

Simulación de circuitos digitales

Área de Arquitectura y Tecnología de Computadores – Versión 1.0.882, 04/02/2022

Índice

Objetivos

Conocimientos y materiales necesarios

1. Introducción al simulador de circuitos digitales
 2. Diseño de un detector de *overflow*
 3. Comprobación automática de circuitos
 4. Creación de componentes
 5. Generación de cronogramas
 6. Ejercicios adicionales
-

Objetivos

En esta sesión se pretende introducir al alumno en la utilización de la herramienta *Digital* para la simulación de circuitos digitales. Esta herramienta permite diseñar un circuito digital y simular su comportamiento, introduciendo diferentes combinaciones en sus entradas y comprobando que sus salidas toman los valores esperados.

Para ilustrar el funcionamiento del simulador se implementará un detector de *overflow* para la suma de enteros en complemento a 2.

Conocimientos y materiales necesarios

Para aprovechar adecuadamente esta sesión de prácticas, el alumno necesita:

- Conocer la función lógica desempeñada por un detector de *overflow*.
- Comprender el concepto de tabla de verdad de un circuito y ser capaz de escribir la tabla de verdad del detector de *overflow*.
- Llevar a clase una memoria USB, o dispositivo análogo, para almacenar los circuitos que se desarrollarán en las práctica.

Durante la sesión se plantearán una serie de preguntas que deben responderse en el correspondiente cuestionario (<https://www.campusvirtual.uniovi.es/mod/quiz/view.php?id=143920>) del Campus Virtual. El cuestionario se puede abrir en otra pestaña del navegador pinchando en el enlace mientras se mantiene pulsada la tecla Ctrl.

1. Introducción al simulador de circuitos digitales

En las clases de laboratorio de sistemas digitales se empleará el simulador denominado *Digital*. Se trata de un programa desarrollado en Java y publicado como proyecto de software libre con licencia GPL v3.0. Se puede obtener la última versión en <https://github.com/hneemann/Digital>. Es recomendable que todos empleemos la misma versión, por lo que tu profesor de laboratorio te indicará dónde está ubicada la versión de *Digital* que debes descargar. En cualquier caso, para poder ejecutar el programa hace falta tener instalada la máquina virtual de Java.

Este simulador no es un producto orientado al mercado profesional, sino un simulador sencillo orientado a la docencia de sistemas digitales. No obstante, a pesar de su simplicidad tiene la potencia y flexibilidad necesarias para simular un computador educacional completo.



- En primer lugar descarga el simulador desde la ubicación que te indicará el profesor. Se trata de un archivo de nombre **Digital.zip** que debes descomprimir. Una vez descomprimido verás entre otros un archivo **Digital.jar** que debes ejecutar haciendo doble click sobre él.

La primera vez que se ejecuta el simulador aparece un tutorial que debería seguirse para adquirir los principios de funcionamiento de la herramienta. Sin embargo, dependiendo de la versión del simulador, las puertas lógicas se representan usando cajas rectangulares en lugar de los símbolos habituales. Para conseguir la representación habitual deben seguirse estos pasos:



- Cancela el tutorial.
- En la barra de menú debes seleccionar **Editar > Ajustes**, a continuación en la pestaña **Básico** activa la casilla **Usa las formas IEEE 91-1984**.
- Aparece una ventana indicando que debe reiniciarse el programa; proceso que debes hacer manualmente cerrando y abriendo de nuevo el programa.

Una vez arranca de nuevo el programa ya no aparece la posibilidad de seguir el tutorial. Sin embargo se puede arrancar el tutorial.



- Selecciona la opción **Ver > Start Tutorial** para arrancar el tutorial.



Es imprescindible seguir el tutorial antes de continuar con la práctica.

Durante la simulación guiada por el tutorial habrás observado que el color verde oscuro se emplea para representar un cero lógico, mientras que el color verde claro se emplea para el uno lógico. Estos colores no pueden cambiarse en la versión actual del simulador.

Si en algún momento tienes alguna duda sobre los diferentes componentes u opciones del programa, puedes dejar el puntero del ratón sobre el elemento correspondiente, aparecerá una descripción emergente (*tooltip*).

A continuación se proporcionan atajos útiles en el uso del simulador.



- Para seleccionar un componente del área de dibujo debe hacerse click con el botón izquierdo del ratón sobre el mismo. Si lo que se desea seleccionar es un cable, además hay que pulsar la tecla **Ctrl**.
- Se puede seleccionar una parte del circuito manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón, arrastrando y soltando. Una vez seleccionado, aparte de moverlo haciendo click sobre él de nuevo y arrastrando, se puede borrar **Supr**, copiar **Ctrl** + **C** y pegar **Ctrl** + **V**.
- Para configurar un componente situado en el circuito debe hacerse click sobre él con el botón derecho del ratón. Aparecerá un menú contextual.
- La tecla **Esc** puede usarse para cancelar operaciones.
- Para deshacer cualquier operación de edición puede pulsarse la combinación de teclas **Ctrl** + **Z** y para rehacer la combinación **Ctrl** + **Y**.
- Para rotar un componente seleccionado, o un área seleccionada, debe pulsarse la tecla **R**.
- El nivel de *zoom* puede modificarse pulsando la combinación de teclas **Ctrl** + y **Ctrl** -, así como empleando la tecla **Ctrl** y la rueda de desplazamiento del ratón. También se puede ajustar el nivel de *zoom* al tamaño del circuito con **F1**.
- Para colocar en el circuito una copia del último componente empleado puede pulsarse la tecla **L**.

