

Laboratorio de Diseño Microelectrónico

Notas prácticas de la herramienta *Cadence* para diseño *Full custom*

Claudio Passerone, M^a Luisa López Vallejo y Pablo Ituero



Departamento de Ingeniería Electrónica

Febrero 2013

Laboratorio de Diseño Microelectrónico 2013
Notas prácticas de la herramienta *Cadence* para diseño *Full custom*

Cadence, Assura y QRC son marcas registradas de Cadence Corporation.

Copyright ©2000–2013, Claudio Passerone, M^a Luisa López Vallejo y Pablo Ituero.

Departamento de Ingeniería Electrónica
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
España
Teléfono: +34915495700 ext. 4207
E-mail: pituero@die.upm.es

Índice

Introducción	1
1. Utilización de las herramientas de Cadence	1
2. Esquemáticos	2
2.1. Apertura de un esquemático	2
2.2. Operaciones en la ventana de esquemáticos	5
2.3. Creación de símbolos para diseños jerárquicos	8
2.4. Ejemplo	9
3. Simulación	11
3.1. Descripción de estímulos y las cargas	11
3.1.1. Fichero de estímulos	11
3.1.2. Bloques de librería	12
3.2. Preparación de la simulación	12
3.3. Ejecución de la simulación	15
3.4. Ejemplo	17
4. Trazados	19
4.1. Las máscaras y las reglas de diseño	19
4.2. Apertura de un trazado	20
4.3. Operaciones en la ventana de trazado	21
4.4. DRC	26
4.5. LVS	26
4.6. Extracción de Resistencias y Capacidades Parásitas	27
4.7. Simulación	27
4.8. Ejemplo	27

Introducción

El laboratorio de Diseño Microelectrónico constituye el complemento práctico de la asignatura Microelectrónica (cuarto curso, P94). Tiene como objetivo introducir al alumno en el conjunto de herramientas CAD habitualmente empleadas en el diseño *full-custom* de circuitos integrados. Para ello, se realizará de forma práctica un diseño completo de un circuito sencillo empleando herramientas CAD comerciales para el diseño *full custom*, todas ellas de *Cadence Design Systems*. Con estas herramientas se pueden realizar los circuitos tanto a nivel de esquemático como de trazado, simularlos, etc. Para llegar a este diseño final se irán realizando ejercicios de menor a mayor complejidad, comenzando con el diseño y simulación de la puerta más sencilla, para terminar con la completa realización de un circuito de complejidad baja.

A continuación se describirá de forma breve el funcionamiento de las herramientas de Cadence involucradas en el ciclo de diseño *full-custom*. En este curso se emplea una tecnología comercial de AMS (Austria Mikro Systeme Int.), de $0.35\mu\text{m}$, 3.3V de tensión de alimentación y 4 capas de metales. La documentación de la tecnología está disponible en las estaciones de trabajo del laboratorio.

1. Utilización de las herramientas de Cadence

Las herramientas de diseño de circuitos presentan una gran complejidad en general. Mediante estas notas se pretende facilitar el trabajo del alumno, resumiéndose en ellas los puntos básicos para utilizar *Cadence* en el laboratorio de Microelectrónica.

Antes de ejecutar el programa hay que preparar un directorio en el que trabajaremos. Cada diseño se ve como una *librería* que se añade a las librerías ya existentes en el sistema. Dentro de cada librería están las *células*, cuya unidad constituye el proyecto final. Las células se componen de *vistas*, que como su nombre indica, son formas diferentes de ver el mismo bloque. A nosotros nos interesan dos en particular: las vistas de esquemático (*schematic*) y de trazado (*layout*). Representan dos niveles de abstracción diferentes del circuito que se está diseñando. Una célula a su vez puede contener más células constituyendo un diseño jerárquico.

El directorio de trabajo donde se van a guardar nuestros diseños y desde donde vamos a llamar a la herramienta es **Labs**, por lo tanto, tendremos que hacer:

```
cd Labs
```

En este punto se puede llamar a *Cadence, Integrated Circuit Frontend Backend (icfb)*, desde una ventana con intérprete de comandos. En concreto, para la tecnología que utilizamos se debe llamar de la siguiente forma:

```
ams_cds -tech c35b4 -mode fb &
```

Para simplificar esta llamada, se ha incluido en los ficheros de configuración de las cuentas un “alias” que hace corresponde a la orden *cadence* con la llamada anterior. Por lo tanto podremos iniciar el programa, simplemente escribiendo:

```
cadence &
```

Tras un período de inicialización en el que se muestran mensajes en el terminal, aparece una ventana como la de la figura 1, la ventana principal de comandos. Se utilizará para crear los

diseños o para seleccionar los ya existentes con el fin de modificarlos o realizar nuevas simulaciones. Aparecerá también otra ventana llamada *Library Manager* (ver la figura 2) que permite ver el contenido de las librerías y de las células, así como las vistas disponibles de estas últimas.

La primera vez que se inicia la herramienta, el programa nos pedirá que seleccionemos opción exacta de proceso necesaria para ejecutar el DRC y el LVS (ver la figura 3). Dejaremos la opción por defecto: “C35B4C0 PIP” y presionaremos OK.

2. Esquemáticos

Nuestro objetivo será diseñar y simular circuitos electrónicos, cuya representación mediante esquemáticos se realizará utilizando el editor de esquemáticos (*Schematic Entry*). Colocaremos todos los componentes que constituyan el circuito de forma manual en el espacio de trabajo, conectándolos adecuadamente. Podremos también modificar los diferentes parámetros que caracterizan los elementos o conservar sus valores por defecto. Finalmente, utilizando el simulador se puede verificar gráficamente el correcto funcionamiento del circuito, comprobando la respuesta que se obtiene en las salidas frente a los estímulos que se aplican en las entradas.

A continuación se describen las utilidades básicas de la herramienta para edición de esquemáticos, que se muestra en la figura 4 en la que se puede ver un inversor. En la sección 3 se detallará el procedimiento de simulación de un circuito.

2.1. Apertura de un esquemático

Recordamos que para cada diseño se debe crear una librería que contendrá las células.

Para crear una nueva librería se debe seleccionar del menú **File** de la ventana principal (*icfb*) o del *Library Manager* el comando **New** y aquí **Library...** Aparecerá una ventana (ver figura 5, izquierda) en la que se debe escribir el nombre de la nueva librería y aceptar con OK. En este punto, si se selecciona la opción **Attach to an existing techfile**, se nos pide el fichero tecnológico (*Technology File*) que se va a utilizar en el diseño, en nuestro caso hay que seleccionar **TECH_C35B4**. En este fichero se describen tanto las características de las máscaras que se utilizarán en el proceso de fabricación como las reglas geométricas que se deben cumplir al realizar el trazado. De momento no nos van a preocupar especialmente, volveremos sobre este fichero en la sección de trazados.

Una vez se ha creado la nueva librería hay que crear las células necesarias para el diseño. Para ello seleccionamos de la ventana del *icfb* o del *Library Manager* el menú **File ->New ->Cellview...** Aparecerá la ventana que se muestra en la parte derecha de la figura 5, en en

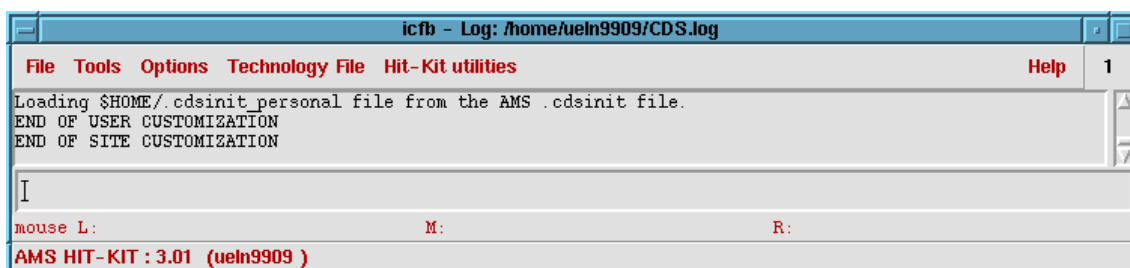


Figura 1: Ventana principal de *icfb*

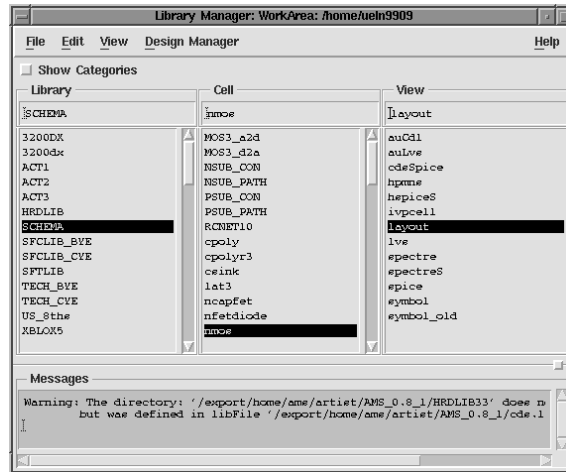


Figura 2: Ventana Lybrary Manager

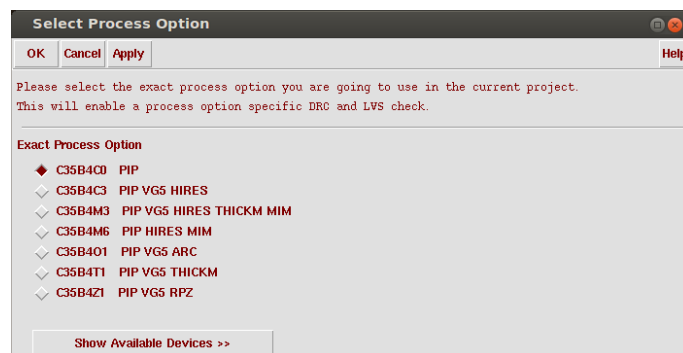


Figura 3: Ventana de selección de proceso.

