

---

---

# TECNOLOGÍA Y ORGANIZACIÓN DE COMPUTADORES

---

---

CÓMO DISEÑAR CIRCUITOS PARA EL MERCADO Y APRENDER LA IMPORTANCIA DEL DISEÑO EN EL  
RENDIMIENTO FINAL DEL DISPOSITIVO

ALEJANDRO BARRACHINA ARGUDO

*GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA  
FACULTAD DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID*



# Índice general

<b>1. Modelado hardware con VHDL. Introducción a las FPGAs</b>	<b>7</b>
1.1. Flujo de diseño . . . . .	7
1.2. Lenguaje de descripción hardware . . . . .	7
1.3. Simulación con VHDL . . . . .	8
1.4. Estructura de un modelo VHDL . . . . .	8
1.5. Elementos básicos de VHDL . . . . .	9
1.6. Entidades parametrizables . . . . .	12
1.7. Testbench de simulación . . . . .	12
1.8. Introducción a las FPGAs . . . . .	13
<b>2. Evaluación de parámetros físicos del diseño</b>	<b>15</b>
2.1. Parámetros . . . . .	15
2.2. Análisis estático de tiempos (STA) . . . . .	15
2.2.1. Retardo de camino . . . . .	15
2.2.2. Modelado retardo: timing arcs . . . . .	16
2.3. Cálculo de tiempo de propagación . . . . .	16
2.3.1. Funcionamiento síncrono . . . . .	16
2.3.2. Definiciones . . . . .	16
2.3.3. Cálculo de tiempo de set-up y hold . . . . .	17
2.3.4. Metaestabilidad . . . . .	17
2.3.5. Clock skew . . . . .	17
2.3.6. Clock jitter . . . . .	17
2.3.7. Cálculo de tiempo de setup y hold . . . . .	18
2.3.8. Falso camino crítico . . . . .	18
2.4. Segmentación . . . . .	18
2.4.1. Rendimiento . . . . .	19
2.5. Comportamiento dinámico . . . . .	19
2.5.1. Azares y glitches . . . . .	19
2.5.2. Riesgos estáticos . . . . .	19
2.5.3. Riesgos dinámicos . . . . .	19
2.5.4. Análisis de consumo . . . . .	19
2.5.5. Consumo estático . . . . .	19
2.5.6. Consumo dinámico . . . . .	20
<b>3. Diseño combinacional avanzado</b>	<b>21</b>
3.1. Módulos combinacionales . . . . .	21
3.1.1. Decodificador . . . . .	21
3.1.2. Decodificador . . . . .	22
3.1.3. Multiplexor . . . . .	22

3.1.4. Sumador . . . . .	23
3.2. Aritmética en VHDL . . . . .	24
3.2.1. Operadores incluidos en VHDL-93 sin incluir ningún paquete . . . . .	24
3.2.2. Operadores y funciones del paquete IEEE std_logic_1164 . . . . .	24
3.2.3. Operadores del paquete IEEE numeric_std . . . . .	25
3.2.4. Funciones de conversión de datos o casting . . . . .	25
3.3. Unidades funcionales multifunción . . . . .	25
3.4. Redes iterativas . . . . .	26
3.4.1. Diseño . . . . .	26
3.4.2. Temporización . . . . .	27
3.4.3. Redes 1-D en VHDL . . . . .	27
3.4.4. Redes iterativas 2-D . . . . .	27
3.5. Técnicas de mejora del rendimiento . . . . .	28
3.5.1. Redes de anticipación . . . . .	28
3.5.2. Redes en árbol . . . . .	30
3.6. Errores de diseño . . . . .	30
3.6.1. Lazos combinacionales . . . . .	30
3.6.2. Errores de diseño en circuitos combinacionales . . . . .	30
<b>4. Diseño algorítmico</b>	<b>31</b>
4.1. Introducción . . . . .	31
4.2. Máquinas de estados: repaso . . . . .	31
4.2.1. Máquinas de estados finitos (FSM) . . . . .	31
4.2.2. Funcionamiento síncrono . . . . .	32
4.3. Elementos de memoria: repaso . . . . .	32
4.3.1. Tipos de biestables . . . . .	32
4.3.2. Biestables asíncronos: Latch . . . . .	33
4.3.3. Biestable síncrono sensible a nivel: Latch síncrono . . . . .	33
4.3.4. Problemas . . . . .	34
4.3.5. Flip-Flop disparado por flanco . . . . .	34
4.3.6. Biestable maestro-esclavo: FF . . . . .	34
4.3.7. Comparación del comportamiento temporal de los biestables . . . . .	35
4.3.8. Registros . . . . .	35
4.4. Diseño Algorítmico . . . . .	35
4.4.1. Proceso de diseño: resumen . . . . .	36
4.4.2. Diagrama de Máquina de Estados Algorítmica (ASM) . . . . .	36

<b>5. Memoria</b>	<b>37</b>
5.1. Introducción . . . . .	37
5.1.1. Jerarquía de Memoria . . . . .	37
5.2. Clasificación . . . . .	38
5.2.1. Ubicación . . . . .	38
5.2.2. Métodos de acceso . . . . .	38
5.2.3. Tecnologías de estado sólido . . . . .	38
5.3. Parámetros . . . . .	38
5.4. Tecnologías de memoria . . . . .	39
5.4.1. Static RAM (SRAM) . . . . .	39
5.4.2. Dynamic RAM (DRAM) . . . . .	39
<b>Glosario</b>	<b>41</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>43</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>44</b>



# 1 | Modelado hardware con VHDL. Introducción a las FPGAs

---

## 1.1. Flujo de diseño

TODO

## 1.2. Lenguaje de descripción hardware

Hardware Description Language (HDL) es un lenguaje específicamente creado para el diseño de circuitos, tanto a nivel de puerta como a nivel de comportamiento. La estructura del lenguaje sugiere el diseño Hardware (HW).