2. Diseño de un detector de *overflow*

Una vez conocemos el funcionamiento básico del simulador es momento de seguir avanzando y construir circuitos más complejos que el del tutorial.

El siguiente objetivo es construir un detector de *overflow* para las operaciones de suma de enteros. Se trata de un sistema digital con una única salida que se pone a uno cuando el signo de la suma no es coherente con el signo de los sumandos.



- ¿En qué dos casos se produce *overflow*? Responde en el [cuestionario](https://www.campusvirtual.uniovi.es/mod/quiz/view.php?id=143920) (<https://www.campusvirtual.uniovi.es/mod/quiz/view.php?id=143920>): pregunta 1.

La figura 1 muestra una posible implementación del detector de *overflow* dentro del simulador *Digital*.

Detector de *overflow* para la suma

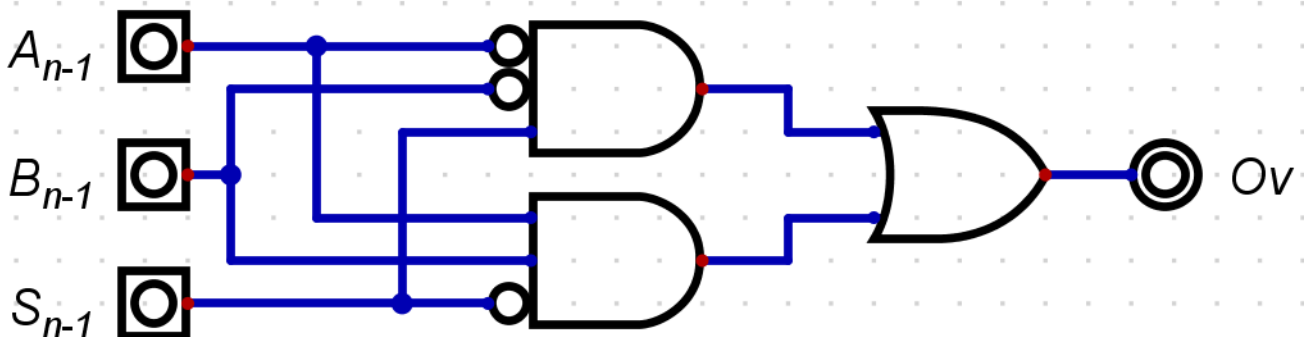


Figura 1. Implementación del detector de *overflow*

Como puedes observar, las puertas AND tienen tres entradas en lugar de las dos habituales y además tienen unos círculos en algunas de sus entradas. Estos círculos indican que la puerta emplea esas entradas negadas y son equivalentes a poner puertas NOT en dichas entradas.



- Abre un nuevo circuito. Puedes emplear la combinación de teclas **Ctrl** + **N** o seleccionar **Archivo** > **Nuevo**. El circuito del tutorial puedes descartarlo.
- Coloca sobre el circuito todas las puertas lógicas, así como las entradas y salidas, tomando como referencia la figura 1. Las puertas AND tienen dos entradas no negadas, pero no hay problema, pues las configuraremos una vez colocadas en el circuito.
- Configura las dos puertas AND con tres entradas y las entradas negadas apropiadas.
 1. Pulsa sobre la puerta con el botón derecho del ratón, selecciona la pestaña **Básico** y a continuación selecciona 3 empleando el selector etiquetado como **Número de entradas**.
 2. Pulsa el botón a la derecha de **Salidas invertidas** y activa las casillas de las entradas que se debes invertir. La figura 2 muestra la configuración de la puerta AND superior.

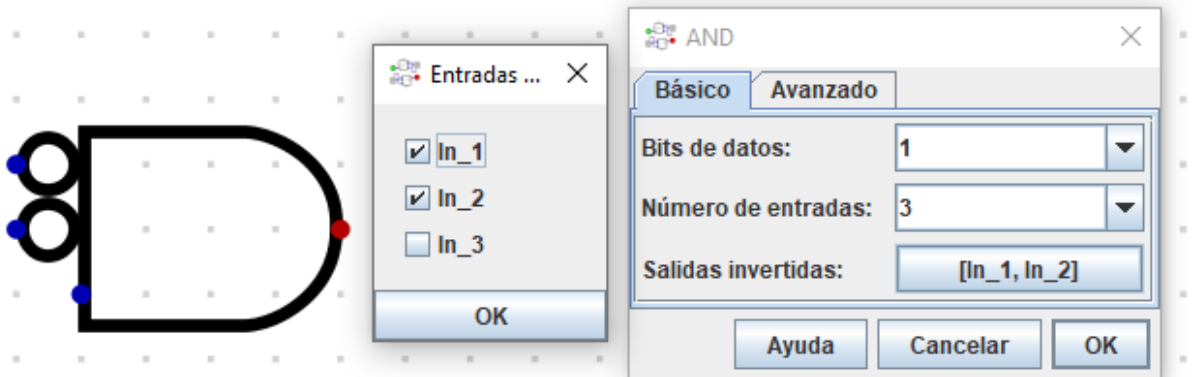


Figura 2. Configuración del número de entradas y su negación en una puerta

- Traza los cables necesarios entre todas las puertas, entradas y la salida tomando como referencia el circuito de la figura 1. Observa cómo cuando un cable comienza o termina en otro cable el simulador pone automáticamente un punto de conexión en la unión.

