

Laboratorio de Diseño Microelectrónico

# Caracterización Avanzada de Circuitos con *Cadence*

Pablo Ituero



*Departamento de Ingeniería Electrónica*

Febrero 2013

Laboratorio de Diseño Microelectrónico 2013  
*Caracterización Avanzada de Circuitos con Cadence*

Cadence es una marca registrada de Cadence Corporation.

Copyright ©2010–2013, Pablo Ituero.

*Departamento de Ingeniería Electrónica*  
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
España  
Teléfono: +34915495700 ext. 4207  
E-mail: [pituerto@die.upm.es](mailto:pituerto@die.upm.es)

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Empleo de parámetros</b>	<b>2</b>
2.1. Ejercicios . . . . .	3
<b>3. Calculadora y expresiones</b>	<b>4</b>
3.1. Ejercicios . . . . .	6
<b>4. Análisis paramétrico</b>	<b>7</b>
4.1. Ejercicios . . . . .	8
<b>5. Análisis de corners</b>	<b>9</b>
5.1. Ejercicios . . . . .	10
<b>6. Análisis estadístico</b>	<b>11</b>
6.1. Ejercicios . . . . .	13
<b>7. Ejercicios Adicionales</b>	<b>13</b>

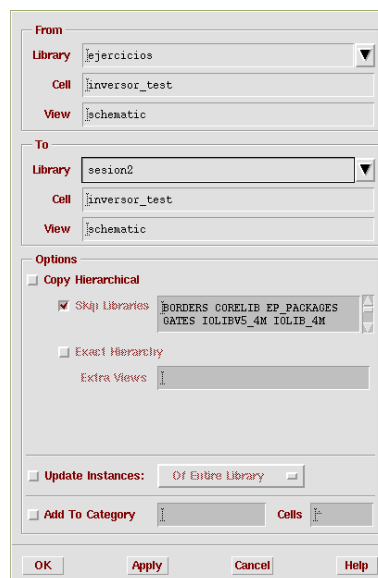
## 1. Introducción

Este tutorial se ha desarrollado para la segunda sesión del Laboratorio de Diseño Micro-electrónico (LDIM) y cubre los siguientes temas sobre caracterización avanzada de circuitos en el entorno de trabajo de Cadence:

- Empleo de parámetros
- Calculadora y expresiones
- Análisis paramétrico
- Análisis de *corners*
- Análisis estadístico

Antes de comenzar con este tutorial, es imprescindible que haya terminado con las tareas previstas para la primera sesión del LDIM, ya que se emplearán algunos de los ficheros generados en ellas.

Para empezar a trabajar, inicie la herramienta en el directorio `/Labs` y cree una nueva biblioteca para esta sesión. Ahora copie las células correspondientes al inversor y la puerta NAND que realizó en la primera sesión a la biblioteca que acaba de crear. Para ello seleccione la célula en el Library Manager y haga `Edit ->Copy`, le aparecerá la pantalla de la figura 1, que deberá rellenar con los datos adecuados acerca de las bibliotecas de origen y destino de la célula.



**Figura 1:** Copia de una célula de una biblioteca a otra.

## 2. Empleo de parámetros

En esta sección se explica cómo parametrizar determinados valores numéricos del circuito de tal manera que puedan ser modificados fácilmente por el simulador. Como ejemplo se va a detallar paso a paso cómo parametrizar el valor de la tensión de alimentación del circuito de pruebas, el inversor.

1. Abra el fichero correspondiente al circuito de pruebas del inversor.
2. Seleccione la fuente de alimentación y abra sus propiedades. Para ello puede presionar la tecla “q” una vez seleccionada la fuente.
3. Ahora, en la casilla correspondiente a DC Voltage, cambie el valor numérico a  $V_{supply}$  tal y como se muestra en la figura 2 y presione OK. Con esta acción habrá convertido en el parámetro  $V_{supply}$  el valor  $V_{supply}$  de su fuente de alimentación.