Los HDL se usan para poder descubrir problemas en el diseño del HW antes de su implementación física. Como la complejidad de los sistemas electrónicos crece exponencialmente, es necesaria una herramienta que trabaje con el ordenador. Por último, gracias a estas herramientas más de una persona puede trabajar en el mismo proyecto

En este curso usaremos VHDL, esto nos permite hacer descripciones de la estructura del circuito con:

- Descomposición en sub-circuitos
- Interconexión de sub-circuitos
- comportamiento
- Estructural

También permite la especificación de un circuito utilizando formas familiares de lenguajes de programación y la simulación del circuito antes de su fabricación.

Un HDL tiene que ser capaz de simular el comportamiento real del HW sin que el programador necesite imponer restricciones.

### Ejemplo 1:

t = 5ns	t=10ns
A = 0	A = 1
B = 1	B = 1
C = 0	C = 0

#### Descripción 1:

D = A and B;

S = D or C;

#### Descripción 2:

S = D or C;

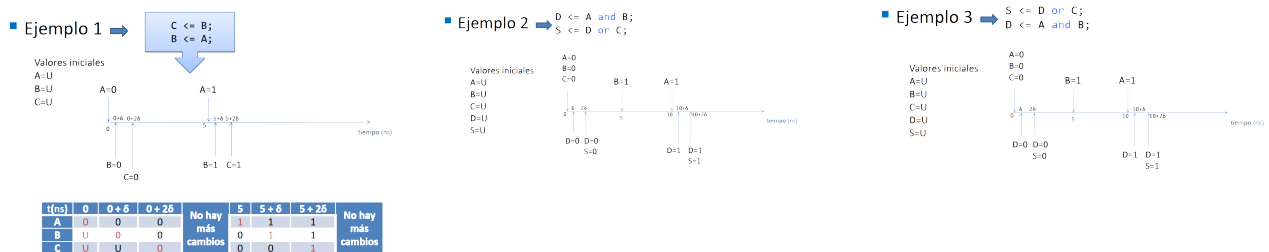
D = A and B;

¿Se obtiene el mismo resultado? No, en la descripción 1 en t = 10ns el valor de S será 1, mientras que en la descripción 2 seguirá siendo 0.

## 1.3. Simulación con VHDL

VHDL realiza la simulación siguiendo la técnica de **simulación por eventos discretos**, esto permite avanzar el tiempo a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de eventos. La simulación consta de tres fases:

- **Fase 0:** fase de inicialización donde las señales se les asignan unos valores iniciales y se pone el tiempo a cero. La asignación se hace rellenando una lista de eventos para el instante  $t = 0$ .
- **Fase 1:** todas las transiciones planificadas para ese tiempo se ejecutan
- **Fase 2:** las señales que se han modificado en consecuencia de las transiciones planificadas en el instante  $t$  se escriben en la lista de eventos planificándose para el instante  $t + \delta$ , donde  $\delta$  es un instante infinitesimal. Una vez acabado esta fase se vuelve a la fase 1 hasta que se termine la simulación.



**Pregunta ejemplo 3:** ¿Qué pasaría si en 5 en vez de cambiar B cambia C?  $S=1$  ya que  $D \text{ or } C$  si  $c = 1$  siempre es 1.

## 1.4. Estructura de un modelo VHDL

Un sistema digital está descrito por sus entradas y sus salidas, donde las salidas dependen de las entradas. Los modelos VHDL están formados por dos partes:

```

1 ENTITY nombre IS
2     GENERIC (lista_de_parametros);
3     PORT (
4         A : IN BIT;
5         B : OUT BIT);
6 END nombre;
```

Figura 1.4.1: Ejemplo Entity

```

1 ARCHITECTURE circuito OF nombre IS
2     -- Signals
3 BEGIN
4     -- Definición del circuito
5 END circuito; -- circuito
```

Figura 1.4.2: Ejemplo Architecture

La entity define externamente el circuito o subcircuito, especifica el nombre y el número de puertos, su tipo de datos y si son de entrada o salida, tiene toda la información necesaria para conectar tu circuito a otros circuitos. La architecture define internamente el circuito, sus señales internas, funciones, procedimientos, constantes, etc.