Las entradas y salidas del circuito están etiquetadas para su identificación. El etiquetado se consigue configurando los componentes correspondientes, pulsando sobre ellos con el botón derecho del ratón, como se muestra en la figura 3. En este caso se ha etiquetado la entrada A_{n-1} , usando el carácter **_** para crear un subíndice. Además del etiquetado se ha introducido una descripción de la entrada que aparecerá como un *tooltip* cuando se ponga sobre ella el cursor del ratón.

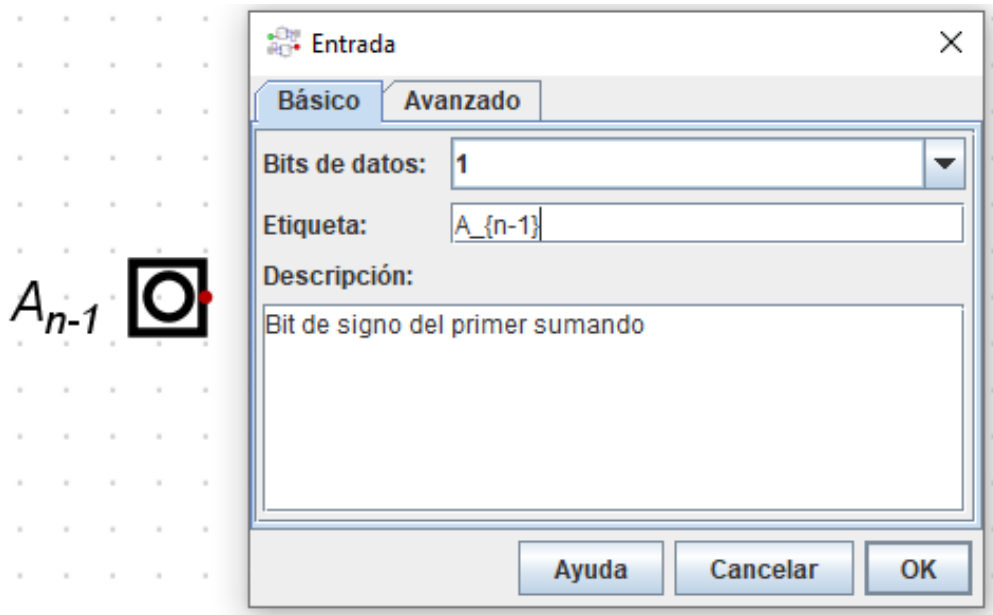


Figura 3. Etiquetado de entradas y salidas



- Etiqueta todas las entradas y salidas del circuito para que coincidan con las de la figura 1.

Para completar el dibujo del circuito mostrado en la figura 1 vamos a colocar la cadena **Detector de overflow** para la suma.



- Selecciona el componente **Texto** a través del menú **Componentes** > **Entrada-Salida**. En el apartado de descripción debes introducir el texto requerido. El componente **Texto** es un componente meramente descriptivo que no influye en la simulación.



Una vez hemos completado el circuito debes guardarlo.



- Guarda el archivo en tu directorio de trabajo con el nombre **overflow**, seleccionando **Archivo** > **Guardar**, o pulsando la combinación de teclas **Ctrl** + **S**.
- Observa desde el explorador de archivos el circuito guardado, verás que tiene la extensión **.dig**.

Vamos a proceder ahora a la simulación.



- Arranca la simulación pulsando la barra espaciadora, o haciendo click sobre el icono  de la barra de herramientas. El estado inicial de todas las entradas es cero, pues es el estado por defecto de las mismas cuando se arranca la simulación. Además, cuando todas las entradas están a cero en este circuito, la salida y todos los cables están también a cero. Recuerda que el estado cero se representa con un color verde oscuro.
- Para cambiar una entrada de cero a uno o viceversa, basta con hacer click sobre ella. Prueba a poner las entradas A_{n-1} y B_{n-1} a uno, se pondrán en color verde claro, y observa cómo la salida de *overflow* se pone a uno. Esto es lógico, pues al estar A_{n-1} y B_{n-1} a uno y S_{n-1} a cero, se están sumando dos enteros negativos y el resultado es un entero positivo.
- Prueba todas las combinaciones de entradas y observa que el estado de la salida es el esperado.
- Finaliza la simulación pulsando de nuevo la barra espaciadora, o haciendo click sobre el icono  de la barra de herramientas.

3. Comprobación automática de circuitos

Una de las características interesantes del simulador *Digital* es la posibilidad de comprobar de forma automática el correcto funcionamiento del circuito, esto es, sin tener que cambiar a mano durante la simulación el estado de las entradas, como se hizo en el apartado anterior.



- Coloca en el circuito el componente **Caso de prueba**, al cual puede accederse a través del menú **Componentes** ▶ **Varios**. La ubicación del componente en el circuito es indiferente, pues no se conecta a otros componentes. Una vez situado en el circuito aparece un componente de nombre **Test** en su interior.
- Configura el componente **Test** haciendo click sobre él con el botón derecho del ratón y pulsando a continuación sobre el botón **Editar**. La pantalla de la aplicación será similar a la mostrada en la figura 4