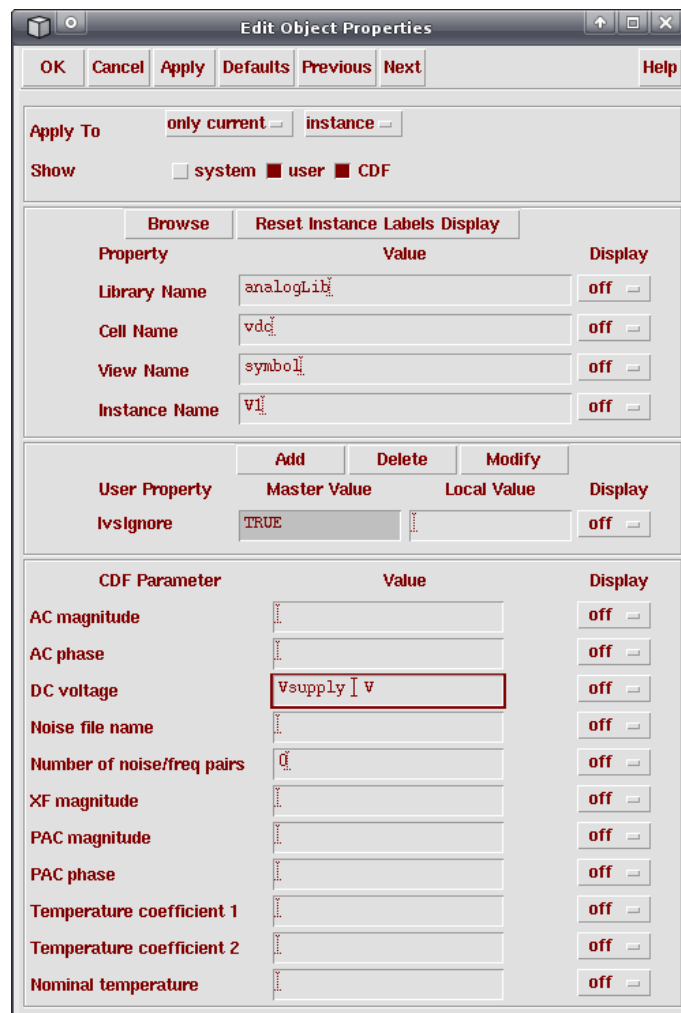
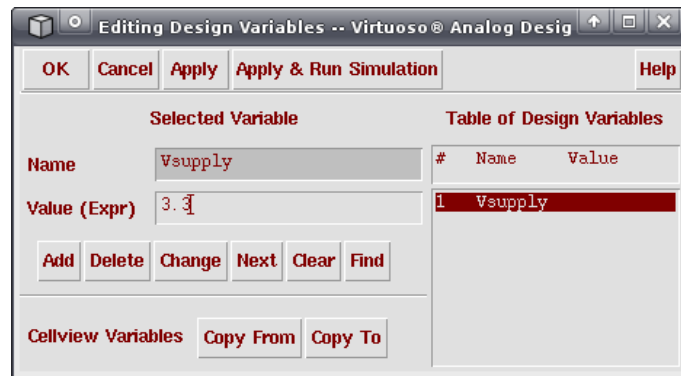


Figura 2: Parametrización del valor DC Voltage de la célula vdc.

4. Guarde los cambios y abra el Analog Design Environment haciendo Tools ->Analog Environment.
5. En la nueva pantalla, extraiga los parámetros del circuito haciendo Variables ->Copy from Cellview. En la parte inferior izquierda, en el recuadro Design Variables le aparecerá su parámetro Vsupply.
6. Proporcione un valor de simulación a su parámetro Vsupply. Para ello, haga doble click sobre su nombre y aparecerá una ventana nueva, como se indica en la figura 3. En la casilla Value (Expr) introduzca el valor 3.3 y presione Change. Finalmente presione OK. Ahora el simulador asignará el valor 3.3 al parámetro Vsupply.



