

**Ingeniería Técnica de Sistemas Electrónicos.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y de Telecomunicación.
Laboratorio de Electrónica Digital.**

Práctica nº 3. Análisis de circuitos digitales II: simulación.

Esta práctica tiene como objetivo aprender el manejo de un simulador de circuitos electrónicos Circuit Maker, que se utilizará a lo largo de la asignatura como la herramienta básica de simulación. Circuit Maker es un simulador de circuitos electrónicos analógicos y digitales, aunque esta asignatura se centrará principalmente en simulación de circuitos digitales. Este simulador está orientado principalmente al diseño con elementos discretos, disponibles en catálogos comerciales de circuitos electrónicos. Los circuitos se editan gráficamente de forma sencilla e intuitiva mediante símbolos de los dispositivos conectados por cables. El simulador dispone de diversos elementos para aplicar señales (analógicas y digitales) y para observar las respuestas de forma sencilla y, en el caso digital, interactiva. También dispone de otras utilidades que permiten añadir nuevos modelos para los dispositivos soportados, o añadir nuevos elementos al catálogo (macros) diseñados en función de los dispositivos inicialmente disponibles.

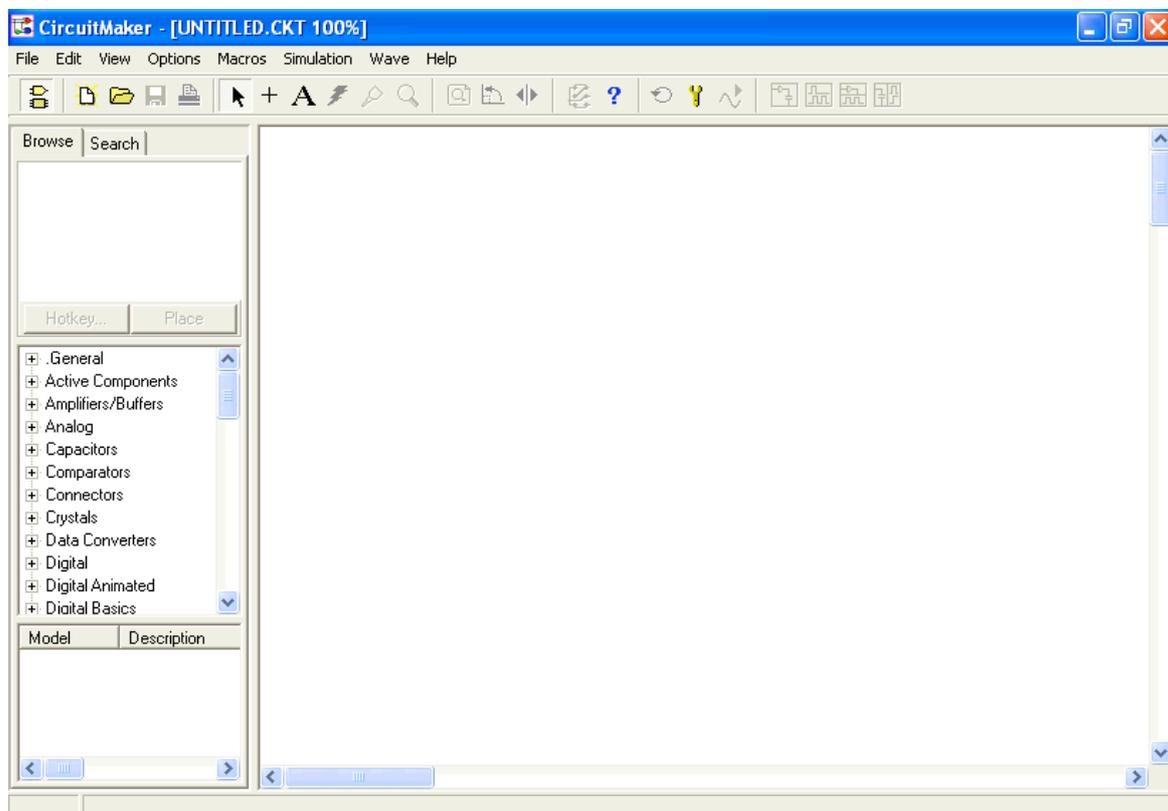
Circuit Maker tiene dos simuladores: analógico (o circuital) y digital (o lógica). El simulador analógico está basado en el simulador SPICE, y los resultados de simulación son variables físicas de tipo eléctrico: voltajes, intensidades y potencia. El simulador digital trabaja exclusivamente con señales de tipo lógico: 0, 1, etc, y realiza una discretización del tiempo en unidades (ticks). Durante las prácticas se trabajará preferentemente con el simulador digital. Aunque algunos dispositivos sólo admiten un tipo de simulación (por ejemplo, análogica en los transistores, digital en los circuitos generadores de pulsos lógicos), los circuitos lógicos que se utilizarán en esta asignatura (puertas lógicas, flip-flops, contadores, etc), son modelados mediante un código en el que se establece su comportamiento analógico en función de parámetros discretos (puntos críticos, tiempos de propagación, factores de carga, etc), por lo que se pueden utilizar en simulaciones digitales y en simulaciones analógicas.

En esta práctica se realizarán distintos ejercicios en los que se utilizarán los métodos y los comandos más usuales para la edición y la simulación de circuitos digitales, haciendo referencia en lo posible a algunas otras posibilidades del programa. Una descripción más extensa de Circuit Maker, sus dispositivos, comandos, modos de simulación y salidas gráficas se puede obtener de la ayuda interactiva de la herramienta o del manual del simulador disponible en el laboratorio.

Antes de empezar la práctica cada grupo debe crear un directorio o carpeta de trabajo donde se guarde el contenido de sus prácticas. Esta carpeta debe estar dentro de la carpeta EDIGITAL que se encuentra en el disco local C: del ordenador, y debe llamarse EDXXX, donde XXX corresponde con el grupo de prácticas (EDA03, EDB07, EDC10, ...). Dentro de la carpeta de trabajo deben crearse nuevas carpetas para cada una de las prácticas de nombre

PRX, donde X representa el número de la práctica. Para esta práctica se debe crear la carpeta PR3. Cada grupo dispondrá de un CD para hacer copias de seguridad del trabajo realizado, este CD permanecerá siempre en el laboratorio.

En el escritorio del ordenador de cada puesto de trabajo hay un icono CircuitMaker para acceso rápido a la herramienta. Para ejecutar CircuitMaker basta con hacer un doble-click sobre ese icono. El aspecto inicial de la herramienta será el que se muestra en la figura siguiente. La parte superior está dedicada a los menús en línea, y a los menús por iconos. El cuadro grande en blanco de la derecha contiene la ventana para editar el esquemático del circuito, y en el lado izquierdo aparecen paneles para la selección de los dispositivos del circuito, desde distintos catálogos (desde Browse) o mediante búsqueda (desde Search). Se puede eliminar este panel pulsando en el icono . Para salir del programa Circuit Maker, pulsar con el ratón sobre el comando *Exit* del menú File.



a) Simulación lógica de un circuito electrónico digital: puerta lógica 74LS37.

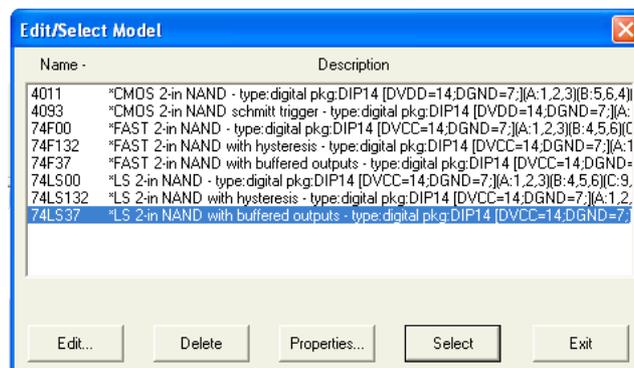
- Ejecutar CircuitMaker haciendo un doble-click sobre el icono de la herramienta CircuitMaker.
- Introducir un dispositivo en el circuito: una puerta NAND de 2 entradas. La forma más rápida de hacerlo consiste en situar el ratón en la ventana de esquemáticos y pulsar la tecla (hotkey) correspondiente al dispositivo (si está definida), el hotkey 5 corresponde al la puerta 74LS00. Al pulsar 5 aparece el símbolo de la puerta, pulsar ahora el botón izquierdo del ratón y el símbolo se fija en el esquemático. Si no se quiere situar el dispositivo, pulsar la tecla ESC (la tecla ESC aborta la operación de edición en curso, tanto en dispositivos, como en

cableado); si se quieren poner varios dispositivos del mismo tipo hay que activar opción *Auto Repeat* del comando *Schematic* del menú Options (fija dispositivos hasta que se pulsa ESC). Para observar los hotkeys asignados (o modificarlos), hay que seleccionar un elemento desde el catálogo de dispositivos y pulsar en la palabra *Hotkey*... Los hotkeys más usuales se irán utilizando a lo largo de esta práctica por ejemplo: 0 (Gnd), 1 (Vcc +5V), 2 (puerta NOT), del 3 al 8 (puertas lógicas de 2 entradas AND, OR, NAND, etc).

La selección de un dispositivo normalmente debe hacerse desde el catálogo de dispositivos (ventana Browse), por ejemplo para la NAND de 2 entradas: en la ventana de los catálogos de dispositivos buscar y expandir el submenú Digital Basics (puertas y flip-flops) pulsando con el ratón sobre el signo + (para eliminar la expansión pulsar en -), expandir de igual forma el submenú Gates, y hacer doble-click sobre 2-In NAND (o un click, elegir el modelo en la ventana inferior izquierda pulsando sobre él, y pulsar luego sobre *Place*), llevando el ratón a la ventana de esquemáticos. Otros menús y submenús adecuados para buscar circuitos digitales son Digital o el submenú Digital de Switches para fuentes y generadores de señales digitales, Digital by Function para dispositivos ordenados por operación sumadores, comparadores, etc, Digital by Number para dispositivos ordenados por número del catálogo, y Displays o Digital Animated para dispositivos que permiten observar respuestas lógicas.

Si no se conoce donde puede estar un dispositivo se puede buscar dentro del catálogo pulsando en *Search*. Se escribe la clave de búsqueda en *Name/Description* (Nand, por ejemplo), y se pulsa en *Find*.

- El símbolo de la puerta fijada mediante el hotkey 5 corresponde al modelo de un circuito determinado por defecto, al circuito LS00, pero puede asociarse a modelos de otros circuitos Para fijar su modelo al LS37 hacer doble-click en el símbolo de la puerta, en la ventana que aparece seleccionar el modelo LS37, pulsar en *Select* y pulsar en *Exit*.