Cada architecture va asociada a una entity y se indica en la primera sentencia. Antes del begin se definen las señales, los tipos y los componentes



```

1 ENTITY F IS
2     PORT (
3         A, B : IN STD_LOGIC;
4         Y : OUT STD_LOGIC);
5 END F;
6
7 ARCHITECTURE circuito OF F IS
8
9     SIGNAL D, E : STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNTO 0);
10    SIGNAL H : STD_LOGIC;
11
12 BEGIN
13
14     -- Implementación del circuito
15
16 END circuito; -- circuito

```

Figura 1.4.3: Ejemplo Entity y Architecture

## 1.5. Elementos básicos de VHDL

Las sentencias concurrentes siempre se encuentran fuera de los PROCESS, aparecen en cualquier punto del programa después del begin de la arquitectura, es lógica combinacional pura y siempre tiene un ELSE final o un WHEN OTHERS.

```

1 signal_name <= valor_1 WHEN condition1 ELSE
2   valor_2 WHEN condition2 ELSE
3   valor_i WHEN condition1 ELSE
4   otro_valor;

```

Figura 1.5.1: Ejemplo When-Else

```

1 WITH id SELECT
2   signal_name <= valor1 WHEN valor_id1,
3   valor2 WHEN valor_id2,
4   valori WHEN valor_idi,
5   otro_valor WHEN OTHERS;

```

Figura 1.5.2: Ejemplo With-Select-Else

Los procesos son sentencias concurrentes. Solo se ejecutan esas sentencias que se encuentran dentro del proceso si alguna de las señales de la lista de sensibilidad ha cambiado de valor. La lista de sensibilidad es opcional, si no existe el proceso se ejecuta infinitas veces. Es un código secuencial.

```

1 identificador : PROCESS (lista de sensibilidad)
2 BEGIN
3     -- Sentencias secuenciales
4     -- Sentencias condicionales
5     -- Ecuaciones booleanas
6 END PROCESS; -- identificador

```

Figura 1.5.3: Ejemplo Process

Las secuencias condicionales van dentro de un process, si la lista de sensibilidad está incompleta, el comportamiento del process será incorrecto. Estas sentencias deben tener un caso por defecto.

```

1 ifthenelse : PROCESS (a, b, c)
2 BEGIN
3     IF a = b THEN
4         c <= a OR b;
5     ELSIF a < b THEN
6         c <= b;
7     ELSE
8         c <= "0000";
9     END IF;
10 END PROCESS; -- ifthenelse

```

Figura 1.5.4: Ejemplo If-Then-Else

```

1 CASE expresion IS
2     WHEN choice_1 => statements;
3     WHEN choice_n => statemens;
4     WHEN OTHERS => statemenst;
5 END CASE;

```

Figura 1.5.5: Ejemplo Case

Ejemplos de bucles en VHDL:

```

1 id : LOOP
2   list_of_statements
3   -- Use exit statement to
   get ount
4 END LOOP id; -- id

```

Figura 1.5.6: Loop simple

```

1 id : FOR var IN rango LOOP
2   list_of_statements
3 END LOOP id; -- id

```

Figura 1.5.7: For Loop

```

1 id : WHILE condition LOOP
2   list_of_statements
3 END LOOP id; --id

```

Figura 1.5.8: While Loop

Las sentencias wait se usan en procesos, procedimientos y funciones y, como indica su nombre, hace que haya un tiempo de espera. Puede ser de tres tipos:

- **wait for** <timeout clause, time delay>: **wait for** 10 ns;
- **wait until** <condition>: **wait until** clk = '1';
- **wait on** <sensitive clause, event>: **wait on** in1;

Atributos:

- **S'DELAYED(t)** es el valor de la señal S en el tiempo actual -t.
- **S'STABLE** es true si no hay ningún evento ocurriendo para S.
- **S'STABLE(t)** es true si no hay eventos ocurriendo en S durante t unidades de tiempo.
- **S'QUIET** es true si no hay eventos en ese ciclo de simulación para la señal S.
- **S'QUIET(t)** es true si no hay eventos en ese ciclo de simulación para la señal S durante t unidades de tiempo.
- **S'TRANSACTION** es un valor BIT, el inverso del valor previo de cada ciclo en que S está activo.
- **S'EVENT** es true si S tiene un evento en el ciclo de simulación.
- **S'ACTIVE** es true si S está activa durante el ciclo de simulación.
- **S'LAST\_EVENT** es el tiempo desde el último evento en S.
- **S'LAST\_ACTIVE** es el tiempo desde la última vez que S estuvo activa.
- **S'LAST\_VALUE** es el valor anterior de S.

Tipos de datos:

- Tipos enteros y reales:
  - INTEGER
  - NATURAL
  - REAL
- Tipos físicos
  - TIME
  - RESISTANCE
- Tipos enumerados: conjuntos de posibles valores
  - BIT 0,1
  - BOOLEAN TRUE, FALSE
  - CHARACTER ASCII CHARACTERS
  - STD\_LOGIC U, X, 0, 1, Z, W, L, H, -

Se pueden definir tipos personalizados

```

1 TYPE nuevo_tipo1 IS (v1, v2, v3, v4);
2 TYPE nuevo_tipo2 IS RANGE 0 TO 17;
3 SIGNAL A : nuevo_tipo1;
4 SIGNAL B, C : nuevo_tipo2;
5
6 -- Asignaciones a señales, dentro dde la arquitectura
7
8 A <= v1; -- Asignacion correcta
9 B <= 17; -- Asignacion correcta
10 C <= 18; -- Asignacion incorrecta
11
12 -- Los records son como Structs de C++
13
14 TYPE my_record IS
15 field_1 : STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNT0 0);
16 field_2 : STD_LOGIC;
17 END RECORD;
18
19 SIGNAL A, C : my_record;
20 SIGNAL B : STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNT0 0);
21
22 -- Asignaciones a "A", dentro de la arquitectura
23 A.field_1 <= B;
24 A.field_2 <= B(2);
25 C <= A; -- Se pueden hacer asignaciones directas o campo a campo

