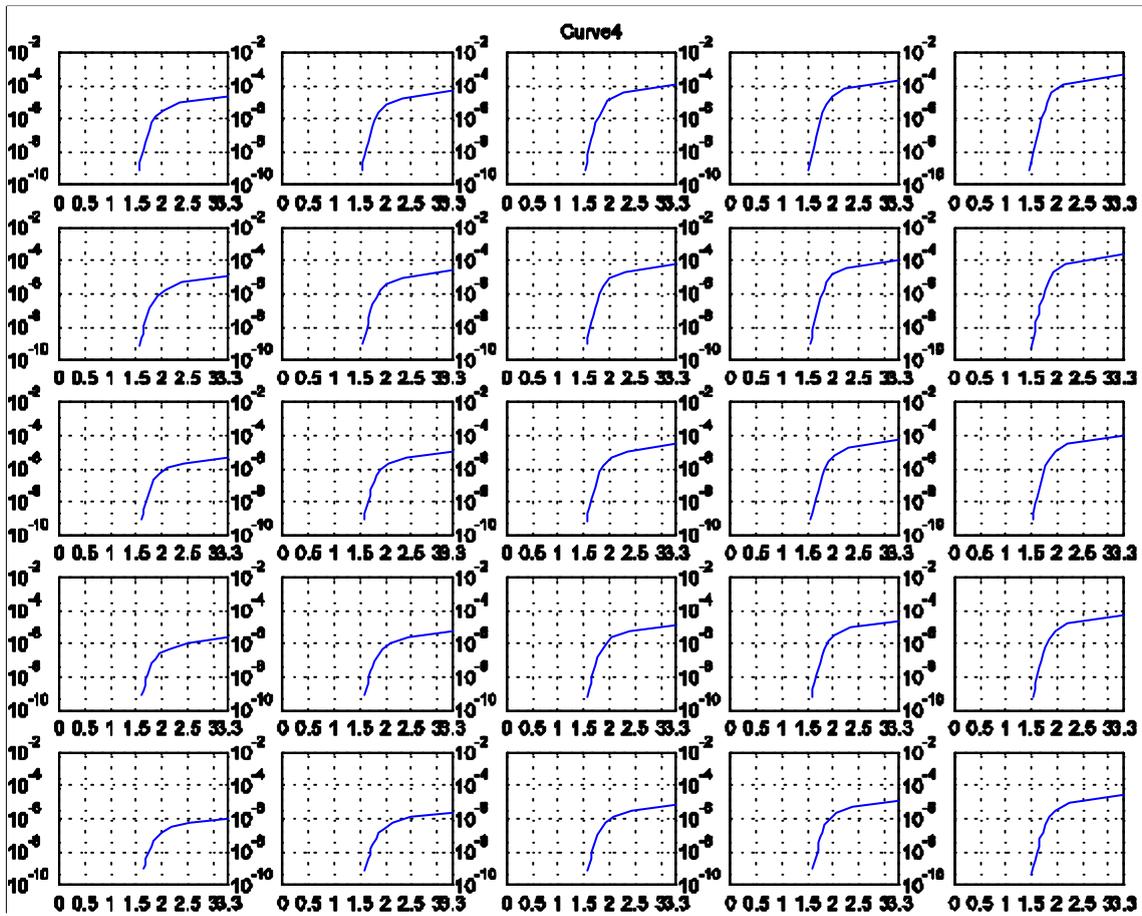


Figura 5.13. Valores medios de las corrientes de los 25 tamaños del array para la curva 4 para transistores nmos.

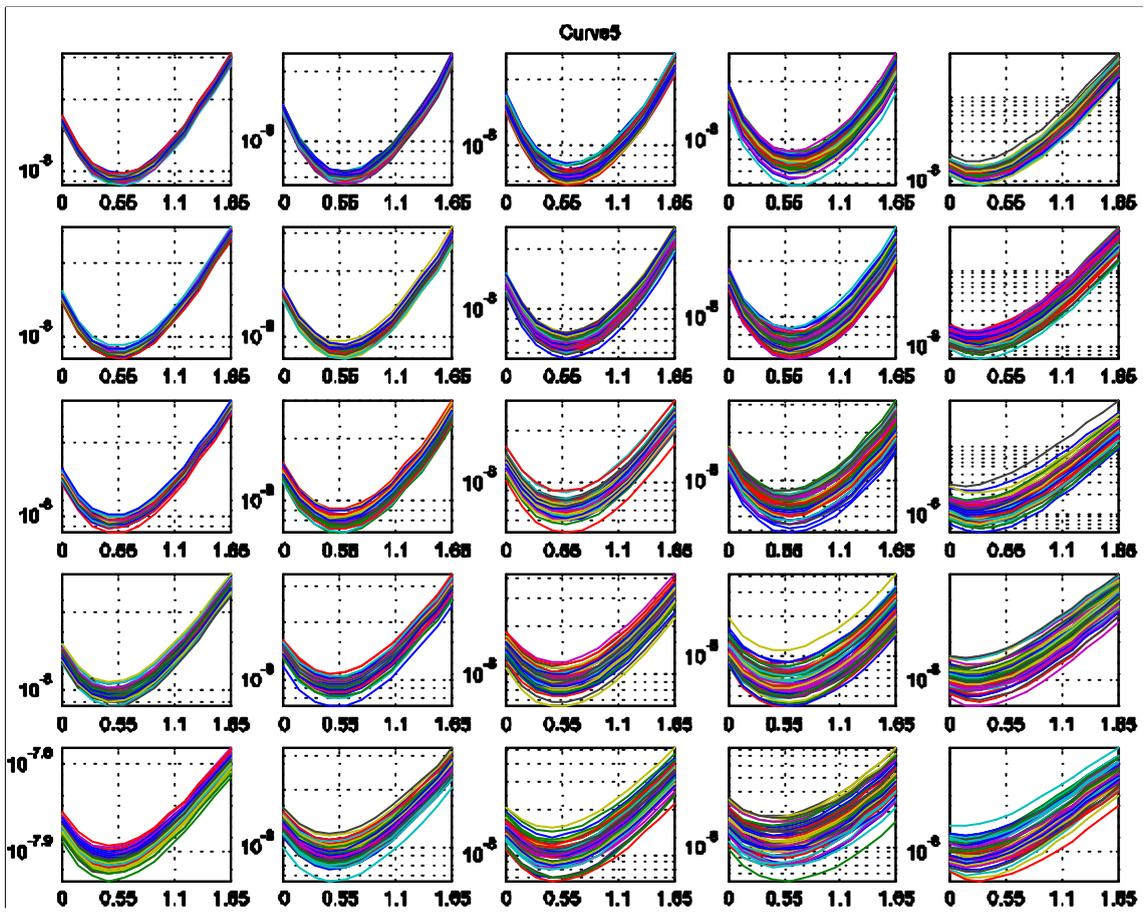


Figura 5.14. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 5.

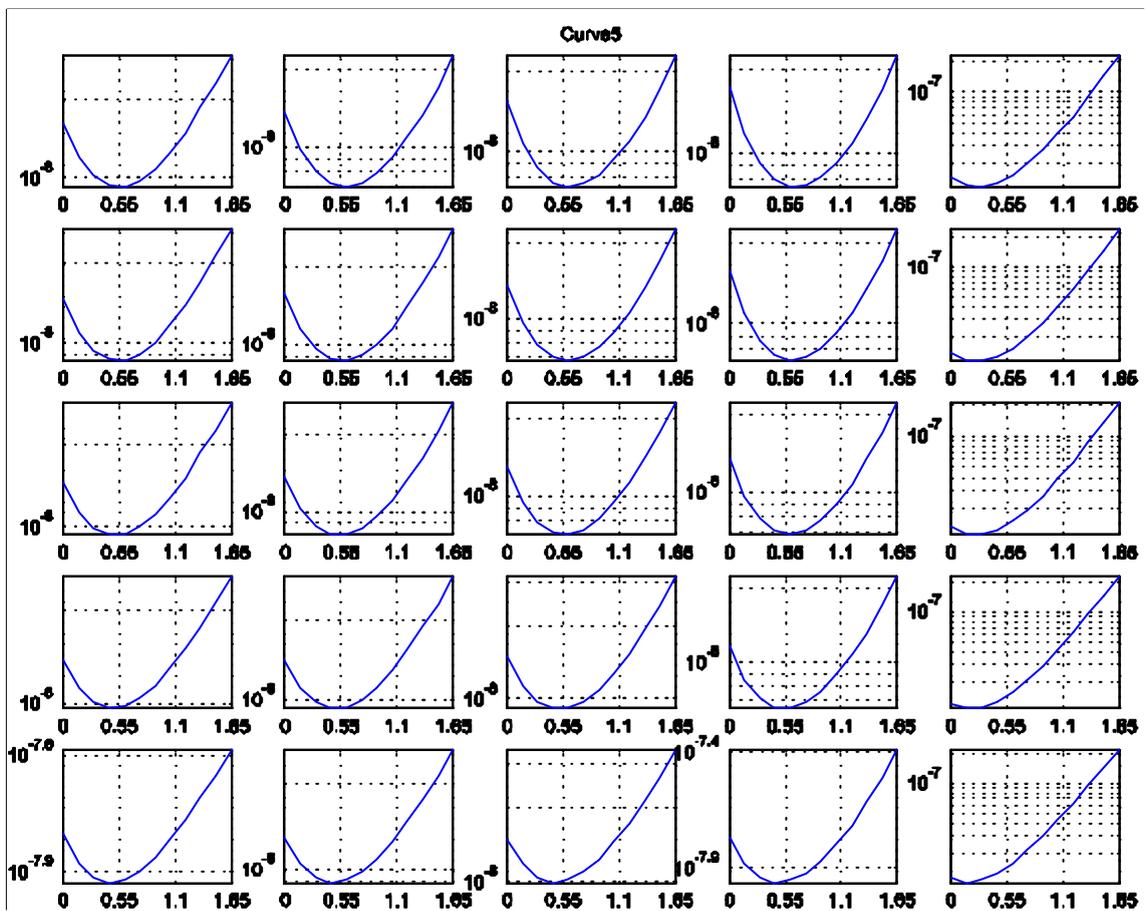


Figura 5.15. Corrientes medias de los 25 transistores del array para la configuración de la curva 5 para transistores nmos.

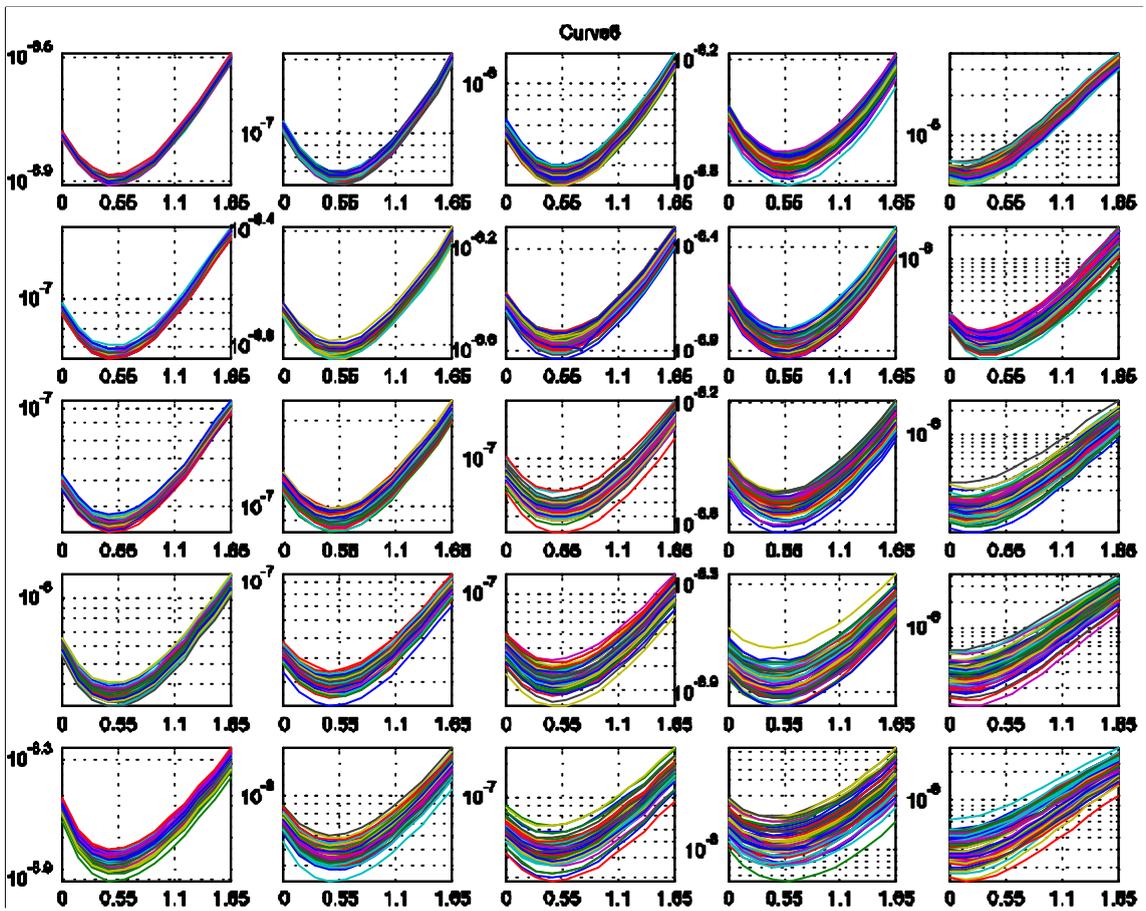


Figura 5.16. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 6.

