



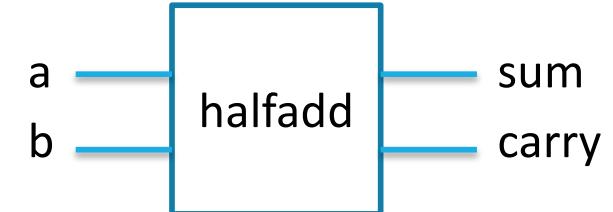
Tema 1

Introducción a Verilog

- Presentar las características básicas del lenguaje de descripción de hardware Verilog
- Introducir las palabras claves del lenguaje y sus reglas
- Introducir el diseño jerárquico
- Presentar los tipos de datos, operadores y estructuras del lenguaje
- Mostrar la descripción de módulos básicos combinacionales y secuenciales
- Mostrar la descripción de estímulos para simulación (testbench)

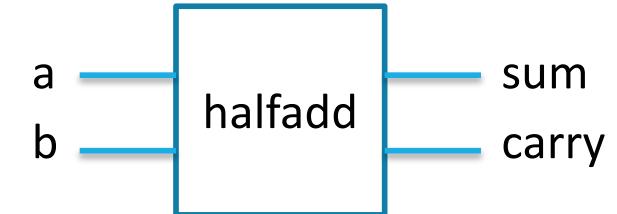
- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Descripción de módulos de diseño
 - Comienza con la palabra clave **module**
 - Se declaran la lista de entradas y salidas del módulo
 - Se pueden agrupar entradas (o salidas) si son del mismo tamaño
 - En el cuerpo del módulo se describe el comportamiento del mismo
 - Se termina con la palabra clave **endmodule**



```
module halfadd (
    input wire a,b,
    output wire sum, carry);
    assign sum = a^b;
    assign carry= a&b;
endmodule
```

- Descripción de módulos de diseño
 - **assign** se utiliza para definir una expresión lógica
 - **^** es la op. exclusive-OR
 - **&** es la op. and
 - Las palabras clave son siempre en minúsculas
 - Verilog es “case-sensitive”: diferencia mayúsculas y minúsculas



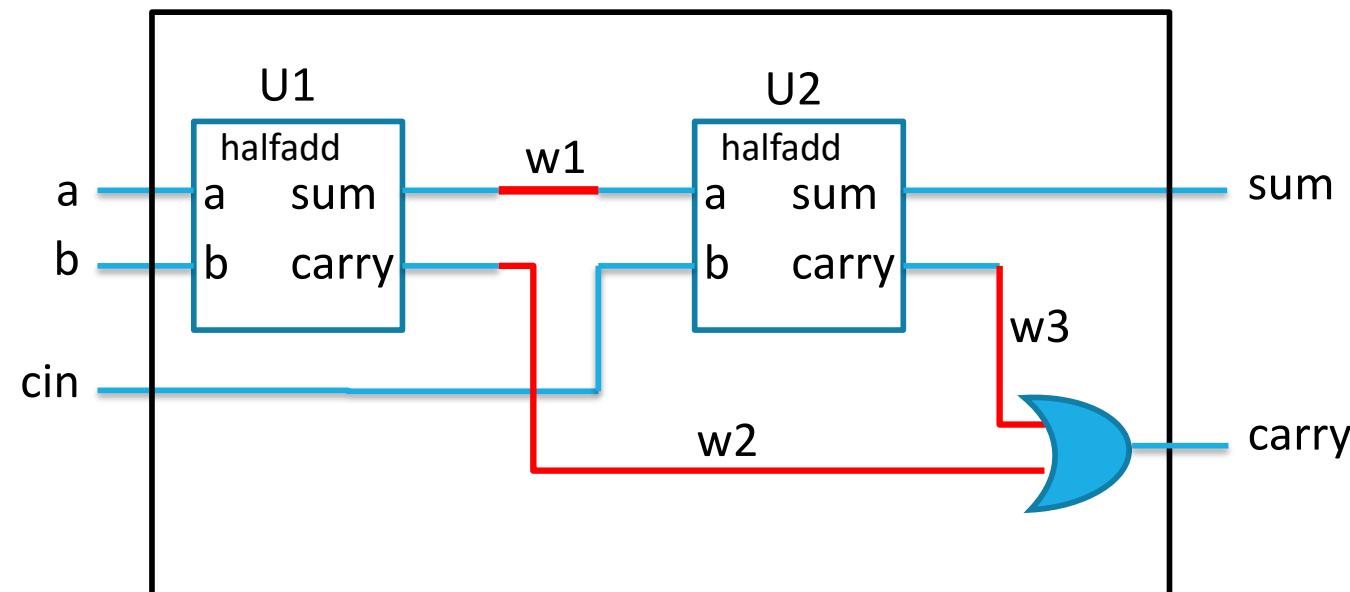
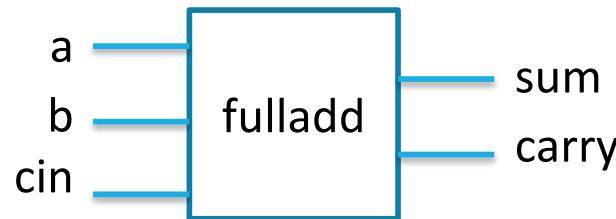
```
module halfadd (
    input wire a,b,
    output wire sum,carry);

    assign sum = a^b;
    assign carry= a&b;

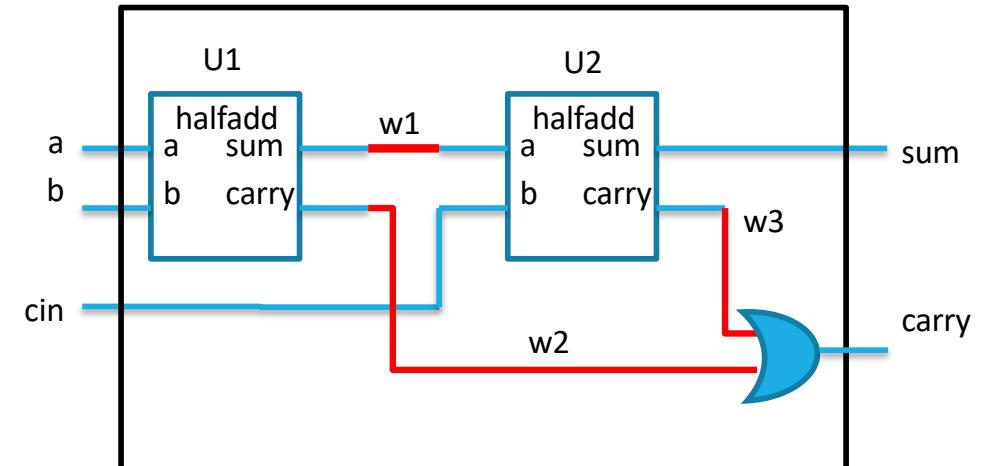
endmodule
```

- Reglas para los comentarios y el formato:
 - Se pueden escribir comentarios de línea y de bloque
 - Los comentarios de línea comienzan a partir de dos barras consecutivas (//) y terminan al final de la línea.
 - Puede ser una línea completa o solo la parte final
 - Los comentarios de bloque comienzan con /*) y terminan con (*/)
 - Verilog es un lenguaje sin formato
 - Se puede organizar el código como se quiera
 - Se recomienda usar espacios, tabulaciones y fin de línea, de modo que el código sea legible
 - En general, no se debería poner más de una sentencia ejecutable por línea.

- Diseño jerárquico:
 - Podemos construir nuevos módulos a partir de otros



- Diseño jerárquico:
 - Es necesario:
 - Declarar las variables locales
 - Instanciar los módulos
 - Dar a cada instancia un nombre
 - Conectar los puertos de entrada y salida de cada instancia



```

module fulladd (input wire a, b, cin,
                  output wire sum, carry);

  wire w1,w2,w3;

  halfadd U1( .a(a), .b(b), .sum(w1), .carry(w2) );
  halfadd U2( .a(w1), .b(cin), .sum(sum), .carry(w3) );

  assign carry = w2 | w3;

endmodule
  
```

- Conexión posicional vs conexión nombrada
 - Se pueden conectar puertos y variables respetando el orden de la declaración de los puertos en el módulo (conexión posicional)
 - No es recomendable, es fácil cometer errores
 - Es preferible usar la conexión nombrada (la vista anteriormente)

```
module halfadd (
    input wire a,b,
    output wire sum,carry);

    assign sum = a^b;
    assign carry = a&b;

endmodule
```

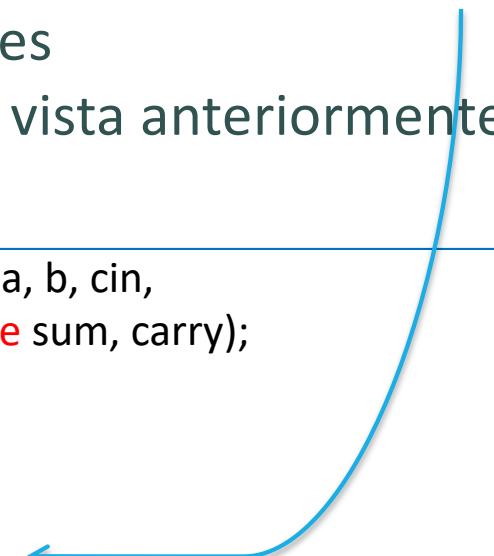
```
module fulladd (input wire a, b, cin,
                 output wire sum, carry);

    wire w1,w2,w3;

    halfadd U1(a,b,w1,w2);
    halfadd U2(w1,(cin,sum),w3);

    assign carry = w2 | w3;

endmodule
```



- Tipos de descripción:
 - Descripción funcional
 - Descripción estructural
 - Descripción procedimental

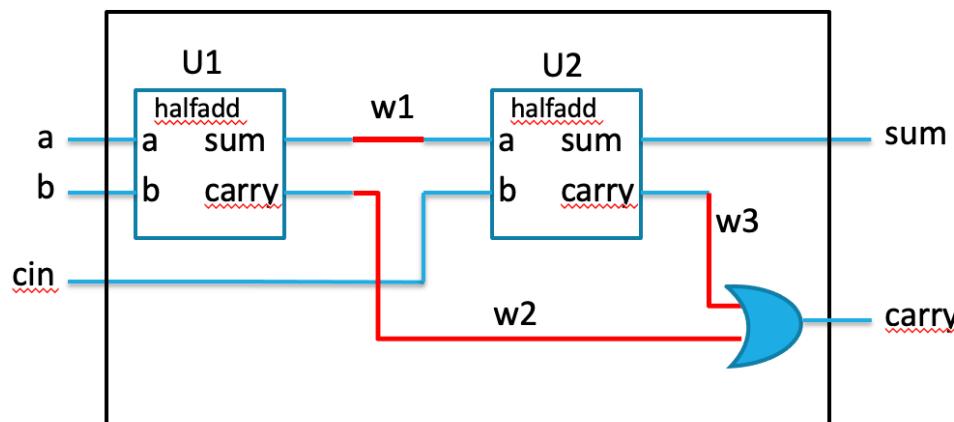
- Tipos de descripción:
 - Descripción funcional:
 - Se realizan asignaciones de forma continua utilizando **assign**
 - Representa conexiones directas de hardware que están constantemente activas y responden inmediatamente a cambios en sus entradas
 - Modela lógica combinacional
 - Todas las sentencias **assign** se ejecutan concurrentemente

```
module halfadd (
    input wire a,b,
    output wire sum,carry
);
    assign sum = a^b;
    assign carry= a&b;
endmodule
```