```

Figura 1.5.9: Ejemplo tipos personalizados

Arrays:

```

1 TYPE my_array IS ARRAY (3 DOWNT0 0) OF STD_LOGIC_VECTOR(3 DOWNT0 0);
2
3 SIGNAL A : my_array;
4 SIGNAL B : STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNT0 0);
5
6 -- Asignaciones a "A", dentro de la arquitectura
7
8 A(1) <= B(3 DOWNT0 0);
9 A(2) <= B(7 DOWNT0 4);
10
11 -- Tambien se pueden declarar constantes
12 CONSTANT M : INTEGER := 32;
13 SIGNAL A : STD_LOGIC_VECTOR(M - 1 DOWNT0 0);

```

Figura 1.5.10: Ejemplo Arrays

Un **componente** es una entidad que se describe dentro de una arquitectura

```

1 ARCHITECTURE arch_name OF entity_name IS
2     COMPONENT component_name
3         PORT ( < IO_ports_list >);
4     END COMPONENT;
5     --declaración de señales;
6     begincomponent_i : component_name
7         PORT MAP( < s1 >, < s2 >, ..., < sn >);
8 END arch_name;

```

Figura 1.5.11: Ejemplo Component

**Generate:** las secuencias de generación de componentes permiten crear una o más copias de un conjunto de interconexiones, lo cual facilita el diseño de circuitos mediante descripciones estructurales

```

1 COMPONENT comp
2   PORT (
3     x : IN BIT;
4     y : OUT BIT);
5 END comp;
6
7 SIGNAL a, b : BIT_VECTOR(0 TO 7);
8
9 gen : FOR i IN 0 TO 7 GENERATE
10    u : comp PORT MAP(a(i), b(i));
11 END GENERATE; -- gen

```

Figura 1.5.12: Ejemplo Generate

Un **paquete** son agrupaciones de tipos, funciones y procedimientos personalizados. Pueden ser incluidos en uno o varios diseños, normalmente se definen en ficheros .vhd dedicados.

```

1 PACKAGE nombre IS
2   -- tipos personalizados
3   -- constantes
4   -- declaraciones de componentes
5   -- funciones y procedimientos (SOL0 declaraciones)
6 END nombre;
7
8 PACKAGE BODY nombre IS
9   -- Funciones y procedimientos (cuerpo)
10 END nombre;

```

Figura 1.5.13: Ejemplo Package

## 1.6. Entidades parametrizables

Una entity puede tener una lista de parámetros. El valor por defecto de los parámetros genéricos es opcional, sin embargo, no se puede sintetizar un diseño con parámetros que no tengan asignado un valor.

Al instanciar este componente en otro fichero, hay que asignar un valor a *n* si y solo si no se le dio un valor por defecto en su declaración de entity.

Se puede utilizar la asignación (*others=>0*) o (*others=>1*) para asignar el valor 0...0 o 1...1 a una señal de longitud parametrizable.

## 1.7. Testbench de simulación

Para conocer si nuestro diseño funciona correctamente tendremos que introducir unos estímulos en las entradas y comprobar que las salidas obtenidas son las deseadas.

### Estructura básica:

1. Se crea una entidad de simulación sin puertos de entrada ni de salida
2. Se añade como component la entity a verificar
3. Se definen tantas señales como puertos de la entity del diseño a verificar
4. Se instancia el component igualando las señales internas a las entradas
5. Se crea el process de simulación, no tiene lista de sensibilidad
6. Se definen los valores iniciales de las entradas
7. Se definen los valores de las entradas en los siguientes instantes de tiempo

Cómo implementar una entrada periódica: *clk*

```
1 clk_process : PROCESS ()
2 BEGIN
3     clk <= '0';
4     WAIT FOR clk_period/2;
5     clk <= '1';
6     WAIT FOR clk_period/2;
7 END PROCESS; -- clk_process
```

Figura 1.7.1: Ejemplo Clk

Como este process no acaba con un wait sin for, se repetirá indefinidamente.

## 1.8. Introducción a las FPGAs

Una Field-Programmable Gate Array (FPGA) es un HW de prototipado automático. Inicialmente servía para lo mismo que un entrenador, con la diferencia de que el circuito se implementaba automáticamente. Debido a su gran capacidad de procesamiento, versatilidad y a las herramientas de diseño 9. Introducción a las TC versatilidad y a las herramientas de diseño disponibles, actualmente existen circuitos comerciales que llevan FPGA incorporadas.

Los componentes de una FPGA son:

- Celdas de entrada salida
- Celdas lógicas programables
- Celdas de interconexión programables (las estructuras de interconexión son muy costosas)
- Memorias(opcional)
- Multiplicadores(opcional)
- Micro-controladores(opcional)

Una CLB contiene:

- Look-Up Tables: son memorias Read Only Memory (ROM) que almacenan 1x16 bits, pueden implementar cualquier función lógica de 4 entradas.
- Biestables: se utilizan en el caso de que la celda deba implementar HW secuencial. Se pueden configurar si son disparados por flanco o por nivel.
- Multiplexores: para interconectar las entradas con los módulos o los módulos entre si se utilizan multiplexores



## 2 | Evaluación de parámetros físicos del diseño

---

### 2.1. Parámetros

**Área (tamaño).** Tamaño de silicio ( $cm^2$  o  $mm^2$ ) necesarios para implementar una determinada aplicación. Depende de la arquitectura del circuito y de la tecnología empleada para su fabricación. Si no tenemos el layout del circuito podemos estimarlo con un número de puertas NAND equivalente.