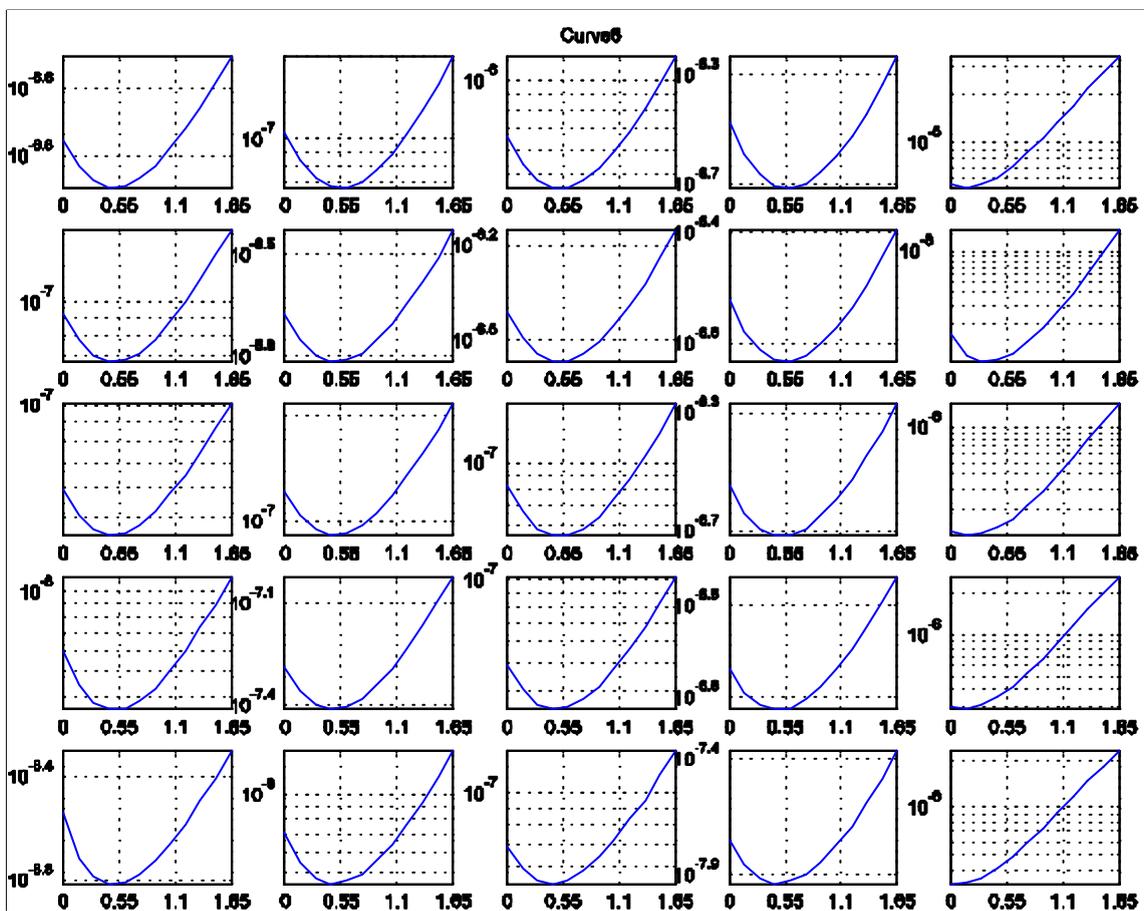


Figura 5.17. Corrientes medias para los 25 tamaños del array con la configuración de la curva 6 para transistores nmos.

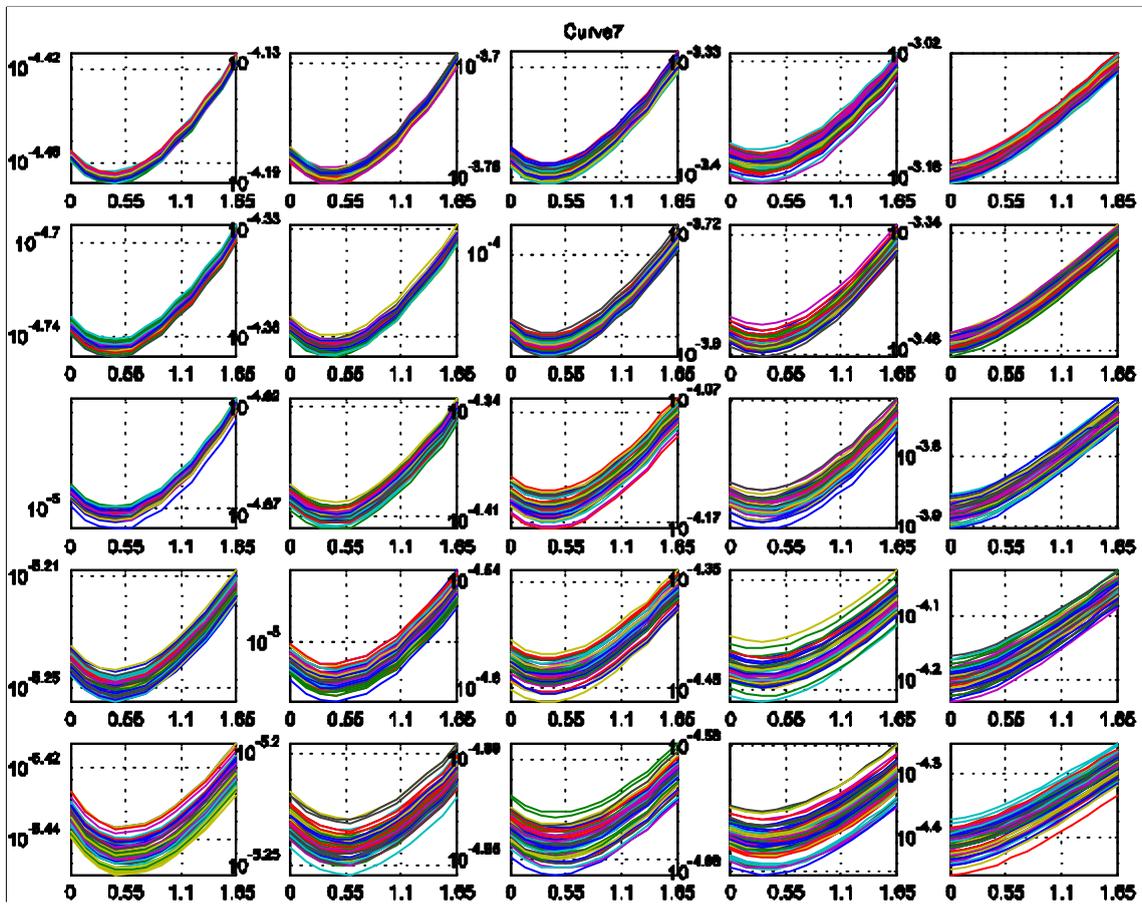


Figura 5.18. Valores de corriente para los 64 transistores nmos del array y para la configuración de la curva 7.

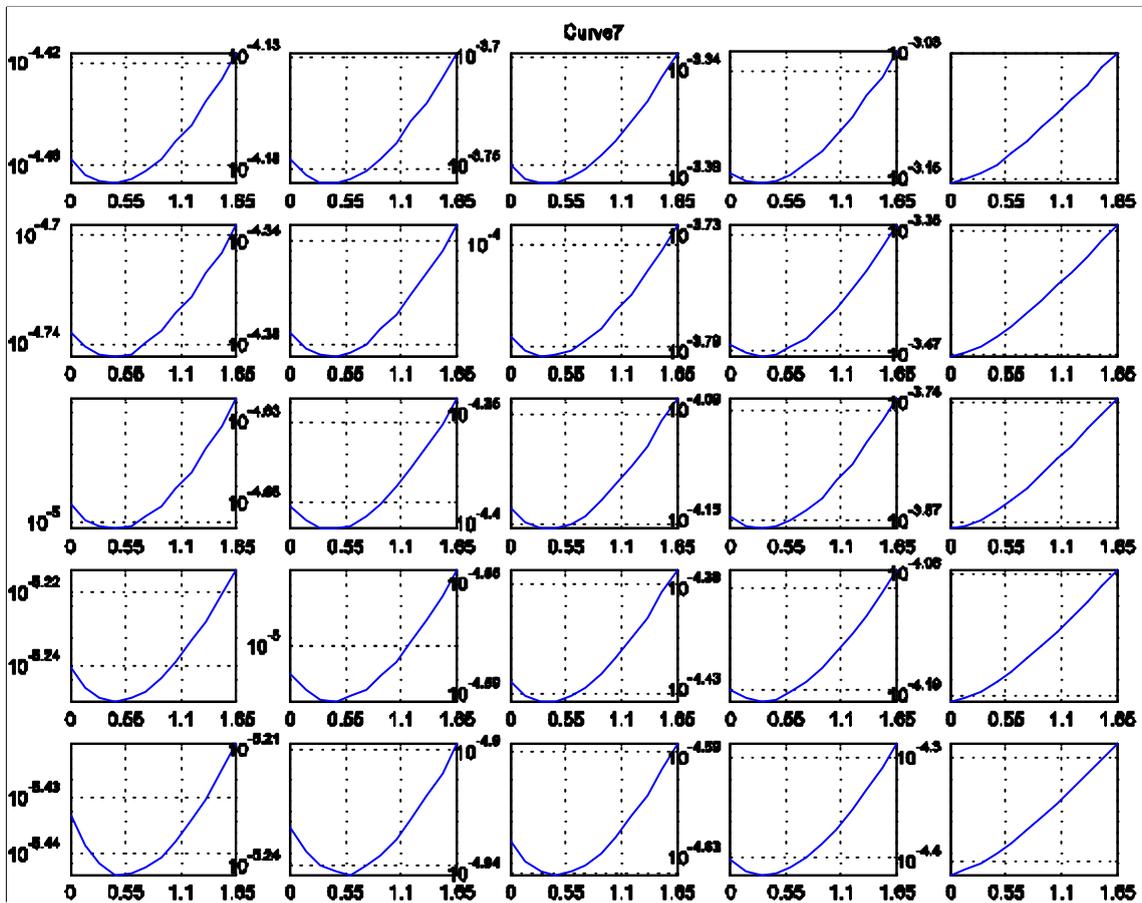


Figura 5.19. Intensidades medias para los 25 tamaños y la configuración de la curva 7 para transistores nmos.

### 5.3.2. DESVIACIONES ESTÁNDAR EN LAS CORRIENTES MEDIDAS

Para un par de transistores dados, el mismatch entre las corrientes se puede obtener directamente restando la diferencia relativa entre las corrientes medidas,  $\frac{\Delta I_{DS}}{I_{DS}}$ . Para obtener el valor  $\Delta I_{DS}$  se realiza la diferencia entre las corrientes medidas para transistores de un mismo tamaño situadas en celdas consecutivas a lo largo de una misma columna. De ese modo, pasamos de tener 64 transistores de cada tamaño a  $15 \cdot 4 = 60$  pares de transistores. Para cada tamaño calculamos  $s\left(\frac{\Delta I}{I}\right)$  de los 60 pares de transistores.

En las figuras 5.20 a 5.26 podemos observar las curvas de  $s\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{med}$  obtenidas con el trazador de curvas, para todos los transistores nmos del array, para los 25 tamaños y para cada una de las 7 curvas medidas.

En las figuras 5.20 y 5.22 podemos observar cómo tenemos una variación de la pendiente en las curvas, que no se manifiesta en las curvas de las figuras 5.21 y 5.23. Esta variación es debida a las corrientes de pérdida (leakage), pues en esta zona (inversión débil) y para las curvas anteriormente mencionadas (que poseen  $V_s = 0\text{ V}$ ) las corrientes de fuga son elevadas (de hecho serían equivalentes a la corriente de fuga de  $64 \cdot 25$  diodos en paralelo, por cómo está construido el chip), por lo que enmascaran en la zona de inversión débil la corriente medida, produciendo este efecto de variación de pendiente en las curvas.