**Figura 3:** Asignación de un valor al parámetro Vsupply.

## 2.1. Ejercicios

- Simule su inversor dando distintos valores al parámetro Vsupply.
- (\*) Genere un nuevo parámetro que se corresponda con la anchura de la puerta del transistor P de su inversor. Para ello tendrá que asignar un parámetro en las variables `width` y `width stripe` del transistor P (el mismo a las dos). Simule su inversor dando distintos valores al nuevo parámetro hasta obtener un inversor equilibrado.

### 3. Calculadora y expresiones

En esta sección se muestra el uso de la calculadora del Analog Design Environment para generar expresiones complejas que sirvan en la caracterización del circuito. En concreto, se detallarán los pasos que debe seguir para obtener una expresión del retardo de una transición de bajada hasta una transición de subida en un inversor.

1. Continuando con el ejemplo anterior, en la ventana del Analog Design Environment haga Outputs ->Setup .... Le aparecerá la ventana Setting Outputs.
2. En la ventana Setting Outputs, rellene el campo Name (Opt) de una nueva expresión llamada t\_subida tal y como se muestra en la figura 4.

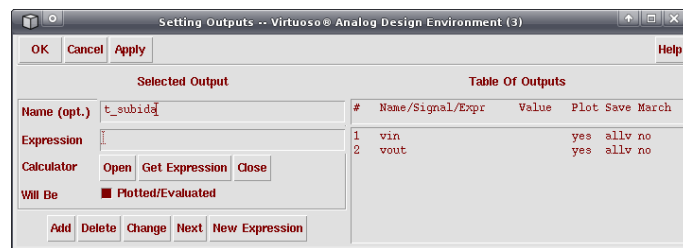


Figura 4: Creación de la expresión t\_subida.

3. Seguidamente abra la calculadora haciendo click en Open. Le aparecerá la pantalla de la figura 5 donde se puede distinguir el teclado de una calculadora tradicional al lado de una lista de funciones más complejas, especialmente útiles para el tratamiento de las señales circuitales.

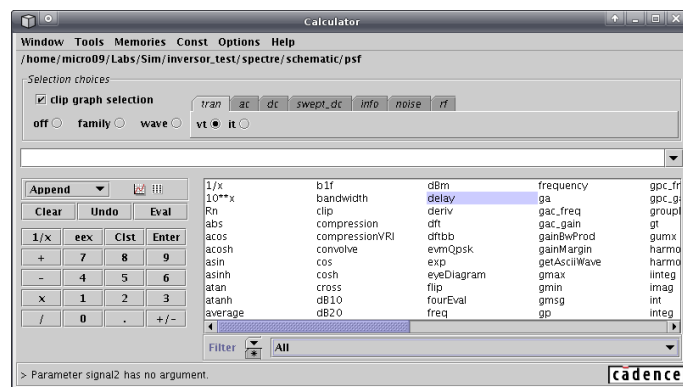


Figura 5: Calculadora del Analog Design Environment.

4. Para este ejemplo va a ser interesante la función delay. Haga click en esta función y expanda la ventana hacia abajo para hacer visibles las opciones ocultas. Debería obtener una ventana como la que se muestra en la figura 6.

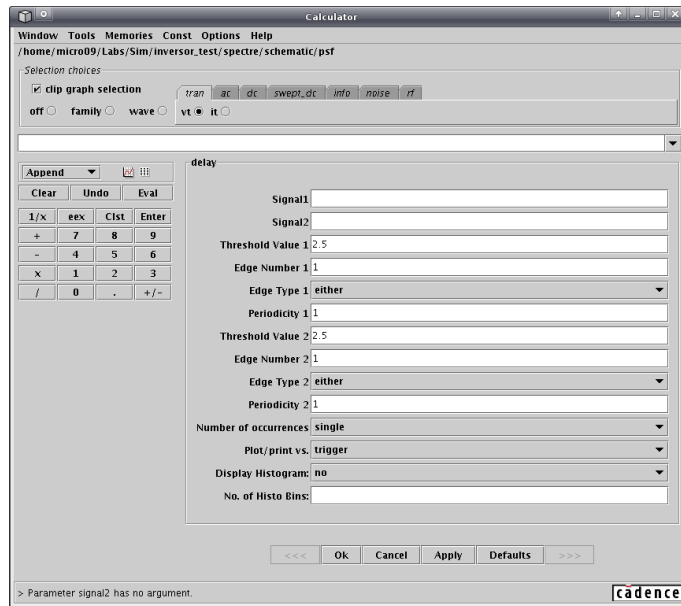


Figura 6: Calculadora empleando la función delay una vez alargada la ventana.