**Velocidad (tiempo).** La velocidad de un circuito se corresponde con el tiempo necesario para realizar una determinada función, normalmente este concepto se calcula sobre el peor caso posible. Siempre es deseable que el circuito sea lo más rápido posible, pero casi siempre para conseguirlo se necesita un diseño más sofisticado, lo que puede implicar un mayor área de silicio y/o un mayor consumo de energía. La velocidad de un circuito está directamente relacionada con la frecuencia de reloj, pero no es verdad que una mayor frecuencia de reloj garantice que el resultado se obtenga en menos tiempo. Tendremos que evaluar a qué frecuencia puede trabajar el circuito, cuántas operaciones puede realizar por unidad de tiempo y si funcionará correctamente a la frecuencia de reloj exigida.

**Potencia (energía).** La potencia hace referencia a la energía consumida por el circuito al realizar las operaciones para las cuales fue diseñado. En todos aquellos circuitos diseñados para dispositivos móviles la reducción del consumo de potencia es la prioridad. Antes de su fabricación el circuito puede ser rediseñado para cumplir los requisitos de consumo. Un mismo diseño consume menos en tecnologías. La temperatura que alcanza un circuito está directamente relacionada con el consumo de energía. Cuanto mas dure la batería de un circuito, menor será el impacto medioambiental.

**Coste.** El diseño de un circuito digital es rara vez un objetivo en sí mismo. Se trata de una actividad económica y el coste es un importante factor, si no el decisivo. En el coste final del circuito influyen:

- El coste de desarrollo (diseño)
- El coste de producción (diseño y fabricación)
- El tiempo de salida al mercado (comercialización)

La importancia de la evaluación es:

- Conseguir diseños más rápidos, con mayor capacidad de procesamiento y reducción en la cantidad de recursos HW para realizar las mismas operaciones.
- Diseños más pequeños, menor coste de fabricación, menor posibilidad de errores físicos durante la fabricación y aumentar la capacidad de integración.
- Diseños más eficientes energéticamente, con menor huella de  $CO_2$ , mayor duración de la batería y menor coste de operación.

### 2.2. Análisis estático de tiempos (STA)

El análisis de la temporización de un circuito recibe el nombre de Static Time Analysis (STA). Determina si el circuito satisface los requisitos de temporización impuestos por el reloj.

Para este análisis debemos calcular el retardo de todos los caminos del circuito y determinar si su valor es mayor o menor que el valor límite impuesto por la señal de reloj. Si es mayor el retardo, entonces se produce una violación del timing. Si es menor, entonces el camino más lento establece la frecuencia máxima del reloj.

#### 2.2.1. Retardo de camino

Es la suma de los retardos de la lógica y conexiones desde:

- Las entradas primarias hasta las salidas primarias para todos los posibles caminos combinacionales.

- Las entradas primarias hasta los elementos de memoria.
- Los elementos de memoria hasta las salidas primarias.
- Desde los elementos de memoria hasta los elementos de memoria.

**Retardo de lógica:** retardo de las puertas o elementos lógicos del circuito.

- Combinacionales. OR, AND, sumadores, decodificadores...
- Secuenciales: FF, contadores, registros, memorias...

**Retardo de conexión:** todas las conexiones del circuito tienen un retardo.

### 2.2.2. Modelado retardo: timing arcs

Combinacional: retardo desde cualquier entrada a cualquiera de sus salidas. Secuencial: retardo desde el pin del reloj hasta cualquiera de sus salidas, a este tiempo se le conoce como Clk-2-Q. Conexiones: retardo desde el pin de salida hasta cada uno de sus destinos.

## 2.3. Cálculo de tiempo de propagación

Se suman todos los retardos de la lógica y las conexiones para todos los caminos del circuito combinacional. Depende del camino, hay tantos tiempos como caminos. Se usa el valor del camino más lento, conocido como **camino crítico**.

### 2.3.1. Funcionamiento síncrono

Si en el sistema hay elementos de memoria debe existir un reloj. El reloj determina cuándo se actualiza el estado de los elementos de memoria del sistema.

La hipótesis de funcionamiento síncrono obliga a que la diferencia en tiempo entre dos flancos consecutivos (positivos o negativos los dos) sea superior al tiempo necesario para que los valores de las entradas de los registros sean estables.

### 2.3.2. Definiciones

**Tiempo de set-up:** tiempo mínimo que la entrada debe permanecer antes del suceso del reloj.

**Tiempo de hold:** tiempo mínimo que la entrada debe permanecer estable después del suceso del reloj.

**Tiempo de propagación del registro:** tiempo que tarda en propagarse el dato desde la entrada hasta la salida del registro cuando ocurre el flanco activo de reloj.

**Tiempo de propagación combinacional:** tiempo desde que cambian las entradas del circuito combinacional hasta que se produce un cambio en las salidas. Depende del camino. Se usa el valor del camino crítico.