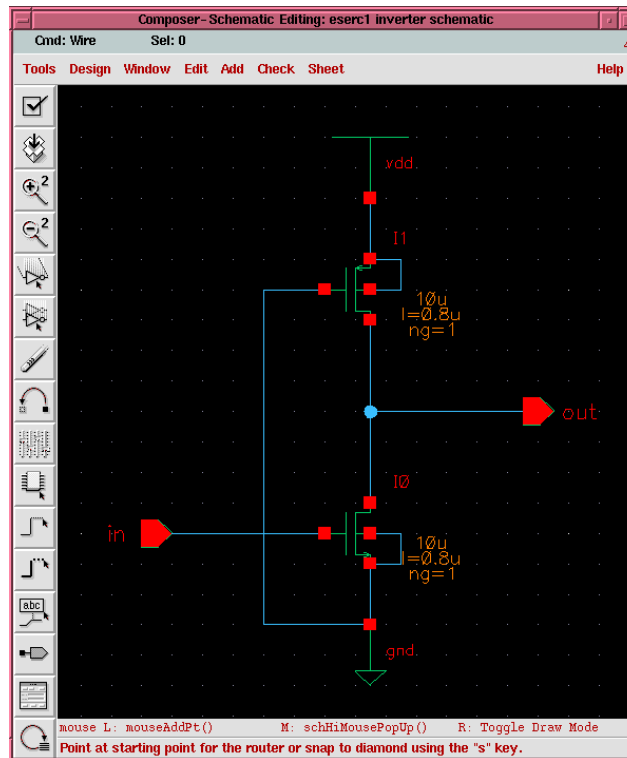


Figura 4: Editor de esquemáticos *Schematic Entry* de *icfb*

la que se puede seleccionar la librería en la que creamos la célula, darle nombre y escribir el tipo de vista que se va a crear (en nuestro caso `schematic`). Aceptamos todos los datos introducidos pulsando OK.

Para abrir un trabajo que se ha guardado en una sesión anterior basta con seleccionar del *Lybrary Manager* la librería y la célula deseada y hacer doble click en el tipo de vista que se quiere abrir. Otra forma de hacer lo mismo es mediante el comando `Open...` del menú `File` de *icfb* o del *Lybrary Manager*.

El resultado de las operaciones previas es en cualquier caso a apertura de la ventana del editor de esquemáticos (o de trazados si ésta es la vista elegida) similar a la que se ve en 4. Se distinguen cuatro áreas diferentes:

- La *barra de menú*, aparece horizontal en la parte superior de la ventana.
- La *barra de iconos de instrumentos*, en vertical al lado izquierdo.
- La *zona de trabajo*, en negro, ocupa la mayor parte del espacio disponible.
- La *línea de estado*, en la parte de abajo.

Para cerrar la ventana de esquemáticos al terminar el trabajo hay que ejecutar el comando `Close` dentro del menú `Window`.

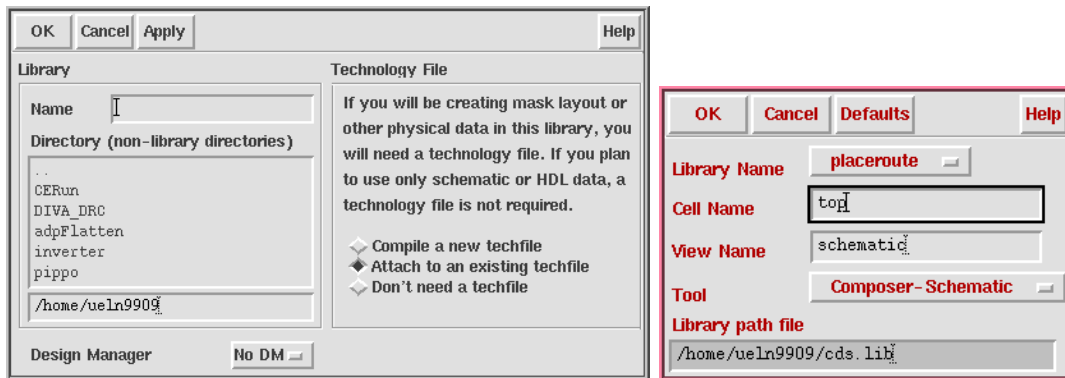


Figura 5: Ventana de creación de librería (nuevo diseño)

2.2. Operaciones en la ventana de esquemáticos

Para realizar una esquemático disponemos de una serie de comandos que se pueden ejecutar de diversas maneras:


- a través del menú,
- mediante iconos de instrumentos,
- utilizando el ratón y haciendo click en la zona de trabajo,
- pulsando una tecla (*hotkey*).

En el último caso hay que prestar atención a las mayúsculas y minúsculas, que tienen diferente significado. Muchos comandos al ejecutarse se mantienen activos por un tiempo indefinido, interrumpiéndose su ejecución en general pulsando ESC.

Si para un comando en particular es necesario operar sobre un objeto o varios habrá que seleccionarlos. La selección se puede hacer antes o después de activar el comando. Para ello se puede pulsar el botón izquierdo del ratón sobre el objeto o mantener pulsado el botón y arrastrar el ratón encerrando la zona que se desea seleccionar. Para añadir nuevos objetos a una selección ya existente se hace igual que se ha descrito hasta ahora pero oprimiendo simultáneamente la tecla SHIFT.

En los próximos apartados se describirán las operaciones principales que se pueden realizar en la edición de esquemáticos y sus características. Finalmente, como ejemplo se realizará la construcción del esquemático de un inversor.


Inserción de componentes de librería

<i>menú</i>	Add -> Instance...
<i>ratón</i>	botón central -> Add Instance...
<i>teclado</i>	i
<i>icono</i>	

Permite añadir un componente en el esquemático. Al activarse aparece una ventana, denominada *Add Instance*, mediante la cual se selecciona la librería del elemento que se va a insertar. Si

se pulsa **Browse** aparece el *Library Browser*¹ que permite seleccionar el componente mediante el ratón: en la librería **PRIMLIB**, por ejemplo, se pueden encontrar transistores MOS o bipolares²; en la librería **analogLib** la alimentación y la masa, además de múltiples tipos de fuentes. Para todos los componentes se puede especificar en general una serie de parámetros que definen las características del componente presentando unos valores por defecto. El tipo de vista de los elementos que se instancien debe ser **symbol**. Al pulsar con el botón izquierdo del ratón un punto de la zona de trabajo aparecerá en esa posición una instancia del componente que se ha seleccionado.


Realización de conexiones

<i>menú</i>	Add -> Wire (narrow)
<i>ratón</i>	botón central -> Wire (narrow)
<i>teclado</i>	w
<i>icono</i>	

Consiste en conectar mediante un hilo fino³ dos terminales. Se pulsa con el botón izquierdo del ratón en el punto donde se quiere realizar la conexión. Se suelta el botón y se desplaza el ratón hasta el punto final: hacer click de nuevo. Si se desea terminar aquí la conexión hay que pulsar de nuevo. Si no, continuaremos realizando conexiones.

Al trazar los hilos aparecerá un rombo pequeño en las cercanías del puntero del ratón, en general en los terminales de los componentes. Si se pulsa la tecla **s**, se obtendrá el mismo efecto que si se hace click sobre el punto en donde está el rombo, facilitando con ello el trazado de la red.

Inserción de pines de entrada y salida

<i>menú</i>	Add -> Pin...
<i>ratón</i>	botón central -> Add pin...
<i>teclado</i>	p
<i>icono</i>	

Para poder excitar el circuito con señales es necesario insertar *pin*es que comuniquen el circuito con el exterior. Al activar el comando se abre una ventana en la que hemos de especificar el nombre y el tipo de pin (**input**, **output**, ...), que se sitúa en el esquemático con el ratón, al pulsar el botón izquierdo. Es posible especificar más de un nombre, con lo que varios pines serán insertados en el esquemático consecutivamente.

Los pines son útiles en dos casos particulares:

- cuando se quiere introducir un estímulo o ver una salida en una simulación;
- cuando se va a realizar un diseño jerárquico, pues se hace a través de símbolos con pines de entrada y salida (2.3).

En el primer caso el nombre de los pines serán los nodos que se utilizarán en el fichero de estímulos para indicar la posición de los generadores utilizando la sintaxis de **SPICE**. En el segundo caso el


¹Muy parecido al *Lybrary Manager*.

²Si se pulsa el botón de clasificación en categorías (**Show Categories**) los componentes aparecen agrupados por familias: mosfets, bipolares, diodos, etc.

³ Existe un comando para conectar hilos gruesos, cuyo funcionamiento es similar.



símbolo generado a partir de la vista esquemática tendrá terminales de entrada y salida parejos a los pines definidos como `input` y `output`; se podrá utilizar el símbolo como cualquier otro componente de librería.

Edición de las propiedades de los componentes

<i>menú</i>	Edit -> Properties -> Objects...
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	q
<i>ícono</i>	






Cuando se instancia un componente se pueden elegir los valores de los parámetros que lo caracterizan en la ventana de inserción de componentes de librería. Para poder modificarlos una vez han sido creados, se utiliza este comando. Para ello hay que seleccionar el componente en cuestión (antes o después de activar el comando) y modificar los valores oportunos en el cuadro de diálogo que aparece. Los cambios se hacen efectivos al pulsar **Apply** o **OK** (si se utiliza **Apply** se puede continuar con el comando en otros componentes que se vayan seleccionando sucesivamente).