- Tipos de descripción:

- Descripción estructural:

- Se conectan módulos que ya están definidos previamente mediante instanciación
 - Las puertas lógicas básicas ya están predefinidas (and, nand, or,nor, xor, xnor, not, buf, etc.)
 - Es muy útil para la interconexión de módulos creados previamente (diseño jerárquico)



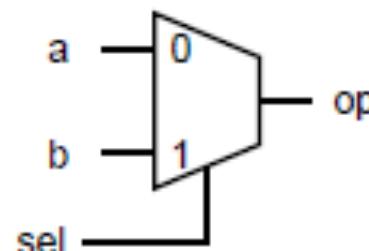
```
module fulladd (input wire a, b, cin,
                  output wire sum, carry);
    wire w1,w2,w3;
    halfadd U1(a,b,w1,w2);
    halfadd U2(w1,cin,sum,w3);
    assign carry = w2 | w3;
endmodule
```

- Tipos de descripción:
 - Descripción procedimental:
 - Permite el uso de estructuras de control similares a las de los lenguajes de programación
 - Se estructura en bloques procedimentales o procesos
 - Todos los bloques procedimentales se ejecutan concurrentemente
 - Dentro de cada proceso las instrucciones se ejecutan en el orden en que están escritas (flujo secuencial)

- Bloques procedimentales

- Pueden definir comportamientos complejos, como lógica combinacional repetitiva o condicional
- Pueden definir circuitos con memoria (secuenciales)
- Pueden definir bancos de estímulos (testbenches) para simulaciones
- Fundamentalmente hay dos tipos de bloques procedimentales:
 - tipo **always**: Se ejecutan continuamente (cíclicamente)
 - tipo **initial**: Se ejecutan linealmente (de principio a fin una sola vez)

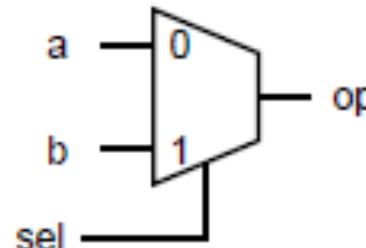
```
always @(a, b, sel)
  if(sel== 1)
    op = b;
  else
    op = a;
```



```
initial
begin
  a = 1;
  b = 0;
  sel = 1;
  #10ns;
  sel= 0;
  ...
end
```

- Bloques procedimentales
 - Cuando hay más de una sentencia en un bloque, estas han de agruparse mediante **begin** y **end**

```
always @ (a, b, sel)
  if(sel== 1)
    op = b;
  else
    op = a;
```



```
initial
begin
  a = 1;
  b = 0;
  sel = 1;
  #10ns;
  sel= 0;
  ...
end
```

- Ejemplo de concurrencia

- Un módulo puede contener múltiples bloques procedimentales (**initial**, **always**) y múltiples sentencias **assign** y no hay orden de ejecución entre ellos sino que se ejecutan en paralelo (conurrencia)
- Dentro de un procedimiento las sentencias se ejecutan secuencialmente en orden de aparición

definen la misma función

```

module ejemplo1 (
    input wire x,
    input wire y,
    input wire z,
    output wire f1);
    assign f1 = x & y & z;
endmodule

```

```

module ejemplo2 (
    input wire x,
    input wire y,
    input wire z,
    output wire f1);
    wire f0;
    assign f0 = x & y;
    assign f1 = f0 & z;
endmodule

```

```

always begin // a periodica T=10
    #5 a = ~a;
end

always begin
    #10 b = ~b; // b periodica T=20
end

initial begin
    a=0;
    b=0;
    #500;
    $finish;
end

```

- Bloques procedimentales

- Cada bloque **always** se ejecuta (dispara) cuando hay un evento en alguna variable de su **lista de sensibilidad** que viene determinada por una **@**
- En lógica combinacional la lista de sensibilidad debe incluir todas las variables
- Para la lógica secuencial el evento suele ser el flanco de una señal, es decir, se disparan en una transición específica de una determinada señal.
- Se utilizan las palabras clave **posedge** y **negedge**

```
always @(a, b, sel)
  if(sel== 1)
    op = b;
  else
    op = a;
```

```
always @(posedge clock)
  q<=d;
```

Lista de
sensibilidad

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- **Nets**, para representar conexiones. No almacenan valores.
 - Se usan sobre todo para conexiones entre módulos: **wire** (el más común y el tipo por defecto).
 - Se usan en asignaciones continuas (assign), nunca en bloque procedimentales.
- **Variables**, para almacenar valores.
 - El más importante: **reg**. Otros: *integer* (entero con signo de 32 bits), *real*, *time*...
 - Se usan en bloques procedimentales (always, initial)
- Tipos compuestos:
 - **vectores**: cualquier wire o reg puede ser vectorial,
 - reg [15:0] data;
 - wire [3:0] opcode;
 - **arrays**: para memorias o bancos de registros,
 - reg [7:0] memoria[0:255];

- *parameter*: constante válida en un módulo que permite crear bloques genéricos personalizables, su valor puede modificarse al instanciar el módulo
- *localparam*: constante cuyo valor es fijo y no se puede modificar

- Tipos por defecto y declaraciones implícitas
 - Una declaración sin tipo es **wire** por defecto
 - Una errata en un nombre de variable puede llevar a una declaración implícita como **wire**
 - Lo recomendable es declarar completamente todas las variables
 - También se puede usar la directiva **`default_nettype none`** de esta forma se genera un error si se intenta usar una variable no declarada

```
module halfadd (
    input wire a, b,
    output sum, carry);

    assign sum = a^b;
    assign carry = a&b;

endmodule
```

```
module fulladd (input wire a, b, cin,
                 output wire sum, carry);

    wire w1,w2,w3;

    halfadd U1( .a(a), .b(b), .sum(w1), .carry(w2) );
    halfadd U2( .a(w1), .b(cin), .sum(sum), .carry(w3) );

    assign carry = w2 | w3;

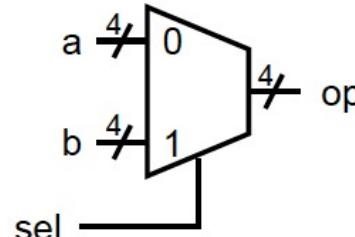
endmodule
```



- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Al declarar un vector se define su tamaño (rango máximo)
 - Puede ser descendente o ascendente
 - Puede contener expresiones (constantes y conocidas antes de la simulación)
 - Por defecto las componentes del vector no tienen signo, si se quieren cantidades con signo, serán en notación complemento a 2 y se ha de declarar como **reg signed**

```
module mux4 (
    input wire [3:0] a,b,
    input wire sel,
    output reg [3:0] op
);
    always @(a, b, sel)
        if(sel== 1)
            op = b;
        else
            op = a;
endmodule
```



```
parameter N=8;
reg [N-1:0] in;
```

```
reg signed [7:0] svec8;
reg [7:0] usvec8;

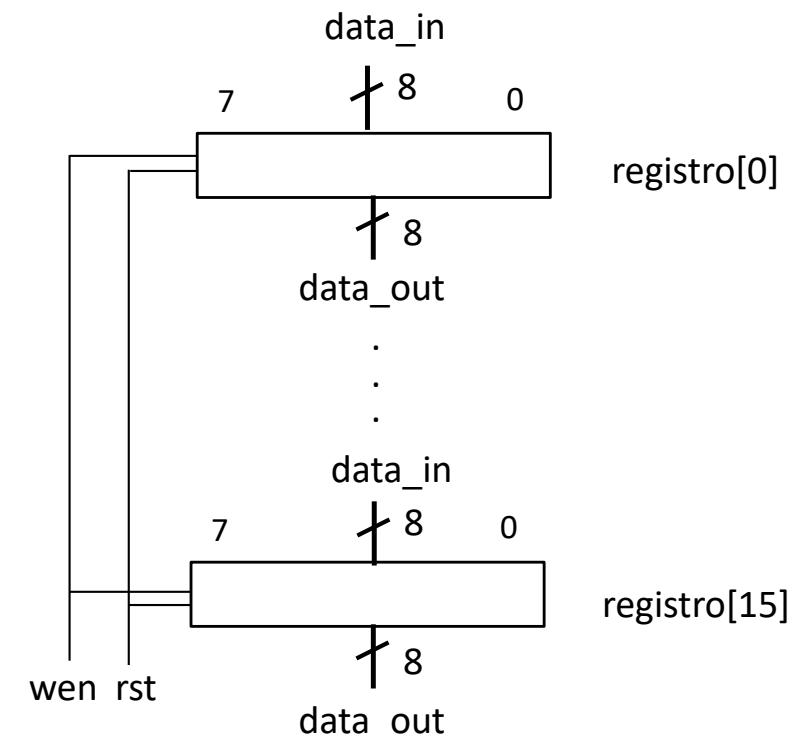
initial begin
    svec8 = 8'b11001101; // -51
    usvec8 = 8'b11001101; // 205
    ...