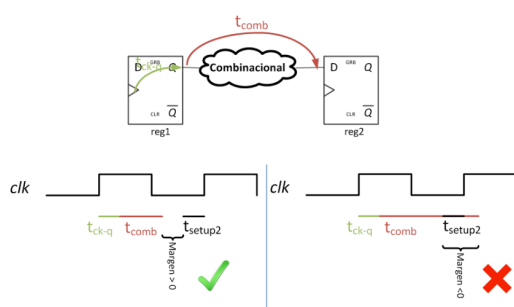


Figura 2.3.1: Margen de setup

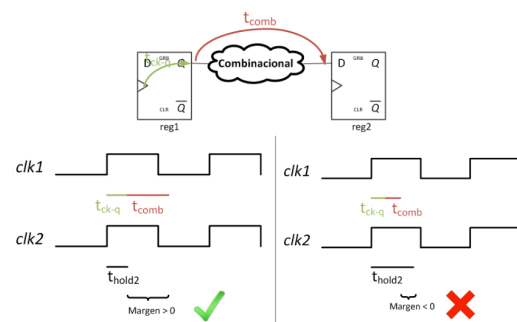


Figura 2.3.2: Margen de setup



### 2.3.3. Cálculo de tiempo de set-up y hold

Sin considerar el clock skew y el clock jitter:

$$\text{Margen setup} = t_{clk} - (t_{clk_q} + t_{comb} + t_{setup})$$

$$\text{Margen hold} = t_{clk_q} + t_{comb} + t_{hold}$$

Margen negativo → error de temporización

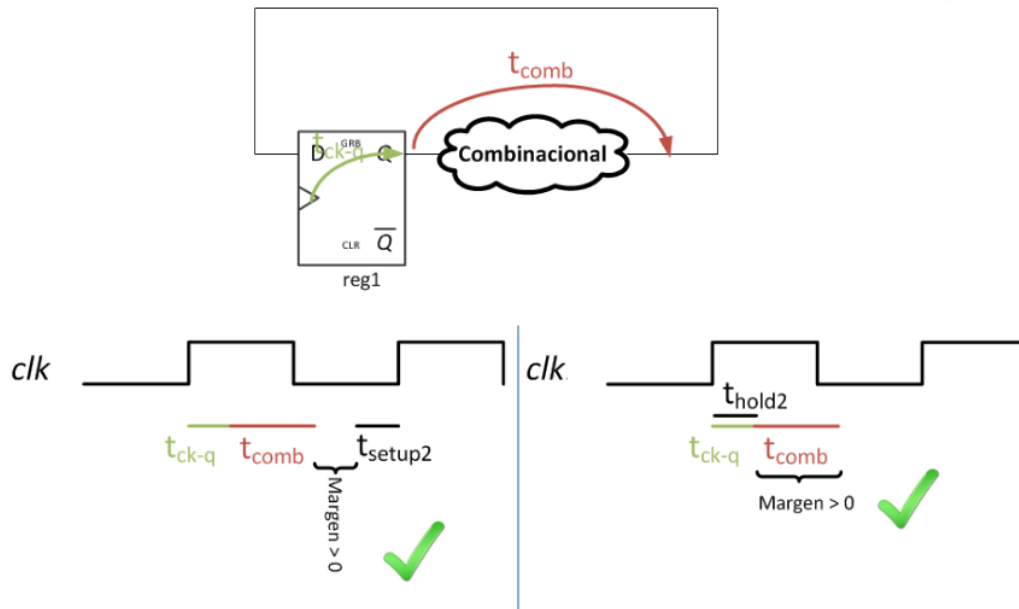


Figura 2.3.3: Circuito retroalimentado

### 2.3.4. Metaestabilidad

Consiste en una indecisión prolongada en el comportamiento lógico del biestable al intentar almacenar uno de sus dos estados estables. Ocurre si existe una violación de setup o de hold. Mientras ese biestable permanezca en metaestabilidad, sus señales de salida están indefinidas a nivel lógico.

### 2.3.5. Clock skew

El sesgo del reloj es un fenómeno que ocurre en los circuitos secuenciales cuando el reloj no llega al mismo tiempo a todos los componentes de memoria. Puede deberse a la longitud del cable, variaciones de temperatura, capacidades parásitas, imperfecciones del silicio, etc. Cuando el tiempo de ciclo es pequeño, este problema se convierte en uno de los más importantes a la hora de diseñar el circuito.

Hay dos tipos de clock skew:

- **Positive skew:** el registro que transmite recibe el reloj antes que el registro que recibe.
- **Negative skew:** el registro que transmite recibe el reloj después que el registro que recibe.

$$\text{skew} = t_{dest} - t_{orig}$$

### 2.3.6. Clock jitter

El jitter es una modificación no deseada en la periodicidad del reloj. En otras palabras, es la variación de los flancos de reloj respecto de su posición ideal en el tiempo. Tiene orígenes muy variados, variaciones en la fabricación de los osciladores, variaciones de temperatura etc.

Se especifica de tres maneras:

- **Jitter absoluto:** diferencia entre la posición real del flanco de reloj y su posición ideal.

- **Jitter periódico:** diferencia entre el periodo real del reloj y el periodo ideal. Es el más importante a efectos de STA
- **Jitter ciclo-a-ciclo:** diferencia en la duración de dos periodos de reloj adyacentes

Es necesario tenerlo en cuenta en el análisis temporal del circuito porque puede acortar la duración del ciclo de reloj. Especificado como RMS(Root Mean Square) o valor pico-a-pico, se mide la duración media del ciclo sobre una muestra y se obtiene su desviación estándar.