- Guardar el circuito con el nombre NandTV.ckt en el directorio de trabajo PR3 de cada grupo usando el comando *Save as* del menú File (ó desde el icono correspondiente ). Cuando se hagan cambios que se quieran almacenar es conveniente guardar la información en disco cuanto antes. Para guardar los cambios hay que usar el comando *Save* de menú File, ó volver a pulsar en el icono .



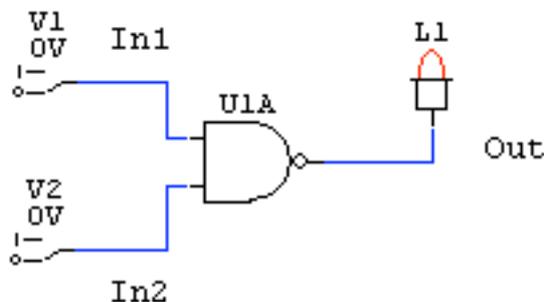
- Añadir al circuito dos switches lógicos. con la tecla hotkey s. Añadir un Display lógico con la tecla hotkey 9.

- Conectar las entradas de la puerta a los switches, y su salida al display. Entrar en modo Wire pulsando en el icono **+**. Realizar conexiones automáticas, pulsando en un terminal de un dispositivo, y sin soltar el ratón desplazarlo hasta el otro terminal de conexión, soltando el ratón.

Se pueden editar líneas de conexión de punto a punto a tramos horizontales o verticales, pulsando en cualquier punto de la ventana y desplazando el ratón. Se dibuja una línea horizontal o vertical, cada vez que se pulse el ratón se cambia el tipo de desplazamiento, así hasta que se haga doble-click en un punto (o se alcance una conexión de un dispositivo), con lo que la línea se fija en el diseño.

Una vez editadas, la forma de las líneas pueden cambiarse pulsando sobre ellas (o en un tramo de ellas) con el ratón en modo selección (pulsar en **↔**), y sin soltar desplazar el ratón.

- Situar etiquetas para las líneas de entrada y de salida del circuito. Entrar en el modo Label pulsando en su icono **A**. Pulsar en la ventana de edición cerca de una de las líneas de entrada de la puerta lógica y, en la ventana que aparece, introducir desde teclado el nombre In1. Pulsar cerca de la segunda línea de entrada e introducir el nombre In2. Pulsar cerca de la línea de salida e introducir el nombre Out. Volver al modo selección, pulsando sobre su icono **↔**, para abandonar el modo Label.



- Simular el circuito para comprobar la tabla de verdad. Seleccionar el modo de simulación digital (*Digital Mode*) desde el menú Simulation del menú en línea (cambian algunos iconos del menú). Pulsar en el icono de simulación **▶** (Run, o pulsar F10, o seleccionar *Run* en el menú Simulation), a hacerlo en la parte derecha de la pantalla aparecen las opciones de simulación digital (ventana Digital).

Fijar valores lógicos altos (5V) y bajos (0V) en los switches pulsando con el ratón sobre el switch, y comprobar el valor lógico de la salida (encendido 1, apagado 0). Situar el modo traza, pulsando sobre el icono  (o pulsar F11, o seleccionar *Trace* en el menú Simulation), y comprobar la tabla de verdad con los colores en las líneas: rojo 1, azul 0. Pulsar en el icono Pause  (o F10 o *Pause* en el menú Simulation) para detener la simulación. Pulsar en el icono de Reset  (o Ctrl+Q, o seleccionar *Reset* en el menú Simulation). El color verde indica una situación de alta impedancia.

También puede verse el valor de una línea en el modo *Probe*: pulsar sobre el icono  y situar el ratón sobre una línea del circuito, en especial cuando se esté simulando. Según el valor de la línea el cursor del ratón tomará el valor H (1 lógico), L (0 lógico), Z (alta impedancia) ó P (la señal contiene un pulso).

- Guardar el circuito: pulsar en el icono  o en el comando *Save* del menú File. Cerrar el circuito: pulsar en el comando *Close* del menú file.

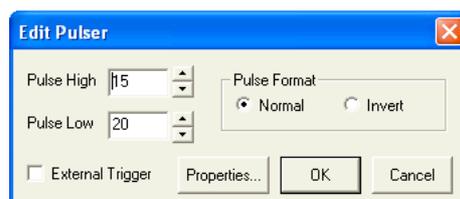
- Abrir un nuevo circuito: pulsar en el icono  (o usar el comando *New* del menú File). Copiar todo el circuito anterior a este circuito: usar el comando *Merge* del menú File, seleccionar el nombre del circuito anterior y pulsar en Abrir.

- Eliminar los switches del diseño. Seleccionar cada switch, pulsando sobre él (se pone en color rojo), y pulsar en la tecla Supr. Otra opción es usar el modo borrado: pulsar en el icono , y pulsar sobre los switches para borrarlos, al finalizar pulsar sobre el icono  para finalizar el modo borrado.

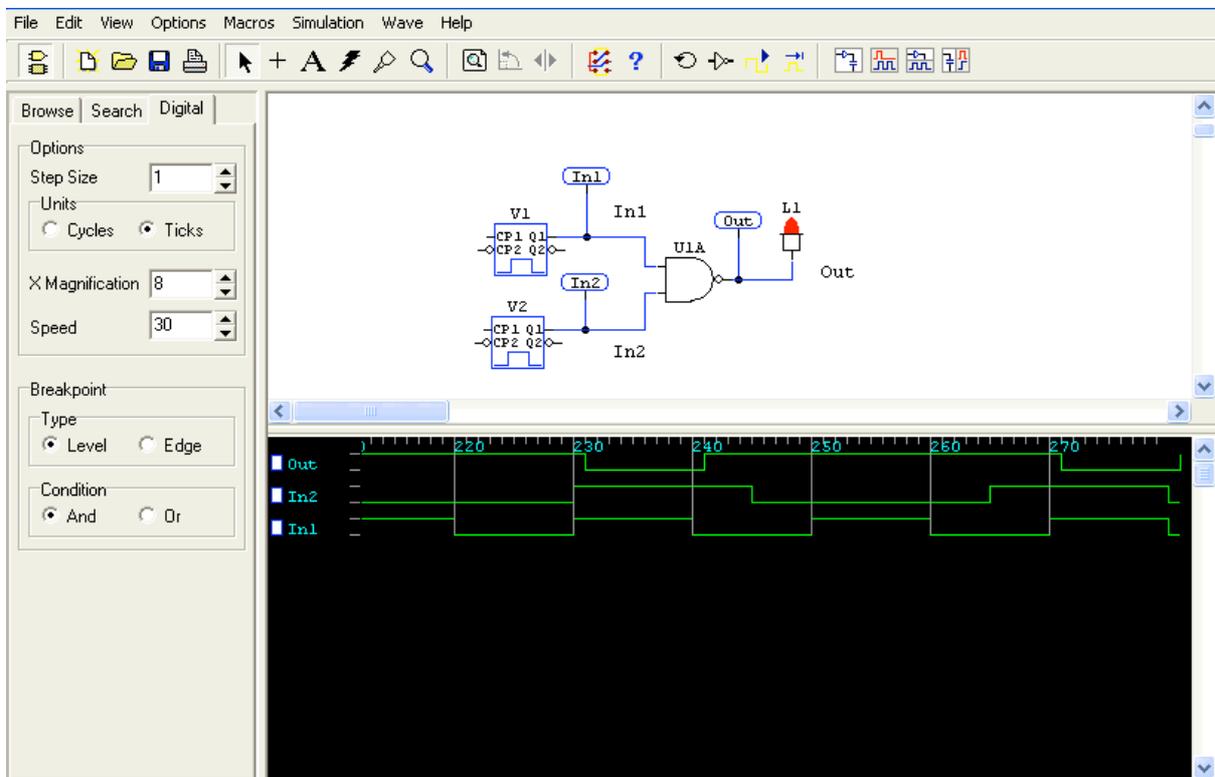
Se pueden seleccionarse varios elementos a la vez pulsando sobre ellos con el ratón manteniendo pulsada la tecla de las mayúsculas. También se puede seleccionar una zona del diseño pulsando con el ratón en la zona de edición y sin soltar, desplazar el ratón con lo que aparece un rectángulo rojo en pantalla; al soltar el ratón, todo el contenido del rectángulo queda seleccionado.

Todos los elementos seleccionados simultáneamente pueden borrarse mediante la tecla Supr. Los comandos del menú Edit operan sobre la zona seleccionada pudiendo eliminarla (*Delete*, *Cut*), moverla (*Move*), copiarla (*Copy* seguida de *Paste*), duplicarla (*Duplicate*), etc. Las zonas seleccionadas también pueden rotarse (icono  ó comando *Rotate*) o reflejarse como en un espejo según el eje vertical (icono  ó comando *Mirror*).

- Añadir al circuito dos generadores de pulsos (hotkey p). Programar las características del pulso: hacer doble-click sobre el generador. Situar en uno 10 unidades arriba y 10 abajo y en el otro 15 unidades arriba y 20 abajo. Conectar la salida Q1 de cada uno a las entradas de la puerta Nand.



- Situar SCOPES o puntos de medida, para comprobar el funcionamiento temporal de las señales (hotkey T). Situar un SCOPE cerca de cada entrada y de la salida. Fijar sus nombres respectivos a In1, In2 y Out: hacer doble-click sobre el dispositivo, introducir el nombre desde teclado y pulsar en OK. Conectar cada SCOPE a las entradas o salidas mediante un cable.
- Guardar el circuito con el nombre NandDsim.ckt. Usar *Save As* del menú File.
- Pulsar en uno los iconos de formas de onda para que aparece una ventana gráfica con tres filas, cada una correspondiente a cada uno de los SCOPES  (corresponden a las comandos *Schematic*, *Waveforms*, *Split Horizontal*, *Split Vertical* del menú View). De izquierda a derecha al pulsar sobre el primer icono se muestra en pantalla sólo la ventana de esquemáticos, al pulsar el segundo, se muestra sólo la ventana de formas de onda; el tercer y el cuarto icono muestran las dos ventanas anteriores divididas horizontal y verticalmente. Pulsar en el tercer icono.



Las filas pueden reordenarse pulsando con el ratón sobre el nombre, y sin soltar desplazar arriba ó abajo en las filas hasta la posición deseada, soltando entonces.

Se puede incluir una fila más de nombre Probe al activar el campo *Active Probe* del menú Simulation. En esta fila se muestra el valor del cursor cuando el modo Probe está activo (si no está activo el valor corresponde a alta impedancia).

En cada fila de simulación pueden aparecer tres valores: alto (1 lógico), bajo (0 lógico) y medio (alta impedancia).