```

- Verilog permite arrays (matrices)
 - De cualquier tipo
 - Con cualquier número de dimensiones (a nivel RT se usan dos dimensiones)
- Los arrays multidimensionales se usan para
 - Modelar memorias
 - Declarar grupos de registros

```
/* Declaración de un array de 16 registros de
8 bits */
reg [7:0] registro [0:15];

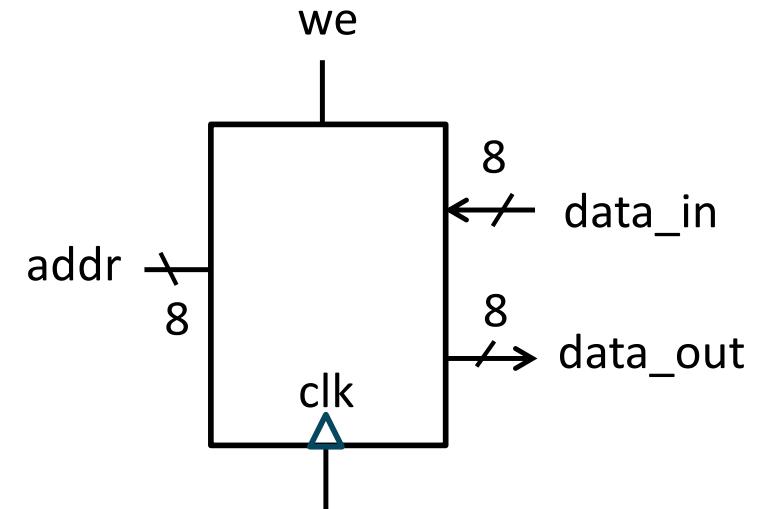
// registro == array de bits
// registro [5] == uno de los registros de 8
//           bits (el 6º)
// registro[5][2] == bit 2 del registro[5]
```



- Ejemplo:

```
module memoria_simple (
    input wire clk,
    input wire we,
    input wire [7:0] addr,
    input wire [7:0] data_in,
    output wire [7:0] data_out
);
```

```
reg [7:0] mem [255:0];
always @(posedge clk) begin
    if (we) begin
        mem[addr] <= data_in;
    end
end
assign data_out = mem[addr];
endmodule
```



Esta memoria contiene 256 palabras de 8 bits

Asignamos data_in (8 bits) al byte dado por mem[addr], por ejemplo, si addr que es un vector de 8 bits contiene el valor 00110110 -> 54 haríamos mem[54] <- data_in (ambos son vectores de 8 bits)

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- **Literales y bases**
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Un **literal numérico** es una representación explícita y fija de un valor
 - Permiten especificar el ancho, la base y el valor
 - **8'd255**: Literal de 8 bits en base decimal con valor 255 (1111 1111)
 - **16'hA5A5**: Literal de 16 bits en base hexadecimal con valor A5A5 (1010 0101 1010 0101)
 - **4'b1010**: Literal de 4 bits en base binaria con valor 1010
 - **8'b1010_0101**: Se admiten “_” para mejorar la legibilidad
 - **8'o123**: Literal de 8 bits en base octal con valor 123 (01010011)
 - Si se omite, la base por defecto es 10
- Cuando asignamos un literal a un vector no es necesario que tengan el mismo tamaño
 - El valor se extiende con 0 o se trunca al tamaño del vector

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Sentencia condicional **if-else**

- Su sintaxis es:

```
if (expresion)
    comando1;
else
    comando2;
```

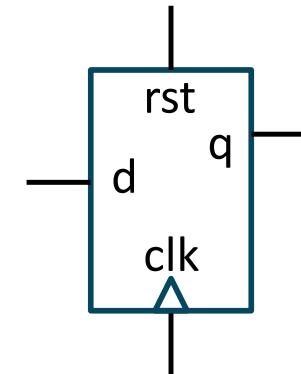
- También:

```
if (expresion1)
    comando1;
else if (expresion2)
    comando2;
else if (expresion3)
    comando3;
else comando4;
```

- Sentencia condicional **if-else**, ejemplo (I):

```
module flip_flop_d_reset(
    input wire clk, rst, d,
    output reg q
);

    always@(posedge clk) begin
        if (rst == 1'b1)
            q <= 1'b0;
        else
            q <= d;
    end
endmodule
```

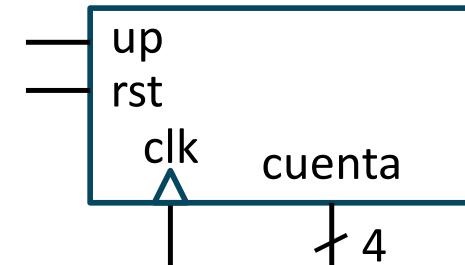


rst	d	q
1	X	0
0	0	0
0	1	1

- Sentencia condicional **if-else**, ejemplo (II):

```
module contador_con_reset (
    input wire clk, rst, up,
    output reg [3:0] cuenta );
```

```
always@(posedge clk) begin
    if (rst == 1'b1)
        cuenta <= 4'b0000;
    else if (up == 1'b1)
        cuenta <= cuenta + 1;
end
endmodule
```



rst	up	cuenta
1	X	0
0	1	cuenta + 1
0	0	cuenta

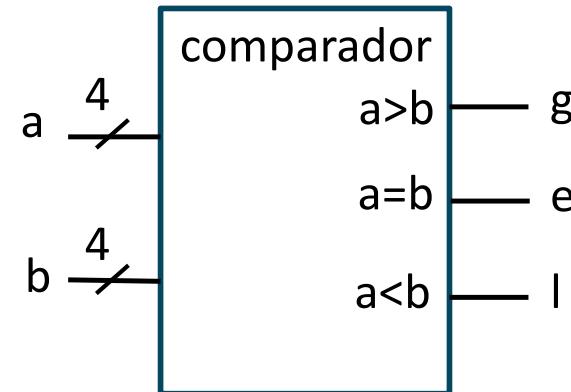
Para *rst asíncrono*, se debe incluir el mismo en la lista de sensibilidad:

always @(posedge clk, posedge rst)

- Sentencia condicional **if-else**, ejemplo (III):

```
module comparador(
    input wire [3:0] a, b,
    output reg g, e, l);

    always @* begin
        g=0;
        e=0;
        l=0;
        if (a>b)
            g=1;
        else if (a<b)
            l=1;
        else
            e=1;
    end
endmodule
```



	g e l
a > b	1 0 0
a = b	0 1 0
a < b	0 0 1

- Sentencia **case**

- Su sintaxis es:

```
case (expresion)  
      valor1: sentencial;  
      valor2: sentencia2;  
      valor3: sentencia3;  
      default: sentencia4;  
endcase
```

- **default** es opcional, aunque recomendable

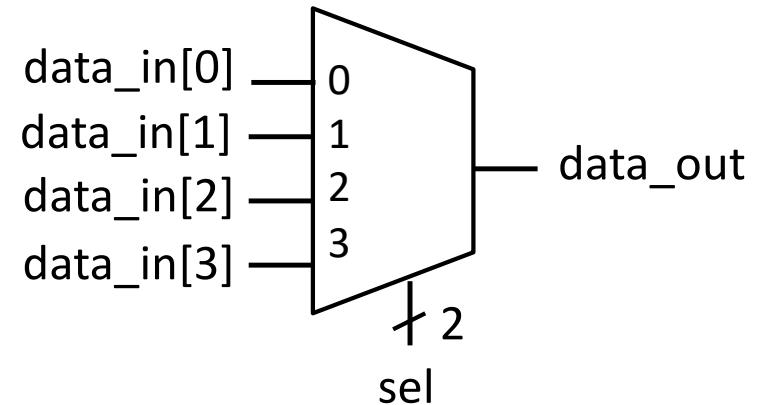
- Sentencia **case**, ejemplo (I):

```

module multiplexor_4a1 (
    input wire [1:0] sel,
    input wire [3:0] data_in,
    output reg data_out );

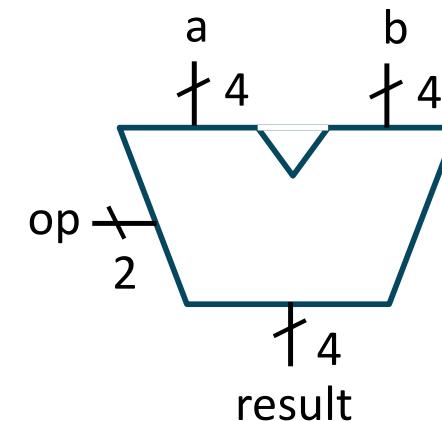
    always @* begin
        case (sel)
            2'b00: data_out = data_in[0];
            2'b01: data_out = data_in[1];
            2'b10: data_out = data_in[2];
            2'b11: data_out = data_in[3];
            default: data_out = 1'bx; // Valor 'x' para el caso por defecto
        endcase
        // p.ej: si sel valiese 2'b0x, 2'bx1, 2'bxz, etc.
    end
endmodule

```



- Sentencia **case**, ejemplo (II):

```
module alu_simple (
    input wire [1:0] op,
    input wire [3:0] a,
    input wire [3:0] b,
    output reg [3:0] result);
always @* begin
    case (op)
        2'b00: result = a + b; // Suma
        2'b01: result = a - b; // Resta
        2'b10: result = a & b; // AND
        2'b11: result = a | b; // OR
        default: result = 4'bx; // Valor 'x' del caso por defecto
    endcase
end
endmodule
```



op[1:0]	result
0 0	a+b
01	a-b
10	AND(a,b)
11	OR(a,b)

- **Bucle for**

- Su sintaxis es:

```
for (initializacion; expresion; step)  
    sentencia;
```

- El bucle **for** comienza con la inicialización y evalúa la expresión, si esta se cumple realiza la sentencia y ejecuta la función step.
 - Permite escribir código más compacto y legible si se trabaja con estructuras repetitivas

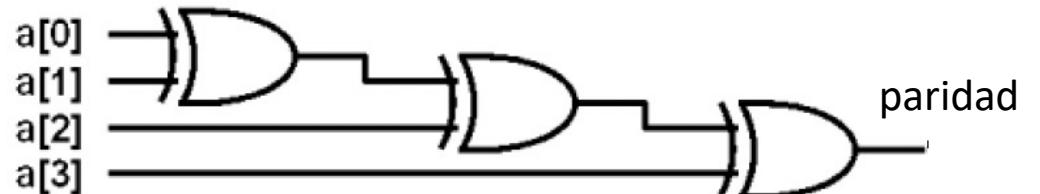
- Bucle **for**, ejemplo (I):

```
module paridad_impar_4bits(
    input wire [3:0] a,
    output reg paridad);
```

```
integer i;
always @* begin
    paridad = 1'b0;
    for (i = 0; i <= 3; i=i+1)
        paridad = paridad ^ a[i];
    end
endmodule
```

Estos valores va
tomando la salida
en cada iteración

0	
a[0]	
a[1] xor a[0],	
a[2] xor a[1] xor a[0]	
a[3] xor a[2] xor a[1] xor a[0]	



a[3:0]	paridad
0 0 0 0	0
0 0 0 1	1
0 0 1 0	1
0 0 1 1	0
...	...
1 1 0 1	1
1 1 1 0	1
1 1 1 1	0