### 2.3.7. Cálculo de tiempo de setup y hold

Considerando el clock skew y el clock jitter

$$\text{Margen setup} = t_{clk} + skew - (t_{clk\_q} + t_{comb} + t_{setup} + jitter)$$

$$\text{Margen hold} = t_{clk\_q} + t_{comb} - (skew + jitter + t_{hold})$$

Margen negativo → **error de temporización**

$$t_{clk} + skew > (t_{clk\_q} + t_{comb} + t_{setup} + jitter)$$

$$t_{clk} > (t_{clk\_q} + t_{comb} + t_{setup} + jitter) - skew$$

### 2.3.8. Falso camino crítico

Parece el camino más lento del circuito pero en realidad no lo es, no propaga una transición. Los diseños que comparten lógica para distintos cálculos son susceptibles de tener falsos caminos.

## 2.4. Segmentación

Dividir un circuito en etapas usando registros. Las salidas de los registros de una etapa proporcionan las entradas de la siguiente etapa. Todas las etapas operan concurrentemente.

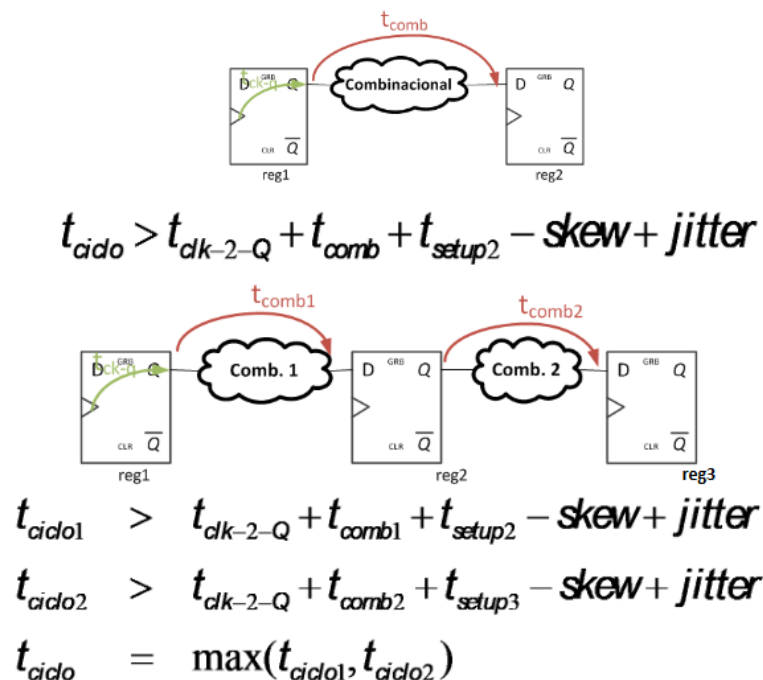


Figura 2.4.1: Tiempo de ciclo

### 2.4.1. Rendimiento

**Latencia:** tiempo transcurrido para obtener un nuevo resultado a la salida del circuito desde su entrada en este.

$$L = n * t_{ciclo}$$

**Intervalo de inicialización (Throughput):** tasa de entrada de nuevos datos en el sistema por unidad de tiempo.

$$T = \frac{1}{t_{ciclo}}$$

## 2.5. Comportamiento dinámico

La simulación lógica no mide retardos. Los retardos se miden en la Simulación Post-Place & Route. La herramienta calcula el retardo de todos los caminos, el más lento, llamado camino crítico, es el que define el retardo del circuito. El retardo de los distintos caminos del circuito puede originar errores funcionales.

### 2.5.1. Azares y glitches

El retardo de propagación de un circuito se define como el tiempo necesario para obtener un valor de salida válido. Los azares o riesgos son las posibles fluctuaciones de la señal de salida antes de alcanzar su valor final:

- Riesgo estático
- Riesgo dinámico

Estas fluctuaciones pueden ser uno o varios pulsos no deseados que reciben el nombre de glitches.

### 2.5.2. Riesgos estáticos

Un determinado cambio en la entrada produce un glitch en la salida cuando no debería producirse ningún cambio. Se deben a la existencia de distintos caminos que convergen hacia la salida con diferente retardo.

### 2.5.3. Riesgos dinámicos

La salida debe cambiar pero el cambio no es directo sino con fluctuaciones. Suelen producirse en circuitos con riesgo estático y un nivel más de puertas.

### 2.5.4. Análisis de consumo

Existen distintas métricas: potencia (temperatura) y energía (duración de la batería). Existe también el consumo estático y dinámico.

### 2.5.5. Consumo estático

Consumo de los bloques de circuito cuando no hay transiciones en las señales de entrada.

$$P_{static} = V_{dd} * I_{static}$$

Donde:

- $I_{static}$  es la corriente estática
- $V_{dd}$  es la tensión de alimentación

$I_{static}$  depende de la corriente de fuga de los transistores, la tensión de alimentación y la temperatura.