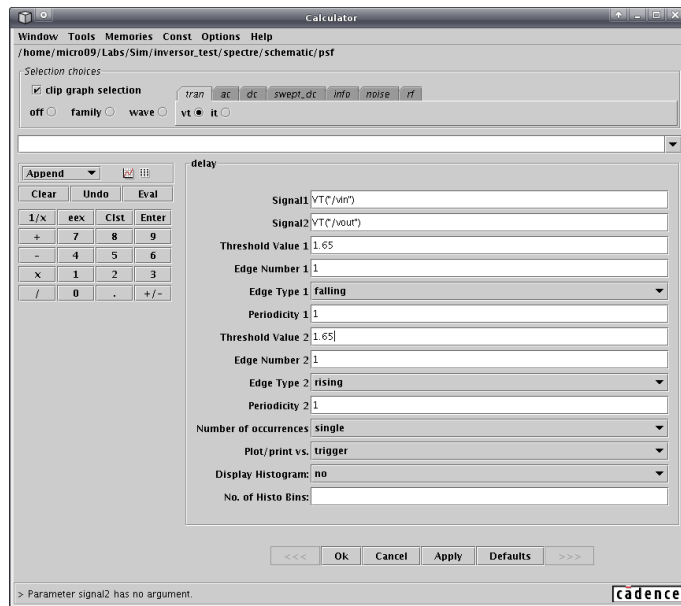


Figura 7: Empleo de la función delay para el cálculo del tiempo de subida.

5. La función `delay` va a medir el retardo entre dos señales (pueden ser la misma) muestreadas en la tensión `Threshold Value` en la transición `Edge Number` que puede ser positiva o negativa según indique `Edge Type`. Para medir el tiempo de subida del inversor queremos medir el retardo entre transición de bajada —de 1 a 0— en la entrada que produce una transición de subida —de 0 a 1— en la salida. Por lo tanto las casillas de la función `delay`



se deben rellenar como se muestra en la figura 7. Note que para seleccionar las señales, haremos click en `vt` y en el esquemático seleccionaremos la señal que nos interese.

6. Una vez rellenados los campos, presione `OK` y la calculadora generará la expresión correspondiente.
7. Vuelva a la ventana `Setting Outputs` y haga click en `Get Expression`. El programa recogerá la expresión de la calculadora y la pegará en la casilla `Expression`. Haga click en `Add` para que se guarde la expresión, haga click en `OK` y cierre la ventana.
8. Ejecute la simulación de su circuito y compruebe que el tiempo de subida se calcula correctamente. Al terminar la simulación, el valor calculado de la expresión `t_subida` aparecerá a su lado en la ventana principal del `Analog Design Environment`.

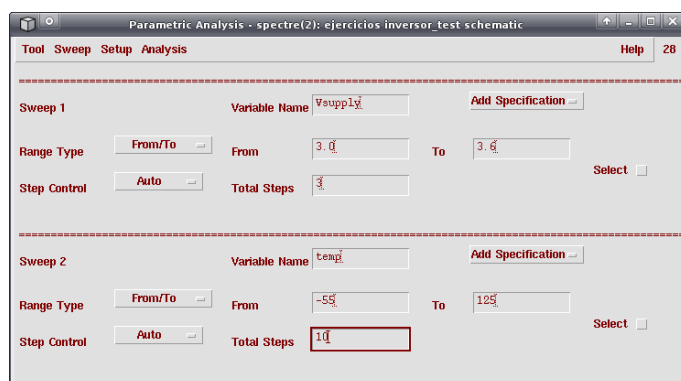
### 3.1. Ejercicios

- Repita los pasos anteriores para crear una expresión del retardo en la transición de bajada del inversor.
- Repita los pasos anteriores para crear una expresión del retardo del inversor. Para calcular la expresión del retardo, calcule el máximo de los valores obtenidos anteriormente, con la función `max` de la calculadora. Observe la sintaxis de esta función: `max(5 9) = 9`