- Pulsar en los iconos Run  y Pause  para que avance el tiempo de simulación. Comprobar que la salida de la puerta Nand cambia con un retraso de una unidad de tiempo (1 tick).

- Seleccionar la puerta pulsando sobre ella. Utilizar el comando *Set Prop Delays* del menú Edit, y fijar el tiempo de retraso de la puerta a 3 (3 ticks). Comprobar por simulación que el tiempo de retraso es ahora de 3 unidades. Para ver los tiempos de propagación asociados a cada puerta en la ventana de edición del circuito hay que activar la opción *Show Prop Delays* en el comando *Schematic* del menú Options.

- Pulsar en el icono Step  (o F9, o seleccionar *Step* en el menú Simulation) para avanzar la simulación por pasos sólo una unidad de tiempo. Pulsar en el icono Reset  para comenzar la simulación desde tiempo 0. Pulsar varias veces en Step para visualizar como avanza la simulación. Modificar el campo *Step Size* de la ventana Digital de opciones digitales de la izquierda de la pantalla. Situar su valor a 3 y observar cómo la simulación a pasos avanza 3 unidades. En la ventana Digital cambiar las unidades (Units) de Ticks a Cycles (1 ciclo = 10 ticks), y observar como se comporta ahora la simulación a pasos.

- Fijar un breakpoint (punto de parada) en simulación. En la ventana de simulación a la izquierda de los nombres de cada señal hay un pequeño cuadro en blanco. Pulsar con el ratón en el cuadro correspondiente a la salida de la puerta (Out) para que se fije su mitad inferior a color azul (breakpoint a valor 0). Continuar la simulación y comprobar que se para la simulación automáticamente al cumplirse las condiciones del breakpoint: Out a valor 0. Pulsando otra vez se fija la mitad superior a azul (breakpoint a valor 1), y pulsando otra vez el breakpoint desaparece.

El breakpoint también se puede poner por flanco (pulsar sobre *edge* en lugar de *level* que corresponde al caso anterior), en la ventana Digital. Al hacerlo el valor bajo en el cuadro blanco significa que la simulación se detiene al encontrar un flanco negativo, y con valor alto se detiene en flanco positivo. Probarlo sobre el ejemplo.

Cuando hay varios breakpoints se puede indicar que la condición de parada en la simulación se cumpla cuando se cumplen a la vez todas las condiciones (And, por defecto) ó cuando se cumple sólo una de ellas (pulsar con el ratón en Or).

Eliminar el breakpoint.

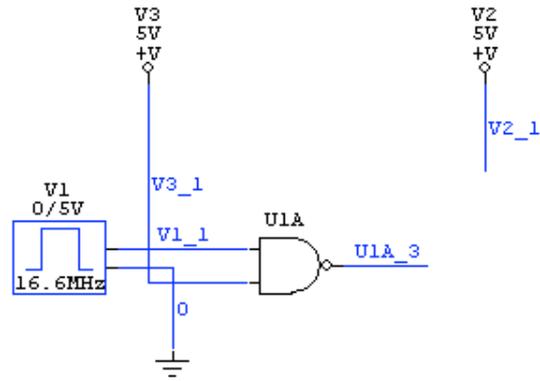
- Simulando el circuito, comprobar el efecto de cambiar en la ventana Digital los valores de la resolución en pantalla (*X Magnification*, puede tener valores entre 1, la menor resolución y 100, la mayor resolución) ó disminuir la velocidad de ejecución (*Speed*, puede tomar el valor entre 1, la más lenta, y 30, la más rápida).

- Guardar el circuito con el comando *Save* del menú File y cerrar (*Close*) el circuito.

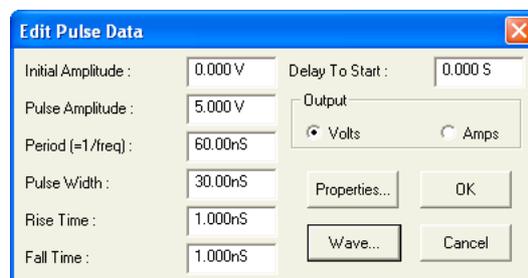
b) Simulación analógica de un circuito electrónico digital: puerta lógica 74LS37.

- Abrir un nuevo circuito (comando *New* del menú File).

- Introducir en él una puerta 74LS37 como en los apartados anteriores, una tensión de tierra (hotkey 0), dos tensiones de alimentación +V de 5 voltios (hotkeys 1), y una fuente generadora de señal (hotkey g). Para realizar una simulación analógica es obligatorio introducir el dispositivo de tierra.

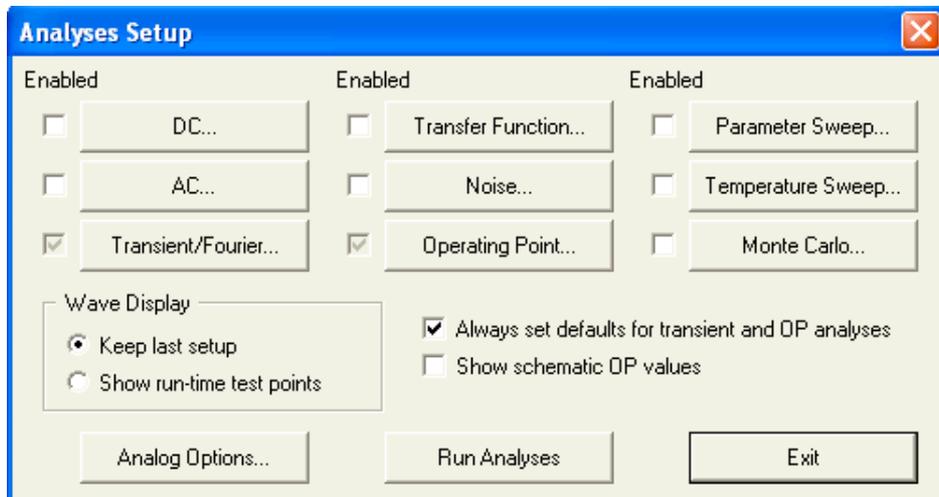


- Conectar una entrada de la puerta a una de las tensiones de alimentación (valor no controlante), y la otra a la salida del generador de señal (al pin superior) cuyo otro terminal (pin inferior) se conecta a tierra. Conectar la salida de la puerta a un cable dejando el otro extremo del cable sin conectar (utilizar el modo manual de conexión: doble-click para finalizar la línea). Hacer lo mismo con la otra fuente de alimentación; además, editar dicha fuente haciendo doble-click sobre ella, en la ventana que aparece (*Device Properties*) fijar el valor del campo *Bus Data* a **DVCC**; (no olvidar incluir el punto y coma). Esto hace que esta fuente sea físicamente la tensión de alimentación de la puerta NAND.
- Ejecutar el comando *Set Designations...* del menú Edit. Esta orden genera automáticamente el nombre de los elementos y la numeración de los nudos para la simulación analógica. Elegir la opción *All*. El nombre de los elementos aparece en pantalla (V1, V2, V3, U1A). Si se desea ver el nombre de los nudos hay que activar la opción *Show Node Names* del comando *Schematic* del menú Options (desactivar para que no se visualicen).
- Editar el generador de señales: hacer doble-click en él. Pulsar en *Wave...* para cambiar la forma de onda (sinusoidal por defecto), y pulsar en la opción *Pulse...*, para indicar que la fuente corresponde a un pulso. Indicar los datos del pulso en pantalla: pulso entre 0 y 5 volts, 60 ns de periodo, 30ns de anchura de pulso, y 1ns de tiempos de subida y bajada. Pulsar en *Properties...*, para leer el nombre de la fuente (en el campo Designation), nombre que se utilizará para hacer un análisis de tipo DC (se analiza el circuito frente al cambio de valores de una fuente de tensión o de intensidad). Pulsar en OK para volver a la ventana de esquemáticos.



- Guardar el circuito con el nombre *NandAsimTTL.ckt* con el comando *Save As* del menu *File* o con el icono .

- Seleccionar el modo de simulación analógico: pulsar sobre el comando *Analog Mode* del menú Simulation.
- Activar el comando *Analyses Setup* del menú Simulation (o pulsar el icono , o pulsar F8). Al hacerlo se abre una ventana con las distintas opciones de simulación analógica que se pueden activar.



Por defecto, se hace un cálculo del punto de trabajo (Operating Point) y una análisis transitorio (ó temporal, Transient/Fourier), bajo unas condiciones que calcula directamente el simulador. Para la realización de la práctica se debe mantener activa la opción *Always set defaults for transient and OP analyses*. Habilitar además un análisis en continua DC, en el que se variará el valor de la tensión aplicada a una entrada de la puerta NAND, pulsando con el ratón en su *Enabled* correspondiente.

Al pulsar en *Analog Options* se abre una ventana en la que aparecen los parámetros actuales del simulador analógico SPICE de Circuit Maker, así como los valores actuales de las fuentes de alimentación de los circuitos (DVCC ó DVDD a 5 voltios por defecto) y las medidas que se van a recoger al hacer la simulación. Para esta práctica no hace falta cambiar ningún valor, así que pulsar en Cancel.

Pulsar con el ratón sobre *DC...*, para programar las características del análisis en continua: el simulador debe efectuar un barrido en continua con los valores aplicados por el generador de pulsos (tensión de entrada). Habilitar la fuente primaria (activar *Enabled*) seleccionando el nombre del generador en el campo *Source Name*: bajo Primary. La fuente debe tomar valores entre 0 (campo *Start Value*) y 5V (campo *Stop Value*) con un paso (*Step Value*) de 0.001 voltios. Pulsar en OK.