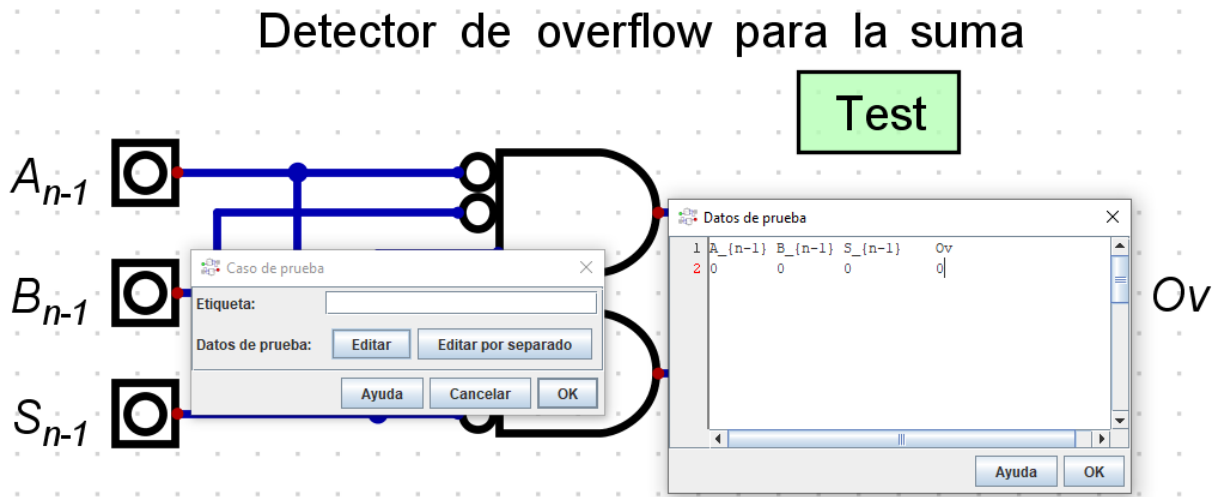



Figura 4. Componente para la comprobación del circuito

En la figura anterior se ha mostrado además como ejemplo el caso de prueba para la combinación de entradas $A_{n-1} = 0$, $B_{n-1} = 0$ y $S_{n-1} = 0$ que debe dar $Ov = 0$.



Para que el componente **Test** funcione correctamente, los nombres de las entradas y salidas de la primera línea deben coincidir con las etiquetas de las entradas y salidas en el circuito.

- Debes completar el dispositivo **Test** con las combinaciones de entradas restantes, empleando una línea adicional para cada una de ellas. Una vez completado, debes guardar su estado pulsando OK en las dos ventanas modales abiertas.
- Para realizar la comprobación del circuito puedes pulsar F8 o hacer click sobre el icono  de la barra de herramientas. Aquellas combinaciones de entradas para las cuales las salidas son correctas son marcadas en verde en una ventana emergente.

Vamos a comprobar lo que ocurre cuando el resultado de algún *test* no es correcto.



- Cierra la venta emergente anterior, prueba a hacer algún cambio en los datos de la prueba y repite la prueba. Aquellas combinaciones cuyas salidas no coinciden en la tabla y en la simulación aparecen marcadas en rojo.
- Devuelve los valores correctos al componente de prueba.
- Guarda de nuevo el circuito para almacenar el circuito con el componente **Test**.

4. Creación de componentes

Una de las características imprescindibles en cualquier simulador digital es la capacidad de crear nuevos componentes a partir de circuitos. De esta forma, a partir de puertas lógicas u otros componentes simples se pueden crear de forma jerárquica componentes cada vez más complejos, hasta llegar por ejemplo a implementar un computador completo.

Para ejemplificar la capacidad del simulador para crear componentes a partir de circuitos se procederá a crear un componente nuevo, el detector de *overflow* para la suma.



- Abre un nuevo archivo en blanco seleccionando **Archivo** > **Nuevo**, o pulsando la combinación de teclas **Ctrl** + **N**. Para que este nuevo circuito pueda emplear el circuito *overflow.dig* anterior como componente debe estar en el mismo directorio, o en un directorio que lo contenga. Por esta razón guardaremos el nuevo circuito en el mismo directorio. Selecciona **Archivo** > **Guardar como** y guárdalo con el nombre *new-overflow.dig*.
- Selecciona en el menú la opción **Componentes** > **Personalizado** y elige el componente *overflow*. Observarás que aparece el componente *overflow* que construiste previamente.
- Sitúa el componente *overflow* en el área de dibujo del simulador. La disposición de las entradas y salidas, así como las dimensiones del componente son generadas por defecto por el simulador y son las mostradas en la figura 5 izquierda.

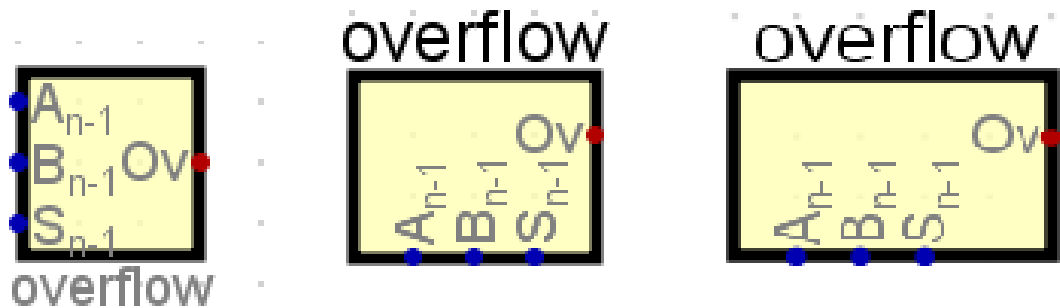


Figura 5. Diferentes disposiciones de entradas y salidas en el componente

- Prueba a poner el puntero del ratón sobre el componente que acabas de situar en el circuito y espera un instante. Observarás que aparece la descripción del componente que introdujiste durante su creación.
- Prueba ahora a poner el puntero del ratón sobre alguna de las entradas o la salida del componente. Observarás que aparece la descripción introducida durante el etiquetado.