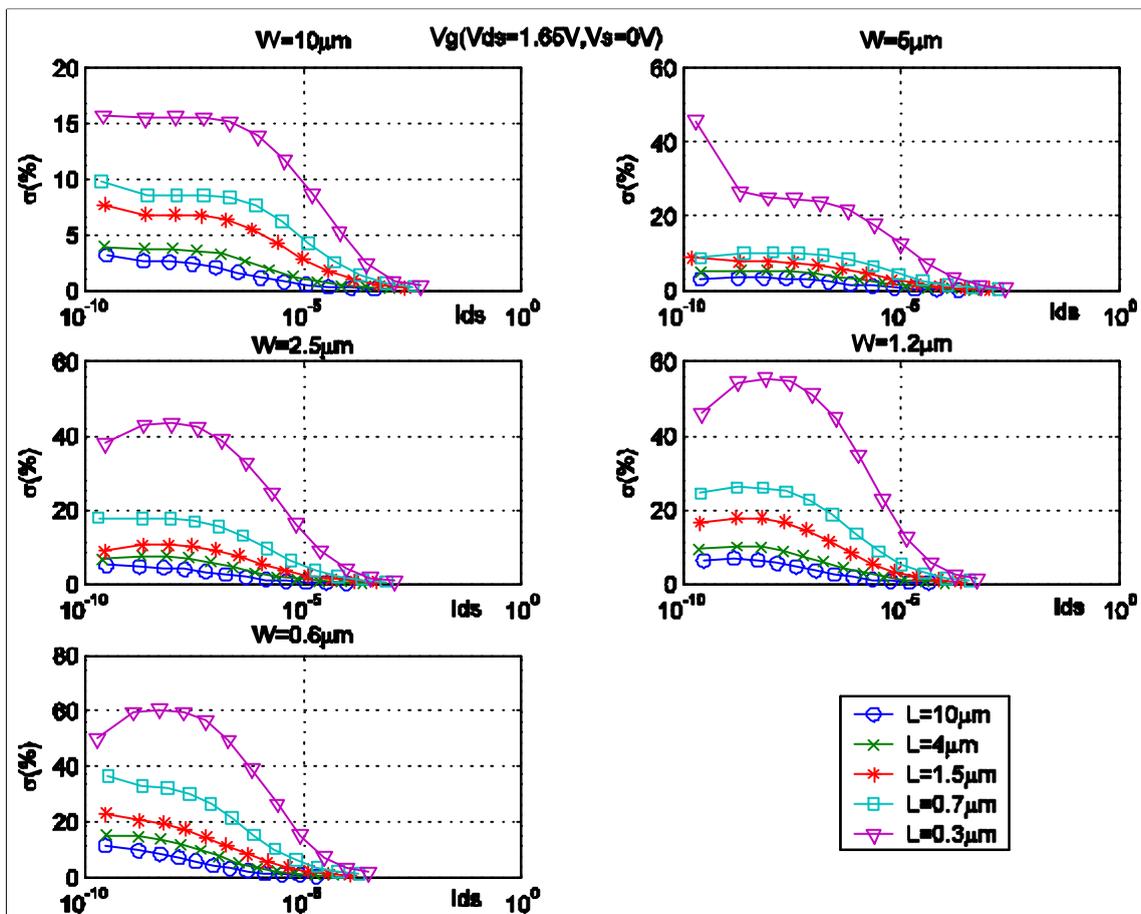


Figura 5.20. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores nmos para la curva 1. En el eje x se representa la corriente, en escala logarítmica.

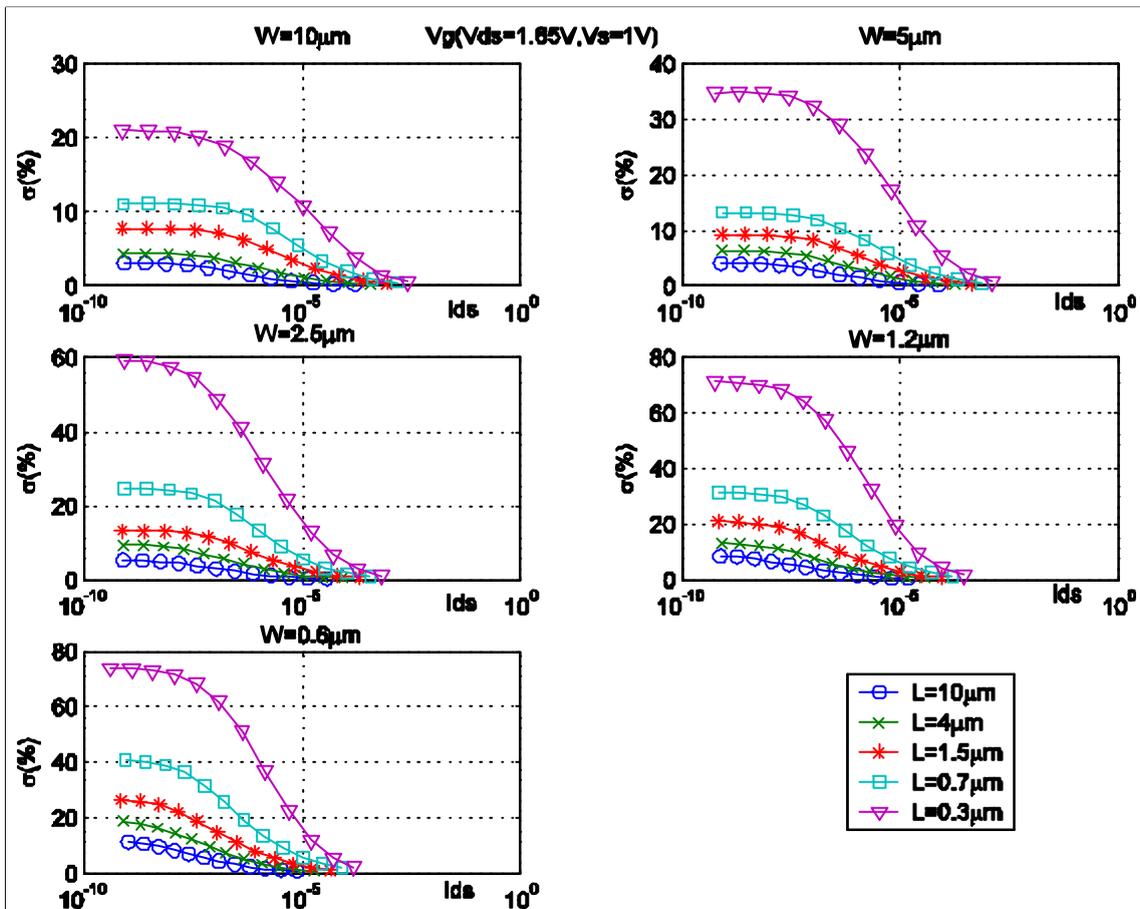


Figura 5.21. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 2. En el eje x se representa la corriente, en escala logarítmica.

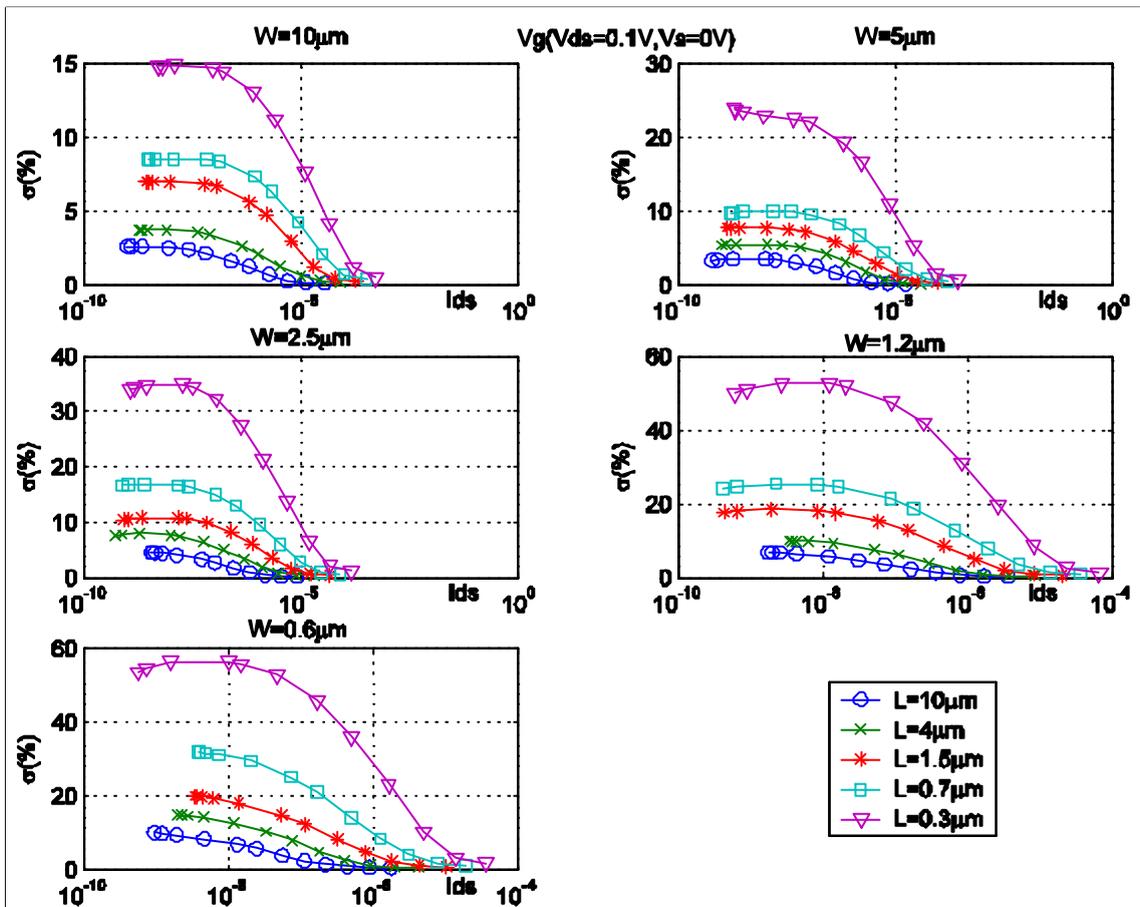


Figura 5.22. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 3. En el eje x se representa la corriente, en escala logarítmica.

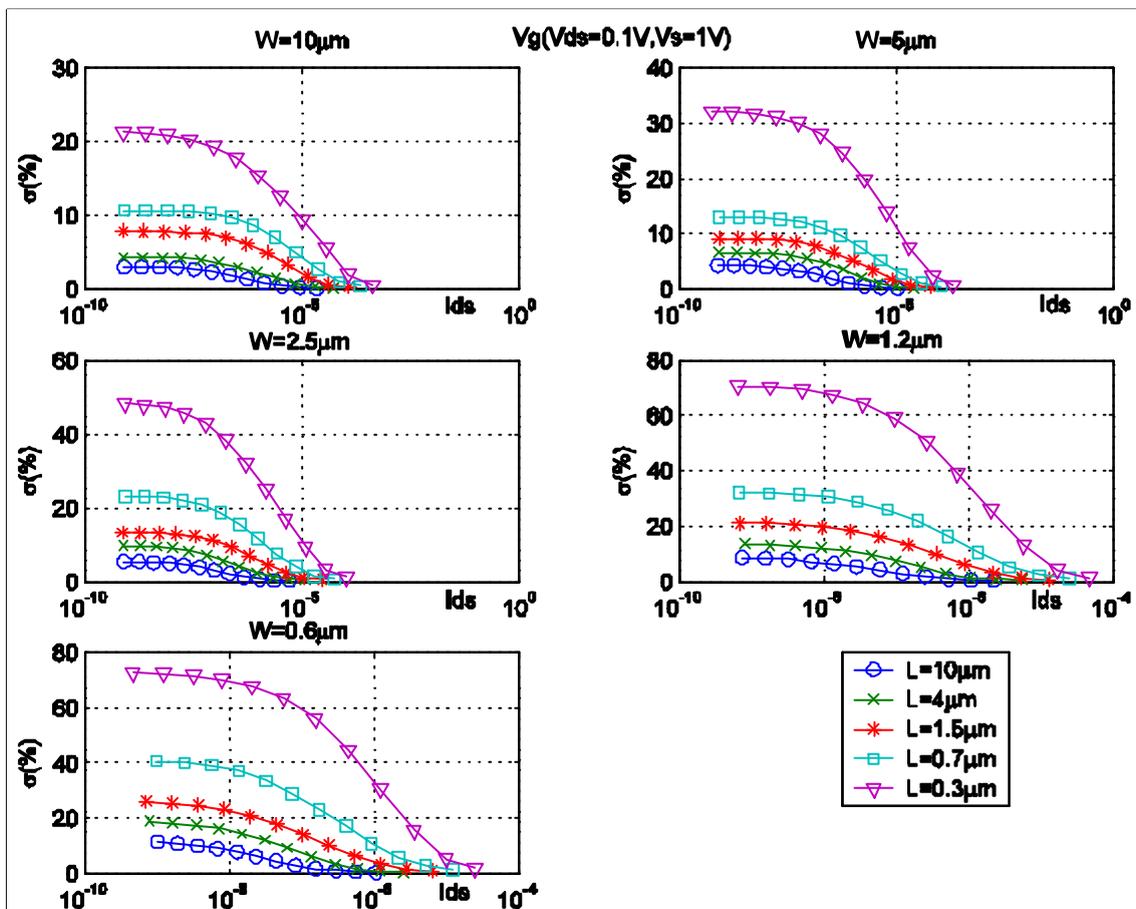


Figura 5.23. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 4. En el eje x se representa la corriente, en escala logarítmica.