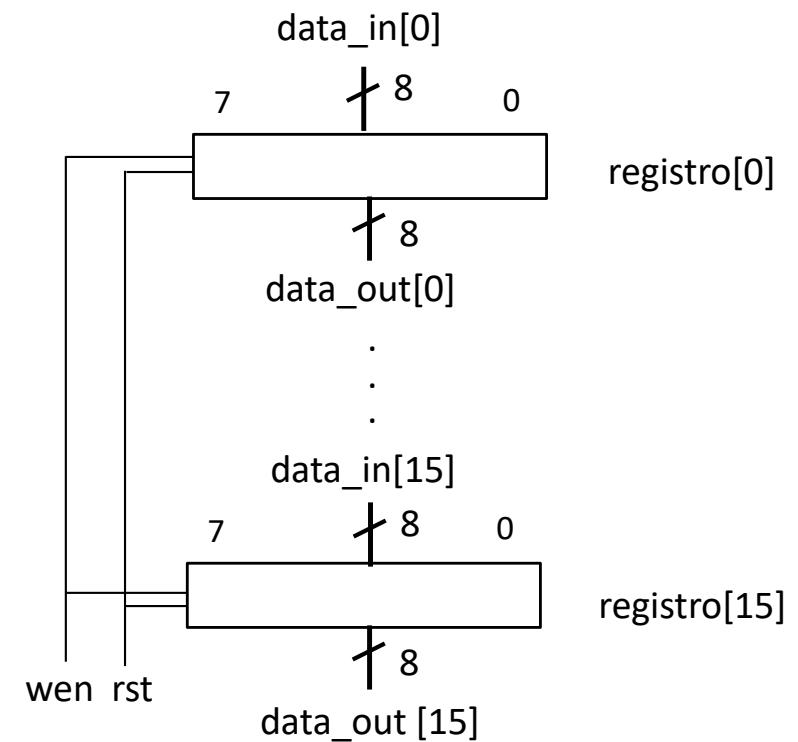
- Bucle **for**, ejemplo (II):

```
module banco_registros (
    input wire clk, rst, wen,
    input wire [3:0] addr [0:15],
    input wire [7:0] data_in [0:15],
    output wire [7:0] data_out [0:15] );

    reg [7:0] registro [0:15]; // Declaración de un array de 16 registros de 8 bits
    integer i;

    // Lógica de escritura
    always @(posedge clk) begin
        if(rst)
            for (i = 0; i < 15; i=i+1)
                registro[i] <= 8'b00000000;
        else if (wen)
            registro <= data_in;
    end

    // Lógica de lectura
    assign data_out = registro;
endmodule
```



- Bucle **repeat**
 - Su sintaxis es:

```
repeat (expresion)
        sentencia;
```
 - El bucle **repeat** evalúa la expresión para obtener un número y ejecuta la sentencia el número de veces especificado.
 - Muy usado en simulación (testbenches)

Ejemplo:

```
// Generación de reloj:
//20 ciclos de periodo 10
repeat (20) begin
    #5 clk = ~clk;
end
```

- Bucle **forever**:

- Su sintaxis es:

```
forever sentencia;
```

- se ejecuta siempre
 - sirve para definir señales en test benches para simulación
 - Ejemplo:

```
// Generación de reloj: periodo 10 unidades
initial begin
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
end
```

- Bucle **while**:

- Su sintaxis es:

```
while (condición)  
    sentencia;
```

- ejecuta una sentencia hasta que una determinada expresión es falsa

- Ejemplo:

```
//Espera los ciclos de reloj necesarios hasta que completed ==1  
while (completed != 1)  
    @(negedge clk);
```

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Existen muchos operadores, algunos ya han ido apareciendo, se pueden clasificar en tipos
 - Aritméticos
 - Relacionales
 - Lógicos
 - De bits, de palabras (bit a bit), de reducción
 - De desplazamiento
 - De concatenación y replicación
 - Condicional ternario
 - De asignación bloqueante y no bloqueante

- **Operadores aritméticos**

- **Suma:** +
 - $a + b$
 - Suma de dos valores.
- **Resta:** -
 - $a - b$
 - Resta de dos valores.
- **Multiplicación:** *
 - $a * b$
 - Multiplicación de dos valores.
- **División:** /
 - a / b
 - División de dos valores (si ambos son enteros, es división entera).
- **Módulo (Residuo):** %
 - $a \% b$
 - Devuelve el residuo de la división.

- **Operadores Relacionales y de Comparación**

- **Igualdad lógica:** `==`
 - $a == b$
 - Devuelve 1 (true) si a es igual a b.
- **Desigualdad lógica:** `!=`
 - $a != b$
 - Devuelve 1 (true) si a es diferente de b.
- **Mayor que:** `>`
 - $a > b$
- **Menor que:** `<`
 - $a < b$
- **Mayor o igual que:** `>=`
 - $a >= b$
- **Menor o igual que:** `<=`
 - $a <= b$

- **Operadores lógicos (booleanos)**

- **AND lógico:** **&&**

- $a \&\& b$
 - True si ambos a y b son true (1).

- **OR lógico:** **||**

- $a \mid\mid b$
 - True si al menos uno de a o b es true (1).

- **NOT lógico:** **!**

- $\mathbf{!}a$
 - True si a es false (0).

- **Operadores bit a bit**

- **AND bit a bit:** &
 - $a \& b$
 - Operación AND entre cada bit de a y b.
- **OR bit a bit:** |
 - $a | b$
 - Operación OR entre cada bit de a y b.
- **XOR bit a bit:** ^
 - $a ^ b$
 - Operación XOR entre cada bit de a y b.
- **NOT bit a bit:** ~
 - $\sim a$
 - Niega cada bit de a
- **Combinaciones de los mismos:**
 - **NAND** ~&, **NOR** ~|, **XNOR** ~^ o ^~

- Ejemplos

```
reg [3:0] vector1, vector2, vector3;
```

```
reg [3:0] num;
```

```
initial begin
```

```
vector1 = 4'b1001;
```

```
vector2 = 4'b1010;
```

```
vector3 = 4'b11x0;
```

```
num = ~ vector1; // num = 0110
```

```
num = vector1 & 4'b0111; // num = 0001
```

```
num = vector1 & vector2; // num = 1000
```

```
num = vector1 | vector2; // num = 1011
```

```
num = vector2 & vector3; // num = 10x0
```

```
num = vector2 | vector3; // num = 1110
```

```
end
```

• Operadores de reducción

- Aplican una operación bit a bit y generan un único bit de resultado:
 - **AND de reducción:** $\&a$
 - **OR de reducción:** $|a$
 - **XOR de reducción:** a
 - **NAND de reducción:** $\sim\&a$
 - **NOR de reducción:** $\sim|a$
 - **XNOR de reducción:** \sim^a o $^{~a}$
- Ejemplos:
 - Si $a = 4'b1010$, $\&a = 1 \& 0 \& 1 \& 0 = 0$
 - Con reg [3:0] q; $\&q = q[3]\& q[2]\& q[1]\& q[0]$
- En el ejemplo de la transparencia 37, bastaría hacer:
 - assign paridad = a ;

- **Operadores de desplazamiento**

- **Desplazamiento lógico izquierda : <<**
 - $a = a << n$; (despl. a izq., rellena con 0 por la dcha.)
- **Desplazamiento lógico derecha : >>**
 - $a = a >> n$; (despl. a dcha., rellena con 0 por la izq.)
- **Desplazamiento aritmético derecho con asignación: >>>**
 - $a = a >>> n$; (despl. a dcha., rellena con el bit de signo por la izq.)

- Ejemplos:

```
reg [7:0] vector1 , vector2;  
reg signed [7:0] vectorsigno;  
initial begin  
    vector1 = 8'b10011001;  
    vectorsigno = 8'b10011001;  
    vector2 = vector1 << 3; // 11001000 (entran 0 por la dcha.)  
    vector2 = vector1 >> 1; // 01001100 (entra un 0 por la izq.)  
    vector2 = vectorsigno >>> 1; // 11001100 (preserva signo)  
end
```

- **Operadores de Concatenación y Replicación**

- **Concatenación: {}**

- $\{a, b\}$
- Combina los bits de a y b en un único vector.
- Por ejemplo, si a es de 4 bits y b es de 4 bits, $\{a, b\}$ será de 8 bits.
- $c = \{c[4:0], c[7:5]\}$ rota el vector $c[7:0]$ tres posiciones a la izquierda.

$$\{a, b\} = 8'b10011100$$



- **Replicación: {n{}}**

- $\{4\{a\}\}$
- Repite el valor de a n veces.
- Por ejemplo, si $a = 2'b01$, entonces $\{4\{a\}\} = 8'b01010101$

- **Operador condicional ternario:**

- Evalúa una condición y asigna un valor diferente según si dicha condición se cumple o no.
 - $\text{result} = <\text{condition}> ?<\text{true value}> :<\text{false value}>;$

- **Operadores de Asignación en Procedimientos**

- **Asignación bloqueante:** =

- Se ejecuta de forma secuencial dentro de un bloque **initial** o **always**.

- **Asignación no bloqueante:** <=

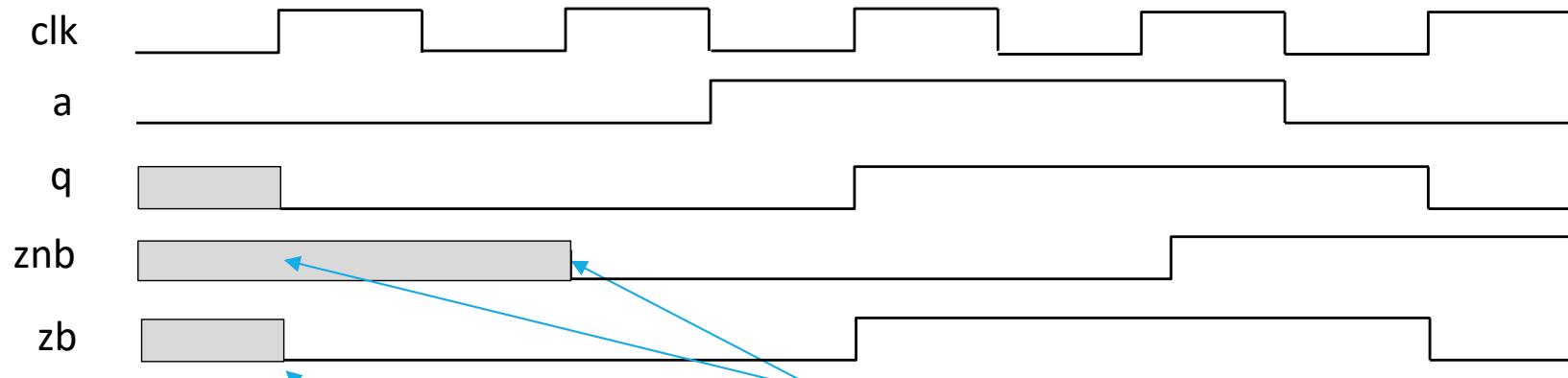
- Permite que las asignaciones se programen en paralelo dentro de un bloque secuencial.
- Muy utilizado en el modelado de registros y secuencias de diseño sin introducir dependencias de orden.

```
module bloqueante(
    input wire a, clk,
    output reg zb
);
    reg q;
    always @(posedge clk) begin
        q = a;
        zb = q;
    end
endmodule
```

Cuando llega el flanco activo de reloj, zb toma el valor de a

```
module nobloqueante(
    input wire a, clk,
    output reg znb
);
    reg q;
    always @(posedge clk) begin
        q <= a;
        znb <= q;
    end
endmodule
```

Cuando llega el flanco activo de reloj, znb toma el valor de q y, en el siguiente flanco, es cuando toma el valor de a



```
module bloqueante(
    input wire a, clk,
    output reg zb
);
    reg q;
    always @(posedge clk) begin
        q = a;
        zb = q;
    end
endmodule
```