Sin embargo, nuestro objetivo es que la disposición y forma sea similar a la que aparece en la misma figura a la derecha. Para conseguirlo debes realizar algunos cambios adicionales en el circuito del detector de *overflow*.



- Abre de nuevo el circuito haciendo click con el botón derecho del ratón sobre el componente y pulsando el botón **Abrir circuito**. Aparecerá una nueva ventana del simulador en la cual podemos modificar el circuito del detector de *overflow*.
- Modifica el circuito para que la disposición de las entradas sea como la que se muestra en la figura 6.

Detector de overflow para la suma

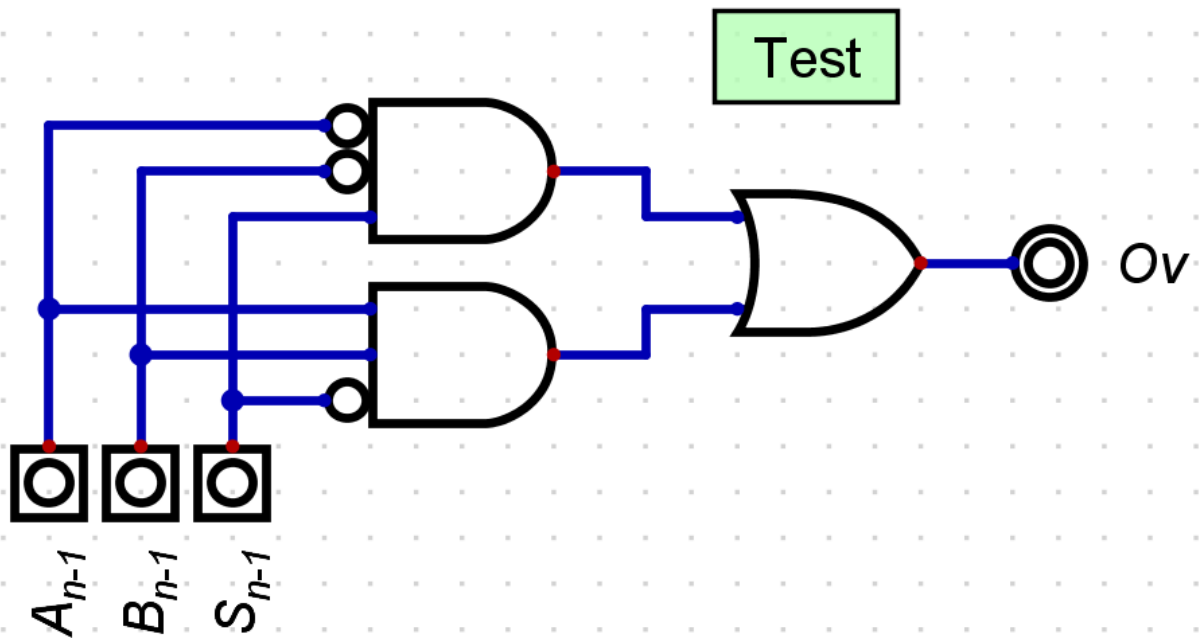


Figura 6. Detector de overflow con las entradas cambiadas

- Guarda el circuito del detector de *overflow* con el mismo nombre, pero no lo cierres, y vuelve al circuito con el componente, verás que nada ha cambiado.

Independientemente de la posición de las entradas y salidas en el circuito *overflow*, la disposición en el componente no cambia cuando el circuito está configurado con su forma por defecto, por lo que hay que cambiar de forma.



- Vuelve a la ventana del circuito del detector de *overflow*, sin cerrar la ventana actual, y selecciona **Editar > Ajustes específicos del circuito**. En la pestaña **Avanzado** selecciona la opción **Diseño para Forma**.
- Guarda el circuito para que los cambios tengan efecto. Si vuelves de nuevo a la ventana del circuito con el componente verás que la ubicación de las entradas ha cambiado y son las mostradas en la figura 5 central. Lo que ha ocurrido es que las entradas y salidas se sitúan ahora en el componente en el mismo orden y orientación que aparecen en el circuito.

Para finalizar el componente aún faltan un par de ajustes.



- En primer lugar vamos a ampliar el ancho mínimo de la caja para que pase de 3 a 5 unidades de rejilla. De nuevo hay que volver a la ventana del circuito del detector de *overflow* y seleccionar **Editar** › **Ajustes específicos del circuito**. En la pestaña **Básico** seleccionamos 5 en **Anchura**. Aprovecharemos además para introducir una descripción que aparecerá en forma de descripción emergente cuando pongamos el puntero del ratón sobre el componente. Estos ajustes se muestran en la figura 7.