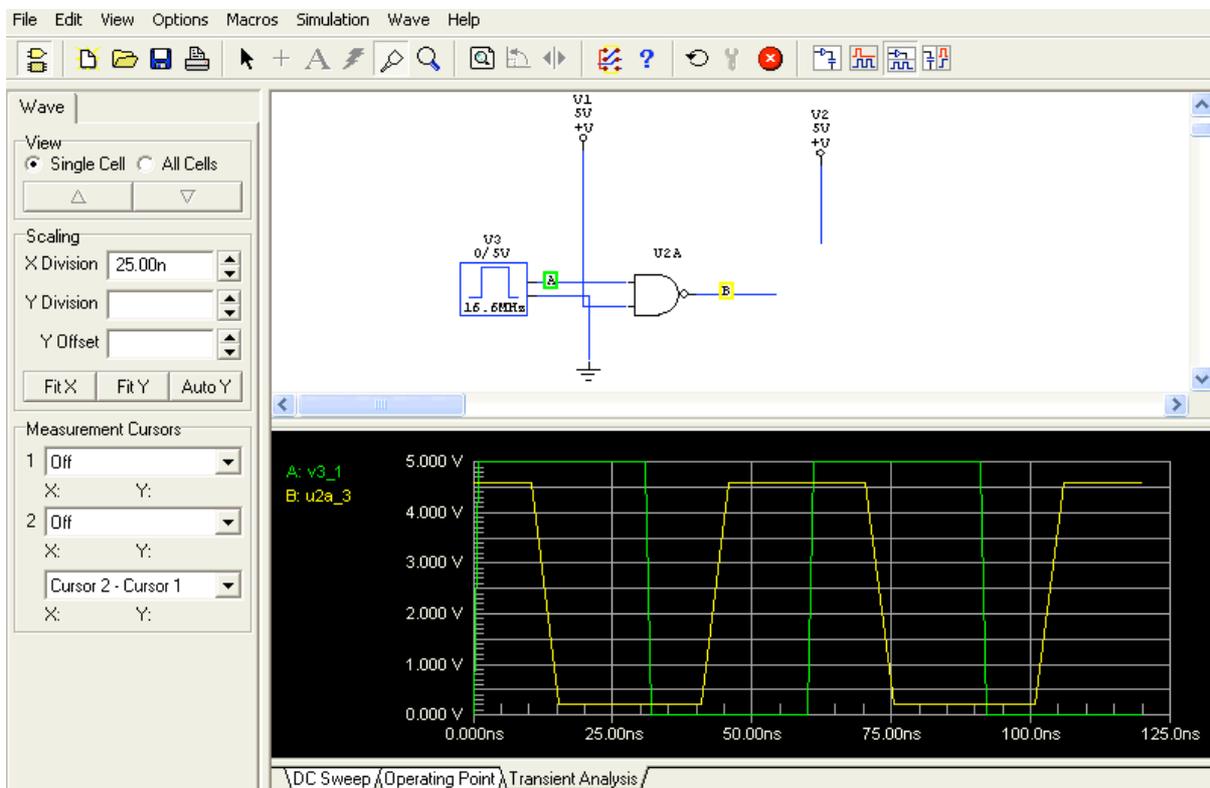
Pulsar con el ratón sobre *Transient/Fourier* para programar las características del análisis temporal, que servirá para medir los tiempos de propagación de la puerta. La mayoría de los campos no se pueden modificar, ya que está habilitada la opción para que tomen los valores por defecto. Cambiar la variable *Number of cycles*: a valor 2. Pulsar OK.

- Pulsar en Run Analyses para realizar la simulación (o bien pulsar en *Exit*, volver a la ventana de esquemáticos y pulsar el icono ). El icono  permite ejecutar la simulación

analógica en cualquier momento utilizando las características de programación que estén fijadas en ese momento en los campos de *Analyses Setup*.

Acabada la simulación, el programa vuelve a la ventana principal en formato Split Horizontal. En las ventanas de formas de onda se puede analizar los resultados de la simulación. El programa queda en estado de simulación en modo Probe: el cursor del ratón aparece como ; al pulsar con él sobre una línea el resultado de su simulación aparecerá en la forma de ondas activa en ese momento. Para abandonar el modo simulación y volver al funcionamiento normal pulsar en el icono . Para volver al modo simulación pulsar en .

En la figura siguiente se muestran unos resultados de simulación (análisis transitorio), en la parte izquierda de la pantalla aparece una ventana Wave con opciones para el control de la pantalla de formas de onda. Más opciones se pueden encontrar en el menú en línea Wave.



- Analizar los resultados de la simulación en modo Operating Point. Seleccionar con el ratón ese modo pulsando en el indicador correspondiente (*Operating Point*) que se encuentra bajo la ventana de formas de onda. Para realizar medidas pulsar con el ratón en modo Probe sobre el punto donde se quiera medir. Antes de pulsar, el cursor del ratón muestra el tipo de medida que se va a realizar: P (potencia), V (voltaje), I (intensidad). Hay otros tipos de medidas pero en esta práctica sólo se usarán estos tipos. Para medir potencia hay que pulsar sobre el interior de una fuente de señal, para medir intensidad hay que pulsar sobre el pin de salida de una fuente de señal, y para medir voltaje hay que pulsar sobre un cable de conexión.

Al pulsar sobre un punto de medida aparece el resultado en la ventana de formas de ondas, si se pulsa en otro punto las medida anteriores desaparecen y aparece la nueva medida. Para situar nuevas medidas en la ventana sin borrar las anteriores, pulsar sobre los nuevos puntos

de medida con la tecla de mayúsculas pulsada. Si se quiere eliminar una única medida de la ventana, pulsar con la tecla mayúscula pulsada sobre el punto de medida.

Los valores obtenidos por simulación se muestran en la ventana de formas de onda: DC bias, DC Average, AC RMS, en esta práctica hay que considerar sólo el valor DC bias.

Medir los siguientes puntos (tener en cuenta que en este modo la salida del generador de pulsos está a 0V): voltaje en la salida (V_{oh}), intensidad de la fuente de alimentación que se conecta a una entrada de la puerta Nand (I_{ih}), intensidad en la salida del generador de pulsos (I_{il}), intensidad en la salida de la fuente de alimentación que opera como V_{cc} (I_{cch}) y potencia disipada en las tres fuentes.

- Analizar los resultados de la simulación en modo DC. Seleccionar con el ratón ese modo pulsando en el indicador *DC Sweep* que se encuentra bajo la ventana de formas de onda.

Medir sobre la salida de la puerta lógica para obtener la VTC del circuito. Situar la pantalla para ver sólo la forma de onda pulsando en el icono . En la ventana Wave, se pueden activar dos cursores para tomar medidas en las gráficas. Seleccionar el cursor 1 y asignarle el nudo de salida de la puerta Nand (el único valor disponible aparte de Off): aparece un cursor de nombre 1 en la ventana de formas de onda. Pulsar sobre el 1 con el ratón y, sin soltar, mover el ratón horizontalmente por encima de la gráfica: el cursor sigue a la gráfica, y en la ventana Wave aparece el valor (X, Y) del punto de la gráfica dónde está el cursor. Medir con ayuda del cursor los puntos críticos de la VTC.

La zona de medida puede ampliarse haciendo Zoom sobre una parte de la gráfica: pulsar con el ratón, y arrastrar sin soltar, formando un rectángulo en pantalla (conviene que por encima y por debajo de los límites horizontales de la gráfica), soltar y esa zona se muestra en la pantalla de formas de ondas. Para recuperar la forma de ondas original pulsar el comando *Fit Waveforms* del menú en línea Wave.

Situar la pantalla en modo Split Horizontal pulsando el icono , y medir ahora la intensidad en el generador de pulsos, pulsar otra vez en , utilizar el comando *Fit Waveforms* del menú en línea Wave por seguridad, y obtener de la gráfica los valores I_{il} ($V_{in} = 0V$) e I_{ih} ($V_{in} = 5V$) con ayuda del cursor.

Realizar el mismo proceso con la intensidad de la fuente de alimentación que opera como V_{cc} y medir I_{ccl} ($V_{in} = 5v$) e I_{cch} ($V_{in} = 0v$).

- Analizar los resultados de la simulación en modo temporal. Seleccionar con el ratón ese modo pulsando en el indicador *Transient Analysis* que se encuentra bajo la ventana de formas de onda. Situar en la ventana de formas de onda los voltajes correspondientes al pulso de entrada y a la salida (pulsar sobre los cables de conexión del generador de pulsos a la entrada de la puerta Nand y, con la tecla mayúscula pulsada, sobre el cable conectado a la salida de la puerta). Colocar la pantalla en modo Waveforms (pulsar en ). En pantalla se deben mostrar correctamente dos ciclos completos de la señal de entrada, si no es así pulsar el comando *Fit Waveforms* del menú en línea Wave.

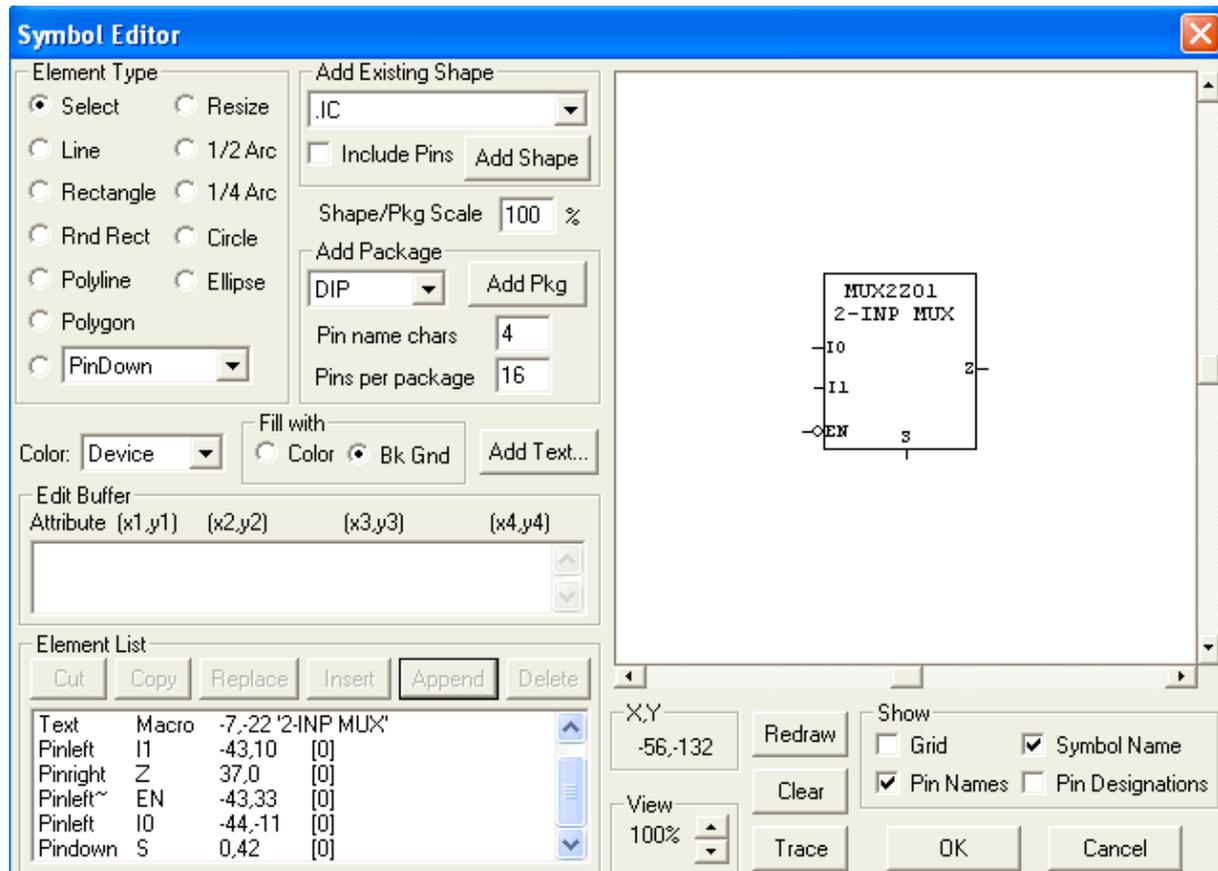
Activar los dos cursores en la ventana Wave, asociar el primer cursor a la tensión de entrada, y el segundo cursor a la tensión de salida. Mover los cursores en cada gráfica (arrastrarlos con el ratón, pulsando sobre su número) para situarlos de forma que se pueda medir

correctamente los tiempos de propagación T_{phl} y T_{plh} (del 50% de la entrada al 50% de la salida). Realizar Zoom de la zona de medida para mayor comodidad y mejor precisión, ajustando los cursores si fuese necesario. Los tiempos de propagación pueden medirse directamente en el campo *Cursor2* – *Cursor1* de la pantalla Wave. Realizadas las medidas volver a la pantalla de esquemáticos (pulsar en el icono ) y finalizar la simulación (pulsar en el icono )

- Guardar los cambios (orden *Save* del menú File ó icono )

c) Edición de una macro. Diseño de un multiplexor de dos entradas.