Guardar el diseño

<i>menú</i>	Design -> Check and Save, Save, Save As...
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	X, S, CTRL-s
<i>ícono</i>	 

Siempre es conveniente ir guardando el trabajo que se ha realizado por lo que pueda suceder (aunque UNIX es un sistema muy robusto, puede producirse una caída del sistema o la alimentación en cualquier momento). Hay tres opciones disponibles: **Check and Save** realiza antes de salvar el diseño un test del circuito que permite detectar posibles fuentes de error (por ejemplo, terminales sin conectar). **Save** salva simplemente el trabajo en la librería o célula seleccionada. Finalmente, **Save As...** permite cambiar el nombre de la librería o de la célula.

Modificación del esquemático

<i>menú</i>	Edit -> Stretch, Copy, Move, Delete, Rotate, Undo, Redo
<i>ratón</i>	botón izquierdo (para seleccionar) botón derecho (para repetir el último comando)
<i>teclado</i>	m, c, M, del, r, u, U
<i>ícono</i>	    

Este conjunto de comandos permite modificar el esquemático de diferentes formas. A continuación se describen brevemente:

Stretch : modifica las dimensiones de un objeto o mueve un símbolo manteniendo las conexiones.

Copy : duplica un objeto ya existente.

Move : mueve un objeto.

Delete : borra un objeto. Se puede anular con **Undo**.



Rotate : rota un objeto.

Undo : anula el efecto del último comando ejecutado.

Redo : repite el último comando.

Muy interesante es que durante la ejecución de estas operaciones es posible girar el objeto obteniendo imagen especular del mismo tanto en sentido vertical como horizontal. Para ello hay que pulsar la tecla F3, y en la ventana que aparece se pulsa **Sideways** (reflexión horizontal) o **Upsidedown** (reflexión vertical).

Zoom y Pan

<i>menú</i>	Window -> Zoom In, Zoom In By 2, Zoom Out By 2, Pan, Zoom To Fit
<i>ratón</i>	botón central -> Zoom In, Zoom Out By 2, Fit botón derecho (creando un rectángulo)
<i>teclado</i>	z, f
<i>icono</i>	 

Los comandos *zoom* y *pan* sirven para ampliar o reducir la parte del esquemático que se visualiza. Si se selecciona **Pan** hay que apuntar con el ratón al punto de la pantalla que se desea pase a ser el centro. Un efecto similar se puede conseguir con las teclas de dirección del teclado (flechas). Con los distintos comandos de **zoom** se puede ampliar o reducir la parte del esquemático que se puede observar en la zona de trabajo. Finalmente, el comando **Zoom To Fit**, permite ver el circuito completo en la zona de trabajo.

2.3. Creación de símbolos para diseños jerárquicos

El diseño de circuitos complejos resulta más fácil realizando bloques básicos que se utilicen posteriormente como componentes de un nivel jerárquico superior. El procedimiento de creación de símbolos es el siguiente:

1. Crear una célula básica (vista **schematic**) (por ejemplo, un inversor). Para que sea útil, debe tener al menos un pin de entrada y/o salida, que constituirán los terminales del símbolo que se va a generar.
2. Crear la vista **symbol** para la célula que se acaba de diseñar: para ello utilizamos el comando **Design ->Create Cellview ->From Cellview...** y pulsamos **OK** en las dos ventanas que aparecen sucesivamente.
3. Se abre una ventana que presenta el símbolo que se acaba de generar. Éste se puede modificar (comandos **Stretch** y **Move**), teniendo cuidado de no eliminar los terminales (cuadrados rojos).
4. Crear otra célula (con otro nombre, por ejemplo **top_inv**) a un nivel jerárquico superior, con la vista **schematic**.

5. Insertar el componente que se acaba de crear con el comando **Add Instance**, buscándolo en la librería que lo contiene y eligiendo la vista **symbol**.

Se puede generar el símbolo de una célula formada de otras células, creando diseños jerárquicos con un número arbitrario de niveles en la jerarquía. Lo que no se puede hacer es instanciar el símbolo de una célula dentro de sí misma, cosa que es de lo más lógica.

Se puede recorrer la jerarquía de un diseño desde el nivel más alto haciendo uso del comando del menú **Design ->Hierarchy**. Con él se puede abrir para lectura (**Read**) o escritura (**Edit**) el contenido del símbolo, retornando al nivel anterior (**Return**) o al nivel inicial directamente (**Return To Top**).

2.4. Ejemplo

A modo de ejemplo vamos a describir la creación de un esquemático que represente un inversor. Este esquemático contendrá transistores, conexiones, pines de entrada/salida y alimentación. Se debe realizar lo siguiente:

1. En la ventana principal de *icfb* hacer click en **File**; en el menú que aparece seleccionar **New** y aquí **Library**. Aparece una ventana para la creación de una librería.
2. Escribir el nombre de la nueva librería (por ejemplo **labo1**) y pulsar **OK**. Aparecerá una ventana para seleccionar el fichero tecnológico (**Technology File**), seleccionamos **TECH_C35B4** y pulsamos **OK**.
3. Seleccionar la nueva librería con el *Library Manager* y crear una nueva célula mediante el comando **File ->New ->Cellview...**; se introduce el nombre de la célula (por ejemplo: **inversor**) y la vista **schematic** (si se elige la herramienta de edición de esquemáticos automáticamente aparece el tipo de vista **schematic**). Al aceptar con el **OK** aparecerá la ventana de edición de esquemáticos.
4. Para insertar los transistores MOS vamos al menú **Add** y seleccionamos **Instance**: se abre la ventana **Add Instance**, pulsamos en **Browse** y seleccionamos la librería **PRIMLIB**. De todos los componentes que aparecen utilizaremos **nmos4** de la categoría **mosfets** (si está activa la opción que muestra categorías), siempre con la vista **symbol** y situamos el ratón en la hoja de trabajo, pulsando con el botón izquierdo en la posición deseada.
5. Repetimos la operación precedente eligiendo **pmos4** en lugar de **nmos4**; pulsando **ESC** finalizamos la ejecución del comando de inserción.
6. Para colocar los pines de E/S podemos volver al menú **Add** y seleccionar **Pin**; tecleamos el nombre del pin de entrada, por ejemplo **in** en la línea que aparece a la derecha de **Pin Names**; llevamos el ratón de nuevo a la zona de trabajo y pulsamos en la posición deseada; volvemos a la ventana **Add Pin**, escribimos el nombre del pin de salida y seleccionamos la dirección del mismo: cambiamos de **input** (valor por defecto) a **output**; nos volvemos a situar en la zona de trabajo para insertar el nuevo pin. Pulsando **ESC** terminamos este comando.
7. Para insertar en el esquemático la alimentación y la masa se opera como en el punto 4, escogiendo del *browser* **analogLib->Sources ->Globals** y seleccionando la vista **symbol** de **gnd** y **vdd**.

8. Para realizar las conexiones volvemos al menu **Add** y seleccionamos **Wire (narrow)**: nos situamos en el punto donde se desea comenzar la conexión y pulsamos el botón izquierdo; al soltarlo aparecerá un hilo que sigue al ratón; situarse en la posición final y pulsar nuevamente.
9. Para escoger los parámetros de los transistores vamos a **Edit ->Properties ->Objects** y seleccionamos uno de los transistores; hay que modificar si es preciso los valores de las reglas (**Width** y **Length**) o el modelo de simulación; pulsamos **Apply**, volvemos al esquemático, seleccionamos otro transistor y procedemos sucesivamente con todos.
10. Guardamos el trabajo realizado: **Design ->Check and Save**.

3. Simulación

Cadence permite realizar simulaciones relativas a los esquemáticos creados, visualizando la variación con el tiempo de las magnitudes (tensiones y corrientes) que se pretende analizar frente a las entradas que se aplican en particular (ver la sección 3.1). El simulador que vamos a utilizar es *Spectre*, una versión propietaria y mejorada del conocido simulador SPICE. Cada componente se simula tomando como base un modelo del mismo (que define sus características) y los parámetros parásitos (se pueden estimar utilizando la información proporcionada al diseñador del esquemático o calculados a partir del trazado del circuito). A continuación se describe el procedimiento que se debe seguir para simular un circuito sencillo, partiendo de su especificación a nivel esquemático. La sección 4.6 explicará qué modificaciones habrá que efectuar cuando la fuente de datos del modelo sea el mismo trazado.

3.1. Descripción de estímulos y las cargas

La descripción de los estímulos de entrada y de las cargas en las salidas se pueden realizar de dos formas:

- mediante un fichero de texto descrito con la sintaxis de SPICE,
- mediante la utilización de bloques de librería.

La primera es más cómoda si se quieren simular situaciones muy diversas, pues basta con escribir diferentes ficheros y anotar el comportamiento de todas las simulaciones. La segunda forma de descripción presenta la ventaja de no requerir un conocimiento profundo de la sintaxis de SPICE, pues basta con configurar los bloques de librería. Por supuesto, se puede utilizar una forma de descripción mixta. En ambos casos, los estímulos y las cargas de las salidas constituyen el *entorno* (*testbench*) de la simulación del circuito que se estudia.