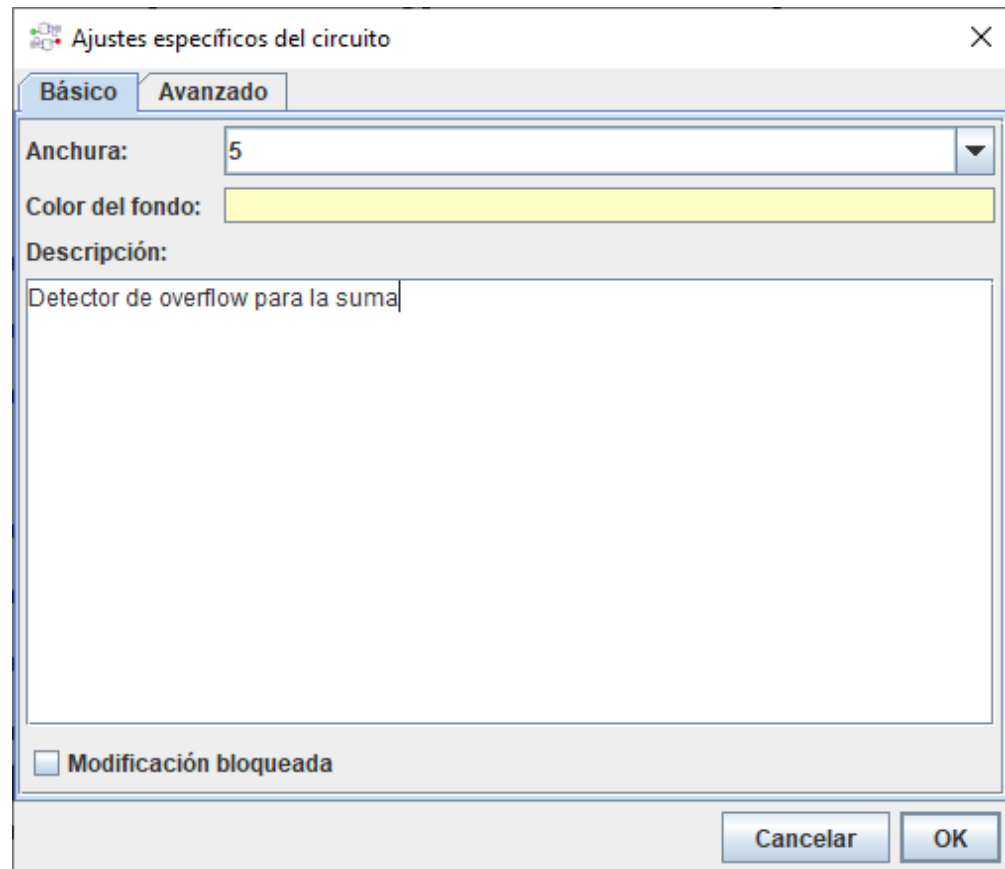


Figura 7. Configuración del ancho y descripción emergente del componente

Si además del ancho mínimo se quisiese configurar el alto mínimo de la caja de componente podría hacerse dentro de la pestaña **Avanzado**.

- Guarda de nuevo el circuito del detector de *overflow* y ciérralo.
- Observa en el circuito **new-overflow** cómo la caja del detector de *overflow* coincide con la de la figura 5 derecha.

Ahora vamos a trabajar exclusivamente en el circuito **new-overflow** con el componente.



- Conecta las entradas y salidas como se indican en la figura 8.