## 4. Análisis paramétrico

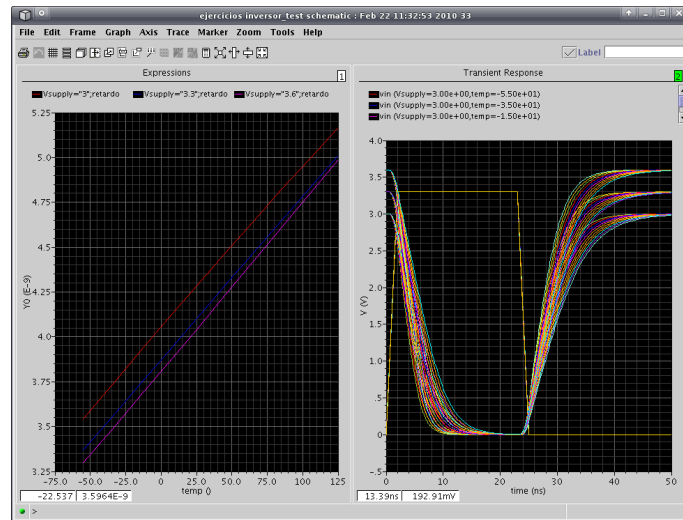
Esta sección explica cómo realizar análisis paramétricos, es decir, un conjunto de simulaciones que se diferencian entre sí por la variación de uno o varios parámetros que hayamos definido previamente. Concretamente se proporciona un ejemplo detallado de análisis paramétrico conjunto de la tensión de alimentación y la temperatura de un inversor.

1. Parta del ejemplo anterior, en el que tenemos un parámetro llamado `Vsupply` que se corresponde con la tensión de alimentación y una expresión que calcula el retardo del inversor. Desactive las expresiones correspondientes al tiempo de subida y bajada. Para ello, haga doble click en ellas en la ventana principal del **Analog Design Environment**, con lo que aparecerá la ventana **Setting Outputs**, desactive el cuadro **Plotted/Evaluated** y haga click en **Change**. Sólo debe quedar activa la expresión del retardo.
2. En la ventana principal del **Analog Design Environment** haga **Tools ->Parametric Analysis...**
3. Le aparecerá la pantalla de la herramienta **Parametric Analysis** donde concretar el número de análisis que vamos a hacer y para cada análisis, al menos deberemos especificar a qué parámetro corresponde (**Variable Name**), qué rango va a tener este parámetro (**From ... To**), y el número de muestras (**Total Steps**).
4. El primer parámetro que va a analizar es `Vsupply`. Consideraremos que la alimentación tiene una variabilidad máxima de un 10%, por lo tanto tomaremos tres muestras desde 3.0V hasta 3.6V.
5. Posteriormente añadiremos un nuevo análisis, esta vez sobre el parámetro `temp`, que se corresponde con la temperatura del circuito. Para añadir el análisis haga **Setup ->Add New Variable To Bottom**. Esta vez analizaremos temperaturas (parámetro `temp`) de  $-55$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , tomando 10 muestras. La figura 8 muestra cuál tiene que ser el estado de la ventana **Parametric Analysis** llegados a este punto.



**Figura 8:** Análisis paramétrico conjunto de la tensión de alimentación y de la temperatura.

6. Proceda a ejecutar el análisis paramétrico. Para ello, haga **Analysis ->Start**. Si ha realizado los pasos correctamente, le aparecerá una ventana que le irá informando de las simulaciones que se realizan y finalmente aparecerá la ventana de resultados como la mostrada en la figura 9.



**Figura 9:** Resultado del análisis paramétrico conjunto de la tensión de alimentación y de la temperatura de un inversor.