3.1.1. Fichero de estímulos

Este fichero permite describir en modo texto el *testbench*; el nombre del fichero se pasa como parámetro al simulador (ver el apartado 3.2). Simplificando mucho, hay que escribir una línea por cada entrada o salida presente en el esquemático del circuito, siguiendo la forma:

```
nombre nodo1 nodo2 comando valor
```

A continuación hacemos una breve descripción de cada uno de estos cinco elementos para el caso de que queramos especificar tensiones:

nombre : se puede poner cualquiera siempre que empiece por la letra **v** para las tensiones o la letra **i** para las corrientes.

nodo1 nodo2 : representan los extremos en los que se aplica la tensión que se está especificando. Generalmente **nodo1** representa el nombre del pin de entrada y **nodo2** la masa, indicada simplemente con el número 0. Para especificar un nodo se encierra entre corchetes y se precede del símbolo **#**. El nodo de alimentación **vdd** debe escribirse siempre seguido del carácter **!**.

comando valor : indica el tipo de tensión que se desea aplicar. Puede ser constante o variable con forma seleccionable. Para crear un valor constante utilizamos:

```
dc valor
```

Para crear una forma de onda lineal a trazos utilizamos:

```
pwl ( t1 v1 t2 v2 t3 v3 ... )
```

A continuación se presenta un ejemplo en el que se especifican las formas de onda de entrada, el valor de la alimentación y una capacidad de carga de 10 pF situada a la salida del circuito.

```
vin [#in] 0 pwl (0 0 1n 0 3n 3.3 8n 3.3)
vvdd [#vdd!] 0 dc 3.3
c1 [#out] 0 10p
```

Es importante destacar que no es necesario escribir las unidades de las magnitudes (voltios, segundos, faradios, etc.), aunque sí se deben anotar los múltiplos o submúltiplos de las mismas. Dichos submúltiplos se escriben seguidos del valor sin dejar espacios en blanco, como se ve en el ejemplo anterior (10 pF se escribe 10p).

3.1.2. Bloques de librería

Como ya se ha dicho, se pueden seleccionar los generadores de forma de onda y las cargas directamente de la librería `analogLib`. Se deben tratar exactamente como los componentes insertados en el esquemático, conteniendo una serie de parámetros que describen su comportamiento. Volviendo al ejemplo de fichero de estímulos que se acaba de describir, para reproducir estos estímulos tendremos que seleccionar para la entrada `in` el generador `vpwl`, para la alimentación el generador `vdc`, y para la salida `out` el condensador `cap`.

Dado que estos componentes no son en realidad parte del circuito, sino que son externos al mismo, se sugiere utilizarlos a un nivel jerárquico superior respecto a la célula que representa el propio circuito. Esto es especialmente recomendable si vamos a confrontar la vista `schematic` y la vista `layout` para verificar su correspondencia (ver el apartado de *LVS* 4.5 al respecto).

Por ejemplo, si se quiere diseñar un inversor y se quiere verificar su comportamiento con una onda cuadrada a la entrada y una capacidad de carga, se puede estructurar la librería de la siguiente forma: una célula denominada `inverter` que contiene los transistores y pines de E/S, con alguna de las vistas `schematic` o `layout` y la vista `symbol`; otra célula llamada `test` con los generadores, las cargas y el símbolo del inversor. La figura 6 ilustra gráficamente el ejemplo. Como se ve en la figura, existe una vista adicional denominada `av_extracted` cuya generación se describe en el apartado *LVS* 4.5.

3.2. Preparación de la simulación

Antes de realizar la simulación es necesario especificar un cierto número de parámetros (con hacerlo una vez antes de empezar es suficiente). La selección de las variables que se visualizan y los gráficos que se generan se pueden repetir múltiples veces en una única sesión.

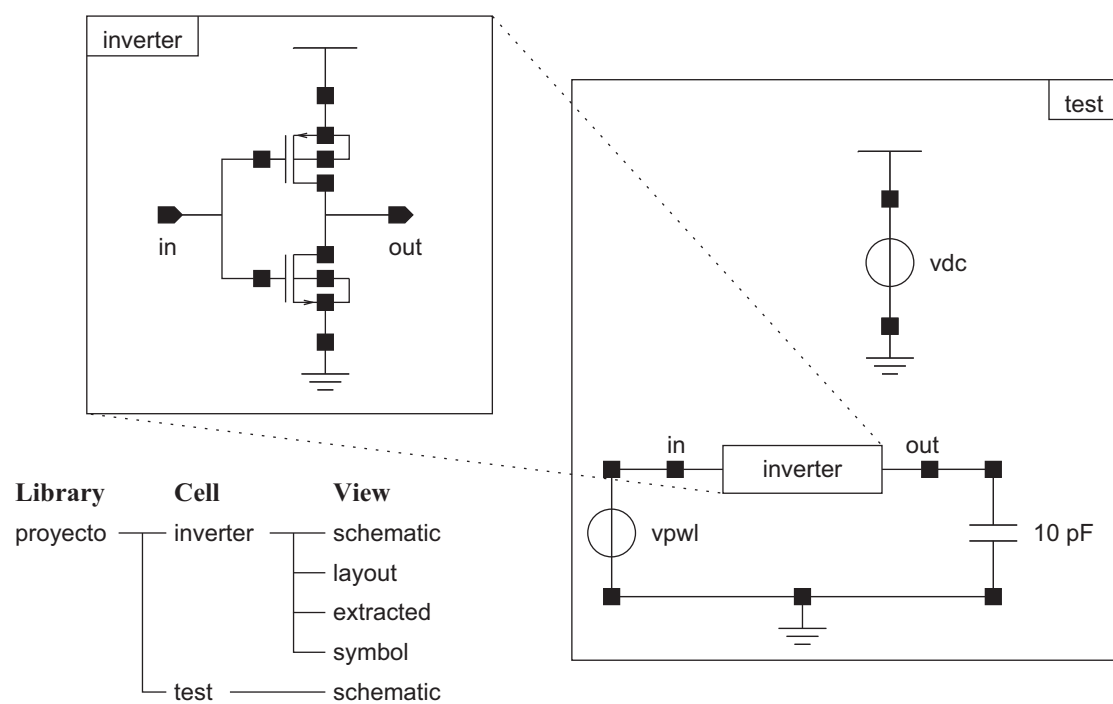


Figura 6: Ejemplo de diseño jerárquico con utilización de generadores y cargas

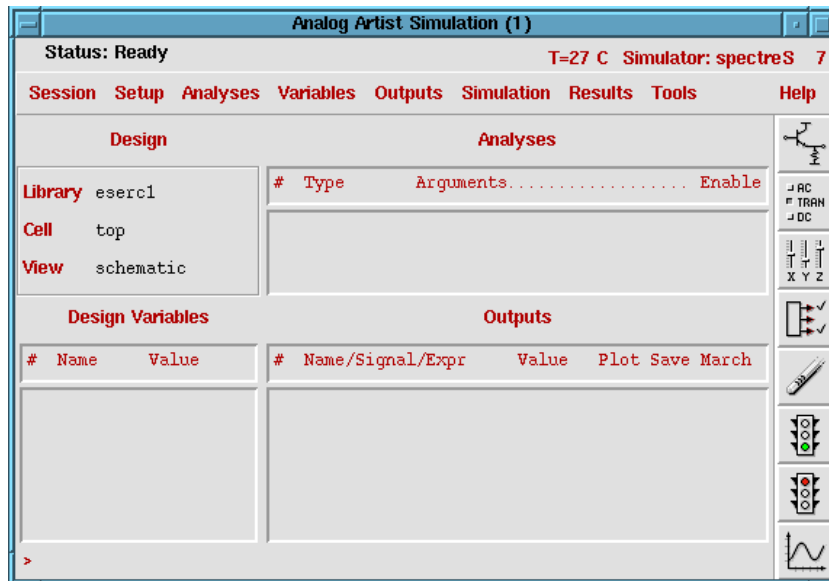


Figura 7: Ventana principal del simulador *Analog Artist*

Cómo lanzar *Analog Artist* / *Spectre*

El simulador *Spectre* se utiliza desde la herramienta *Analog Artist*, que se puede lanzar desde la ventana de esquemáticos seleccionando el comando **Analog Environment** del menú **Tools**. Se abrirá una nueva ventana (como la que se ve en la figura 7) a través de la cual se selecciona la configuración deseada, se lanzan las simulaciones y se observan los resultados.

Configuración de *Analog Artist*

A partir del menú **Setup** podemos configurar el entorno de simulación como se detalla a continuación.

Selección del diseño Cuando se ha lanzado *Analog Artist* se supone que el esquemático que se va a simular es aquél desde el que se ha invocado. Si se desea simular un circuito diferente se puede seleccionar mediante el menú **Setup ->Design...** o pulsando uno de los iconos situados a la derecha de la ventana del *Analog Artist*. Un cuadro de diálogo permitirá elegir la librería y la célula deseada. A la izquierda de la ventana de *Analog Artist* aparecerá el nombre del diseño en la sección **Design**.

Selección del simulador Se puede seleccionar el simulador que vamos a utilizar (aunque es mejor no cambiarlo). Esto se hace ejecutando el comando **Setup ->Simulator/Directory/Host...** Para nuestro laboratorio vamos a utilizar el simulador *spectre*, disponible en la primera línea de la ventana.

Selección de la temperatura El resultado de la simulación depende en gran medida de la temperatura de funcionamiento del circuito. El valor normal utilizado es el de la temperatura ambiente 27° C, pero se puede modificar ejecutando el comando **Setup ->Temperature**.

Selección del fichero de estímulos Esta opción se debe seleccionar sólo si se quiere utilizar un fichero de estímulos para describir los estímulos de entrada y las cargas. Si se van a emplear los componentes de librería se debe ignorar esta opción de configuración.

El nombre del fichero de estímulos se debe escribir en el cuadro de diálogo que se obtiene mediante el comando `Setup ->Environment...`, en la última línea, que tiene la etiqueta `Stimulus File`. La ubicación del fichero se debe especificar completamente. Hay que indicar también la sintaxis utilizada en la descripción de los estímulos. En nuestro caso `cdsSpice`.

Selección del tipo de simulación Hay varios tipos de simulaciones, seleccionables mediante el menú `Analyses` y la opción `Choose...`, siendo los tres análisis principales:

- el transitorio,
- el régimen sinusoidal,
- el régimen continuo.