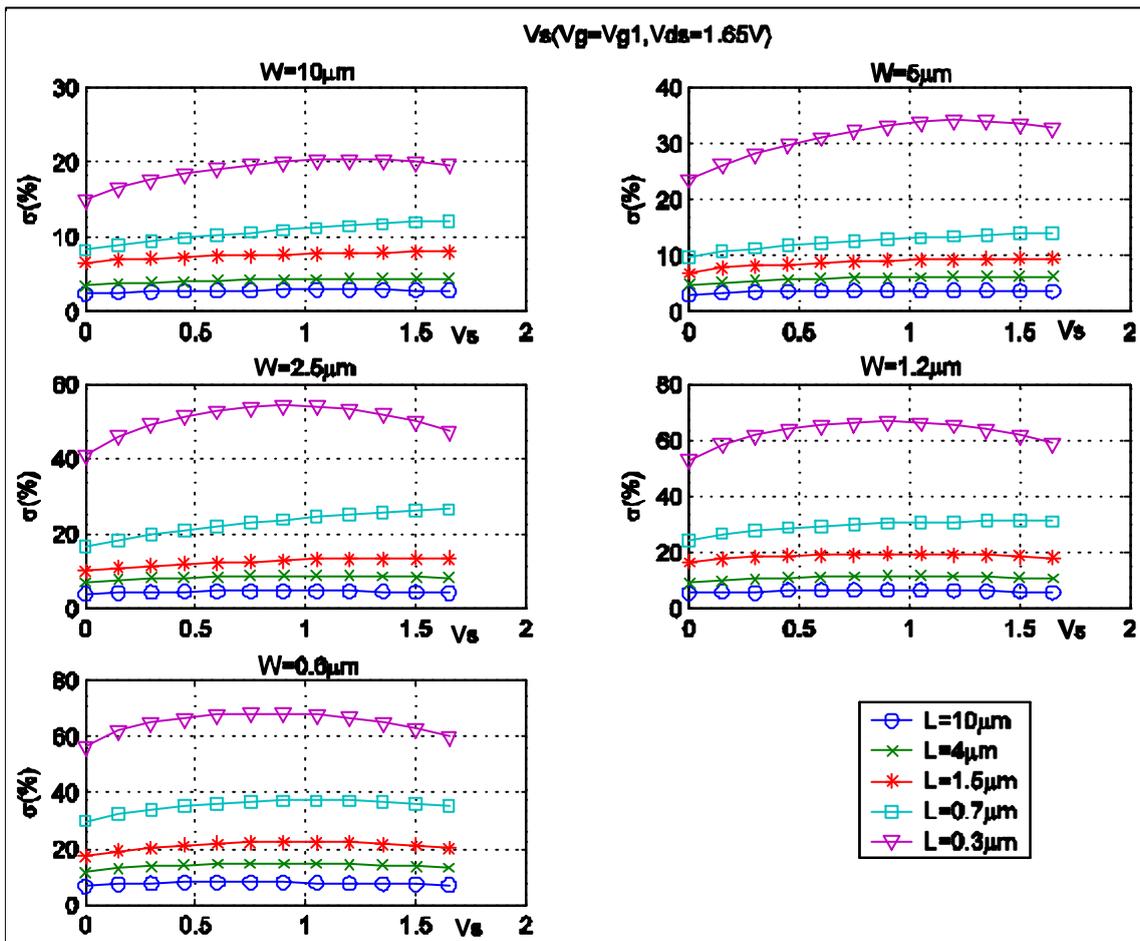


Figura 5.24. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 5. En el eje x se representa la tensión de barrido,  $V_s$ .

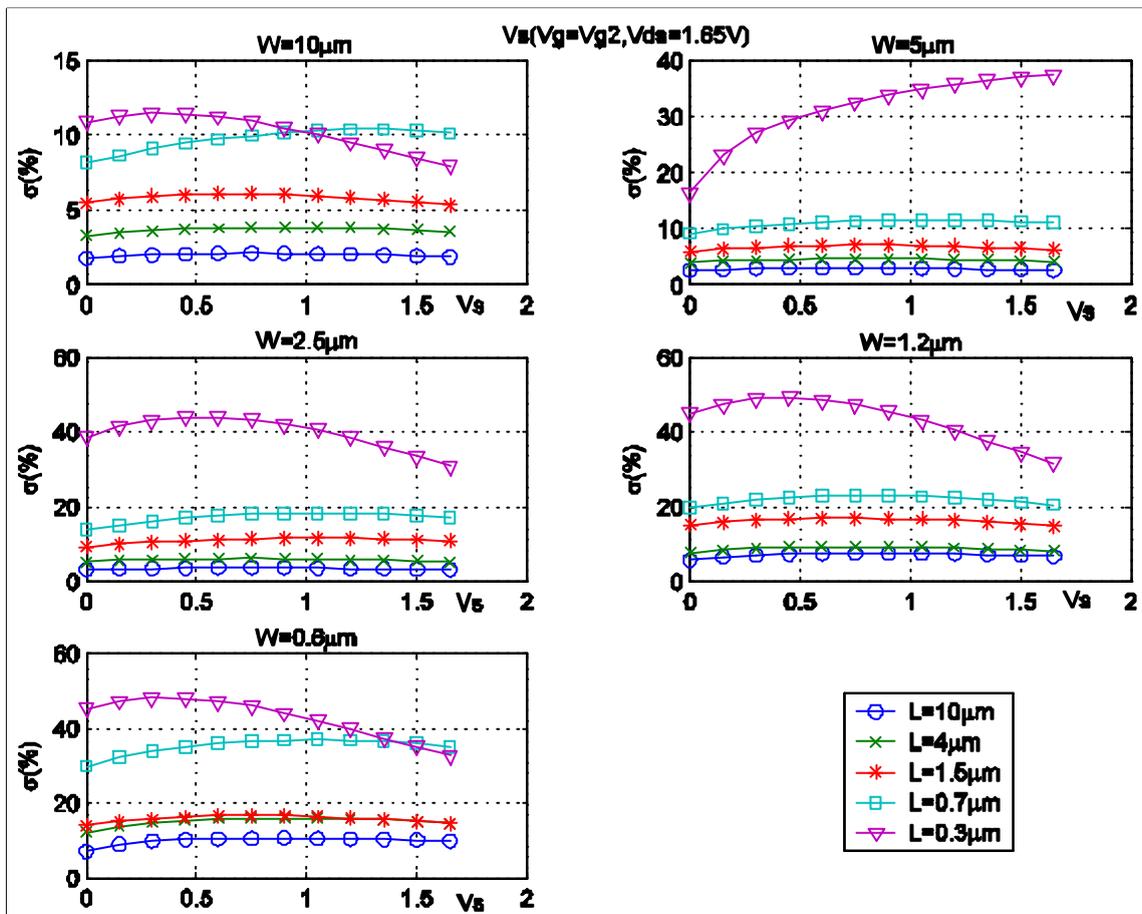


Figura 5.25. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 6. En el eje x se representa la tensión de barrido,  $V_s$ .

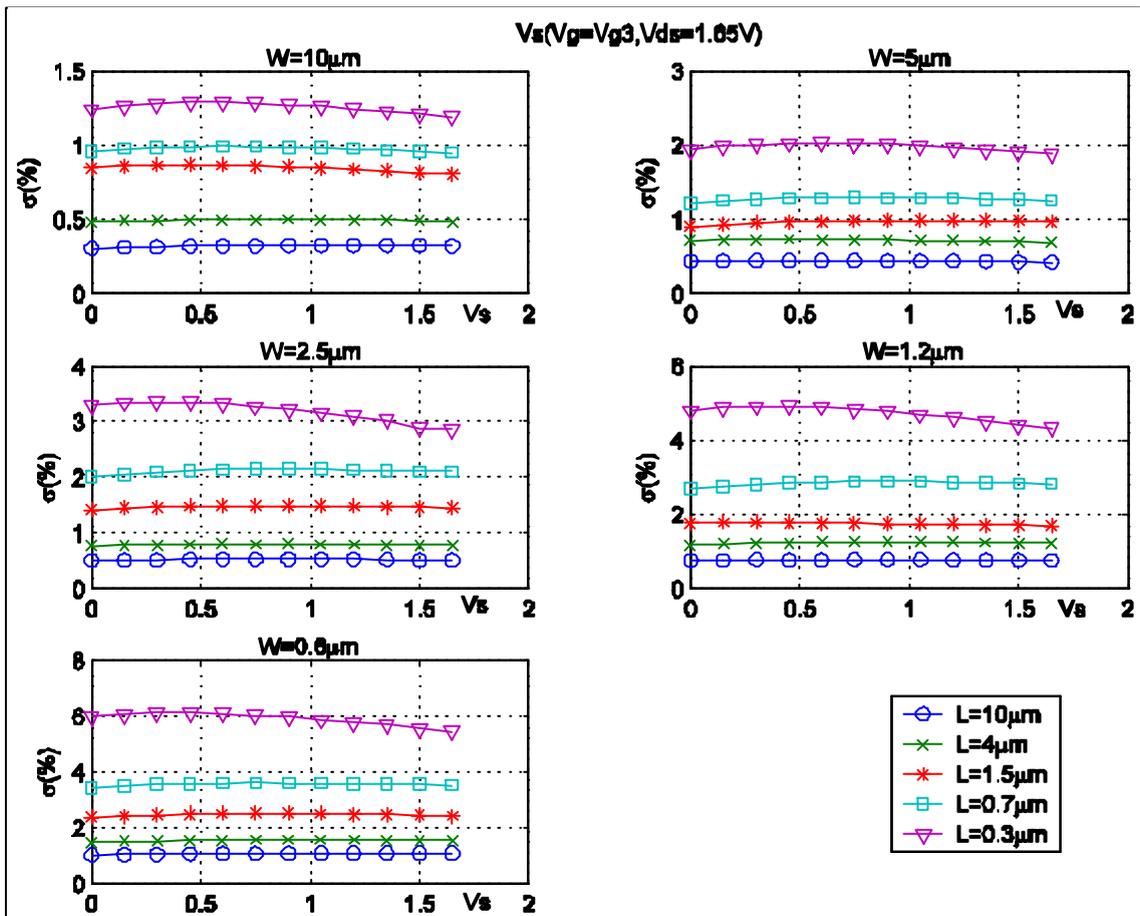


Figura 5.26. Desviación típica del incremento de la corriente que atraviesa los transistores para la curva 7. En el eje x se representa la tensión de barrido,  $V_s$ .

### 5.3.3. PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE GRAN SEÑAL.

Para realizar nuestro estudio partimos de la siguiente ecuación [10]:

$$I_{DS} = \frac{I_S (i_f - i_r)}{(1 + \mathbf{q}_o [V_P - V_S]^+) (1 + \mathbf{q}_e V_{DS\text{eff}})} (1 + \mathbf{I} (V_D - V_S)) \quad (5.1)$$

con

$$V_{DS\text{eff}} = [V_P - V_S]^+ - [V_P - V_D]^+ \quad (5.2)$$

El modelo que se presenta expresa el mismatch en la corriente,  $\Delta I_{DS}/I_{DS}$ , como el desarrollo en serie de Taylor de los parámetros de mismatch:  $\{\Delta I'_S/I'_S, \Delta \mathbf{g}, \Delta V_{TO}, \Delta \mathbf{q}_e, \Delta \mathbf{q}_o\}$  como sigue:

$$\frac{\Delta I_{DS}}{I_{DS}} = \frac{\Delta I'_S}{I'_S} + \frac{1}{I_{DS}} \frac{\partial I_{DS}}{\partial \mathbf{g}} \Delta \mathbf{g} + \frac{1}{I_{DS}} \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{TO}} \Delta V_{TO} - \frac{[V_P - V_S]^+}{1 + \mathbf{q}_o [V_P - V_S]^+} \Delta \mathbf{q}_o - \frac{V_{DS\text{eff}}}{1 + \mathbf{q}_e V_{DS\text{eff}}} \Delta \mathbf{q}_e \quad (5.3)$$

Para la caracterización del mismatch, lo primero que debemos obtener son los parámetros de gran señal  $\{I'_S, n, V_{TO}, \mathbf{q}_e, \mathbf{q}_o, \mathbf{I}\}$  para poder evaluar las derivadas parciales de la ecuación 5.3.

El punto de partida de esta parte del estudio es la extracción de dichos parámetros. Para ello se realiza una función de optimización a la que se le pasan todos los datos correspondientes a las curvas medidas experimentalmente (tanto los valores de tensión aplicados, como los valores de las corrientes en dichos puntos de tensión) y unos valores iniciales de los parámetros, de modo que el algoritmo converja con la mayor precisión posible. Con estos valores se implementa un algoritmo que trata de optimizar dichos parámetros para ajustar la curva caracterizada mediante las expresiones del modelo ACM con los valores experimentales.

Podemos ver, a modo de ejemplo, el resultado obtenido en el ajuste de las curvas para un transistor determinado, con tamaños  $W=0.6 \mu\text{m}$  y  $L=10 \mu\text{m}$ , en la figura 5.27.

Al final del programa se ha obtenido un conjunto único de parámetros para cada transistor del array. Dichos parámetros obtenidos son:  $\{I'_S, n, V_{TO}, \mathbf{q}_e, \mathbf{q}_o, \mathbf{I}\}$ .