#### 4.1. Ejercicios

- Para el caso del inversor, identifique qué par de tensión de alimentación y temperatura producen el mejor y el peor retardo.
- (\*) Para el caso del inversor, averigüe qué anchura del transistor P, ecualiza los retardos de las transiciones de subida y de bajada, suponiendo que la anchura del transistor N es la mínima,  $0,40\mu m$ . Sugerencia: trate de minimizar la función  $(t_{subida} - t_{bajada})^2$ .

## 5. Análisis de *corners*

Esta sección expone cómo realizar un análisis de *corners*. Lo que sigue es una breve introducción al concepto de *corner* tecnológico.

Al ejecutar una simulación, **spectre** lee un fichero tecnológico donde están especificadas los valores numéricos de cada parámetro de los dispositivos involucrados en la simulación. En el caso de los transistores, estas listas se componen de decenas de parámetros, tales como la anchura del óxido o la movilidad de los portadores. Estos parámetros son confidenciales y distintos para cada tecnología, y para obtenerlos, el fabricante realiza numerosos test a sus dispositivos una vez fabricados. Por ejemplo, la tecnología que se emplea en el laboratorio, la C35B4 de AMS, define en `/usr/local/ams/ams_v3.80/spectre/c35/soac/cmos53.scs` los parámetros de los dispositivos CMOS. Este fichero se va a leer en cada simulación mediante una sentencia **include**.

Hasta ahora las simulaciones que se han ejecutado han cogido los parámetros del caso típico, proporcionando el resultado más probable. Sin embargo, los fabricantes tecnológicos proporcionan más casos o *corners*, aparte del típico, con el fin de realizar una caracterización más exhaustiva de los circuitos antes de fabricarlos. Los *corners* adicionales se van a corresponder con configuraciones extremas de los parámetros que proporcionan “peores casos” de algún tipo. El fabricante garantiza prácticamente todos los circuitos fabricados (los que caigan dentro de la  $3\sigma$  o el 99,73%) tendrán mejores características que estos casos extremos. En el caso de la tecnología del laboratorio, tenemos los siguientes *corners* para los dispositivos CMOS:

- Typical Mean Condition (el que se ha usado hasta ahora)
- Worst Case Speed Condition
- Worst Case Power Consumption
- Worst Case One Condition
- Worst Case Zero Condition

Estos *corners* están especificados en distintas secciones del fichero de parámetros. Aparte de estos casos, el fabricante también proporciona *corners* para las resistencias, capacidades, inductancias y dispositivos bipolares del circuito. A continuación se detalla paso a paso cómo realizar un análisis de *corners* sobre el retardo de un inversor CMOS.

1. Parta del ejemplo anterior, en el que tenemos un parámetro llamado **Vsupply** que se corresponde con la tensión de alimentación y una expresión que calcula el retardo del inversor. Desactive las expresiones correspondientes al tiempo de subida y bajada. Para ello, haga doble click en ellas en la ventana principal del **Analog Design Environment**, con lo que aparecerá la ventana **Setting Outputs**, desactive el cuadro **Plotted/Evaluated** y haga click en **Change**. Sólo debe quedar activa la expresión del retardo.
2. En la ventana principal del **Analog Design Environment** haga **Tools ->Corners....**
3. Le aparecerá la ventana de la figura 10. En la tabla de la ventana, las columnas representan los distintos *corners* descritos anteriormente y las filas son los parámetros que se pueden modificar para cada *corner*. Note que aparte del caso de los dispositivos CMOS se

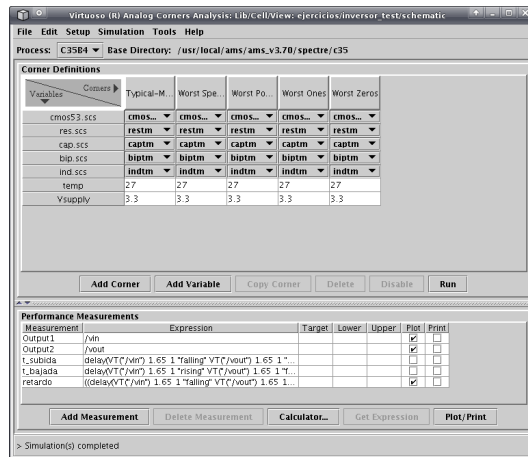


Figura 10: Ventana inicial del análisis de corners.

pueden variar el resto de dispositivos y además los parámetros de temperatura y voltaje de alimentación.