El análisis transitorio (`Transient`) necesita un estudio previo en continua para encontrar el punto de trabajo y seguir el análisis transitorio propiamente dicho. Es fundamental introducir el tiempo que se quiere que dure la simulación (`Stop Time`, **atención**, por defecto el valor se da en segundos). El régimen sinusoidal (AC) realiza un análisis en frecuencia. Requiere tres parámetros principalmente: la frecuencia mínima (`Start`), la máxima (`Stop`) y el tipo de paso (lineal, logarítmico o automático). Alternativamente se puede elegir una frecuencia fija, y hacer variar la temperatura, un parámetro de un componente o un parámetro de un modelo. El análisis en continua (DC) es similar al de alterna, para el caso obvio de frecuencia nula. También en este caso es posible variar la temperatura o parámetros en intervalos fijados de antemano. De nuevo hemos de insistir en lo importante que es especificar los órdenes de magnitud de las unidades de todos los campos: si se introduce 10 en un tiempo estamos especificando 10 segundos; si se quieren poner nanosegundos hay que teclear 10n (sin espacio en medio).

El algoritmo de cálculo que se utiliza en alguna de las posibles simulaciones (en particular en el transitorio) puede ser más o menos preciso, pudiéndose variar el compromiso precisión-tiempo de cálculo. Hay tres posibilidades: `conservative`, `moderate` y `liberal`, seleccionables mediante botones. Tal y como se han enumerado se va de la opción más precisa y lenta a la menos precisa pero más veloz. Las variaciones en tiempo de ejecución se aprecian significativamente en los circuitos de tamaño medio o grande. Para el laboratorio se recomienda comenzar con el tipo `liberal` y verificar los resultados con precisión `conservative` sólo al final del diseño.

3.3. Ejecución de la simulación

Una vez se ha configurado el entorno de simulación se ha de proceder a la selección de las magnitudes para visualización y simulación.

Guardar las magnitudes de la simulación

Durante la simulación se realizan cálculos de las tensiones y corrientes del circuito. Sólo algunas de éstas resultan de interés para comprender el funcionamiento del circuito, por lo que es muy interesante seleccionarlas para reducir el tiempo de ejecución de la simulación y el espacio

de disco para los datos. Esto es especialmente útil cuando simulamos esquemáticos complejos con un gran número de nodos.

Por defecto el simulador está configurado para salvar todas las tensiones y *ninguna* corriente. Para cambiar esto vamos al menú **Outputs**, escogemos **To Be Saved** y **Select On Schematic**. Nos vamos a la ventana con el esquemático y seleccionamos las señales de la siguiente forma:

- *tensiones*: hacemos click con el botón izquierdo en el nodo (hilo) correspondiente;
- *corrientes*: hacemos click con el botón izquierdo en el *terminal* del componente que nos interese; la corriente se considera positiva si es entrante y negativa si es saliente.

Para anular alguna selección se pulsa nuevamente sobre el nodo o el terminal correspondiente⁴. Las tensiones seleccionadas aparecerán con diferentes colores, mientras que los terminales cuya corriente queremos guardar aparecerán circundados por una elipse. Si el diseño es jerárquico podemos seleccionar también los nodos y terminales del interior de los símbolos. Para ello descendemos en la jerarquía con el comando **Design ->Hierarchy ->Descend Edit...** y retornamos con **Design ->Hierarchy ->Return**.

Desde el menú **Outputs** se puede seleccionar también la opción **Save All...**: aparecerá una ventana que permite guardar todas las tensiones (opción por defecto), todas las corrientes (para el análisis del transitorio marcar **Select all DC/Transient terminal currents**), tanto tensiones como corrientes o ninguna magnitud. En el caso de circuitos pequeños siempre podemos guardar todo, pues el impacto será mínimo en el tiempo de simulación.

Selección de la representación gráfica

Vamos a seleccionar las salidas que se van a representar graficamente tras la simulación. Podemos proceder de forma análoga a lo descrito anteriormente seleccionando de la barra menú la opción **Outputs ->To Be Plotted ->Select On Schematic**.

Puesta en marcha de la simulación

Lo hacemos mediante el comando **Simulation ->Run**, o mediante el icono con el semáforo verde. Durante la simulación aparecerán en la ventana del *Analog Artist* y en la principal (*icfb*) una serie de mensajes que informan del transcurrir de la simulación.

Para la simulación del transitorio se puede visualizar periódicamente el tiempo transcurrido y el porcentaje de simulación que se ha completado. Para detener la simulación pulsaremos en el icono con el semáforo rojo o elegimos el comando **Simulation ->Stop**.

Visualización de resultados

Al terminar la simulación aparecerá automáticamente una ventana con todas las señales seleccionadas representadas en un único diagrama, como se ve en el ejemplo de la figura 8, obtenida para un inversor nMOS.

⁴ A veces puede resultar complicado seleccionar un terminal para visualizar la corriente, dado que la herramienta se empeña en seleccionar el nodo que tiene conectado el terminal. En esta caso se puede poner un filtro a los objetos que se pueden seleccionar, de forma que sólo se pueda pinchar en terminales, si es este nuestro deseo. Para ello ejecutamos el comando **Edit ->Select ->Filter...** y en el cuadro de diálogo marcamos los objetos que nos interesa seleccionar (son muy útiles los botones de **none** y **all**). Se vuelve al esquemático, y una vez se ha seleccionado podemos regresar al cuadro de diálogo del filtro de selección para dejar todo como estaba.

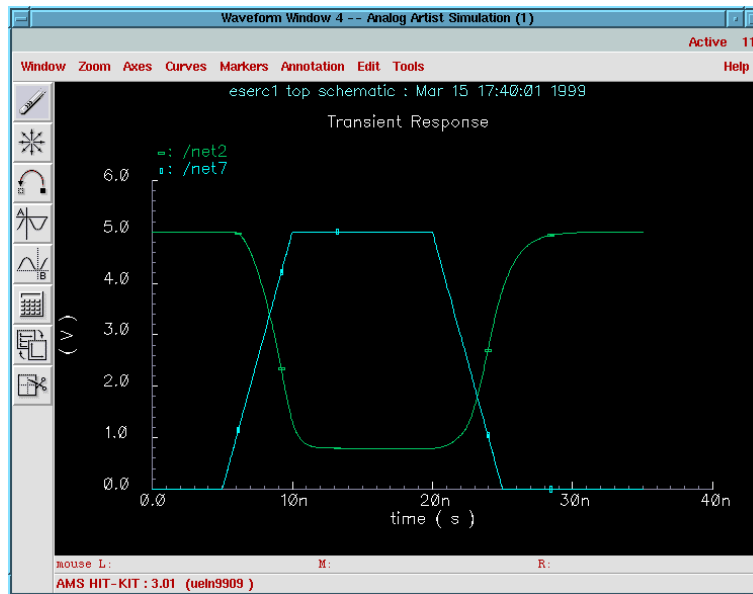


Figura 8: Visualización gráfica del resultado

Si queremos obtener las gráficas separadas hay que elegir en esta ventana el menú **Axes** y ejecutar el comando **To Strip**. Si queremos volver al diagrama único seleccionamos **To Composite**. Esto mismo se puede realizar de forma más rápida pulsando el icono denominado **Switch Axis Mode**, en la parte izquierda de la ventana. También se puede ampliar una zona particular del gráfico (menú **Zoom**), u obtener la evolución de una señal en función de otra y no en función del tiempo (seleccionamos **Axes ->X Axis...** y escogemos la variable que se desea utilizar en el eje de abscisas, indicándola en la parte denominada **Plot vs.**). La herramienta de representación gráfica es muy robusta y completa. Se recomienda echar un vistazo a las múltiples opciones que ofrece.

Si se ha cerrado la ventana gráfica (con **Window ->Close**), se puede volver a abrir desde el *Analog Artist* eligiendo el tipo de simulación efectuada (transitorio, continua, etc...) en el menú **Results ->Plot Outputs**. Además, si una salida no se había elegido se la puede mostrar con **Results ->Direct Plot** que permite indicarla mediante el ratón en el esquemático.

3.4. Ejemplo

A continuación se enumeran los pasos para simular un esquemático suponiendo que los estímulos y cargas se han realizado mediante bloques de librería. Las operaciones que se deben realizar son las siguientes:

1. Abrimos el esquemático que queremos simular escogiendo la vista **schematic** en el *Library Manager*, y seleccionando el comando **File ->Open...**
2. En la ventana del esquemático que aparece, llamamos al simulador con **Tools ->Analog Artist**. Aparecerá la ventana del simulador en la que ya se ha seleccionado el diseño correcto.
3. Configuramos el entorno de simulación (**Setup ->Simulator...** es SPECTRE, etc...)

4. Elegimos el tipo de análisis mediante **Analyses** ->**Choose...**. Escogemos por ejemplo un análisis transitorio de 50 ns (la duración efectiva dependerá de los generadores elegidos).
5. Escogemos las señales que vamos a guardar con el comando **Select On Schematic** del menú **Outputs** ->**To Be Saved**, haciendo click sucesivamente en los nodos o terminales que nos interesan.
6. Escogemos las señales que queremos representar gráficamente con **Outputs** ->**To Be Plotted** ->**Select On Schematic**; estas deben ser un subconjunto o coincidir con las señales que salvamos.
7. Lanzamos la simulación con **Simulation** ->**Run**.
8. Examinamos los resultados en la ventana gráfica que se abre automáticamente.