- Abrir un nuevo circuito (comando *New* del menú File). Seleccionar el comando *New Macro* del menú Macro. En la ventana que aparece indicar el nombre MUX2xxx, donde xxx representa el nombre del grupo (MUX2A03, MUX2C07, ...) y pulsar en OK. Aparece la ventana de definición de símbolos. En la siguiente figura, la ventana aparece con un símbolo ya editado.



Este menú permite definir el esquemático correspondiente al circuito. La ventana de edición es el cuadro grande de la derecha. En la parte de la izquierda aparecen las opciones para incluir elementos (Element Type: pines, rectángulos, líneas; Add Existing Shapes: símbolos propios de Circuit Maker), o modificarlos (Element List: elementos situados en el esquemático, que se pueden borrar, copiar, etc; Edit Buffer: permite cambiar las características de un elemento de la figura).

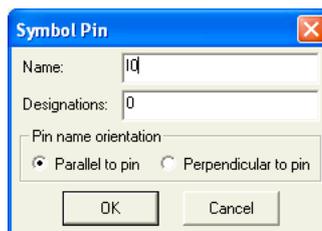
- Dibujar un símbolo basado en un rectángulo: activar *Rectangle*, situar el ratón en un punto de la ventana de edición y, sin soltar, desplazar el ratón hasta tener el rectángulo formado, soltando ahora. Al construir el rectángulo hay que tener en cuenta que su tamaño en la ventana es el que se utilizará en la ventana de esquemáticos de un diseño, por lo que no debe ser ni demasiado grande ni demasiado pequeño. Si se desea eliminar el rectángulo, pulsar en *Delete* de *Element List*, y editar un nuevo rectángulo.

- Dibujar los pines de entrada y salida. Activar *Pin*, pero seleccionar en el recuadro *Pinleft* para situar dos pines izquierdos en el lado izquierdo del rectángulo para las entradas de datos I0 e I1 del multiplexor. Cada vez que se pulse en la ventana de edición se va a fijar un pin. Pulsar sobre el lado izquierdo del rectángulo, e indicar el nombre del pin (I0 ó I1) que debe situarse *Parallel to pin*.

Seleccionar *Pinleft~* y situar un pin sobre el lado izquierdo del rectángulo de nombre E (enable, activo bajo, fija la salida a 0 si está inactivo) que debe situarse *Parallel to Pin*.

Seleccionar *Pinright* y situar un pin sobre el lado derecho del rectángulo de nombre Z (salida) que debe situarse *Parallel to Pin*.

Seleccionar *Pin* y situar un pin sobre el lado inferior del rectángulo de nombre S (selector) que debe situarse *Perpendicular to Pin*.



- Activar el campo *Pin Names* en *Show*, para que se vea el nombre de los pines en el esquemático.

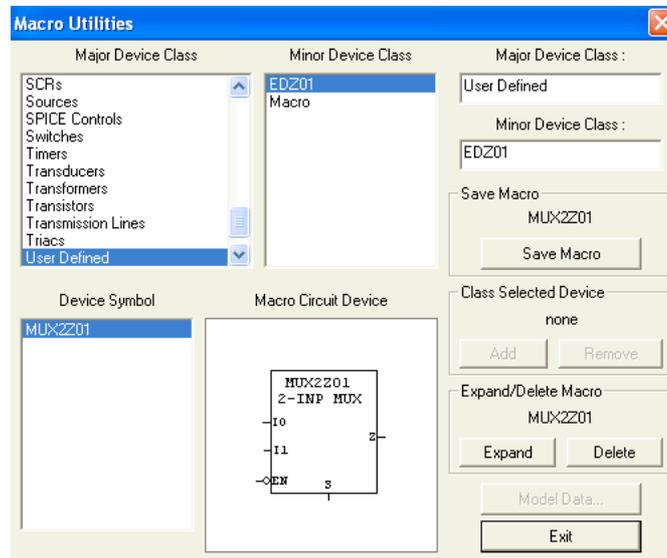
- Pulsar sobre *Add Text*, para incluir el nombre 2-IN MUX en el esquemático. Situarlo dentro del rectángulo, en la parte superior y más o menos centrado.

- Una vez fijados más o menos los componentes en el esquema se puede cambiar el dibujo, añadiendo nuevos elementos, borrando o cambiando la posición los ya existentes, hasta que quede de un tamaño ajustado, y con los pines correctamente situados. Los elementos del dibujo se seleccionan activando la opción *Select* de *Element Type*, y pulsando en pantalla sobre el elemento, o pulsando en su definición en la ventana *Element List*.

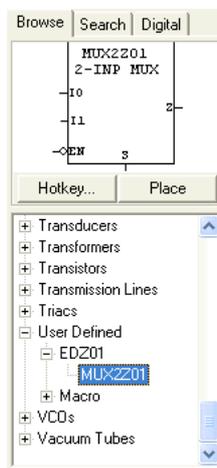
Si se quiere modificar el tamaño del rectángulo hay que activar *Resize* en *Element Type*, pulsando ahora sobre las esquinas del rectángulo se puede cambiar su tamaño. Si se quieren mover el rectángulo o los pines, o los nombres del esquemático (nombre de la macro y texto) activar *Select*, pulsar con el ratón sobre el elemento, desplazar y soltar.

- Finalizado el dibujo, pulsar *OK*. Situar el símbolo en la ventana *Macro Circuit: MUX2xxx**. En esa ventana realizar el diseño del multiplexor de dos entradas con enable activo bajo en base a puertas lógicas TTL, conectarlas entre ellas y conectar las entradas I0, I1, E, S y la salida Z del símbolo MUX2 a las líneas correspondientes en el circuito diseñado con puertas lógicas.

- Ejecutar el comando *Macro Utilities* del menú Macro, para situar la macro en el catálogo de dispositivos. Seleccionar como Mayor Device Class, la ya existente User Defined (buscarla en la ventana de Major Device Class y pulsar sobre ella con el ratón), y como Minor Device Class escribir desde teclado en la casilla correspondiente el nombre EDxxx, donde xxx es el nombre del grupo de prácticas. Pulsar ahora en Save Macro.



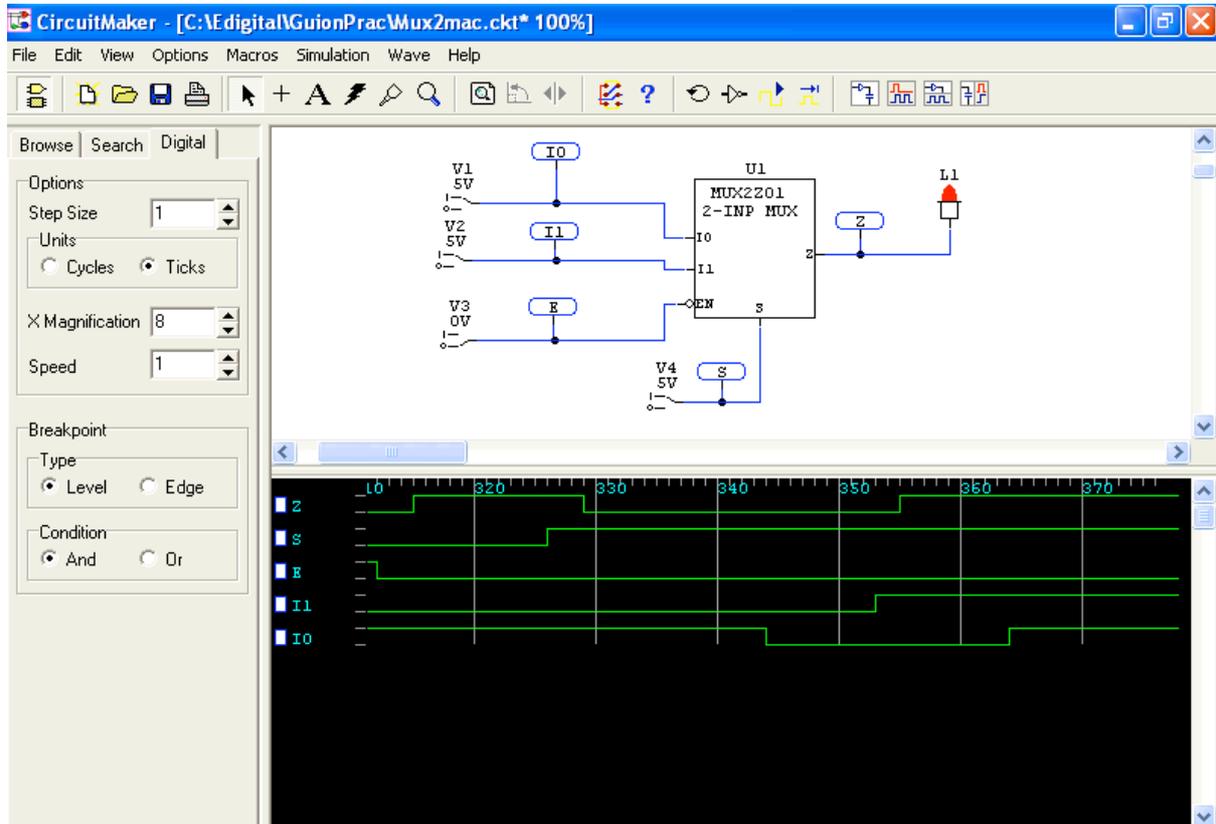
Se vuelve al funcionamiento normal de CircuitMaker, donde se dispone de una ventana para edición de esquemáticos. Situar en ella un elemento del tipo MUX2xxx. El elemento se puede localizar en el catálogo de dispositivos en el submenú EDXXX del menú User Defined.