Cuando llega el flanco activo de reloj, zb toma el valor de a

```
module nobloqueante(
    input wire a, clk,
    output wire znb
);
    reg q;
    always @(posedge clk) begin
        q <= a;
        znb <= q;
    end
endmodule
```

Cuando llega el flanco activo de reloj, znb toma el valor de q y, en el siguiente flanco, es cuando toma el valor de a

- **Resumen**

- **Aritméticos:** +, -, *, /, %,
Comparación: ==, !=, >, <, >=, <=
- **Lógicos:** &&, ||, !
- **Bit a bit:** &, |, ^, ^~, ~^, ~ (incluyendo reducción).
- **Desplazamiento:** <<, >>, >>>
- **Concatenación y replicación:** {}, {n{}}
- **Condicional ternario:** ?:
- **Asignación:** bloqueante (=) y no bloqueante (<=)

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- **Parámetros**
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- ***parameter***: constante válida en un módulo que permite crear bloques genéricos personalizables, su valor puede modificarse al instanciar el módulo
- ***localparam***: constante cuyo valor es fijo y no se puede modificar
 - Permiten definir el ancho de un bus, el tamaño de un contador, los elementos de un vector, ...
 - Se les asigna determinados valores que pueden ser modificados al instanciar el módulo, sin modificar su código.
 - Su uso facilita la reutilización y adaptación del módulo a distintos contextos
 - Se recomienda nombrarlos con mayúsculas para facilitar la legibilidad

- Ejemplo (I):

```
module mux #(parameter WIDTH = 8) (
    input wire [WIDTH-1:0] a,b,
    input wire sel,
    output reg [WIDTH-1:0] op
);

    always @*
        if (sel)
            op=a;
        else
            op=b;
endmodule
```

```
wire [7:0] a8, b8;
reg [7:0] op8;
wire [3:0] a4, b4;
reg [3:0] op4;
wire sel;
```

//instanciación por defecto: WIDTH se mantiene a 8
mux mux8 (.a(a8),.b(b8),.sel,.op(op8));

// Instanciación con un ancho diferente
mux #(.WIDTH(4)) mux4 (.a(a4),.b(b4),.sel,.op(op4));

Definimos variables
de 8 y 4 bits para
comparar las
instanciaciones

- Módulos parametrizables, ejemplo (II):

```
module contador #(parameter WIDTH = 8) (
    input wire clk,
    input wire rst,
    output reg [WIDTH-1:0] count
);
// Lógica del contador
always @(posedge clk)
    if (rst)
        count <= 'd0;
    else
        count <= count + 1;
endmodule
```

```
// Instanciación con un tamaño diferente

contador #(.WIDTH(16)) contador16bits (
    .clk(clk),
    .rst(rst),
    .count(count16)
);
```

- Sintaxis:

- Declaración:

```
module nombre_modulo #(parameter parametro1 = valor1,  
                      parametro2 = valor2, ... ) (...);
```

- Redefinición al instanciar el módulo:

```
nombre_modulo #(.parametro1(valor1),  
                  .parametro2(valor2), ...)  
nombre_instancia (...);
```

- Se puede usar conexión posicional.

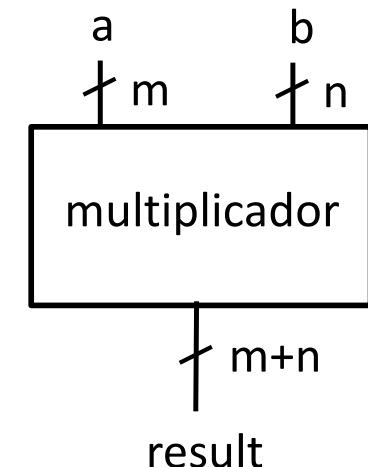
```
nombre_modulo #(valor1,valor2, ...)  
nombre_instancia (...);
```

- **localparam** define una constante invariable
 - A diferencia de **parameter** su valor no puede ser redefinido al instanciarse
 - Sin embargo, puede estar definido a partir de los valores de otras constantes tipo **parameter**

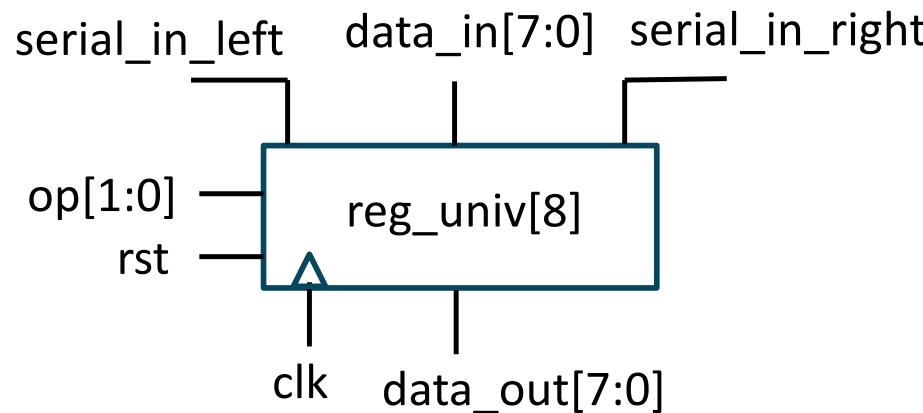
```
module multiplicador
#(parameter WIDTH_A = 4, WIDTH_B = 4)
    (input wire [WIDTH_A-1:0] a,
     input wire [WIDTH_B-1:0] b,
     output reg [WIDTH_OP-1:0] result);

    localparam WIDTH_OP = WIDTH_A + WIDTH_B;
    assign result = a * b;

endmodule
```



- El registro universal puede realizar todas las operaciones:
 - desplazamiento a derecha e izquierda,
 - carga en paralelo (operación de escritura)
 - inhibición (guardar el dato)
 - puesta a 0



op[1:0]	operacion
0 0	inhibición
0 1	shift left
1 0	shift right
1 1	escritura

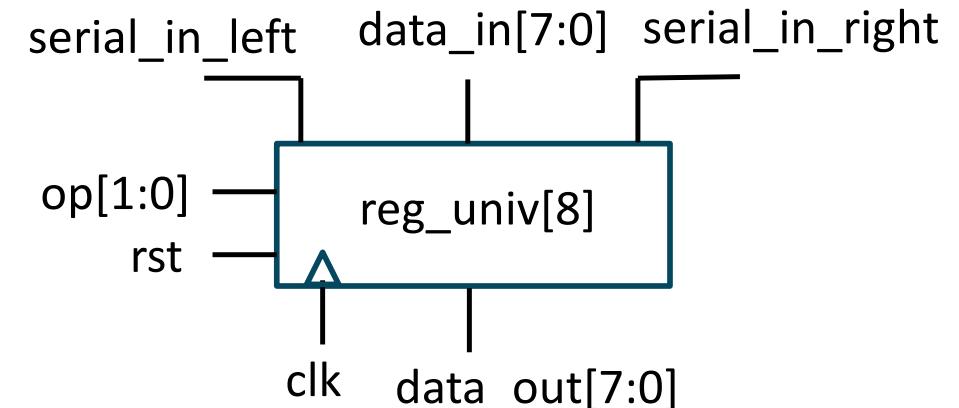
Ejemplo: registro universal

```

module reg_univ #( parameter WIDTH = 8)(
    input wire clk, rst,
    input wire [1:0] op,
    input wire serial_in_left,
    input wire serial_in_right,
    input wire [WIDTH-1:0] data_in,
    output reg [WIDTH-1:0] data_out
);

always @(posedge clk, posedge rst) begin
    if (rst)
        data_out <= '0;
    else
        case (op)
            2'b00: data_out <= data_out;
            2'b01: data_out <= {data_out[WIDTH-2:0], serial_in_right};
            2'b10: data_out <= {serial_in_left, data_out [WIDTH-1:1]};
            2'b11: data_out <= data_in;
            default: data_out <= '0;
        endcase
    end
endmodule

```



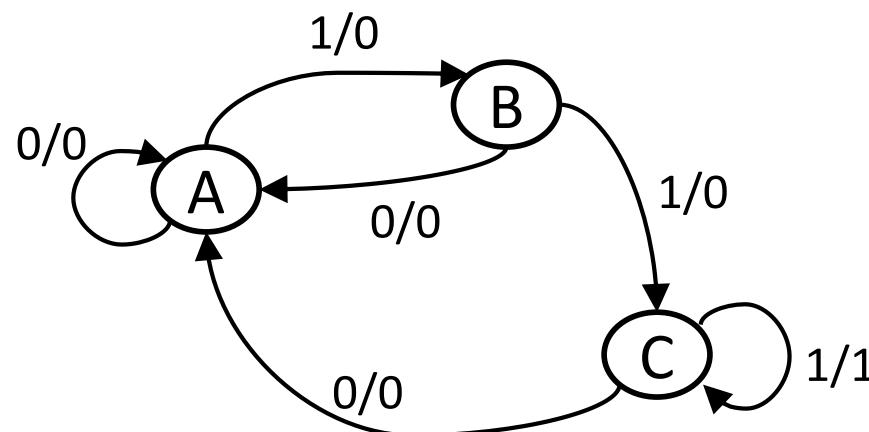
```

begin
    data_out <= data_out<<1;
    data_out[0] <= serial_in_right
end

```

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- **Máquinas de estado**
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Se utilizará una estructura general del código en la que hay 2 tipos de procesos
 - Un proceso **always** para establecer las condiciones de cambio de estado
 - Uno o varios procesos **always** para calcular el próximo estado y las salidas. También pueden usarse sentencias **assign**.
- Se incorpora reset asíncrono (puede ser síncrono) para llevar a la máquina a un estado inicial conocido.