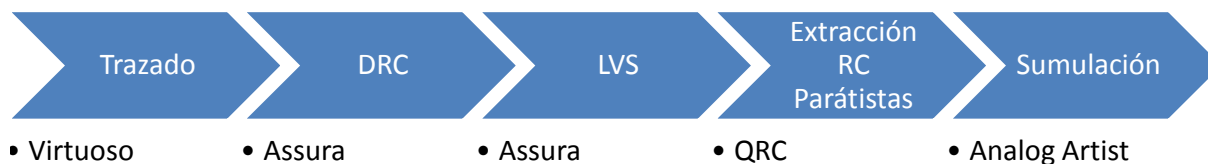


Figura 9: Flujo de diseño de un trazado

4. Trazados

Especificar un circuito a nivel de esquemático no es suficiente para su realización en silicio. Al fabricante hay que proporcionarle el esquema físico de las áreas activas, conexiones, etc. Es decir, el conjunto de máscaras que ha de utilizar en el proceso de fabricación y que constituyen lo que denominamos *trazado*. El trazado se puede realizar de forma automática a partir del esquemático utilizando herramientas de generación de trazado. Este es el denominado estilo de diseño basado en *células estándar*. Sin embargo, en este laboratorio nos vamos a centrar en el denominado estilo *full custom*, en el cual el diseñador ha de realizar hasta los últimos detalles del trazado del circuito que se está diseñando. Dado que esta implementación es “*manual*”, se debe controlar la corrección del diseño de forma exhaustiva, confrontando la simulación realizada a nivel de esquemático con nuevas simulaciones más precisas. Por ejemplo, se pueden incorporar los efectos de las capacidades parásitas, que son desconocidas en las conexiones hasta esta etapa de diseño y sólo se han podido estimar de forma más o menos imprecisa.

El flujo de diseño de un trazado se presenta en la figura 9 junto a las herramientas encargadas de llevar a cabo cada una de las etapas. El primer paso es el dibujo de las geometrías que implementarán el circuito. El resto de pasos se dedicarán a verificar la correcta realización de este trazado. Se comienza con la verificación de las reglas de diseño (*DRC*) que nos da el fabricante. El siguiente paso hace una correspondencia entre el circuito trazado y el esquemático original para comprobar que se ha hecho lo que realmente se quería hacer (*Layout Vs. Schematic, LVS*). Finalmente la etapa de extracción de resistencias y capacidades parásitas genera una nueva vista donde se incorporan los elementos extraídos. Con esta información se pueden realizar simulaciones más precisas. Evidentemente, cualquier error detectado en cualquiera de las etapas de verificación del trazado nos hará volver hacia atrás y rediseñar la parte afectada por el error en el trazado.

4.1. Las máscaras y las reglas de diseño

El proceso de fabricación de un circuito consiste en plasmar, en diferentes fases, estructuras particulares sobre el silicio, indicando qué zonas se deben dopar, atacar, oxidar, etc. Esto se hace mediante las máscaras utilizando técnicas de fotolitografía. El número de máscaras varía dependiendo del proceso de fabricación particular que se siga. Para que todo el proceso se lleve a cabo correctamente es necesario cumplir los márgenes de tolerancia que imponen las máquinas involucradas en la fabricación de un circuito integrado. El fabricante facilita las denominadas *reglas de diseño* (*Design Rules*) que el diseñador del trazado debe cumplir de forma exacta para garantizar la correcta implementación del circuito.

El diseño de un trazado consiste en dibujar las máscaras necesarias para las sucesivas realizaciones del chip. Como veremos en seguida, el programa de trazados (*Virtuoso*) permite escoger

Nombre	Descripción
NTUB	Pozo de tipo N sobre sustrato P
DIFF	Área de difusión. Puede ser tipo P o tipo N dependiendo del dopante aplicado.
FIMP	Implantación iónica*.
POLY1	Primera capa de polisilicio.
NPLUS	Máscara para dopante tipo N*.
PPLUS	Máscara para dopante tipo P.
POLY2	Segunda capa de polisilicio.
CONT	Máscara para contacto metal-polisilicio, o metal-difusión.
MET1	Primera capa de metal.
VIA1	Contacto entre las capas de metal 1 y 2.
MET2	Segunda capa de metal.
VIA2	Contacto entre las capas de metal 2 y 3.
MET3	Tercera capa de metal.
VIA3	Contacto entre las capas de metal 3 y 4.
MET4	Cuarta capa de metal.
* Máscara de tipo negativo.	

Cuadro 1: Algunas máscaras disponibles en el proceso AMS

las máscaras con que se dibuja, y visualizarlas superpuestas y alineadas. Antes de comenzar el diseño de un trazado es importante conocer el proceso de fabricación que se va a utilizar y las reglas que impone. Nos invocarán generalmente cuáles son las dimensiones mínimas de las figuras geométricas que se pueden hacer con cada máscara y qué distancias ha de haber entre los distintos objetos, ya sean de la misma máscara o de diferentes.

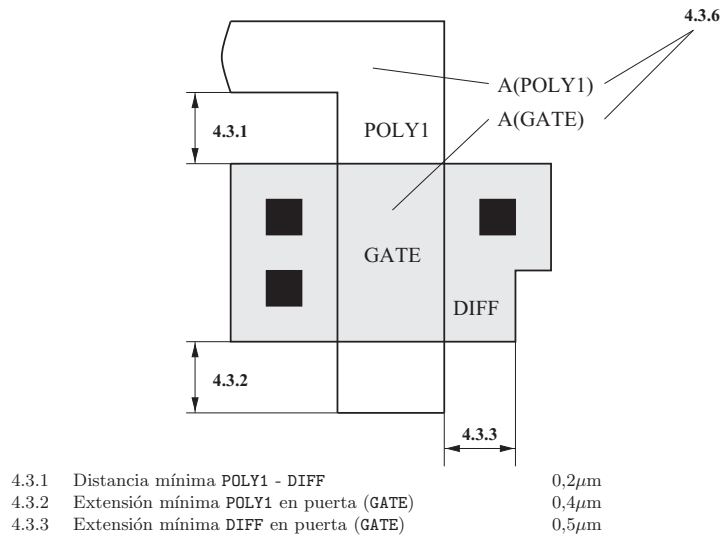
Cada máscara se identifica con un nombre nemónico y un color o patrón diferente. Por ejemplo, en la tabla 1 se han descrito algunas de las máscaras principales que se utilizarán en el proceso tecnológico que se usa en el laboratorio. El que una capa sea negativa quiere decir que el proceso tecnológico asociado se aplica al exterior de la geometría dibujada en la máscara.

Las reglas de diseño se expresan mediante números, como se ve en el ejemplo de la figura 10. En esta figura se ilustran las reglas relacionadas con el polisilicio de primer nivel (la capa más clara) y su interacción con las difusiones en un proceso de fabricación determinado.

La violación de las reglas de diseño hace imposible el proceso de fabricación, por lo que resulta fundamental utilizar la herramienta de verificación de las reglas de diseño *DRC* (Design Rule Check, ver sección 4.4). La utilización de esta herramienta y de transistores de librería parametrizables simplifica notablemente la labor del diseñador, puesto que no necesita memorizar las reglas de diseño.

4.2. Apertura de un trazado

Vamos a seguir utilizando la ventana principal de Cadence (*icfb*) y trabajar con la herramienta de forma similar a lo realizado hasta ahora. Para abrir un célula con el fin de editar su trazado se procede de forma análoga a la apertura de un esquemático, con la única diferencia



4.3.1	Distancia mínima POLY1 - DIFF	$0,2\mu\text{m}$
4.3.2	Extensión mínima POLY1 en puerta (GATE)	$0,4\mu\text{m}$
4.3.3	Extensión mínima DIFF en puerta (GATE)	$0,5\mu\text{m}$

Figura 10: Ejemplo de reglas de diseño

que la vista sea de tipo *layout*.

Una vez creada la vista *layout*, aparecerá en el entorno de trabajo una ventana del editor de trazados, el *Layout Editor*, como se ve en la figura 11. Esta ventana es muy similar a la de edición de esquemáticos. Dispone igualmente de barra de menú, barra de herramientas, área de trabajo y línea de estado. Adicionalmente, encima de de la barra de menú aparecen una serie de indicadores con información acerca de la posición del cursor respecto al origen o distancias respecto a un punto de referencia (medidas en micras).

Junto al editor de trazados aparece siempre otra ventana, la *Layer and Selection Window*, visible a la izquierda de la figura 11 con el título LSW. En esta ventana se listan todas las capas que se pueden utilizar al dibujar el trazado y permite su manipulación: selección de la capa con la que trabajar, visibilidad, etc. Esta ventana no se puede cerrar, al contrario que la de edición de trazado, que dispone de la opción **Close** en el menú **Window**.

4.3. Operaciones en la ventana de trazado

Al igual que sucedía en el entorno *Schematic Entry*, el *Layout Editor* permite activar los comandos de cuatro formas: mediante el menú, los iconos de herramientas, el ratón o el teclado. Recordamos que para anular una operación no hay más que pulsar **Esc**. Resulta interesante seguir la línea de estado, porque informa de la operación en curso o de qué acciones se pueden realizar con el ratón.

Podemos seleccionar tres tipos de objetos:

- figuras geométricas
- bordes
- ángulos



Figura 11: Ventanas de *Layout Editor* y *Layer and Selection Window* de *icfb*

Situando el ratón sobre alguna de estas entidades, ésta se resalta con un borde a trazos: un click con el botón izquierdo la selecciona, y el borde se resalta con línea continua. Por otro lado, al trazar un rectángulo teniendo pulsado el botón izquierdo del ratón, se seleccionan todos los objetos contenidos completamente en el rectángulo. Para “deseleccionar” se debe pulsar con el ratón en cualquier punto vacío del trazado o teclear CTRL-d. Como en el caso de los esquemáticos, la selección puede precede o seguir la activación de un comando.