Una vez guardada la macro se puede editar y cambiar su contenido y su símbolo. Situar una macro en un diseño, seleccionarla pulsando sobre su símbolo y ejecutar el comando *Expand Macro* del menú Macro. Se limpia la pantalla y aparece la macro expandida en puertas, donde se puede cambiar la operación interna de la macro, cambiando dispositivos y conexiones. Si ahora se hace doble-click sobre el símbolo de la macro, y se pulsa en *Symbol...* se puede cambiar el esquemático de la macro.

- Añadir switches, displays y otros dispositivos que permitan verificar el funcionamiento del circuito, y simularlo de forma lógica encontrando su tabla de verdad.

- Añadir SCOPES, activar la forma de onda y comprobar los tiempos de propagación de la macro. En función de la estructura interna del circuito encontrar el camino de propagación crítico, fijar los valores de las entradas que permiten activar ese camino crítico y comprobar por simulación que se obtiene el mayor tiempo de propagación.
- Guardar el circuito con el nombre Mux2mac.ckt. Usar *Save As* del menú File o el icono , y cerrar (*Close* en el menú File) el circuito.

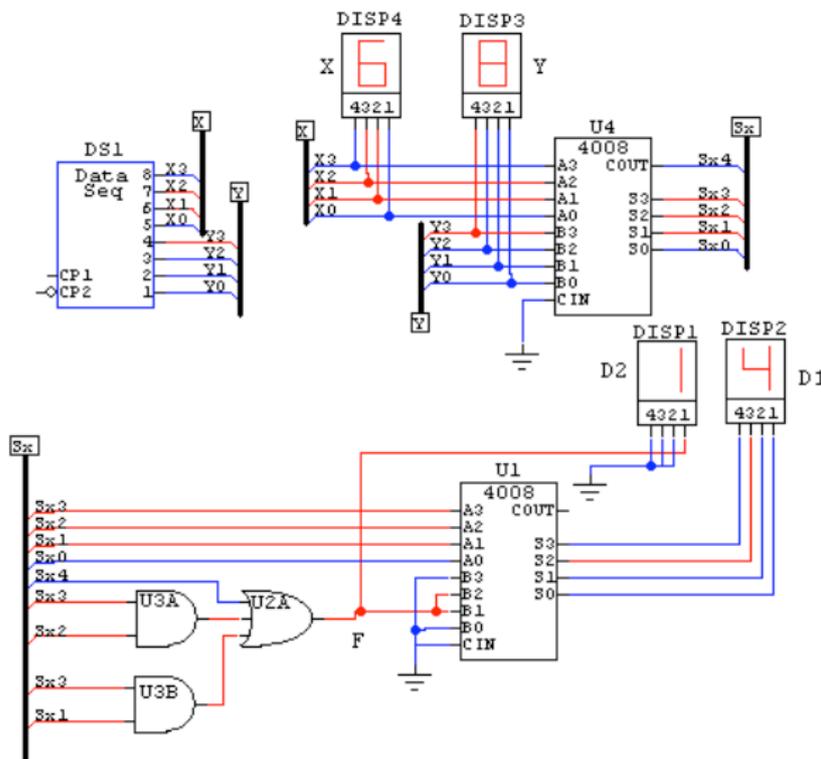


d) Simulación de un circuito combinacional.

Diseño de un circuito combinacional utilizando como base sumadores 4008 y puertas lógicas. El circuito a diseñar y simular es un sumador de dos dígitos en código NBCD X e Y (con valores entre 0 y 9); el resultado estará formado dos dígitos NBCD D2 y D1: D2 puede tomar valores 0 ó 1, y D1 valores entre 0 y 9. La operación que debe realizar el circuito es $X + Y = (D2 D1)$, valor máximo $9 + 9 = 18$.

El diseño se realiza sumando los números con un sumador binario (4008), produciendo el resultado S_x en 5 bits ($S_x4S_x3S_x2S_x1S_x0$) = (CoutS3S2S1S0), si S_x es menor o igual que 9 se obtiene directamente la salida en NBCD (sumarle 0 con otro 4008), si el resultado S_x en binario es mayor que 9 hay que sumar 6 con otro 4008 para obtener el resultado en BCD. La función lógica F que determina si la suma es mayor o igual que 9 es $F = \text{Cout} + S_3 S_2 + S_3 S_1$. Luego se requieren dos 4008 y un circuito combinacional que calcule cuando el resultado de la suma binaria es mayor que 9. En la siguiente figura muestra aproximadamente como debe quedar el esquemático del circuito.

- Abrir un nuevo circuito (comando New). Seleccionar el sumador 4008 en el menú de dispositivos Digital by Number. Situar dos sumadores 4008 en la ventana de edición. Fijar las puertas lógicas, localizándolas en el submenú Gates del menú Digital Basics, eligiendo puertas del modelo 40XX (MOS).
- Seleccionar un generador de secuencias de datos (hotkey G). Este dispositivo permite generar una secuencia de señales lógicas en las 8 salidas 8-1 (8 MSB, 1 LSB). La programación del elemento se genera mas adelante. Los 4 bits más significativos (8-5) se utilizarán para generar valores para el operando X de la suma, y los cuatro menos significativos (4-1) para el operando Y.



- Guardar el circuito con el nombre SumBCD.ckt. Usar *Save As* del menú File o el icono . Recordar guardar los cambios con el comando *Save* del menú File (o con el icono ).
 - Generar buses para conectar el circuito. Para crear un bus situarse en modo de conexión, pulsar donde se quiere situar el bus con la tecla de las mayúsculas (tecla SHIFT) pulsada, desplazar el ratón y hacer doble-click para finalizar el bus. Aparece una ventana donde hay que indicar el nombre del bus para referenciarlo en otras partes del circuito. Todos los buses con el mismo nombre corresponden al mismo bus.
- Crear un bus de nombre X al que se conectan las salidas más altas (5-8) del generador de secuencia de datos (operando X). Para realizar la conexión hay que conectar un cable normal entre un pin de salida del generador y el cable del bus; al conectar se pide que se introduzca un nombre para el cable dentro del bus: nombrar de X0 a X3 las conexiones con el bus de las salidas 5 a la 8. Crear un bus de nombre Y al que se conectan las salidas de 1 a 4 con nombres de Y0 a Y3, respectivamente.

Crear otros dos nuevos buses X e Y (contienen a misma información que los anteriores buses X e Y). Conectar el bus X con la entrada A del primer sumador, conectando las entradas A3-A0 del sumador al bus mediante líneas de nombres X3-X0. Realizar la conexión equivalente para el bus Y conectándolo a la entrada B del sumador. En realidad, se están conectando las entradas del sumador a las salidas del generador de secuencias de datos.

Crear un nuevo bus de nombre Sx. Conectar las salidas del primer sumador: COUT y S3-S0 al bus, dándoles nombres Sx5-Sx0, respectivamente. Crear un segundo bus Sx para aplicar las entradas al segundo sumador (el que suma 6) según el esquema de la figura: las entradas A del sumador toman las señales Sx3-Sx0, y las entradas B del sumador toman el valor (OFF0): 0 (cuando F es 0) ó 6 (cuando F es 1), donde F es generado mediante el circuito de puertas lógicas.

- Incluir conexiones de tierra (hotkey 0). Conectar la entrada de acarreo de los sumadores a tierra.
- Situar 4 displays hexadecimales (hotkey h). Conectar dos displays a las líneas de entrada del primer sumador: uno para visualizar el valor de las entradas X, y otro para visualizar el valor de la entrada Y. Conectar el tercer display a las salidas S3-S0 del segundo sumador para visualizar el valor de D1 y a (000F) para visualizar D2 (0 es una conexión a tierra).
- Utilizar las opciones de Zoom. Existen varios comandos para cambiar la visualización de los circuitos en pantalla. Pulsar el icono  (o pulsar F4, o usar el comando *Zoom to Fit* del menú View) sitúa todo el circuito en la pantalla.

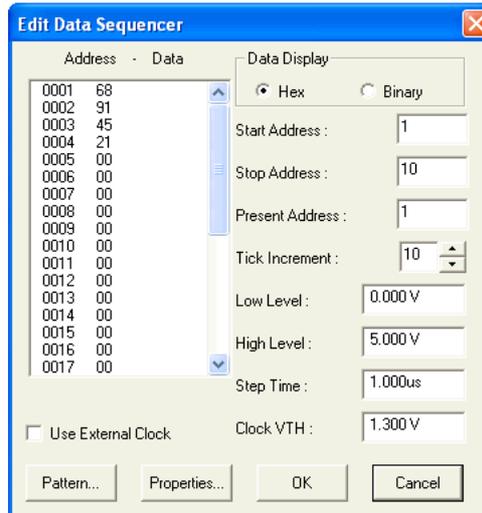
Pulsar el icono  entra el Modo Zoom, cada vez que se pulsa sobre la ventana de esquemáticos aumenta la resolución de la pantalla, si se pulsa con la tecla SHIFT apretada disminuye la resolución de la pantalla. Para abandonar el modo Zoom, pulsar en el icono . El comando *Display Scale...* del menú View (o pulsar F2) permite aumentar (mayor de 100%) o disminuir (menor del 100%) el grado de resolución de la pantalla (campo *Enter 10 to 1000*); también permite programar el porcentaje con el que aumenta o disminuye la resolución al entrar en modo Zoom: activar el campo *Auto Scale Step*, y fijar el valor en *Scale Step Size*, al pulsar OK se entra en el Modo Zoom.

El comando *Normal Size/Position* del menú View (o pulsar F3) fija el tamaño normal en pantalla (resolución del 100%).

- Programar el generador de secuencias. Pulsar dos veces sobre él. Se abre la ventana de programación donde se programan los valores (ventana Address-Data: Address valor fijo que indica una dirección de referencia entre 1 y 32 por defecto, Data el valor programable que se aplica a las salidas en esa dirección) y las características de la secuencia a aplicar.

Dentro de las características se pueden programar datos para la simulación digital:

- Start Address: primera dirección que se aplica al comenzar la secuencia.
- Stop Address: última dirección que se aplica al realizar la secuencia.
- Present Address: dirección actual que se está aplicando en la secuencia y que genera los valores lógicos actuales de las salidas.