El estado inicial que conviene definir en este caso es el estado A

```
module detector_3_unos (
    input wire clk,
    input wire rst,
    input wire in,
    output wire z );

parameter A=2'b00, B=2'b01, C=2'b10;
reg [1:0] state, next_state;

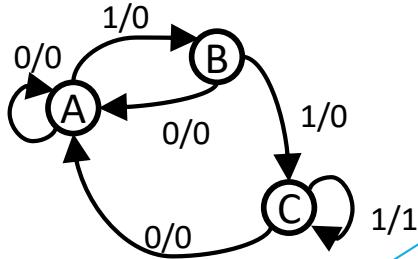
always @(posedge clk or posedge rst) begin
    if (rst)
        state <= A;
    else
        state <= next_state;
end
```

se declaran entradas y salidas

se asignan códigos a los estados y se declaran las variables de estado

procedimiento de cambio de estado:

- valor 1 en rst lleva a la máquina al estado inicial
- un flanco positivo en clk lleva a cambio de estado



procedimiento combinacional de cálculo del próximo estado

```

always@* begin
  case (state)
    A: next_state = in ? B : A;
    B: next_state = in ? C : A;
    C: next_state = in ? C : A;
    default: next_state = A;
  endcase
end
assign z = (state == C && in);
endmodule
  
```

podría realizarse con **if/else** en lugar de la sentencia condicional

```

case (state)
  A: if (in)
    next_state = B;
  else
    next_state = A;
  B: if (in)
    next_state = C;
  else
    next_state = A;
  C: if (in)
    next_state = C;
  else
    next_state = A;
  default: next_state = C;
endcase
  
```

cálculo de la salida
podría realizarse con otro **always** en lugar del **assign**

```

always @*
  if (in==1 && state == C)
    z=1;
  else
    z=0;
  
```

```
module detector_3_unos (
    input wire clk,
    input wire rst,
    input wire in,
    output wire z );

parameter A=2'b00, B=2'b01, C=2'b10;
reg [1:0] state, next_state;

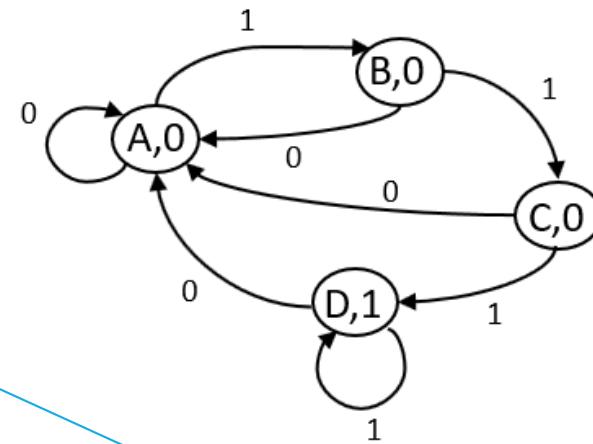
always @ (posedge clk or posedge rst) begin
    if (rst)
        state <= A;
    else
        state <= next_state;
end

```

El bloque de declaración del módulo no cambia

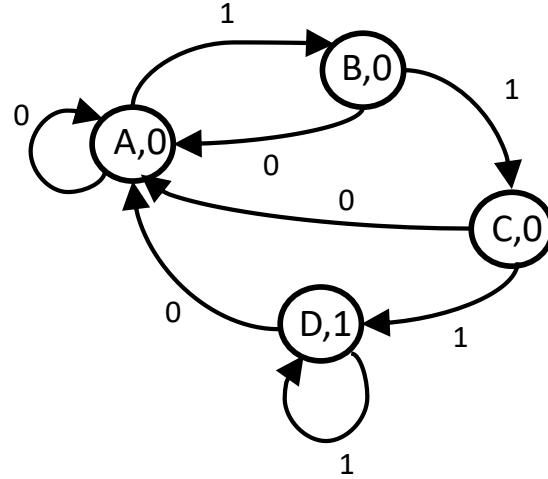
La misma especificación puede realizarse mediante una **máquina de Moore**

En este caso la salida está asociada al estado presente ya que no depende del valor de la entrada de forma directa



El procedimiento de cambio de estado, tampoco cambia:

- valor 1 en rst lleva a la máquina al estado inicial
- un flanco positivo en clk lleva a cambio de estado



```

always @* begin
  case (state)
    A: next_state = in ? B : A;
    B: next_state = in ? C : A;
    C: next_state = in ? D : A;
    D: next_state = in ? D : A;
    default: next_state = A;
  endcase
end
assign z = (state == D);
endmodule
  
```

```

always @*
  if (state == D)
    z=1;
  else
    z=0;
  
```

El cálculo de la salida
podría realizarse con
otro **always** en lugar
del **assign**

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- **Máquinas de estado**
- Directivas define e include
- Simulación funcional

- Se puede usar la directiva **`define`** para definir constantes y macros que se reemplazan antes de la compilación del código.
- Permite cambiar fácilmente los valores de los símbolos sin tener que editar el código.
- Sintaxis: **`define`** SIMBOLO valor

– Ejemplo:

```
`define CLOCK_PERIOD 10 // Define una constante: el período de reloj
module testbench;
    reg clk;
    ...
    initial begin
        clk = 0;
        forever #(`CLOCK_PERIOD / 2) clk = ~clk; // Generación del reloj
    end
    ...
endmodule
```

- Se puede usar la directiva **`include`** para incluir archivos fuente externos en un código.
 - Se usa principalmente en testbenches para organizar mejor el código y reutilizar definiciones evitando el tener que repetirlas en múltiples archivos.
- Sintaxis: **`include "archivo.sv"**
 - Ejemplo:

```
// constantes.sv
`define WIDTH 8
`define NUM_ENTRADAS 16
```

```
module test;
`include "constantes.sv" // Incluir archivo de constantes

reg [`WIDTH-1:0] data[`NUM_ENTRADAS-1:0];

initial begin
    $display("Ancho de datos: %0d", `WIDTH);
    $display("Número de entradas: %0d", `NUM_ENTRADAS);
end
endmodule
```

- Aspectos básicos
- Tipos de datos
- Vectores y arrays
- Literales y bases
- Procedimientos:
 - sentencias condicionales
 - bucles
- Operadores
- Parámetros
- Máquinas de estado
- Directivas define e include
- **Simulación funcional**

- Pasos para la simulación:
 - se debe disponer de la descripción del módulo a simular en Verilog
 - hay que crear un módulo especial llamado **testbench** que:
 - incluirá una instancia del circuito a probar (dut: design under test)
 - generará los estímulos necesarios para probar su funcionamiento
 - el testbench puede incluir bloques procedimentales: **initial**, **always**, ...
 - para observar las formas de onda durante la simulación, se usan comandos específicos:
 - **\$dumpfile**, **\$dumpvars**, **\$dumpon**, **\$dumpoff**...

- Nota: algunos entornos de diseño como ISE o Vivado no requieren estos comandos pues usan su propio formato de volcado y permiten añadir las ondas manualmente al simular
- Comando **\$dumpfile**:
 - Sintaxis: **\$dumpfile("nombre.vcd")**
 - Este comando indica el nombre del archivo donde se guardará la información de la simulación, generalmente en formato VCD (Value Change Dump). Este contendrá todos los cambios de las señales que se especifiquen.
- Comandos **\$dumpon** y **\$dumpoff**:
 - Permiten iniciar y detener el registro de datos durante la simulación para generar un archivo vcd más pequeño

- Comando **\$dumpvars**:
 - Sintaxis: **\$dumpvars(n, modulo)**
 - Con este comando se seleccionan las variables y señales que se van a volcar en el archivo definido con **\$dumpfile**.
 - Con **\$dumpvars(0, top)** se vuelcan todas las variables de todas las instancias y módulos que forman parte de la simulación, es decir, se realiza un volcado global
 - También se puede limitar el volcado especificando un módulo concreto y el número de niveles (n) de jerarquía al que se quiere descender: **\$dumpvars(n, instancia)**
 - **\$dumpvars**; es equivalente a **\$dumpvars(0, top)** en Verilog

Organización de un testbench

El testbench es un módulo sin entradas ni salidas

Se declaran señales de prueba para conectarlas al módulo a probar

Se instancia el módulo y se conectan a él las señales de prueba

En este bloque **initial** se incorporan los comandos para que se generen formas de onda.

```
module tb_codificador_de_prioridad;
reg [3:0] entrada;
wire [1:0] salida;
wire e;

codificador_de_prioridad dut (
    .entrada(entrada),
    .salida(salida),
    .e(e)
);

initial begin
    $dumpfile("codificador_de_prioridad.vcd");
    $dumpvars(0, tb_codificador_de_prioridad);
end

initial begin
    entrada = 4'b0000;
    #10;
    entrada = 4'b0001;
    #10;
    entrada = 4'b0010;
    #10;

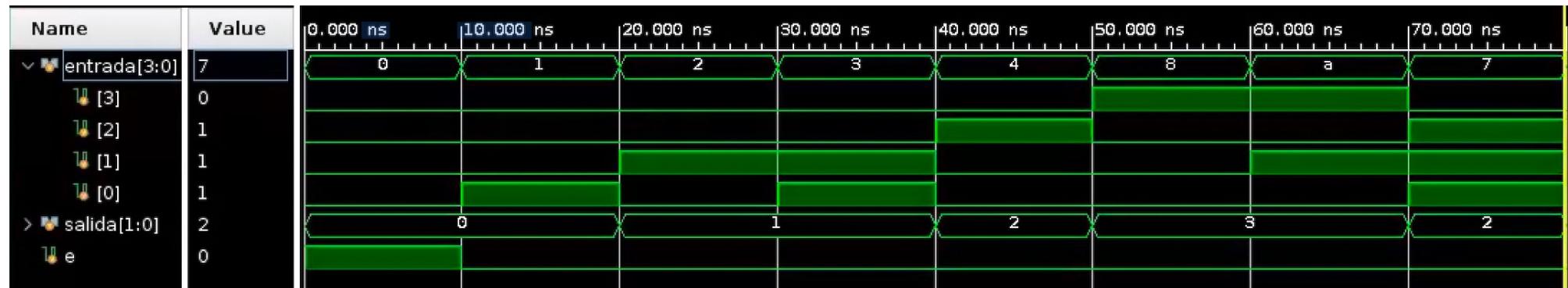
```

```
    entrada = 4'b0011;
    #10;
    entrada = 4'b0100;
    #10;
    entrada = 4'b1000;
    #10;
    entrada = 4'b1010;
    #10;
    entrada = 4'b0111;
    #10;
    $finish;
end
endmodule
```

En este bloque **initial** se fijan los valores de las entradas y se establece el final de la simulación.

Resultado de la simulación

- El simulador nos muestra entradas y salidas para los casos probados: 0000,0001,0010,0011,0100,1000,1010,0111
- Cada valor se mantiene durante 10ns (ver más adelante unidades)
- La salida nos muestra en cada caso el código de la entrada más prioritaria que valga 1.
- El bus de entrada ha sido desplegado para apreciar mejor las entradas
- El bus de salida se muestra en base 10



Otra opción para la organización del testbench

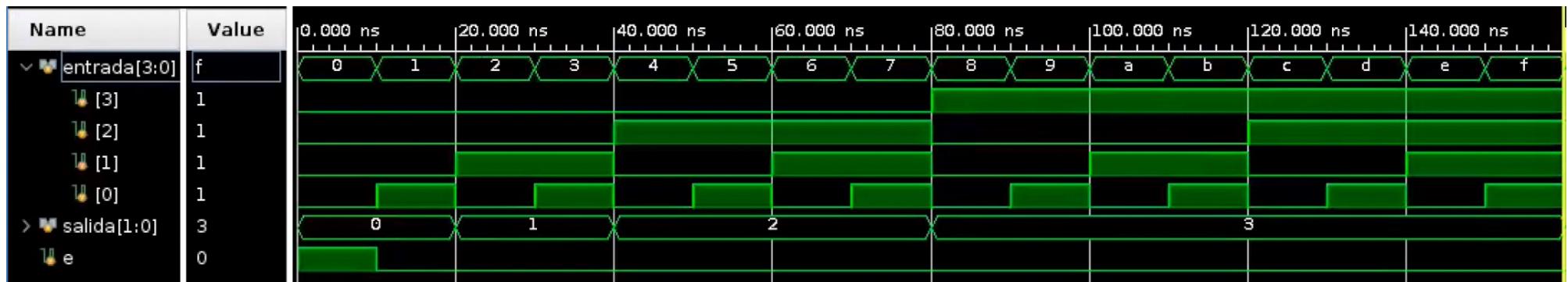
En este bloque **initial** solo se proporciona el valor inicial de las entradas y se establece el final de la simulación

```
module tb_codificador_de_prioridad;  
  
reg [3:0] entrada;  
wire [1:0] salida;  
wire e;  
  
codificador_de_prioridad dut (  
    .entrada(entrada),  
    .salida(salida),  
    .e(e)  
);  
  
initial begin  
    $dumpfile("codificador_de_prioridad.vcd");  
    $dumpvars(0, tb_codificador_de_prioridad);  
end  
  
initial begin  
    entrada = 4'b0000;  
    #160;  
    $finish;  
end  
  
always begin  
    #10;  
    entrada = entrada + 1'b1;  
end  
endmodule
```

En este bloque **always** se cubren todas las posibilidades de entrada.