Selección de la máscara

Antes de dibujar una forma es necesario seleccionar la máscara con la que se quiere trabajar. Para ello utilizamos la ventana selección de capas LSW, haciendo click con el botón izquierdo en el nombre elegido, que se trasladará inmediatamente a la parte superior de la ventana de selección de capas. Alguna de las capas de esta tecnología son las siguientes:

drw: drawing Utilizada para dibujar el circuito y que servirá para la fabricación física del circuito.



pin: pin Identifica la geometría de los pines que será visible desde jerarquías superiores (ver también la sección 2.2). Se emplea sobre polisilicio, difusiones, contactos y metales.

PIN P1/MX: etiqueta de pin Utilizada para especificar el nombre y posición de los pines (ver también la sección 2.2) sobre polisilicio, difusiones, contactos y metales.

En general se utilizan las máscaras de tipo `drw`, mientras que las de tipo `pin` y `PIN P1/MX`, se reservan para la especificación de los terminales de entrada y salida, y cuyo nombre debe ser idéntico al utilizado en el esquemático.

Haciendo click con el botón central en la ventana `LSW` se vuelve una capa invisible en la zona de trabajo; haciendo click una segunda vez se vuelve visible de nuevo. El efecto no es inmediato, se ve al redibujar la ventana de trabajo mediante el comando `Window ->Redraw`, o pulsando `f6`.

Realización de formas geométricas

<i>menú</i>	<code>Create -> Rectangle, Polygon</code>
<i>ratón</i>	botón izquierdo (para delimitar la forma geométrica)
<i>teclado</i>	<code>r, P</code>
<i>ícono</i>	 


En casi la totalidad de los casos las formas geométricas se realizarán mediante la composición de uno o más rectángulos. Una vez se ha activado el comando, pulsamos con el botón izquierdo del ratón en la zona de trabajo en uno de los vértices del rectángulo que se va a crear. Se lleva el ratón hasta el vértice opuesto y hacemos click de nuevo. Aparecerá un rectángulo con el color y patrón de la capa seleccionada.

Un polígono se puede conseguir de dos formas:

1. Utilizando el comando para crear polígonos. Insertamos de uno en uno los vértices del polígono pulsando con el botón izquierdo del ratón, terminando por el que fue primero.
2. Creando tantos rectángulos adyacentes (o superpuestos) como sean necesarios para formar la figura deseada. Seleccionamos todos y activamos el comando `Merge (Edit ->Merge`, o tecleamos `M`). Se obtendrá el polígono a partir de los rectángulos, apareciendo seleccionado. Para deseleccionarlo tecleamos `CTRL-d`.

Se pueden dibujar otras formas como elipses o formas con ángulos no rectos, pero no tiene sentido utilizarlas para nuestro trabajo.

Medida de distancias

<i>menú</i>	<code>Window -> Ruler, Clear Rulers</code>
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	<code>k, K</code>
<i>ícono</i>	






Para respetar las reglas de diseño es preciso conocer con exactitud las dimensiones de las figuras geométricas y sus distancias. La línea que está por encima de la barra de menú proporciona la posición del cursor del ratón respecto al origen, con una resolución de $0,1\mu\text{m}$, apareciendo con la denominación `X:` y `Y:`. También se puede ver en `dx:`, `dy:` y `Dist:` la distancia respecto al último punto de referencia que se ha indicado, siendo respectivamente la longitud en el eje `X`, en el eje `Y` y de la recta que une el punto de referencia y el actual.

Aunque son útiles, los datos de posición del ratón no son permanentes y hacen falta operaciones algebraicas para obtener el resultado buscado. Podemos obtener una indicación permanente de distancia en el trazado mediante el uso de *reglas* (`Ruler`), que proporcionan la distancia en micras entre dos puntos elegidos por el diseñador. Una vez se activa el comando, el primer click

del ratón selecciona el origen, y el segundo el extremo opuesto. La regla sigue el movimiento del ratón tras la selección del punto.

Una vez se ha enlazado, la regla no se puede eliminar con el comando habitual de borrado. Hay que llamar al comando **Clear Rulers**. No se pueden borrar las reglas de forma selectiva.

Modificación del trazado

<i>menú</i>	Edit -> Undo, Redo, Move, Copy, Stretch, Reshape, Delete
<i>ratón</i>	botón central -> Move, Copy, Delete botón derecho (para repetir el último comando)
<i>teclado</i>	u, U, m, c, s, R, del
<i>icono</i>	    

Todos estos comandos, excepto **Undo** y **Redo**, actúan sobre uno o más objetos de una o más capas. Como se ha explicado previamente, la selección se puede realizar antes o después de activar el comando.

Undo : anula la última operación realizada, devolviendo el trazado a su estado anterior.

Redo : repite el último comando.

Move : mueve uno o más objetos

Copy : copia uno o más objetos


Stretch : modifica las dimensiones de uno o más objetos. Si se activa el comando y después se selecciona un área rectangular, todos los objetos incluidos completamente en ese perímetro serán movidos, mientras que los bordes y ángulos que sean cortados por el perímetro se acortarán/alargarán.

Reshape : modifica la forma de un objeto.

Delete : borra uno o más objetos.

Para los comandos **Move**, **Copy** y **Stretch** si una vez pulsado por primera vez el botón izquierdo del ratón pulsamos **F3**, accederemos a un menú de opciones avanzadas.

Modificación de las propiedades




<i>menú</i>	Edit -> Properties...
<i>ratón</i>	botón central -> Properties...
<i>teclado</i>	q
<i>icono</i>	

Es posible modificar las propiedades de cualquier forma geométrica dibujada. Para ello invocamos el comando de edición de propiedades, seleccionamos el objeto y aparecerá una ventana que muestra el tipo de máscara y los extremos de la forma: para los rectángulos las esquinas (**Left**, **Right**, **Bottom** y **Top**), y para los polígonos la lista de vértices que tienen. Para los pines se añade información de conexiones (**Connectivity**), con la dirección del terminal (**input** o

output). Las modificaciones realizadas se confirman con el botón OK o Apply, mientras que el Cancel anula la operación.


Si se seleccionan varios objetos, aunque sean de máscaras diversas, las propiedades se muestran individualmente, siendo posible pasar de un elemento a otro a través de Next y Previous.

Pan y Zoom

<i>menú</i>	Window -> Zoom In, Zoom In by 2, Zoom To Grid Zoom Out by 2, Pan, Fit All
<i>ratón</i>	CTRL + ruleta
<i>teclado</i>	z, CTRL-z, CTRL-g, Z, tab, f
<i>icono</i>	  

En la vista trazado estas operaciones funcionan exactamente igual que en el caso del esquemático. Recordamos por su utilidad el comando Fit All, que hace que todo el circuito sea visible en la zona de trabajo.

Guardar

<i>menú</i>	Design -> Save, Save As...
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	f2
<i>icono</i>	

De vez en cuando conviene salvar el trazado que se está creando. La operación Save utiliza la información de la librería y célula que se abrieron al principio del trabajo. Save As permite modificar estos datos.

Creación de pines

Para poder emplear un trazado en otro trazado de un nivel jerárquico superior, es necesario especificar cuáles van a ser las interfaces o pines de entrada y salida del mismo. Además, para poder realizar automáticamente la correspondencia trazado-circuito (ver sección 4.5) es preciso que en las dos vistas estén definidos los mismos pines. Para el caso de la tecnología empleada en este laboratorio cada pin va a tener asociadas dos máscaras: pin que especifica la geometría del pin y PIN P1/MX que especifica la etiqueta y la red a la que se conecta el pin. Por ejemplo, para hacer un pin en la primera capa de metal, necesitamos una forma geométrica en la capa MET1 pin y una etiqueta en la capa PIN M1. Estas dos máscaras no tienen ningún significado para la fabricación del circuito integrado.


El primer paso para la creación de un pin es el diseño de la geometría del mismo que será visible por instancias jerárquicas superiores:

<i>menú</i>	Create -> Pin...
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	CTRL-p
<i>icono</i>	

En la ventana que aparece cuando se invoca el comando especificamos el nombre del pin (o de los pines, pues se pueden insertar más de uno por comando) y seleccionamos el tipo (input, output, ...) igual que hacíamos con el esquemático. El pin puede ser bien de tipo simbólico (tipo

por defecto) o bien se le puede elegir la forma (`shape pin`). Para la tecnología del laboratorio se va a utilizar solamente la opción `shape pin`. Una vez nos aseguramos que en la ventana LSW se ha seleccionado una máscara de tipo `pin`, hay que trazar los rectángulos que correspondan a las líneas de metal o polisilicio asociadas a las entradas o salidas del circuito. Es importante no tocar líneas diferentes con el mismo pin, pues se produciría un error en fases posteriores.

El segundo paso es la asignación de una etiqueta que identifica el nombre del pin o el nombre de la red global a la que está conectado (`vdd!` o `gnd!`, por ejemplo). Esta etiqueta será consultada por el programa encargado de la comprobación de reglas de diseño para la comprobación de reglas eléctricas (por ejemplo, esta etiqueta servirá para distinguir un poco conectado a alimentación de otro que no, que tienen reglas de diseño distintas).

<i>menú</i>	Create -> Label...
<i>ratón</i>	
<i>teclado</i>	I
<i>icono</i>	

En el menú emergente se dejan las opciones por defecto y se rellena el nombre la etiqueta correspondiente. Antes de hacer pulsar en el pin correspondiente para colocar ahí la etiqueta, hay que seleccionar la máscara correspondiente de tipo PIN P1/MX. La altura por defecto, puede ser un poco excesiva para una célula de pequeñas dimensiones, se sugiere cambiarla por un valor de 0.2.

4.4. DRC

El procedimiento de *Design Rule Check* permite verificar de forma automática las reglas de diseño, señalando en cada caso de violación la posición y el número identificativo de la regla violada. Cualquier diseño listo para fabricación debe pasar este test sin errores, pudiendo entonces proseguir con sucesivos controles y simulaciones.