- Tick Increment (simulación digital): número de unidades de tiempo de simulación que permanece el dispositivo en una dirección antes de cambiar a la siguiente (con el reloj externo deshabilitado).
- Use External Clock. Si se activa esta opción se cambia la dirección cuando aparece un flanco de subida en CP1 o de bajada en CP2.
- Low level (simulación analógica): valor de tensión que equivale a 0 lógico.
- High level (simulación analógica): valor de tensión que equivale a 1 lógico.
- Step time (simulación analógica): tiempo que permanece el dispositivo en una dirección antes de cambiar a la siguiente (con el reloj externo deshabilitado).
- Clock VTH (simulación analógica): valor de tensión que diferencia el 0 lógico del 1 lógico en los relojes externos.

La secuencia se aplica pasando de una dirección a la siguiente en orden ascendente desde *Start Address* hasta *Stop Address* cada cierto tiempo marcado por el valor de *Tick Increment* (en la simulación digital) o *Step Time* (en la simulación analógica), o la llegada de un flanco en CP1 ó CP2, si *External Clock* está activo.

Los valores de las ocho salidas de cada dirección se programan en la ventana Address-Data. El formato de programación puede ser hexadecimal (Hex, dos dígitos hexadecimales de valores entre 0-F, el de la izquierda para las salidas 8-5, el de la derecha para las salidas 4-1) o binario (Binary, 8 dígitos binarios de valores 0 ó 1, de izquierda a derecha: salidas de 8 a 1). Para programar el valor de una dirección hay que hacer doble-click sobre ese valor y, en la ventana que aparece introducir los valores desde teclado y pulsar en OK.

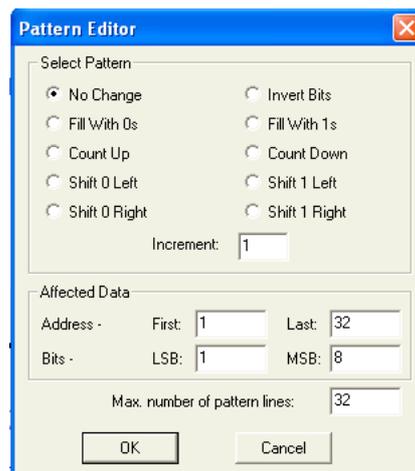


El número de direcciones que aparece en la ventana Address-Data está fijado por defecto a 32. Para cambiar este número (hasta 32767) hay que pulsar en el botón *Pattern...*, y en la nueva ventana que se genera cambiar el valor en el campo *Max. number of pattern lines*.

Esta ventana contiene otras utilidades para facilitar la programación la secuencia cuando guarda una cierta correlación. Para cargar esa programación hay que realizar estos pasos:

- Indicar desde teclado que intervalos de direcciones (Address - First:, Last:) y de salidas deben programarse (Bits - LSB: , MSB:).
- Seleccionar entre las distintas opciones cuál se quiere utilizar: “Rellenar con 0s” (*Fill with 0s*), : “Rellenar con 1s” (*Fill with 1s*), “Incrementar en binario” (*Count Up*), “Decrementar en binario” (*Count Down*), “Desplazar a la izquierda los bits cargando el LSB con 0” (*Shift 0 Left*), ó con 1 (*Shift 1 Left*) “Desplazar a la derecha los bits cargando el MSB con 0” (*Shift 0 Right*), o con 1 (*Shift 1 Right*).
- Indicar desde teclado el incremento o número de direcciones que se mantienen al mismo valor antes de realizar un cambio (*Increment*).

Una vez realizados los pasos hay que pulsar en OK y aparece otra vez la ventana del Data Sequencer con los valores lógicos cargados en las direcciones programadas.



Para programar el Data Sequencer en la práctica hay que seguir estos pasos:

- En la ventana de esquemáticos hacer doble-click sobre su símbolo.
- Situar los valores en modo hexadecimal: pulsar en Hex del campo *Data Display*. Del valor cargado en cada dirección, el dígito de la izquierda corresponde al operando A y el de la derecha al operando B.
- Programar el campo *Stop Address* a, por ejemplo 10 (10 direcciones válidas de la 1 a la 10, al llegar a la 10 se vuelve a empezar por la 1).
- Programar en las primeras 10 direcciones distintas combinaciones de operandos NBCD (valores entre 0 y 9): 32 (3 + 2), 76 (7 + 6), 49 (4 + 9), etc. Para ello, pulsar sobre una dirección e introducir los valores desde teclado.
- Situar el valor del campo *Tick Increment* a valor 10. Esto permite que, al hacer una simulación digital se eviten los problemas derivados de los tiempos de propagación de los

dispositivos que, en algún caso, será de 4. Se asegura que cuando se aplica un valor a las entradas el valor aplicado anteriormente ya ha llegado a las salidas y ha sido observado.

- Pulsar OK.

- Activar el comando *Digital Mode* del menú Simulación. En la ventana Digital situar el valor de la opción *Step Size* a 10 ticks, para que coincida con el valor del Tick Increment del generador de secuencias. De esta forma se sincroniza la aplicación de señales con la simulación por pasos.

- Pulsar en el icono de Reset . Pulsar sucesivamente en el icono de simulación por pasos  y comprobar el funcionamiento del circuito observando los displays.

- Guardar los cambios (orden *Save* del menú File ó icono ) y cerrar (comando *Close* en el menú File) el circuito.

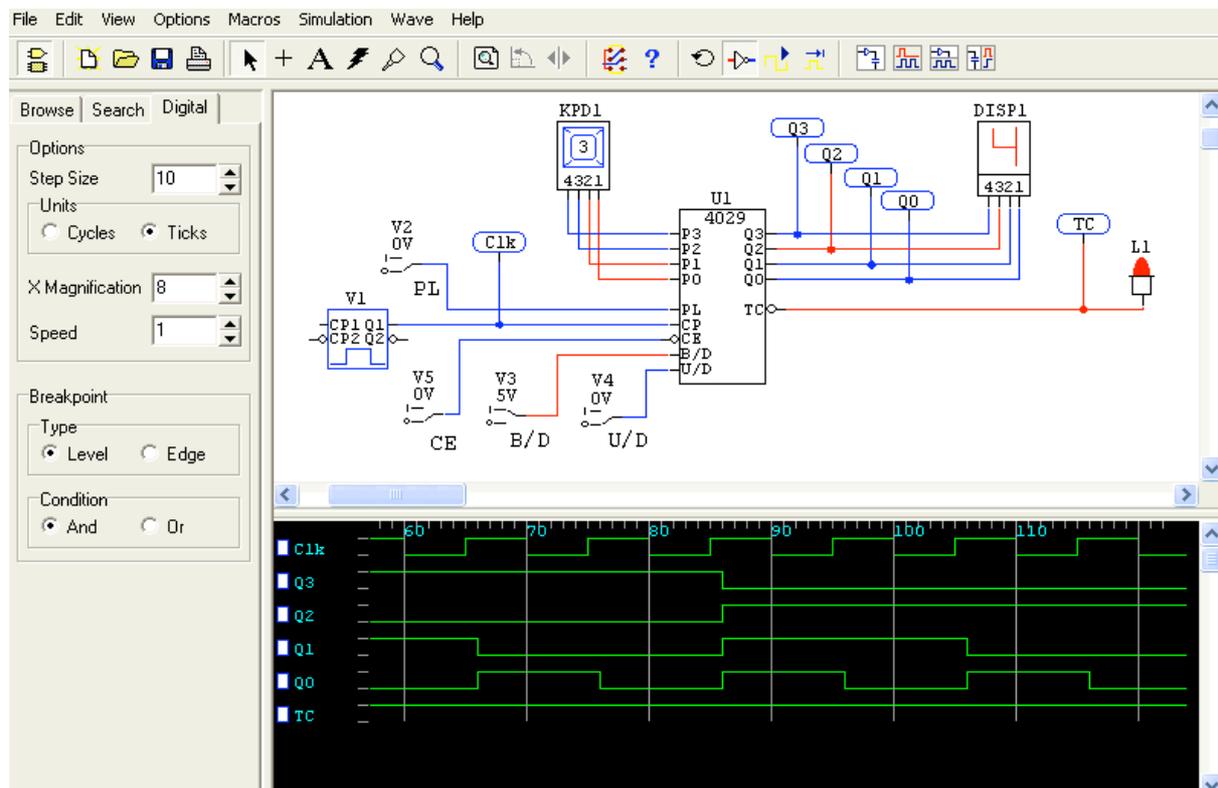
e) Simulación de un circuito secuencial.

Comprobación de un circuito secuencial síncrono: el contador 4029. La descripción del funcionamiento de este circuito se da en el guión de la práctica 2.

- Abrir un nuevo circuito (comando *New* del menú File).

- Fijar en la ventana de esquemáticos el contador 4029, se puede localizar en el menú Digital by Number. Conectar el circuito 4029 de la siguiente forma:

- La entrada de reloj (CP) a un generador de pulso (hotkey p). Mantener su programación a cinco ticks a valor alto y cinco a valor bajo.



- Las entradas de carga en paralelo (PL), de mantenimiento de dato ó Carry In (CE), de selección de cuenta arriba/abajo (U/D) y de selección de cuenta binario/BCD (B/D) se conectan a switches (hotkey s).
- Las entradas en paralelo P3-P0 se conectan a las salidas 4-1 de un switch hexadecimal (Hex Key, hotkey H): envía datos a 4 bits en código hexadecimal. Para cargar un valor en este switch se debe pulsar con el ratón sobre el valor interno (0, por defecto, se pone en color rojo), se fija un valor en el dispositivo introduciéndolo desde teclado (valores entre 0 y F), y su codificación binaria aparece en las salidas.
- Conectar las salidas Q3-Q0 a un display hexadecimal (hotkey h). Conectar las entradas 4-1 del display a las salidas Q3-Q0 del contador. Los valores binarios se muestran como un dígito hexadecimal.
- Conectar la salida Carry Out (TC) a un display lógico (hotkey 9).

- Situar elementos SCOPE (hotkey T) en cada una de las salidas y en la señal de reloj.
- Guardar el circuito con el nombre C4029.ckt. Usar *Save As* del menú File o el icono .
- Activar la simulación digital (*Digital Mode* en el menú Simulación). Situar la velocidad de simulación (*Speed* en la ventana Digital) a 1, la velocidad más lenta.
- Activar la ventana de formas de ondas en formato split horizontal (pulsar el icono ). Pulsar F4, para centrar el dibujo en la ventana de esquemáticos.
- Verificar el funcionamiento del circuito utilizando los display y las señales en la ventana de formas de ondas. Ejecutar la simulación (pulsar en ) o detenerla cuando sea necesario (pulsar en ).

Indicar como se comporta el circuito en función de los valores lógicos de las señales de control PL (y las señales asociadas P), CE, U/D, B/D (en ese orden) cuyo valor se modifica con los switches.