- Haciendo click en **Run** correrá el análisis de *corner* y le aparecerá la pantalla de resultados de la figura 11.

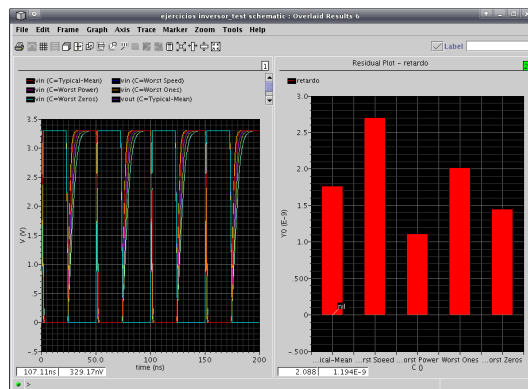


Figura 11: Ventana de resultados del análisis de corners.

## 5.1. Ejercicios

- Para el caso del inversor operando a  $27^{\circ}\text{C}$  y a la tensión nominal de la tecnología, i.e.  $3,3\text{V}$ , identifique cuáles son los *corners* que producen el mejor y peor retardo.
- Para el caso de un inversor operando entre  $27$  y  $90^{\circ}\text{C}$  y que experimenta una variación del  $\pm 10\%$  respecto a la tensión nominal, identifique bajo qué condiciones y *corner* se producen el mejor y el peor retardo.

## 6. Análisis estadístico

Al igual que el fabricante tecnológico proporciona los casos peores de su proceso en forma de secciones de *corners*, también va a proporcionar modelos de variación estadística de cada uno de los parámetros tecnológicos. Para ello añade una nueva sección a los ficheros de parámetros donde especifica la distribución de probabilidad (uniforme, gaussiana, etc) con sus características (media, desviación estándar, etc) de cada uno de los parámetros tecnológicos. En el caso de la tecnología del laboratorio, el fabricante AMS proporciona la sección `cmosmc` en el fichero `/usr/local/ams/ams_v3.80/spectre/c35/soac/cmos53.scs` para realizar el análisis estadístico.

Al realizar un análisis estadístico, no resulta útil ejecutar una única simulación. Lo interesante es, más bien, realizar un conjunto elevado de simulaciones, variando cada parámetro según su función de probabilidad, de tal manera que podamos analizar la distribución de probabilidad de las características del circuito que nos interesen sin necesidad de fabricarlo. A este tipo de análisis, se le conoce como método de Monte Carlo. A continuación se detalla punto por punto la realización del análisis estadístico de un inversor CMOS en Cadence:

1. Parta del ejemplo anterior, en el que tenemos un parámetro llamado `Vsupply` que se corresponde con la tensión de alimentación y una expresión que calcula el retardo del inversor. Desactive las expresiones correspondientes al tiempo de subida y bajada. Para ello, haga doble click en ellas en la ventana principal del **Analog Design Environment**, con lo que aparecerá la ventana **Setting Outputs**, desactive el cuadro **Plotted/Evaluated** y haga click en **Change**. Sólo debe quedar activa la expresión del retardo.
2. Ahora necesita decir al simulador que emplee la sección `cmosmc`. Para ello, en la ventana principal del **Analog Design Environment** haga **Setup ->Model Libraries ...**
3. Le aparecerá la pantalla de la figura 12 donde debe cambiar la sección de la biblioteca `/usr/local/ams/ams_v3.80/spectre/c35/soac/cmos53.scs` a `cmosmc`. Seleccione la biblioteca, introduzca la nueva sección, haga click en **Change** y posteriormente en **OK**.