Resultado de la simulación

- El simulador nos muestra entradas y salidas para todos los casos posibles de entrada (son 16): 0000,0001,0010, ..., 1101,1110,1111
- Cada valor se mantiene durante 10ns (ver más adelante unidades)
- La salida nos muestra en cada caso el código de la entrada más prioritaria que valga 1.
- El bus de entrada ha sido desplegado para apreciar mejor las entradas
- El bus de salida se muestra en base 10



- El tiempo se puede expresar con el símbolo **#** seguido de un valor numérico entero o en punto fijo seguido (sin espacio) por una unidad de tiempo (**fs ps ns us ms s**)
 - Ejemplo: #10ns
- Existe una directiva **`timescale** que fija las unidades de tiempo y la precisión en la simulación
 - Sintaxis: **'timescale unidad/precisión**
 - Ejemplo: **'timescale 1ns/100ps** (usar 1, 10, 100)
- Si al expresar el tiempo no se incluyen unidades se entiende que se usa la indicada en la directiva **`timescale**
 - El simulador redondea las cantidades a la precisión establecida.

- Se puede imprimir información durante la simulación mediante las funciones **\$display** y **\$monitor**. Ambas escriben con formato.
- **\$display** imprime el mensaje una sola vez: en el punto donde se incluye.
 - Ejemplo:
 - `$display ("Valor de la señal A = %0d", A);`
- **\$monitor** se escribe una sola vez, pero imprime el mensaje cada vez que cambia alguna de las variables incluidas en su lista.
 - Ejemplo:
 - `$monitor ("Tiempo: %0d , A = %0d , B = %0d", $time, A, B);`

```
'timescale 1ns/1ns
module tb_codificador_de_prioridad;
    ...
    ...

initial begin
```

```
    entrada = 4'b0000;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b0001;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b0010;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b0011;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b0100;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b1000;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    #10;
    entrada = 4'b1010;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    entrada = 4'b0111;
    #10;
    $display("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    ...
    ...

```

Incluimos la directiva `'timescale` para fijar las unidades de tiempo y la precisión

```
Tiempo 10: entrada = 0000, salida = 00, e = 1
Tiempo 20: entrada = 0001, salida = 00, e = 0
Tiempo 30: entrada = 0010, salida = 01, e = 0
Tiempo 40: entrada = 0011, salida = 01, e = 0
Tiempo 50: entrada = 0100, salida = 10, e = 0
Tiempo 60: entrada = 1000, salida = 11, e = 0
Tiempo 70: entrada = 1010, salida = 11, e = 0
Tiempo 80: entrada = 0111, salida = 10, e = 0
testbench.sv:66: $finish called at 80 (1ns)
```

La salida por pantalla muestra los resultados con el formato solicitado en el testbench

```

`timescale 1ns/1ns
module tb_codificador_de_prioridad;
    ...
    ...
initial begin
    $monitor ("Tiempo %0d: entrada = %b, salida = %b, e = %b", $time, entrada, salida, e);
    entrada = 4'b0000;
    #10;
    entrada = 4'b0001;
    #10;
    entrada = 4'b0010;
    #10;
    entrada = 4'b0011;
    #10;
    entrada = 4'b0100;
    #10;
    entrada = 4'b1000;
    #10;
    entrada = 4'b1010;
    #10;
    entrada = 4'b0111;
    ...
    ...

```

Tiempo 10: entrada = 0000, salida = 00, e = 1
 Tiempo 20: entrada = 0001, salida = 00, e = 0
 Tiempo 30: entrada = 0010, salida = 01, e = 0
 Tiempo 40: entrada = 0011, salida = 01, e = 0
 Tiempo 50: entrada = 0100, salida = 10, e = 0
 Tiempo 60: entrada = 1000, salida = 11, e = 0
 Tiempo 70: entrada = 1010, salida = 11, e = 0
 Tiempo 80: entrada = 0111, salida = 10, e = 0
 testbench.sv:26: \$finish called at 80 (1ns)


 Con una única línea
 conseguimos el mismo
 efecto

- Contador módulo 256 y testbench:

```
module simple_counter (
    input wire clk, rst,
    output reg [7:0] count );

    always @(posedge clk or posedge rst)
        begin
            if (rst)
                count <= 8'd0;
            else
                count <= count + 1;
        end
    endmodule
```

```
module test_repeat_loop;
    reg clk,rst;
    wire [7:0] count;

    simple_counter uut (
        .clk (clk),
        .rst (rst),
        .count (count ));

    always begin
        #5 clk = ~clk;
    end

    initial begin
        clk=0;
        rst = 1;
        #12;
        rst = 0;
        repeat (20) @(posedge clk);
        $finish;
    end
endmodule
```

La organización es la ya vista:
 - creación de un módulo,
 - declaración de señales,
 - instanciación y conexión
 del módulo a probar

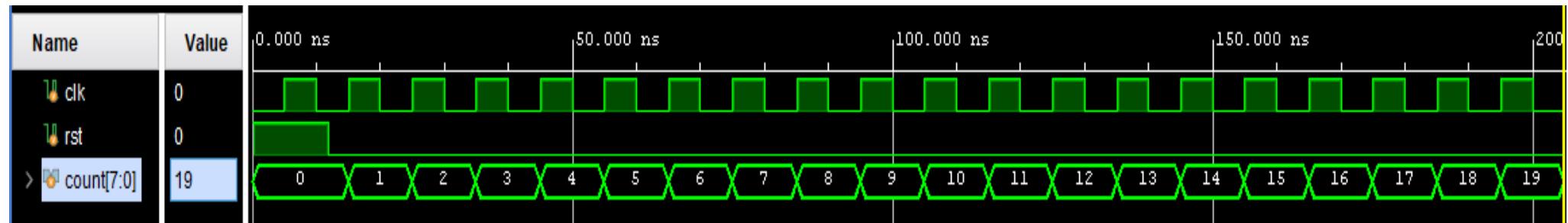
generación de la señal de reloj

generación de estímulos

con esta línea esperamos
 20 ciclos de reloj

Resultado de la simulación

- El simulador muestra las entradas: clk y rst y la salida de 8 bits del contador $count$
- El reloj es de periodo 10 ns tal y como se ha definido.
- En la salida se puede apreciar el *reset* inicial, y durante 20 ciclos de reloj la evolución del estado del contador en decimal: 0->19



- Contador módulo 8 con acarreo:

```
module mod8_counter (
    input wire clk, rst,
    output reg [2:0] count,
    output reg cy);

    always@(posedge clk or posedge rst)
    begin
        if (rst)
            count <= 3'd0;
        else
            count <= count + 1;
    end
    assign cy = (count == 3'b111);
endmodule
```

```
module test_counter;
    reg clk,rst;
    wire [2:0] count;
    wire cy;

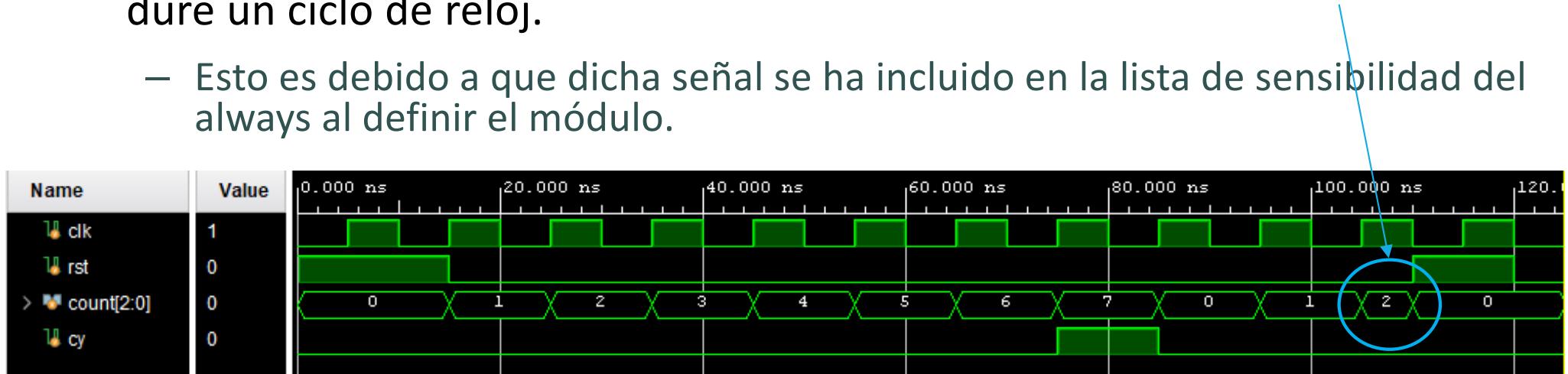
    mod8_counter uut (
        .clk (clk),
        .rst (rst),
        .count (count),
        .cy(cy));

    always begin
        #5 clk = ~clk;
    end
endmodule
```

```
initial begin
    clk=0;
    rst = 1;
    #15;
    rst = 0;
    repeat (10) @(negedge clk);
    rst=1;
    @(negedge clk);
    rst=0;
    repeat(5) @(posedge clk)
    $finish;
end
endmodule
```

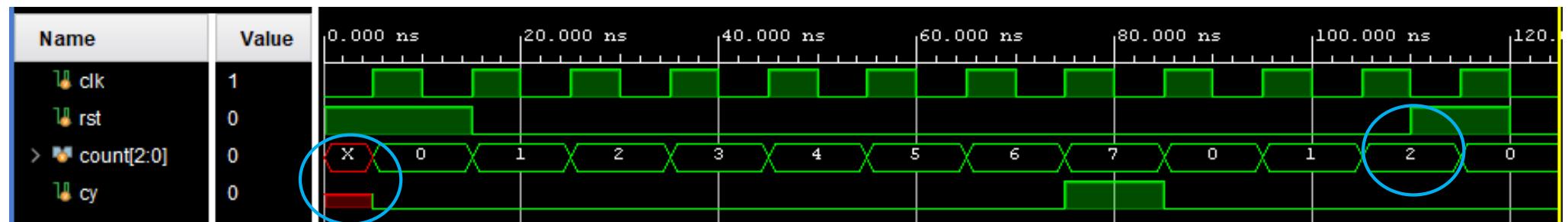
Podemos usar referencias
a ambos flancos de reloj

- El simulador muestra las entradas *clk* y *rst* y las salidas: los 3 bits del contador (*count*) y la salida de carry (*cy*)
- En la salida se aprecian:
 - el *reset* inicial y el ciclo completo de cuenta
 - la activación de la salida de *carry* en el estado 7 (último estado de cuenta)
 - otro *reset* que lleva al contador de nuevo al valor inicial (0)
- Es importante destacar que el reset se produce de forma asíncrona, sin necesidad de esperar a la señal de reloj, haciendo que el estado 2 no dure un ciclo de reloj.
 - Esto es debido a que dicha señal se ha incluido en la lista de sensibilidad del *always* al definir el módulo.