Indicar las condiciones de las señales de control bajo las que el circuito cuenta y los tipos de cuenta que realiza. Comprobar bajo cada tipo de cuenta cuando la señal de salida TC.L se fija a valor activo (valor bajo en la pantalla ó Led apagado).

Indicar las condiciones de las señales de control bajo las que el circuito no cuenta y la operación que realiza en esos casos.

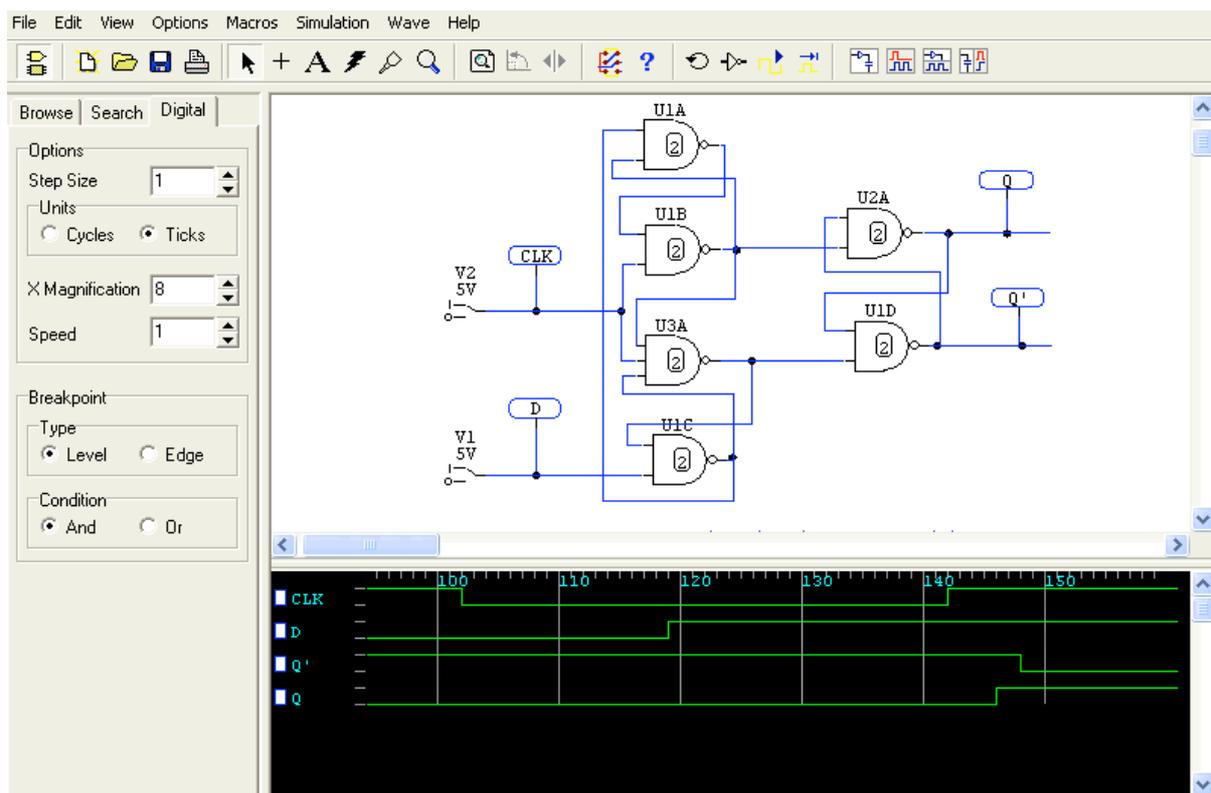
Indicar si las señales de control operan de forma síncrona o asíncrona. Para ello, y para una entrada determinada, hay que situar los valores en las otras entradas que hacen que la señal en cuestión realice su función (cargar en paralelo, parar el circuito, contar arriba/abajo, contar binario/BCD). Simular el circuito y cambiar la señal varias veces, comprobando en la ventana de formas de onda si el funcionamiento del circuito sigue siempre al flanco positivo de la señal de reloj o no. Si las salidas cambian siempre una unidad de tiempo después del flanco de reloj, la señal opera de forma síncrona; si existe algún caso en el que las señales cambian en cualquier otro instante, la operación de la señal es asíncrona.

- Guardar (pulsar en ) y cerrar el circuito .

f) Simulación de un flip-flop.

El flip-flop corresponde a un D disparado por flanco positivo. Está diseñado con puertas lógicas mediante métodos de diseño de circuitos secuenciales asíncronos.

- Abrir un nuevo circuito (comando *New* del menú *File*). Editar en la ventana de esquemáticos el circuito de la figura que corresponde a un flip-flop de tipo D disparado por flanco positivo, utilizando las puertas 74LS00 (2-input NAND, hotkey 5) y las puertas 74LS10 (3-input Nand). Localizar las puertas en el menú de dispositivos *Digital Basics* o en el menú *Digital by Number*.
- Fijar el tiempo de propagación de todas las puertas a 2. Para ello seleccionar la puerta pulsando sobre ella y utilizar el comando *Set Prop Delays...* del menú *Edit*. Activar la opción *Show Prop Delays* del comando *Schematic* del menú *Options* para que se muestre en la ventana del circuito el tiempo de retraso de cada puerta.
- Conectar switches (hotkey *s*) a las entradas *D* y *CLK* y conectar elementos *SCOPE* (hotkey *T*) en las entradas y salidas *D*, *CLK*, *Q* y *Q'*.
- Guardar el circuito con el nombre *DFF.ckt*. Usar *Save As* del menú *File* o el icono .



- Activar el modo de simulación digital (*Digital Mode* en el menú *Simulación*). En la ventana *Digital*, situar la velocidad de simulación (campo *Speed*) a valor 1, la velocidad más lenta. Fijar el valor de la opción *Step Size* a 1 tick.
- Activar la ventana de formas de ondas en la opción *Horizontal Split*, pulsando en el icono . El tamaño de las ventanas (esquemático/formas de onda) puede variarse pulsando con el ratón entre ambas ventanas y, sin soltar, desplazar el ratón hacia arriba ó abajo, soltando

entonces. Ajustar la ventana de ondas al mínimo tamaño, comprobando que se visualizan las cuatro señales. Pulsar F4, para centrar el dibujo en la ventana de esquemáticos.

- Ejecutar la simulación (pulsar en ) o detenerla cuando sea necesario (pulsar en ).
- Verificar el funcionamiento del circuito. Inicialmente al no estar fijado el valor en las salidas del flip-flop, el circuito debe quedar oscilando. Variar los valores del switch conectado a CLK de forma que se genere un flanco positivo y se cargue la salida a un valor lógico (0 ó 1), ticks entre cambio y cambio de valores en las entradas se deben dejar pasar al menos 5 para evitar problemas temporales. Continuar la simulación variando los valores lógicos en CLK y D, comprobando que la salida Q sólo cambia en relación a los flancos positivos en la señal CLK, y que en el resto de los casos los cambios no afectan al valor de Q. La forma correcta de probar el circuito sería comprobar que el circuito asíncrono realiza todas las transiciones correctas en la máquina de estados correspondiente. Como no se va a verificar la máquina de estado, se puede probar la siguiente metodológica:

- Fijar 0 en la salida Q del flip-flop (D a 0 y flanco positivo en CLK).
- Con CLK a 1 variar D para comprobar que la salida no cambia al cambiar D, fijar ahora CLK a 0 (Q no debe cambiar) y variar D otra vez (Q no debe cambiar), fijar D a 0, y cambiar CLK a 1 (flanco positivo). La salida Q se debe mantener a 0, se ha probado que entre dos flancos de CLK, Q mantiene un 0.
- Repetir los pasos anteriores, pero fijar D a 1 antes del flanco positivo final en CLK, con lo que Q se debe cargar a 1. Se comprueba que la salida del flip-flop hace bien la transición de 0 a 1.
- Repetir los pasos anteriores con D a 1 antes del flanco positivo final en CLK, con lo que Q se debe mantener a 1. Se comprueba que la salida del flip-flop mantiene un 1.
- Repetir los pasos anteriores, pero fijar D a 0 antes del flanco positivo final en CLK, con lo que Q se debe cargar a 0. Se comprueba que la salida del flip-flop hace bien la transición de 1 a 0.

- Medir los tiempos de propagación t_{phl} y t_{plh} de las salidas Q y Q': con 0 lógico en la salida Q del flip-flop, cargar un 1 desde la entrada D (D a 1 antes del flanco positivo en CLK), parar la simulación y medir t_{plh} en Q y t_{phl} en Q'. Continuar la simulación, cargar un 0 desde la entrada D (D a 0 antes del flanco positivo en CLK), parar la simulación y medir t_{phl} en Q y t_{plh} en Q' (de CLK a Q ó Q').

- Comprobar que la anchura del reloj debe ser mayor que un tiempo mínimo. Activar la simulación digital, cargar un 0 en la salida del flip-flop, situar CLK a 0, D a 1 (para cargar un 1) y parar la simulación. Colocar CLK a 1 y pulsar tres veces sobre el icono  de simulación paso a paso, volviendo a fijar CLK a 0 (pulso de anchura 3 en CLK), continuar la simulación y comprobar que el circuito oscila. Repetir el mismo proceso pulsando cuatro veces en el icono de simulación paso a paso y comprobar que este efecto no sucede si la anchura del reloj es al menos de 4.

- Comprobar que debe guardarse un tiempo de setup mínimo entre el cambio de la entrada y el flanco de reloj. Activar la simulación digital, cargar un 1 en la salida del flip-flop, situar CLK a 0, D a 1 y parar la simulación. Colocar D a 0 (para cargar un 0) y pulsar tres veces

sobre el icono  de simulación por pasos, fijar CLK a 1 (distancia 3 entre el cambio en la entrada y el flanco en el reloj), continuar la simulación y comprobar que el circuito oscila. Repetir el mismo proceso pulsando cuatro veces en el icono de simulación paso a paso y comprobar que este efecto no sucede si la separación entre señales es al menos de 4.

- Comprobar que debe guardarse un tiempo de hold mínimo entre el flanco de reloj y el cambio de la entrada. Cargar un 1 en la salida del flip-flop, situar CLK a 0, D a 0 (para cargar un 0) y parar la simulación. Colocar CLK a 1 y pulsar una vez sobre el icono  de simulación por pasos, fijar D a 1 (distancia 1 entre el cambio en el flanco en el reloj y en la entrada), continuar la simulación y comprobar que el circuito oscila. Repetir el mismo proceso pulsando dos veces en el icono de simulación paso a paso y comprobar que este efecto no sucede si la separación entre señales es al menos de 2.

- Guardar (pulsar en ) y cerrar el circuito .

- Abandonar Circuit Maker, pulsando en el comando *Exit* del menú File.