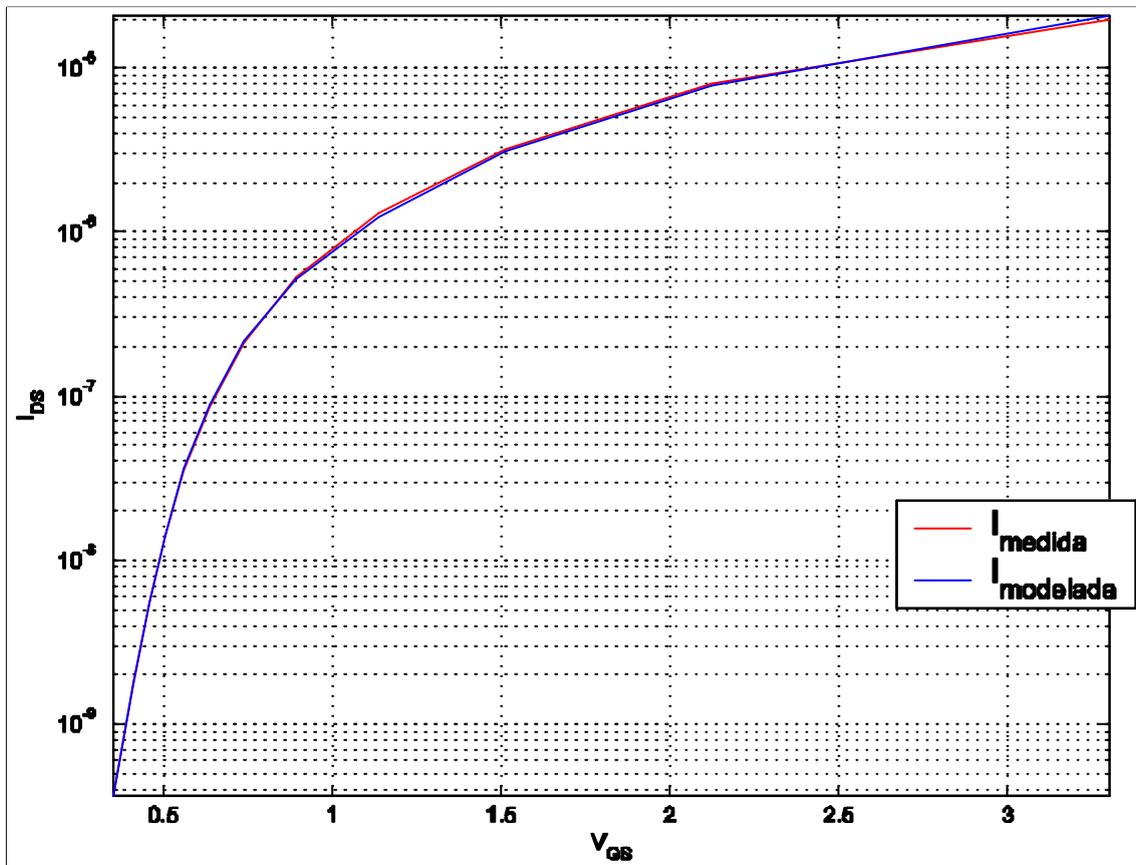


Figura 5.27. Corriente medida y corriente modelada para un transistor determinado.

### 5.3.4. CÁLCULO DE LAS DESVIACIONES ESTÁNDAR EN LAS CORRIENTES MODELADAS

Tras el estudio teórico de las curvas obtenidas con el trazador, nos disponemos a realizar el estudio de las curvas resultantes de aplicar nuestro modelo a las medidas experimentalmente. Llegados a este punto, hemos de resaltar que de las 7 curvas de las que disponíamos en el estudio, hemos entrado en profundidad en sólo 4 de ellas, puesto que de éstas hay algunos resultados previos, mientras que las otras 3 se piensa que pueden ser aptas para la caracterización de los parámetros que dependan del barrido de  $V_s$ , como puede ser el parámetro ?.

Se realizó un programa en Matlab que realizaba un ajuste no lineal entre la curva experimental que se pasaba como parámetro y el modelo creado para este proyecto. Dicha operación se realizaba para las 64 celdas de los 25 tamaños así como para cada una de las 4 curvas objeto de esta parte del estudio. La función devolvía tanto la intensidad modelada, como cada uno de los parámetros para cada celda y cada tamaño, y todo ello para las 4 curvas estudiadas.

Una vez obtenidos los parámetros en gran señal para cada transistor del array, podemos predecir el mismatching en las corrientes de los transistores. De la misma manera que en la sección anterior, agrupamos los transistores por pares, estando cada par compuesto por transistores del mismo tamaño situados en celdas consecutivas a lo largo de la misma columna.

Predecimos el mismatching en las corrientes  $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{mod}}$  para un par de transistores como:

$$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{mod}} = \left( \frac{I(I_{S_1}, \mathbf{I}_1, n_1, \mathbf{q}_{e_1}, \mathbf{q}_{o_1}, V_{t_{01}}) - I(I_{S_2}, \mathbf{I}_2, n_2, \mathbf{q}_{e_2}, \mathbf{q}_{o_2}, V_{t_{02}})}{I(I_{S_1}, \mathbf{I}_1, n_1, \mathbf{q}_{e_1}, \mathbf{q}_{o_1}, V_{t_{01}})} \right) \quad (5.4)$$

donde  $\{I_{S_1}, \mathbf{I}_1, n_1, \mathbf{q}_{e_1}, \mathbf{q}_{o_1}, V_{t_{01}}\}$  son los parámetros extraídos con nuestro modelo para el primer transistor del par y  $\{I_{S_2}, \mathbf{I}_2, n_2, \mathbf{q}_{e_2}, \mathbf{q}_{o_2}, V_{t_{02}}\}$  son los parámetros en gran señal extraídos con nuestro modelo para el segundo transistor del par.

A continuación, para todos los pares de transistores del mismo tamaño, calculamos la  $s\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{mod}}$ .

Podemos observar en las figuras 5.28 a 5.31 las desviaciones típicas de los incrementos de corriente para las 4 curvas modeladas. Se observan en dichas figuras la similitud con las desviaciones estándar de las corrientes medidas experimentalmente, (Figuras 5.20 a 5.23).

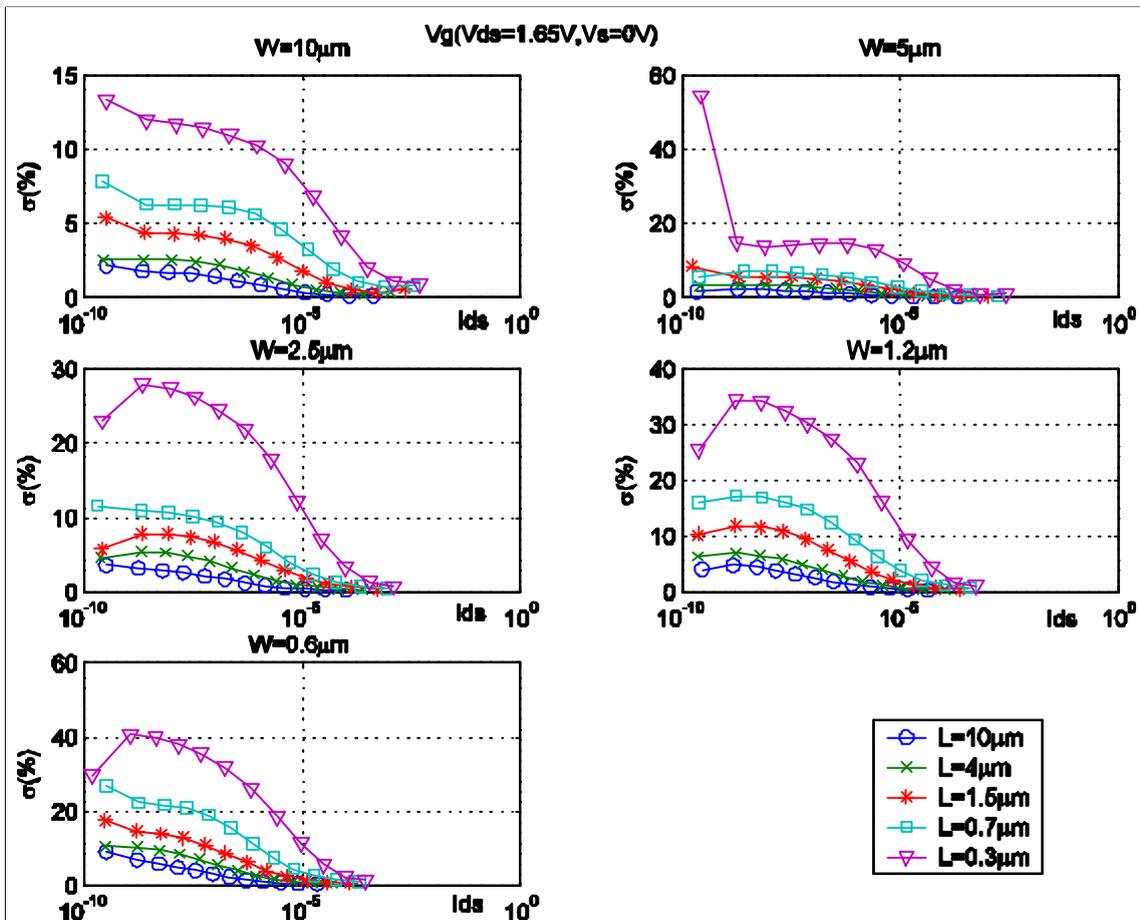


Figura 5.28. Desviación típica de la corriente modelada para la curva 1. En el eje “x” se representa la corriente media de cada tamaño, en escala logarítmica.

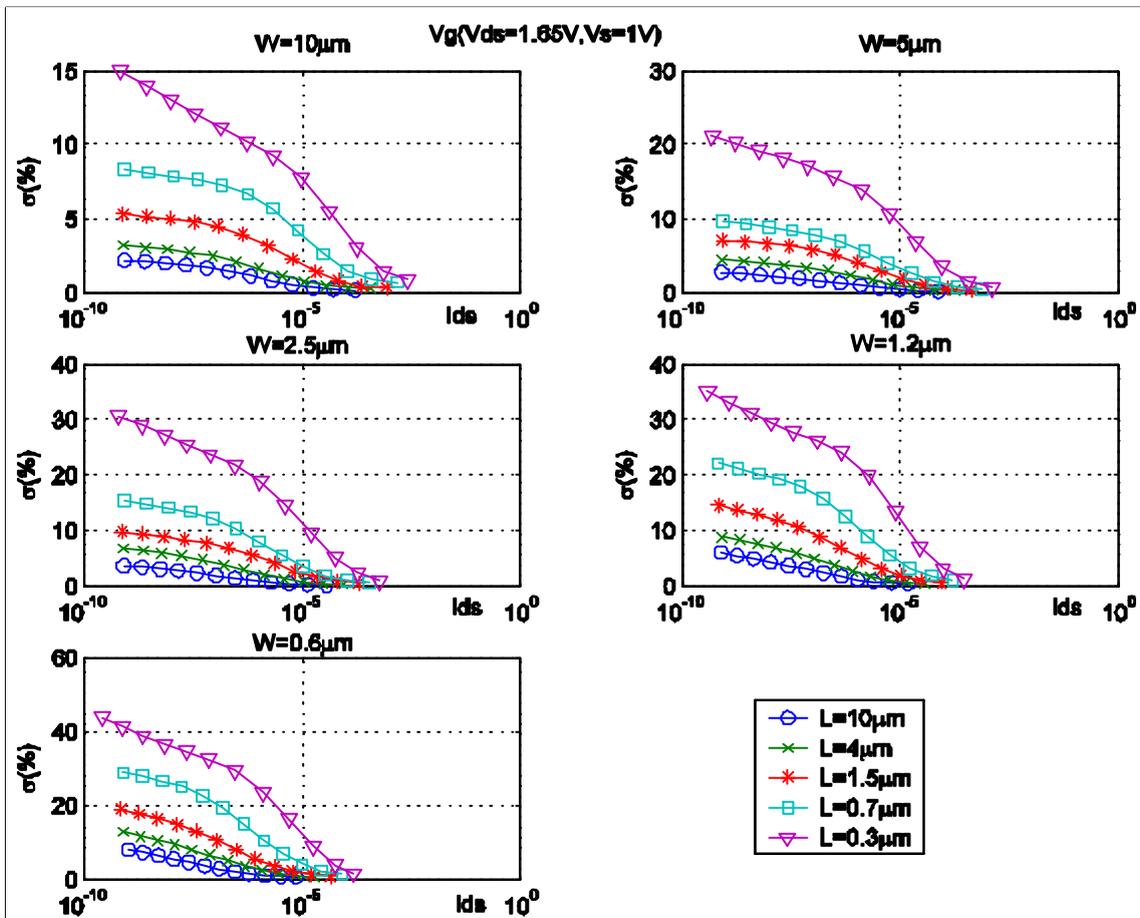


Figura 5.29. Desviación típica de la corriente modelada para la curva 2. En el eje “x” se representa la corriente media de cada tamaño, en escala logarítmica.