Para activar el comando seleccionamos la opción `Run DRC...` del menú `Assura` en la ventana del trazado. Aparecerá una ventana que permite modificar varios parámetros. En nuestro caso es suficiente activar el `switch no_coverage`. Pulsamos OK y aparecerá una ventana de progreso diciendo que el proceso `Assura DRC` se está ejecutando. Espera unos segundos a que termine la ejecución. Al terminar se mostrará un mensaje preguntando si deseas ver los resultados de la ejecución. Haciendo click en `Yes`, aparecerá una nueva ventana donde se muestran las violaciones de reglas. Haciendo click en los errores y en las flechas izquierda y derecha, la ventana del trazado ampliará y centrará la vista en la zona del error. Este proceso hay que repetirlo hasta que se resuelvan todas las violaciones de reglas de diseño.

4.5. LVS

Una vez que el diseño está libre de errores DRC, se puede proceder a la comprobación automática de la correspondencia trazado-esquemático (en inglés *Layout versus Schematic*, LVS). Para realizar esta comprobación es necesario tener en la misma célula el esquemático y el trazado de la célula que se quiere comprobar.

Para activar el comando seleccionamos la opción `Run LVS...` del menú `Assura` en la ventana del trazado. Aparecerá una ventana que permite modificar varios parámetros. En nuestro caso dejaremos todas las opciones por defecto. En general la herramienta proporciona los parámetros necesarios para la verificación de forma automática, pero nunca está de más comprobar el

nombre de la librería y de la célula, o el tipo de vista. Pulsamos **OK** y aparecerá una ventana de progreso diciendo que el proceso **Assura LVS** se está ejecutando. Espera unos segundos a que termine la ejecución. Al terminar se mostrará un mensaje resumiendo los resultados obtenidos y preguntando si deseas ver en detalle los resultados de la ejecución. Haciendo click en **Yes**, aparecerán dos nuevas ventanas: una de ellas similar a la que aparecía en el **DRC**, donde se puede navegar sobre los errores y otra con opciones específicas de depuración de la comprobación **LVS**. Este proceso hay que repetirlo hasta que se consiga resolver todos los errores de **LVS**.

4.6. Extracción de Resistencias y Capacidades Parásitas

La extracción de resistencias y capacidades parásitas se utiliza para realizar una simulación más fiel que la realizada con el esquemático. Los valores de las capacidades parásitas y de las resistencias de las pistas y dispositivos no se conocen a nivel de esquemático, sino que se recogen del trazado.

Antes de realizar la extracción, hay que haber pasado la comprobación de **LVS**. Si este es el caso, volvemos a correr el **LVS Assura ->Run LVS...**, pero esta vez hay que activar el *switch* **resimulate.extracted**. Una vez que ha terminado el proceso **LVS**, ya se puede llamar al programa encargado de la extracción **Assura ->Run QRC...** Aparecerá una ventana con varios menús y pestañas, si se dejan las opciones por defecto el programa extraerá solamente las capacidades. En función del tamaño del circuito y de la precisión que requiramos, también puede ser interesante extraer las resistencias, en ese caso iremos a la pestaña **Extraction** y seleccionaremos **Extraction Type: RC**. Pulsamos **OK** y aparecerá una ventana de progreso diciendo que el proceso **QRC** se está ejecutando. Espera unos segundos a que termine la ejecución. Al terminar se mostrará un mensaje informando del fin de la ejecución, lo cerramos pulsando **Close**. Como resultado de todo este proceso, se ha generado una vista nueva llamada **av_extracted** que contiene todos los parásitos extraídos.

4.7. Simulación

Una vez hemos generado la vista **av_extracted** de la célula que queremos simular, volvemos a llamar al simulador *Analog Artist* como se describió en la sección 3. Procedemos exactamente como se hizo en la simulación del esquemático con una sola excepción: seleccionamos el comando **Setup ->Environment...** y añadimos dentro de la llamada **Switch View List** la palabra **av_extracted** antes que **schematic**. La simulación que sigue utilizará los parámetros parásitos para todas aquellas células que tienen una vista **av_extracted**, y se dejará la vista **schematic** para las demás.

4.8. Ejemplo

En esta sección vemos a describir paso a paso las operaciones necesarios para crear el trazado de un inversor, que van a ser muy similares a las expuestas para crear el esquemático.

1. En la ventana principal de *icfb* hacemos click en **File**; en el menú que aparece elegimos **New ->Cellview**
2. Insertamos en la ventana que se abre los datos **Library Name**, **Cell Name** y **View Name**, suponemos que se ha creado previamente la librería. En nuestro caso, utilizamos la librería

del primer ejercicio (`labo1`) seleccionamos la célula `inversor` y tecleamos la vista `layout` (o elegimos la herramienta *virtuoso* que nos elige esta vista directamente). Aparecerá la ventana `LSW` y el `Layout Editor`.

3. Para insertar los transistores MOS vamos al menú `Create` y seleccionamos `Instance`: se abre la ventana `Add Instance`, pulsamos en `Browse` y seleccionamos la librería `PRIMLIB`. De todos los componentes que aparecen utilizaremos `nmos4` de la categoría `Mosfets` (si está activa la opción que muestra categorías) y seleccionamos la vista `layout`. Con la selección, la ventana de `Add Instance` cargará las opciones correspondientes a la vista. Las opciones más interesantes para este laboratorio son la selección de la anchura y longitud del transistor, la creación o no de contacto de polarización (para este ejemplo activaremos esta opción) y la posibilidad de generar o no contactos en las difusiones (en el caso en que queramos poner varios transistores en serie). Una vez seleccionadas las opciones deseadas, situamos el ratón en la hoja de trabajo y pulsamos con el botón izquierdo en la posición deseada⁵.
4. Repetimos la operación precedente eligiendo `pmos4` en lugar de `nmos4`; pulsando `ESC` finalizamos la ejecución del comando de inserción. Si queremos ver todo lo que hemos hecho en la misma ventana pulsamos `f`.
5. Puede que no nos interese la orientación original de los transistores. En este caso los podemos girar con la opción `Rotate` que se ofrece dentro del menú `Edit ->Move`.
6. Ahora hay que conectar los transistores. Tenemos dos opciones: crear un rectángulo que una los dos puntos que hay que conectar o utilizar el comando `Path`. Vamos a utilizar este comando para unir las puertas de los transistores y crearemos rectángulos para conectar el resto. Los paths son conexiones definidas por una línea central y el parámetro anchura. Se pueden configurar más atributos (forma de esquinas, etc.) pero para nosotros nos basta con las opciones por defecto.
7. Para crear el path que conecte las puertas seleccionamos en primer lugar la máscara `POLY1 (drw)` en la `LSW`. El comando se activa en el menú `Create ->Path`, tecla `p`). En el cuadro de diálogo que aparece podemos cambiar la capa con la que vamos a dibujar el path, su anchura, etc. Para dibujar el path pulsamos en el centro de la pista que queremos conectar⁶, y vamos dibujando la unión mediante clicks sucesivos en los puntos donde deseemos hacer un giro. Es importante observar que la referencia la llevamos respecto al punto central del path. Conectamos las dos puertas de los transistores `p` y `n`, y pulsamos `Esc`.
8. Seleccionamos ahora la capa `MET1 (drw)` y trazamos los rectángulos necesarios (`Create ->Rectangle`, tecla `r`) para conectar los dos transistores entre sí. Se recomienda probar a ejecutar operaciones varias como `Copy`, dibujar polígonos en vez de rectángulos, etc.
9. Finalmente hay que crear los pines del inversor (ver sección 4.3). Seleccionamos la máscara `MET1 (pin)` (¡Ojo! es `pin`, no `drw`); llamamos el comando `Create ->Pin...`, escri-

⁵Para hacer visible el contenido de la célula, tenemos que especificar que queremos hacer visibles más niveles de la jerarquía. En el menú `Options ->Display` los parámetros `Display Levels ->Start`, `Stop` definen los niveles de la jerarquía que son visibles.

⁶Si nota que el ratón no le permite acceder al centro de la pista, tiene que cambiar la rejilla en el menú `Options ->Display` reduciendo los valores de `X Snap Spacing` y `Y Snap Spacing` por ejemplo a `0.025`.

bimos los nombres que queremos asignar a los terminales, seleccionamos **shape pin** marcando la opción **rectangle**, y dibujamos un rectángulo que corresponda al contacto de la entrada, la salida, la alimentación y masa. Para alimentación utilizaremos el nombre de red **vdd!** y para masa **gnd!**. A continuación seleccionamos la máscara PIN (**M1**), llamamos el comando **Create ->Label...** y volvemos a escribir los nombres de los terminales, colocando las etiquetas en sus lugares correspondientes.

10. Antes de guardar el trabajo, verificamos las reglas de diseño ejecutando **Assura ->Run DRC...** (No se debe olvidar activar el *switch no_coverage*) y hacemos la comprobación trazado-esquemático **Assura ->Run LVS...**. Si se ha cometido algún error es el momento de corregirlo.
11. Para poder simular el trazado, es necesario extraer las capacidades y resistencias parásitas del mismo. Para ello, primero volvemos a realizar la comprobación trazado-esquemático **Assura ->Run LVS...**, esta vez con el *switch resimulate_extracted*. Seguidamente se lanza el extractor **Assura ->Run QRC...**, que genera la vista **av_extracted**. Finalmente, abrimos la vista esquemática del test del inversor y llamamos al simulador con **Tools ->Analog Artist**, seleccionamos el comando **Setup ->Environment...**, añadimos dentro de la llamada **Switch View List** la palabra **av_extracted** *antes* que **schematic** y corremos la simulación.