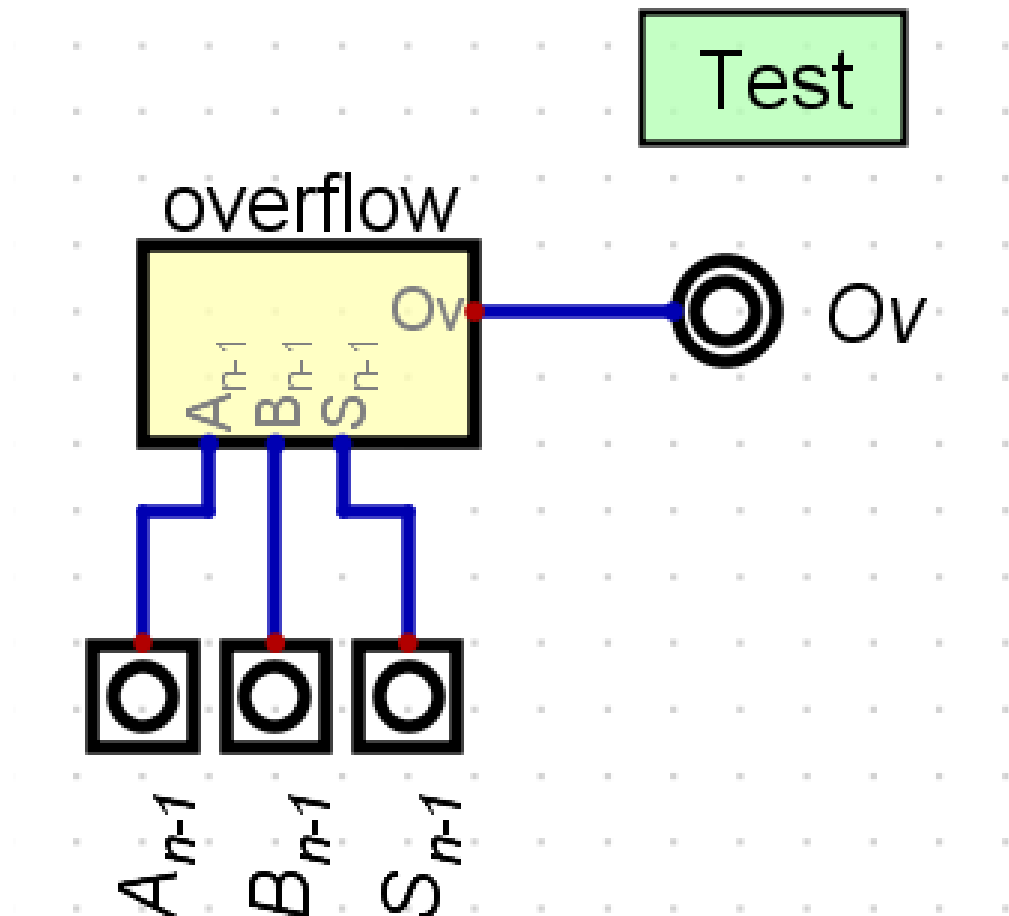



Figura 8. Ejemplo de uso del componente overflow

- A continuación veremos la posibilidad de copiar de un circuito a otro.
 1. Abre el circuito **overflow** haciendo click con el botón derecho del ratón sobre el componente y pulsando el botón **Abrir circuito**.
 2. Selecciona el componente **Test** haciendo click sobre él, pulsa **Ctrl** + **C** y cierra el circuito **overflow**.
 3. Ya en el circuito **new-overflow** pulsa **Ctrl** + **V**.
 4. Ejecuta de nuevo la comprobación del circuito pulsando **F8** o .



Para que el componente **Test** funcione en el nuevo circuito, las etiquetas de las entradas y salidas deben ser las mismas que en el circuito **overflow**.

5. Generación de cronogramas

Una de las características más interesantes de este simulador es su capacidad de generar cronogramas con las entradas y salidas durante la simulación.



- Añade al circuito el componente **Gráfica de datos**, seleccionado **Componentes** › **Entrada-Salida** y siguiendo la opción **Más**. Durante la simulación este componente mostrará un cronograma que se actualizará con cada cambio en alguna de las entradas o salidas del circuito.

Antes de probar la generación de cronogramas vamos a ordenar las entradas y salidas dentro del cronograma.



- Selecciona **Editar > Ordenar los valores de las medidas**. Aparecerá una ventana en la cual debes situar las entradas y salidas usando las flechas en el orden indicado en la figura 9.

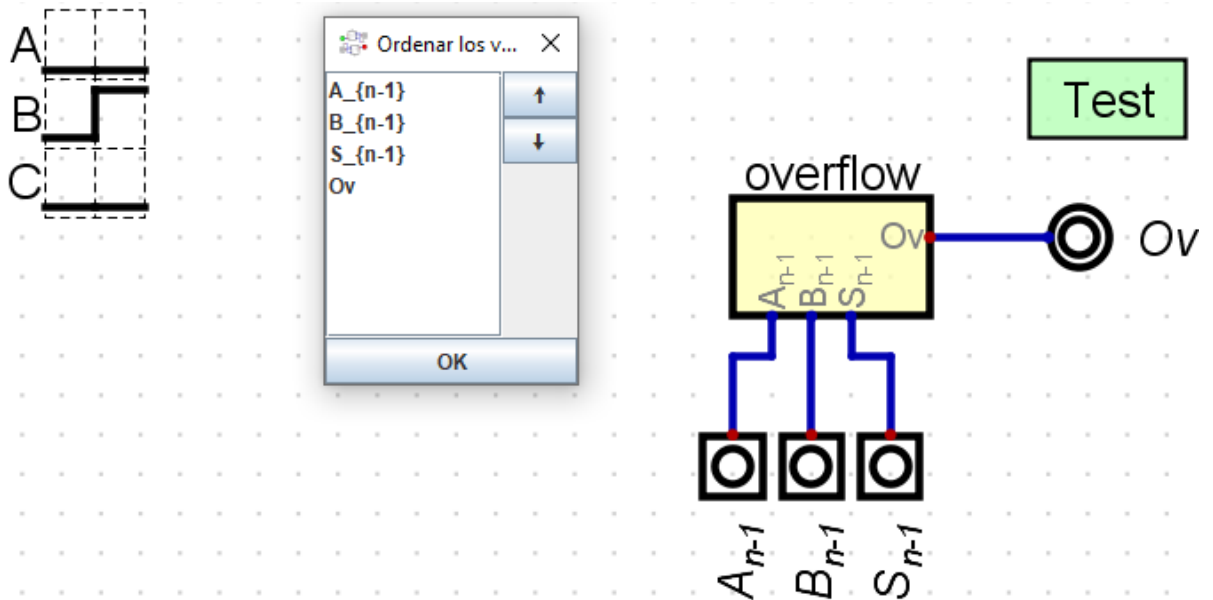



Figura 9. Orden de las entradas y salidas en el cronograma

- Pulsa OK y guarda el circuito.

Ya está todo dispuesto para comenzar la simulación.



- Arranca la simulación pulsando la barra espaciadora o el icono  de la barra de herramientas. Cada vez que cambies una entrada observarás cómo evoluciona el cronograma. En la figura 10 se muestra la evolución tras probar las dos combinaciones de entradas que producen *overflow*.