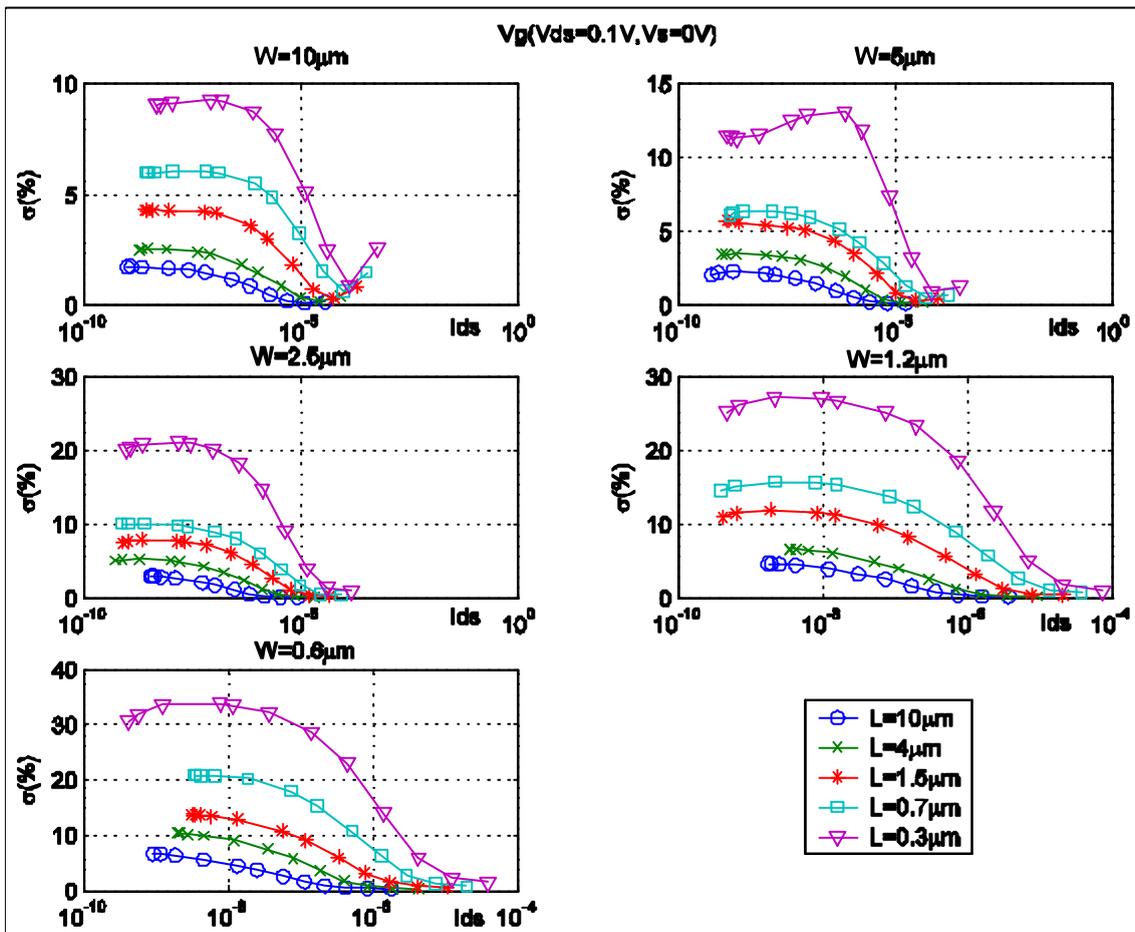


Figura 5.30. Desviación típica de la corriente modelada para la curva 3. En el eje “x” se representa la corriente media de cada tamaño, en escala logarítmica.

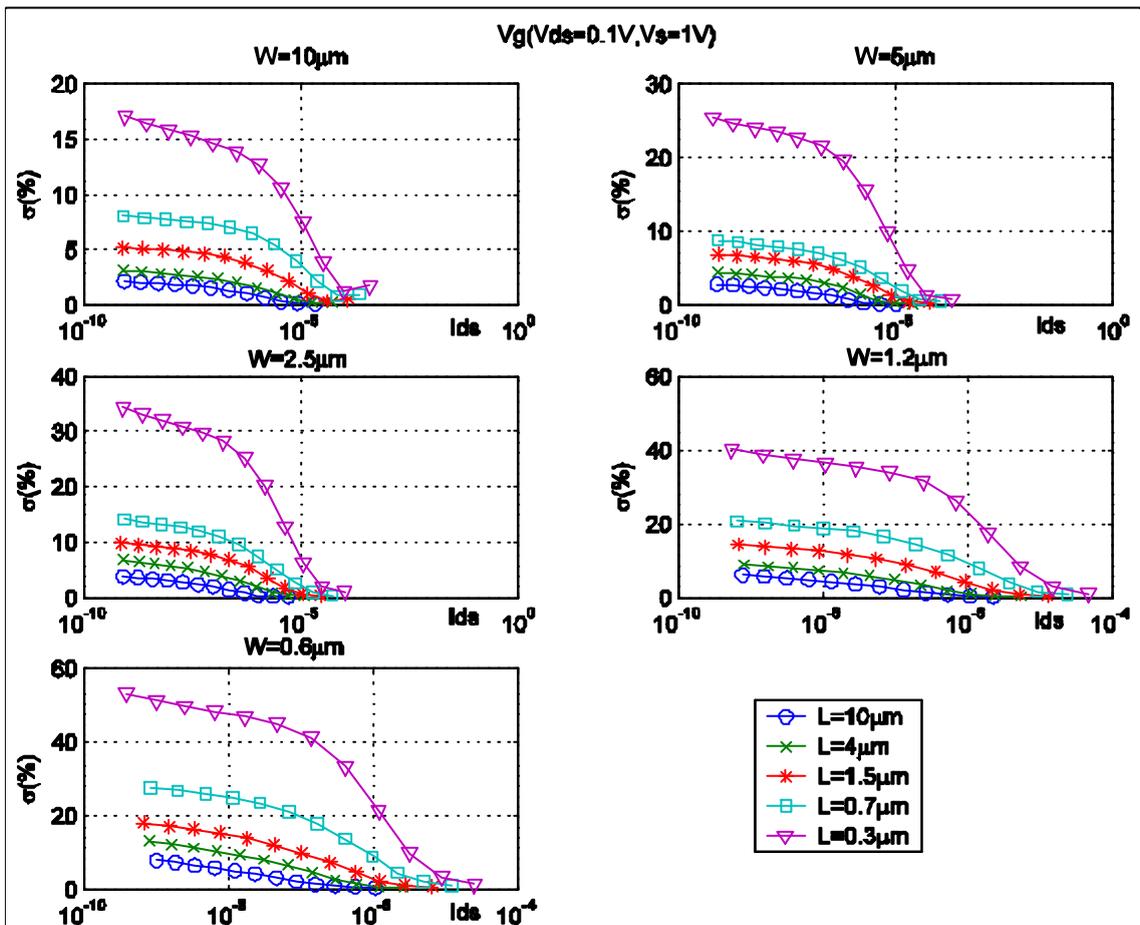


Figura 5.31. Desviación típica de la corriente modelada para la curva 4. En el eje “x” se representa la corriente media de cada tamaño, en escala logarítmica.

Se puede observar en las anteriores gráficas que cuanto menores son los tamaños de los transistores, mayor es la dispersión de la corriente en ellos. Esto es un resultado lógico puesto que cuanto menor es el tamaño de un transistor, menor es la corriente que lo atraviesa, por lo que la dispersión ante el error es mayor.

Para observar la bondad de nuestro modelo tenemos que ver cuáles son los errores relativos, entre las mediciones teóricas y las modeladas, para lo que vamos a evaluar, para cada curva, 
$$h = 100 * \text{abs} \left( 2 * \frac{S_{\text{mod}} - S_{\text{med}}}{S_{\text{mod}} + S_{\text{med}}} \right)$$
 para tener el error relativo en %. Podemos ver el resultado anterior en las figuras 5.32 a 5.35.

En las figuras se representa, en el eje X, el valor medio de la corriente para cada curva, y en el eje Y se representa el anterior valor del error relativo, expresado en %.

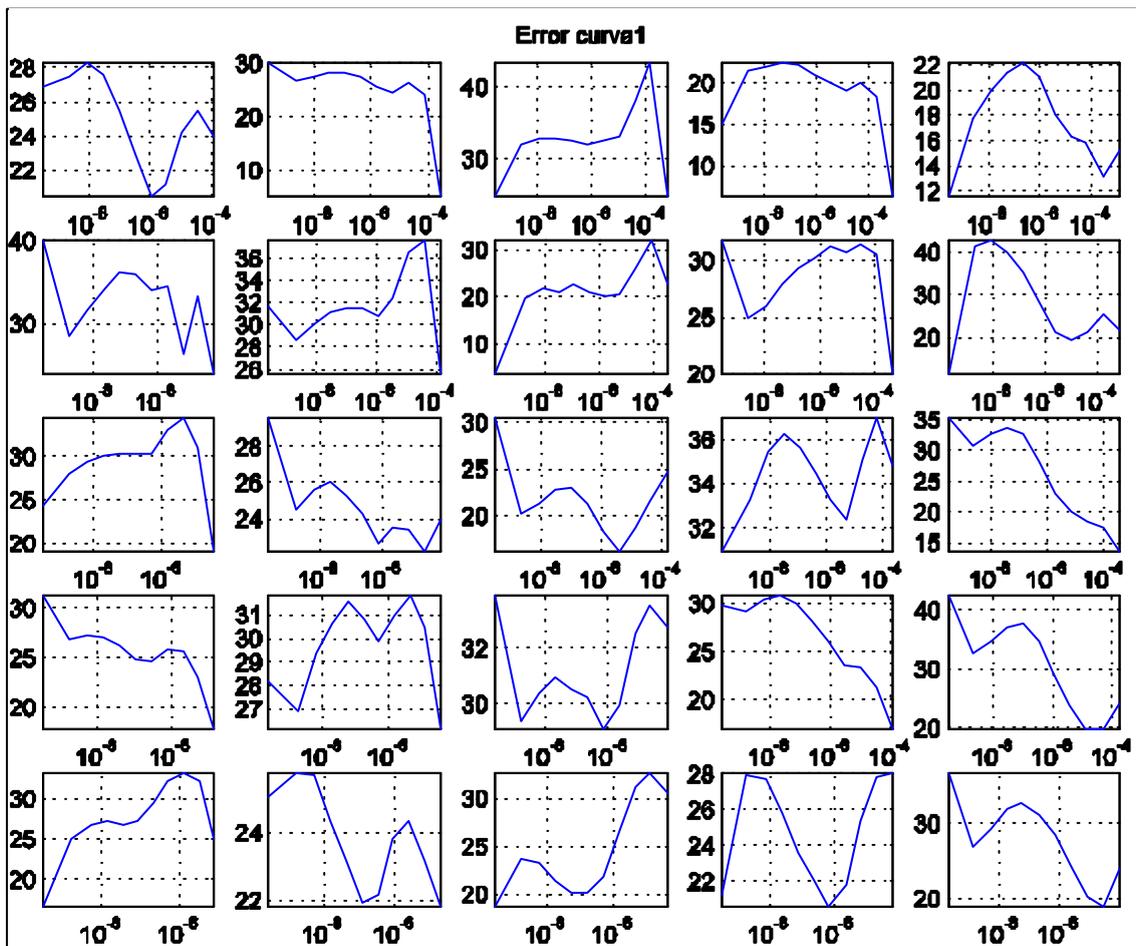


Figura 5.32. Error obtenido en la curva 1.

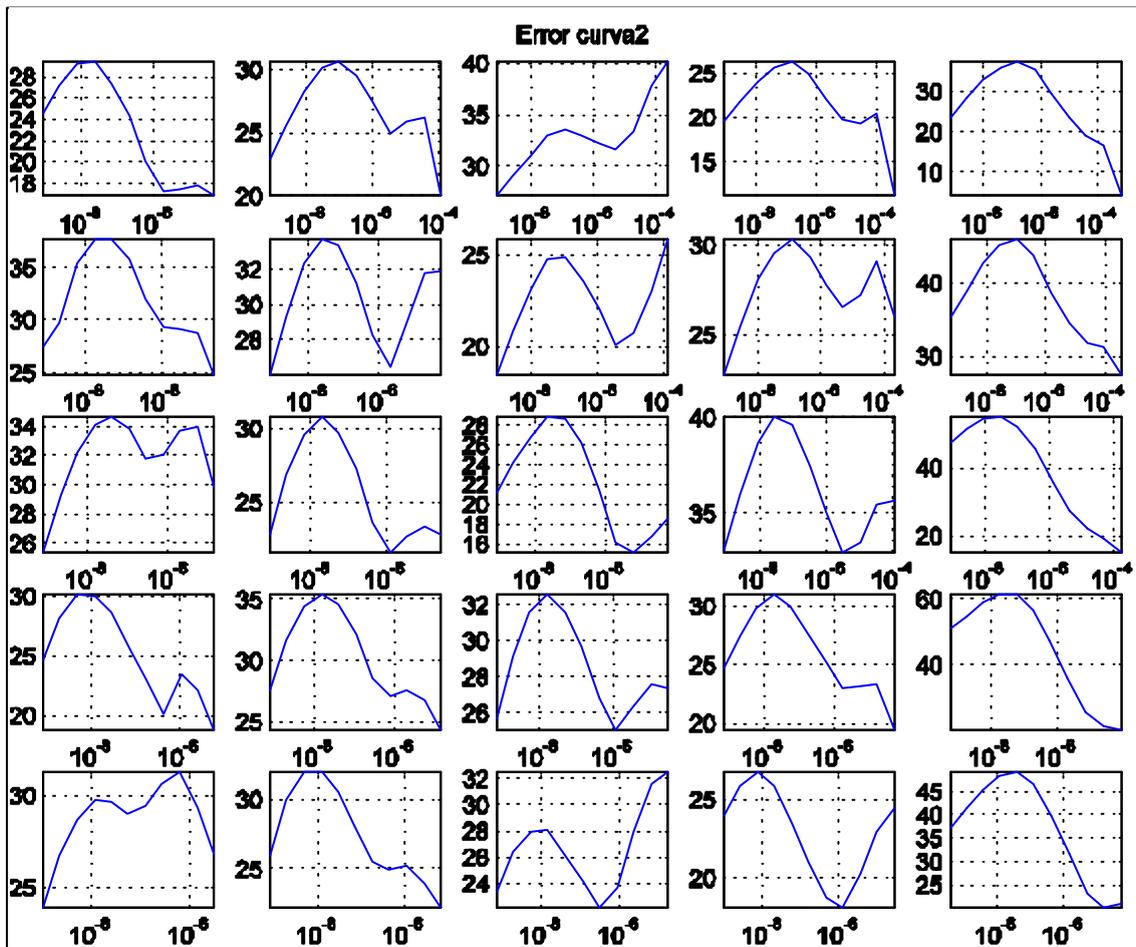


Figura 5.33. Error obtenido en la curva 2.