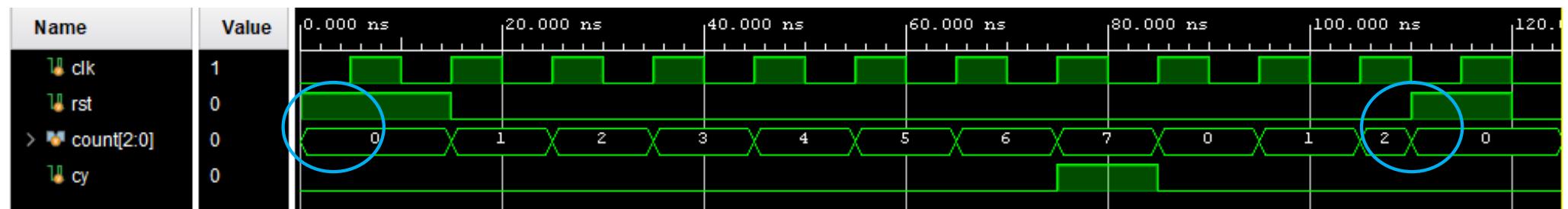
Resultado de la simulación

- Si se desea que la señal de *reset* sea síncrona basta con excluirla de la lista de sensibilidad.
- La respuesta en este caso es:



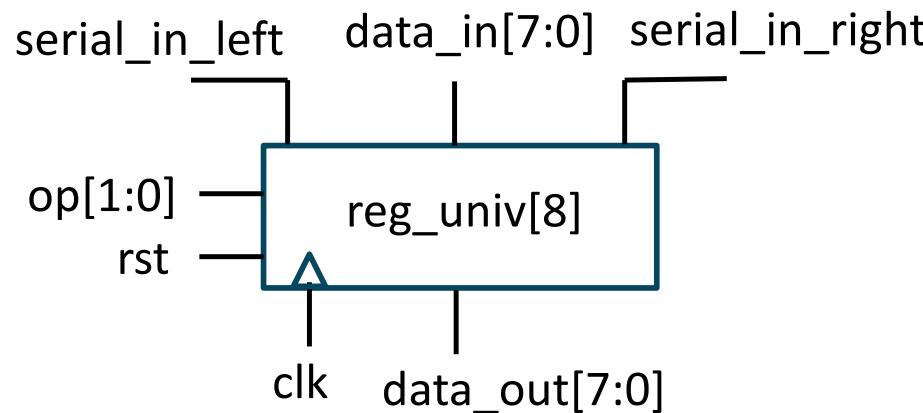
Con `always @(posedge clk)`
rst es síncrona

Con `always @(posedge clk or posedge rst)`
rst es asíncrona



- El registro universal puede realizar todas las operaciones:
 - desplazamiento a derecha e izquierda,
 - carga en paralelo (operación de escritura)
 - inhibición (guardar el dato)
 - puesta a 0

Recordamos
el módulo



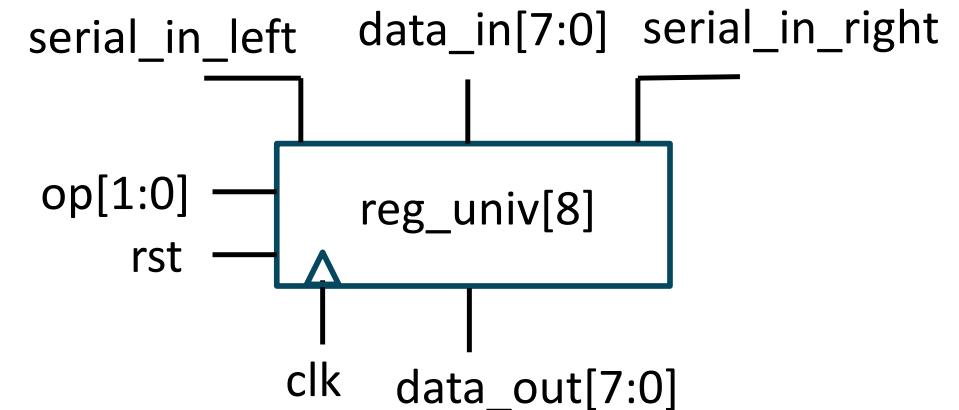
op[1:0]	operacion
0 0	inhibición
0 1	shift left
1 0	shift right
1 1	escritura

```

module reg_univ #( parameter WIDTH = 8)(
    input wire clk, rst,
    input wire [1:0] op,
    input wire serial_in_left,
    input wire serial_in_right,
    input wire [WIDTH-1:0] data_in,
    output reg [WIDTH-1:0] data_out
);

always @ (posedge clk, posedge rst) begin
    if (rst)
        data_out <= '0;
    else
        case (op)
            2'b00: data_out <= data_out;
            2'b01: data_out <= {data_out[WIDTH-2:0], serial_in_right};
            2'b10: data_out <= {serial_in_left, data_out [WIDTH-1:1]};
            2'b11: data_out <= data_in;
            default: data_out <= '0;
        endcase
    end
endmodule

```



Recordamos
el módulo

```

begin
    data_out <= data_out << 1;
    data_out[0] <= serial_in_right
end

```

```
module tb_reg_univ;
parameter WIDTH = 8;

reg clk;
reg rst;
reg [1:0] op;
reg serial_in_left;
reg serial_in_right;
reg [WIDTH-1:0] data_in;
wire [WIDTH-1:0] data_out;

reg_univ #(WIDTH(WIDTH)) dut (
    .clk(clk),
    .rst(rst),
    .op(op),
    .serial_in_left(serial_in_left),
    .serial_in_right(serial_in_right),
    .data_in(data_in),
    .data_out(data_out)
);

initial begin
    clk = 0;
    forever #5 clk = ~clk;
end
```

```
initial begin
    $dumpfile ("dump.vcd");
    $dumpvars (0, tb_reg_univ);
end

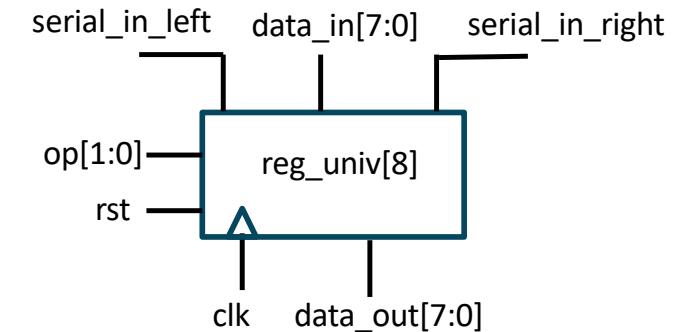
initial begin
    rst = 1;
    op = 2'b00;
    data_in = '0;
    serial_in_left = 0;
    serial_in_right = 0;

    #10;
    rst = 0; //desactiva reset

    @(posedge clk);
    op = 2'b01; // Shift left
    serial_in_right = 1; // Bit que entra
    @(posedge clk);

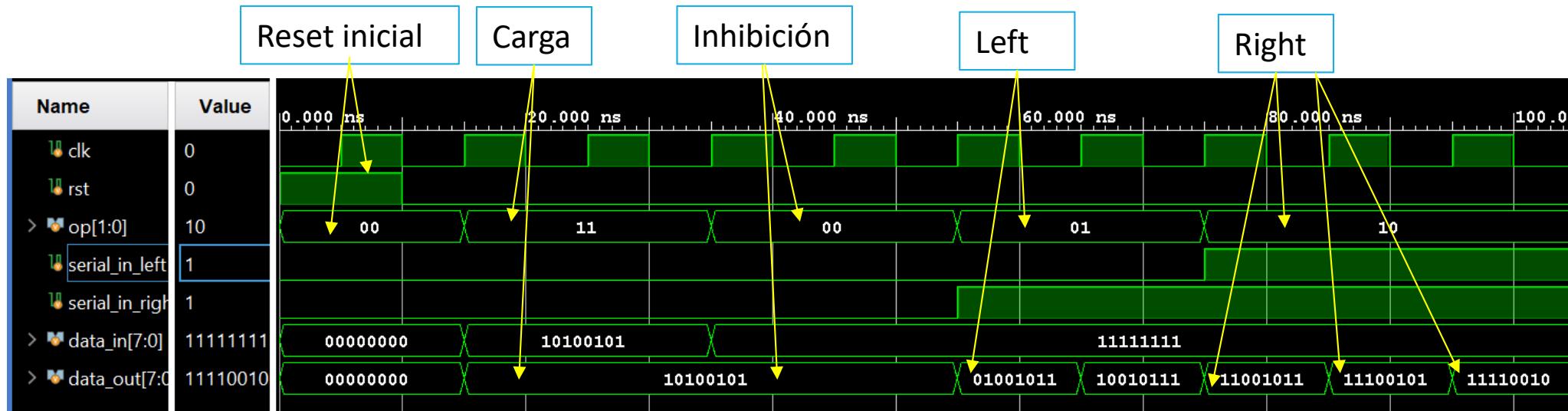
    @(posedge clk);
    op = 2'b11; // carga en paralelo
    data_in = 8'hA5; // Valor de prueba
    @(posedge clk);

    @(posedge clk);
    op = 2'b00; // inhibición
    data_in = 8'hFF; // data_in no afecta
    @(posedge clk);
```



```
@(posedge clk);
op = 2'b10; // Shift right
serial_in_left = 1; // Bit que entra
@(posedge clk);

// Finalización de la simulación
#20;
$finish;
end
endmodule
```



op[1:0]	operación
0 0	inhibición
0 1	shift left
1 0	shift right
1 1	escritura