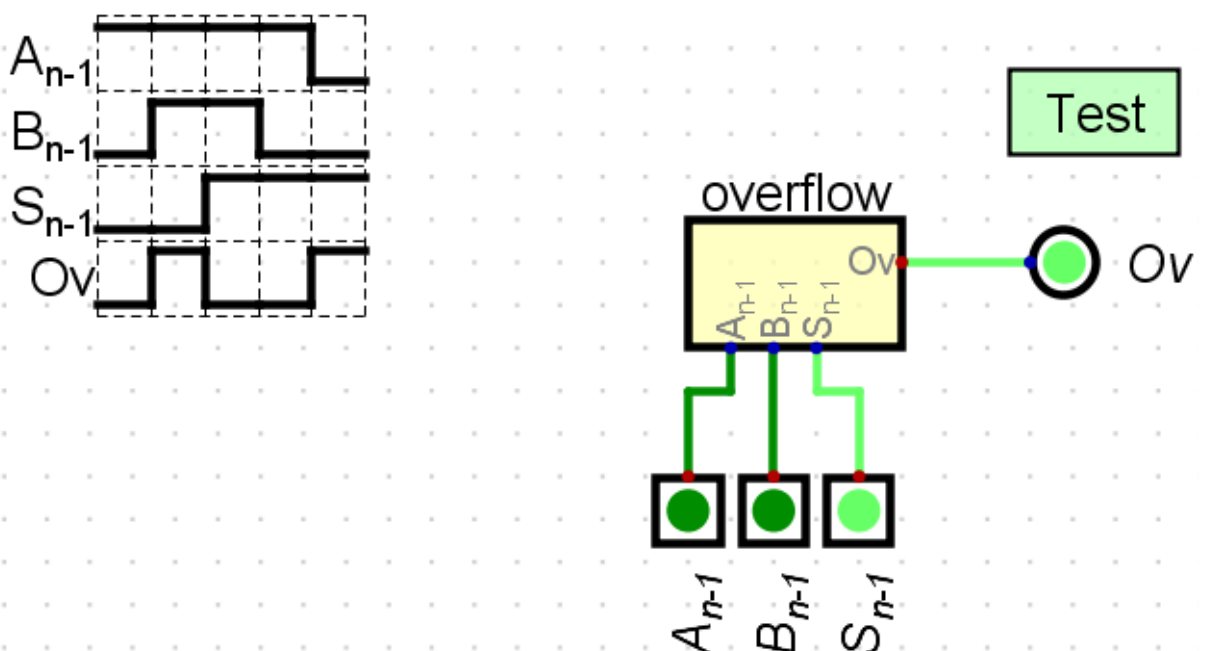


Figura 10. Cronograma durante la simulación

6. Ejercicios adicionales

Estos ejercicios adicionales permiten al alumno reforzar los conocimientos adquiridos durante la sesión práctica.



- En ocasiones resulta útil visualizar en los cronogramas no sólo las entradas y salidas de un circuito, sino además puntos intermedios dentro de un circuito o de uno de sus componentes. El simulador proporciona el componente **Sonda** que se encuentra en **Componentes > Entrada-Salida**. Guarda el circuito **new-overflow** como **sonda-overflow** y sobre este nuevo circuito conecta una puerta AND y una sonda a su salida, tal como se muestra en la figura 11. Se puede cambiar su nombre configurándola y cambiando su valor de etiqueta. Observa el efecto arrancando la simulación y modificando los valores de las entradas.

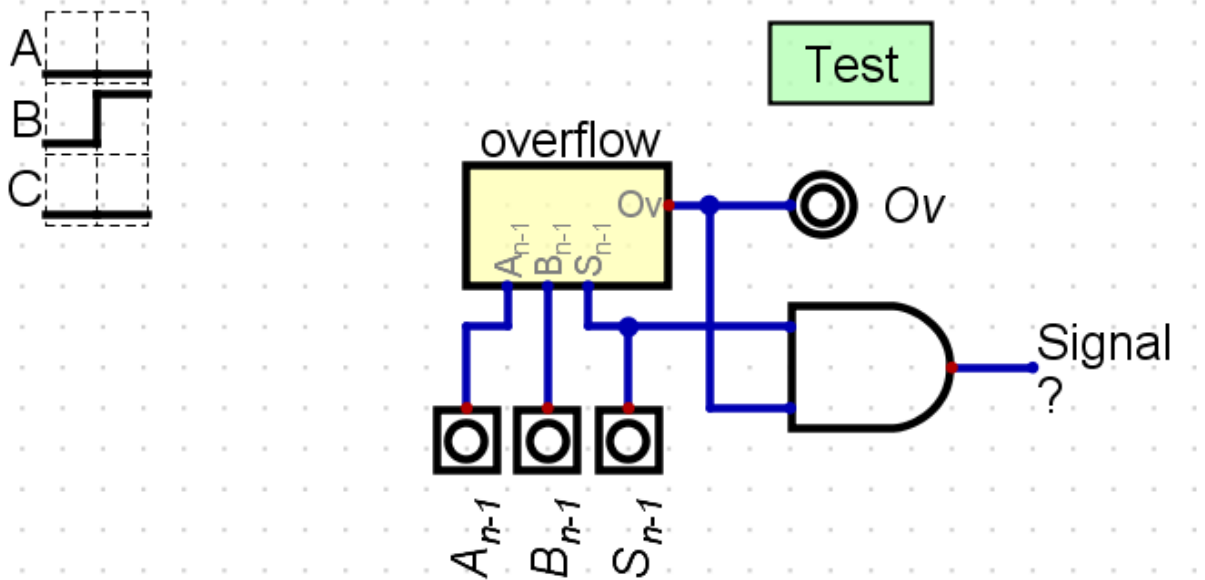


Figura 11. Conexión de sondas en circuitos

- Implementa en el simulador un multiplexor con dos canales de entrada. Comprueba su correcto funcionamiento añadiendo un componente **Test** que verifique todas las combinaciones de entradas.
- El simulador puede emplearse para comprobar cualquiera de los circuitos digitales de la asignatura, especialmente los que aparecen en los ejercicios. Por ejemplo, hay ejercicios en los que se pide el cronograma, cuyas soluciones se pueden comprobar usando el simulador **una vez resueltos**.