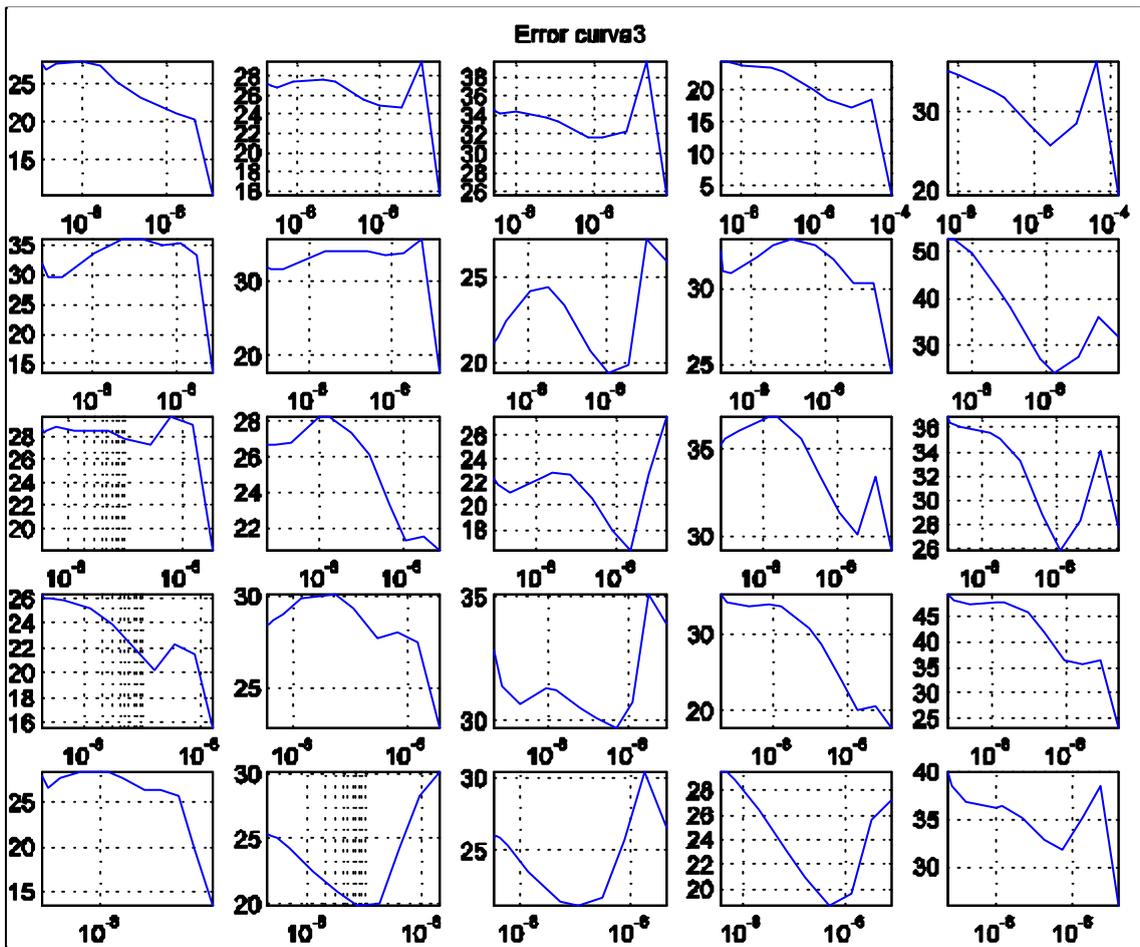


Figura 5.34. Error obtenido en la curva 3.

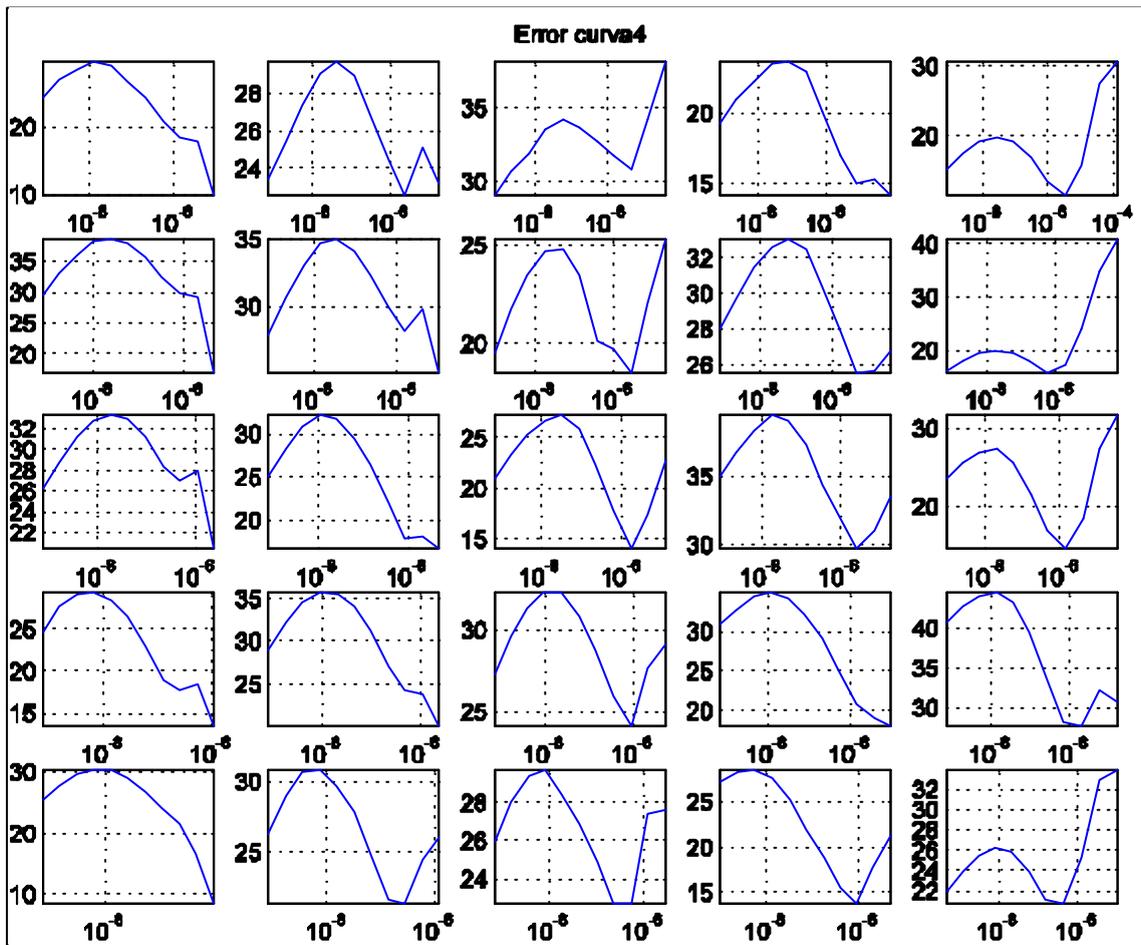


Figura 5.35. Error obtenido en la curva 4.

A la vista de las gráficas anteriores podemos comentar que, como era previsible, los mayores errores se dan para los transistores con longitudes mínimas (las dos últimas columnas de cada gráfica), siendo el mayor error observado uno cercano al 60% (concretamente para la curva 2 y para el transistor de  $W=1.2\mu\text{m}$  y  $L=0.3\mu\text{m}$ ). Además, podemos observar una cierta similitud entre los errores por longitudes de transistor.

Para completar el estudio lo que tenemos que calcular son las desviaciones estándar y las correlaciones cruzadas de los incrementos (?) de los parámetros extraídos del modelo. Dicho incremento se calcula como se ha comentado anteriormente: calculando la diferencia entre los parámetros en gran señal de pares de transistores consecutivos. Cada par está compuesto por los transistores del mismo tamaño situados en celdas consecutivas a lo largo de la misma columna.

A continuación, calculamos las desviaciones típicas de dichos incrementos,  $\{s(\Delta i_s'/i_s'), s(\Delta I), s(\Delta n), s(\Delta q_e), s(\Delta q_o), s(\Delta V_{T0})\}$  así como las correlaciones.

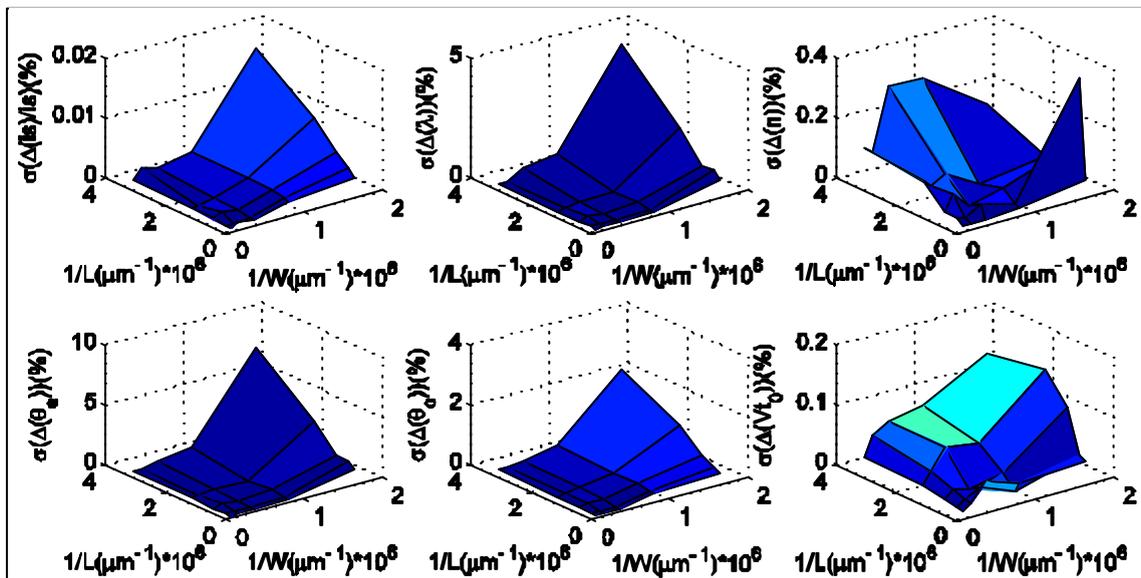


Figura 5.36. Representación de las dispersiones de los parámetros de gran señal extraídos del modelo

A continuación se representan las correlaciones [7] necesarias para completar el modelo.

$$\begin{aligned}
 & r_{(\Delta I_S/I_S, \Delta n)}, r_{(\Delta I_S/I_S, \Delta V_{TO})}, r_{(\Delta I_S/I_S, \Delta q_e)}, r_{(\Delta I_S/I_S, \Delta q_o)} \\
 & r_{(\Delta n, \Delta V_{TO})}, r_{(\Delta n, \Delta q_e)}, r_{(\Delta n, \Delta q_o)}, r_{(\Delta V_{TO}, \Delta q_e)}, r_{(\Delta V_{TO}, \Delta q_o)}, r_{(\Delta q_e, \Delta q_o)}
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