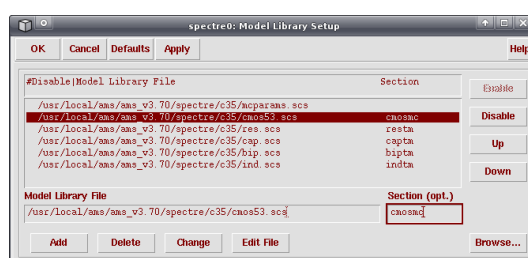


Figura 12: Selección de la sección del análisis estadístico en la biblioteca tecnológica.

4. En la ventana principal del **Analog Design Environment** haga **Tools ->Monte Carlo....**
5. Le aparecerá la ventana de la figura 13. Note que puede variar diversos parámetros, tales como en número de simulaciones (**Number of Runs**). Puede ser interesante encender la casilla **Save Data Between Runs to Allow Family Plots** para que la imagen de resultados incluya a todas las simulaciones, el resto de parámetros déjelos como están por

defecto. Si activa esta opción, el tiempo que tomarán los datos en aparecer en la ventana de resultados será significativamente mayor.

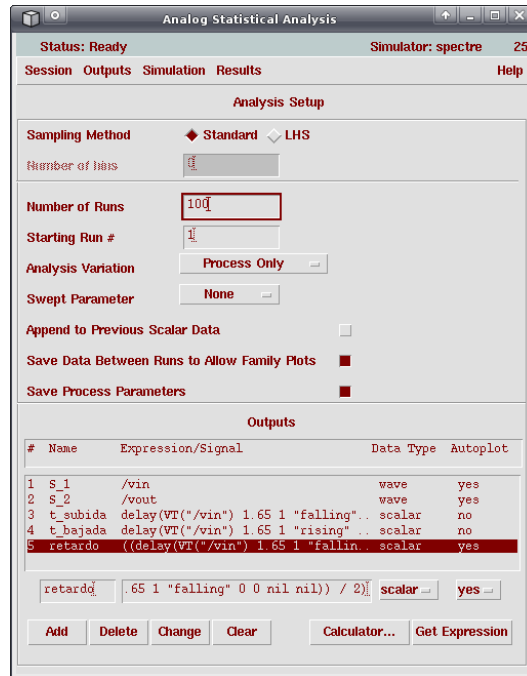


Figura 13: Ventana inicial del análisis estadístico.

- Ejecute el análisis mediante **Simulation** ->**Run**. Después del tiempo necesario para correr cada una de las 100 simulaciones le aparecerá una ventana de resultados similar a la de la figura 14. Note que ahora la gráfica del retardo es un histograma de la función de probabilidad, se le proporcionan la media y la desviación estándar.

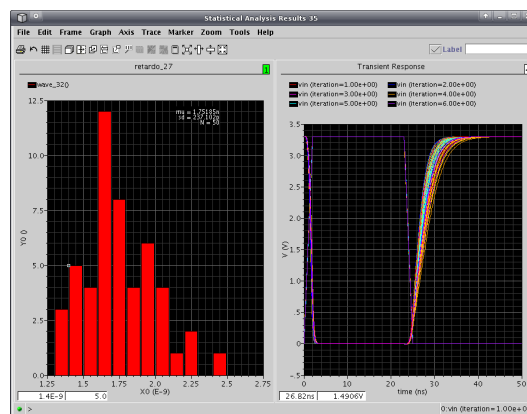


Figura 14: Ventana de resultados del análisis estadístico.

## 6.1. Ejercicios

- Anote las características de la función de probabilidad del retardo del inversor operando a  $27^{\circ}\text{C}$  y a la tensión nominal de la tecnología. ¿Se corresponden los resultados con el análisis de *corners*? Sugerencia: compruebe si el peor resultado del análisis de *corners* cae dentro de la  $3\sigma$
- Repita el apartado anterior para el caso de un inversor operando entre 27 y  $90^{\circ}\text{C}$  y que experimenta una variación del  $\pm 10\%$  respecto a la tensión nominal. Recuerde que puede cambiar la temperatura de simulación en la ventana principal del **Analog Design Environment** haciendo **Setup** ->**Temperature**.

## 7. Ejercicios Adicionales

Repita todos los ejercicios involucrados en este tutorial para una puerta NAND, exceptuando aquellos marcados con un asterisco.