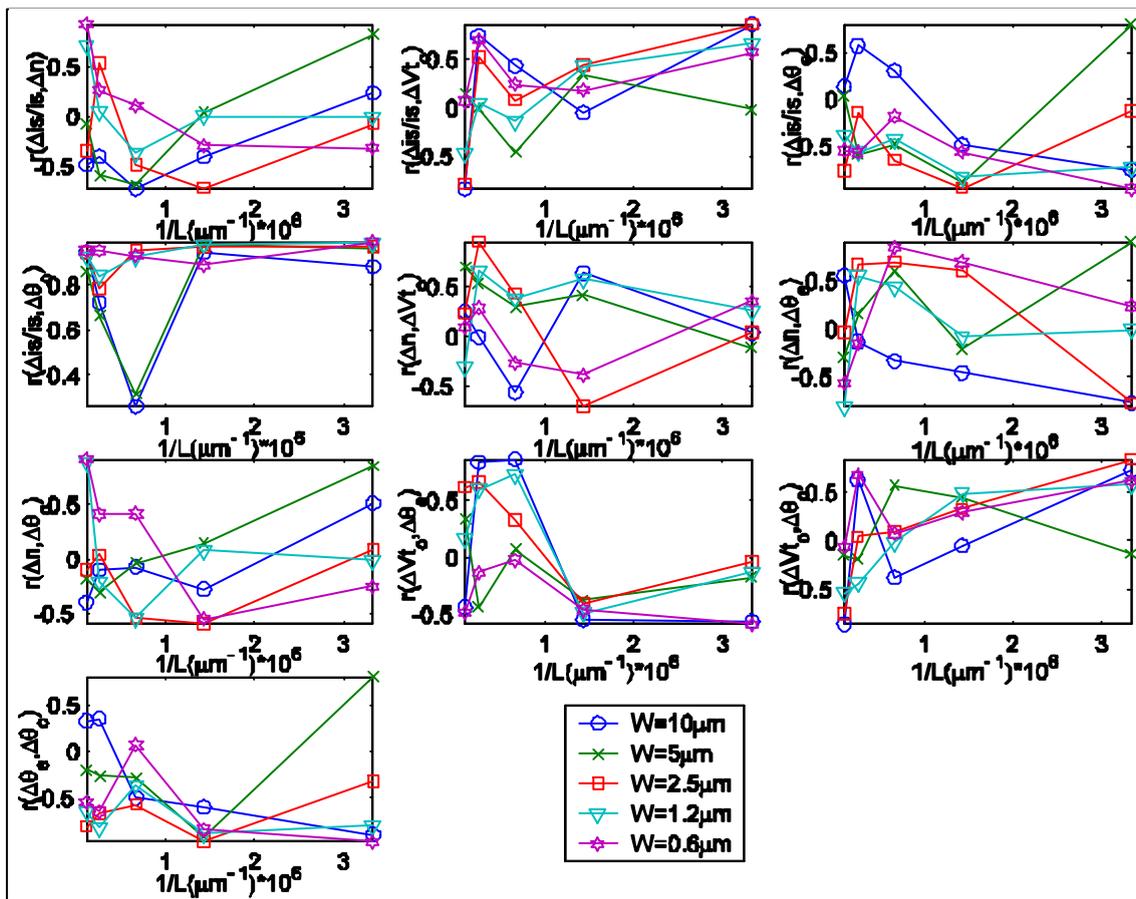


Figura 5.37. Representaciones de las correlaciones en función de los tamaños

### 5.3.5. RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE LOS PARÁMETROS

En esta sección se van a incluir los valores numéricos de los resultados representados en las figuras 5.36 y 5.37.

#### 5.3.5.1. VALORES MEDIOS DE LOS PARÁMETROS

Los valores medios de los parámetros de gran señal para cada tamaño son:

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.065143	0.16131	0.40871	0.86219	1.6887
5	0.032604	0.078816	0.19856	0.42792	0.76988
2.5	0.014921	0.037307	0.095795	0.19871	0.43283
1.2	0.0065977	0.016002	0.041518	0.088641	0.20046
0.6	0.0031071	0.0076328	0.01966	0.042565	0.10275

Tabla 5.1. Valores medios de  $i_s$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.020032	0.039658	0.068379	0.12098	0.8003
5	0.031174	0.043174	0.065702	0.13257	0.66835
2.5	0.017967	0.048251	0.081196	0.12507	0.76431
1.2	0.028151	0.038797	0.079152	0.12765	0.84455
0.6	0.01973	0.037677	0.069737	0.12291	0.88672

Tabla 5.2. Valores medios de  $I$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	1.3309	1.3538	1.3384	1.3486	1.3509
5	1.3824	1.3635	1.3359	1.3784	1.2632
2.5	1.3329	1.3725	1.378	1.3612	1.3773
1.2	1.3812	1.3593	1.3678	1.3685	1.3872
0.6	1.3301	1.3458	1.3182	1.3259	1.3899

Tabla 5.3. Valores medios de  $n$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.069644	-0.05865	-0.0092638	0.087991	1.0931
5	-0.073363	-0.055691	-0.007291	0.10181	0.95652
2.5	-0.070733	-0.053489	-0.00064355	0.10175	1.1756
1.2	-0.074626	-0.055206	0.0033364	0.10389	1.3653
0.6	-0.070373	-0.054225	0.0036412	0.10776	1.4384

Tabla 5.4. Valores medios de  $q_e$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.18011	0.22453	0.2898	0.45968	0.55438
5	0.21083	0.21991	0.26696	0.45486	0.39772
2.5	0.16759	0.2156	0.28074	0.40053	0.53754
1.2	0.17984	0.1813	0.24525	0.37524	0.49769
0.6	0.16312	0.17414	0.20331	0.316	0.46552

Tabla 5.5. Valores medios de  $q_o$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.50785	0.51997	0.5379	0.56436	0.57279
5	0.51167	0.52085	0.53774	0.56741	0.56654
2.5	0.50697	0.51923	0.5386	0.56364	0.58627
1.2	0.50785	0.51416	0.53158	0.56207	0.58822
0.6	0.50168	0.50595	0.51935	0.54772	0.57

Tabla 5.6. Valores medios de  $Vt_o$  para cada tamaño (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

### 5.3.5.2 DESVIACIONES TÍPICAS DE LOS PARÁMETROS

En las tablas 5.7 a 5.12 podemos ver los valores de las desviaciones típicas de los parámetros de gran señal de forma numérica.

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.00030445	0.00086308	0.00056476	0.0019594	0.0031518
5	0.00017602	0.00033357	0.00055041	0.002252	0.0044211
2.5	0.00049052	0.0013427	0.00097986	0.0028047	0.0061463
1.2	0.0005159	0.00067152	0.0013745	0.0029346	0.010167
0.6	0.00077863	0.0023475	0.0016206	0.0030037	0.017308

Tabla 5.7. Valores del parámetro  $S(\Delta i_s / i_s)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.023437	0.031878	0.074678	0.062157	0.72597
5	0.018896	0.031716	0.066166	0.060585	1.0222
2.5	0.022379	0.18715	0.06433	0.20796	0.9444
1.2	0.018573	0.077865	0.14537	0.13396	2.0895
0.6	0.039456	0.083944	0.43564	0.64618	4.5198

Tabla 5.8. Valores del parámetro  $S(\Delta I)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.01292	0.010238	0.011329	0.01983	0.052823
5	0.031907	0.023774	0.054793	0.024828	0.38688
2.5	0.036026	0.086227	0.029826	0.059688	0.13411
1.2	0.10403	0.076965	0.10137	0.038365	0.073691
0.6	0.12079	0.10502	0.31185	0.30192	0.1564

Tabla 5.9. Valores del parámetro  $S(\Delta n)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.022253	0.041485	0.085887	0.098436	1.1832
5	0.025282	0.037046	0.065564	0.092198	1.6104
2.5	0.025063	0.20054	0.076433	0.31318	1.7723
1.2	0.040395	0.091803	0.15167	0.20442	3.61
0.6	0.054219	0.099838	0.42368	0.83117	7.5803

Tabla 5.10. Valores del parámetro  $S(\Delta q_e)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.034761	0.031363	0.062496	0.25451	0.35807
5	0.014728	0.040951	0.04306	0.24309	0.43867
2.5	0.025527	0.092993	0.0911	0.31409	0.7053
1.2	0.052066	0.082881	0.15556	0.33992	1.3128
0.6	0.091611	0.11042	0.14982	0.36507	2.2831

Tabla 5.11. Valores del parámetro  $S(\Delta q_o)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.0089093	0.017342	0.04953	0.028913	0.035477
5	0.01179	0.020365	0.032604	0.014183	0.043879
2.5	0.016384	0.028771	0.021705	0.031344	0.11294
1.2	0.022732	0.040447	0.073483	0.064687	0.15966
0.6	0.02441	0.056325	0.073467	0.086963	0.14243

Tabla 5.12. Valores del parámetro  $S(\Delta Vt_o)$  en %. W y L en  $\mu\text{m}$ .

### 5.3.5.3 CORRELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS

Para finalizar, mostramos los valores de las correlaciones entre parámetros.

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.48305	-0.40224	-0.72233	-0.40212	0.23926
5	-0.071567	-0.58541	-0.67843	0.043437	0.8231
2.5	-0.33583	0.53194	-0.48593	-0.71435	-0.07426
1.2	0.71548	0.04558	-0.36831	0.003299	-0.0031518
0.6	0.92902	0.26194	0.113	-0.28938	-0.31524

Tabla 5.13. Correlación  $r(\Delta i_s / i_s, \Delta n)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.83689	0.74245	0.43204	-0.047769	0.86682
5	0.14079	-0.0057094	-0.45726	0.3461	-0.017328
2.5	-0.78236	0.52323	0.079057	0.44409	0.85899
1.2	-0.47039	0.050051	-0.13821	0.42763	0.66901
0.6	0.063068	0.70334	0.24866	0.18189	0.57341

Tabla 5.14. Correlación  $r(\Delta i_s / i_s, \Delta V_{t_0})$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.1415	0.57572	0.30632	-0.48184	-0.75723
5	0.030703	-0.59252	-0.48552	-0.88672	0.80664
2.5	-0.76007	-0.13847	-0.646	-0.94938	-0.12631
1.2	-0.37861	-0.56453	-0.43124	-0.83185	-0.72921
0.6	-0.54652	-0.56849	-0.18304	-0.56073	-0.95549

Tabla 5.15. Correlación  $r(\Delta i_s / i_s, \Delta q_e)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.94725	0.72146	0.25983	0.9474	0.88301
5	0.86324	0.66608	0.31349	0.97977	0.96394
2.5	0.944	0.78857	0.95193	0.97554	0.97357
1.2	0.92293	0.84426	0.92656	0.98137	0.99046
0.6	0.95472	0.95599	0.93131	0.88946	0.99485

Tabla 5.16. Correlación  $r(\Delta i_s / i_s, \Delta q_o)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.25028	-0.0065183	-0.56491	0.63836	0.035694
5	0.70803	0.54051	0.30198	0.42132	-0.10822
2.5	0.23732	0.95662	0.42948	-0.70127	0.045258
1.2	-0.30385	0.66804	0.38928	0.58187	0.26308
0.6	0.093318	0.28696	-0.26643	-0.38396	0.35602

Tabla 5.17. Correlación  $r(\Delta n, \Delta V_{t_0})$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.5558	-0.13278	-0.33279	-0.4522	-0.76701
5	-0.28744	0.15307	0.60095	-0.21036	0.90864
2.5	-0.035793	0.67658	0.69718	0.59516	-0.7664
1.2	-0.80394	0.54934	0.43288	-0.080502	-0.0021239
0.6	-0.56318	-0.15084	0.85118	0.69432	0.23415

Tabla 5.18. Correlación  $r(\Delta n, \Delta q_e)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.39636	-0.094225	-0.068042	-0.27276	0.51696
5	-0.18117	-0.30227	-0.039315	0.14863	0.85853
2.5	-0.099792	0.043852	-0.54282	-0.59443	0.083599
1.2	0.88679	-0.20682	-0.5399	0.082246	-0.007038
0.6	0.91894	0.41784	0.42034	-0.54838	-0.25077

Tabla 5.19. Correlación  $r(\Delta n, \Delta q_o)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.43576	0.83737	0.86577	-0.54402	-0.56034
5	0.34319	-0.43445	0.07316	-0.36838	-0.17369
2.5	0.61912	0.66878	0.32905	-0.40167	-0.038877
1.2	0.16609	0.60253	0.73562	-0.48502	-0.12567
0.6	-0.48643	-0.13318	-0.017907	-0.46052	-0.58415

Tabla 5.20. Correlación  $r(\Delta V_{t_0}, \Delta q_e)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	-0.85801	0.63385	-0.37825	-0.048374	0.72875
5	-0.14657	-0.19479	0.57083	0.44659	-0.1306
2.5	-0.75558	0.047663	0.08448	0.32786	0.84253
1.2	-0.53492	-0.43309	-0.011767	0.49316	0.58127
0.6	-0.067364	0.68335	0.074948	0.29347	0.61646

Tabla 5.21. Correlación  $r(\Delta V_{t_0}, \Delta q_o)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

W-L	10	4	1.5	0.7	0.3
10	0.32792	0.35257	-0.49729	-0.60001	-0.8925
5	-0.19401	-0.26198	-0.2846	-0.92122	0.80329
2.5	-0.80645	-0.6588	-0.5702	-0.96428	-0.3235
1.2	-0.65158	-0.81071	-0.35843	-0.88328	-0.8007
0.6	-0.55014	-0.64193	0.069072	-0.83237	-0.96964

Tabla 5.22. Correlación  $r(\Delta q_e, \Delta q_o)$  para todos los tamaños (W y L en  $\mu\text{m}$ ).