### 2.5.6. Consumo dinámico

Consumo de los bloques del circuito cuando hay transiciones en las señales de entrada.

$$P = \frac{1}{2} * C_{load} * V_{dd}^2 * f * t$$

Donde:

- $C_{load}$  es la capacidad de carga
- $V_{dd}$  es la tensión de alimentación
- $f$  es la frecuencia del reloj
- $t$  es la tasa de actividad de la puerta

# 3 | Diseño combinacional avanzado

## 3.1. Módulos combinacionales

### 3.1.1. Decodificador

Circuito combinacional con  $n$  entradas y  $2^n$  salidas. Cada salida es uno de los minterms que pueden generarse con  $n$  variables.

$$D_i = \begin{cases} 1 & \text{si } A = i \text{ donde } A = \sum_{j=0}^{n-1} A_j 2^j \text{ para } 0 \leq i \leq 2^n - 1 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

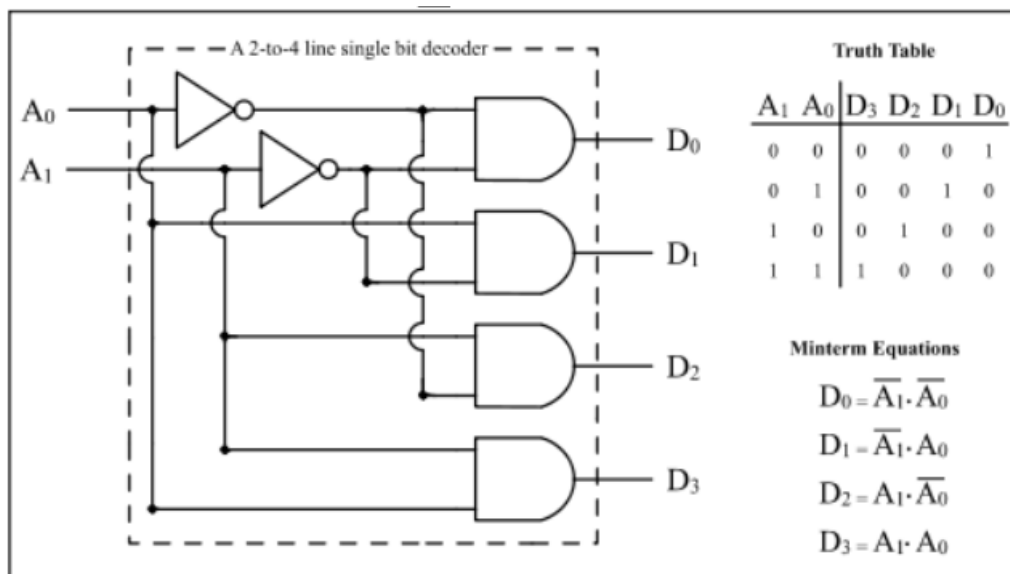


Figura 3.1.1: Decodificador

```

1 ENTITY decoder_1 IS
2     PORT (
3         sel : IN STD_LOGIC_VECTOR (2 DOWNTO 0);
4         res : OUT STD_LOGIC_VECTOR (7 DOWNTO 0));
5 END decoder_1;
6
7 ARCHITECTURE rtl OF decoder_1 IS
8 BEGIN
9     res <= "00000001" WHEN sel = "000" ELSE
10         "00000010" WHEN sel = "001" ELSE
11         "00000100" WHEN sel = "010" ELSE
12         "00001000" WHEN sel = "011" ELSE
13         "00010000" WHEN sel = "100" ELSE
14         "00100000" WHEN sel = "101" ELSE
15         "01000000" WHEN sel = "110" ELSE
16         "10000000";
17     p_decode : PROCESS (sel)
18     BEGIN
19         res <= (OTHERS => '0');
20         res(to_integer(unsigned(sel))) <= '1';
21     END PROCESS; -- p_decode
22 END rtl;

```

Figura 3.1.2: Código Codificador

### 3.1.2. Decodificador

```

1 ENTITY priority_encoder IS
2   PORT (
3     sel : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 DOWNTO 0);
4     code : OUT STD_LOGIC_VECTOR (2 DOWNTO 0));
5 END priority_encoder;
6
7 ARCHITECTURE rtl OF priority_encoder IS
8 BEGIN
9   code <= "111" WHEN sel(7) = '1' ELSE
10    "110" WHEN sel(6) = '1' ELSE
11    "101" WHEN sel(5) = '1' ELSE
12    "100" WHEN sel(4) = '1' ELSE
13    "011" WHEN sel(3) = '1' ELSE
14    "010" WHEN sel(2) = '1' ELSE
15    "001" WHEN sel(1) = '1' ELSE
16    "000" WHEN sel(0) = '1' ELSE
17    "---"; -- --- es el simbolo de don't care en
18 VHDL
19 END rtl; -- rtl

```

Figura 3.1.3: Código Decodificador

### 3.1.3. Multiplexor

Descripción de alto nivel:

$$y = x_s \text{ donde } s = \sum_{j=0}^{n-1} x_j 2^j$$

Implementación

- 2 a 1  $y = x_0 * \bar{s} + x_1 * s$
- 4 a 1  $y = x_0 \bar{s}_1 \bar{s}_0 + x_1 \bar{s}_1 s_0 + x_2 s_1 \bar{s}_0 + x_3 s_1 s_0$

```

1 ENTITY mux8_1 IS
2   PORT (
3     sel : IN STD_LOGIC_VECTOR (2 DOWNTO 0);
4     datos : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 DOWNTO 0);
5     z : OUT STD_LOGIC);
6 END mux8_1;
7
8 ARCHITECTURE rtl OF mux8_1 IS
9 BEGIN
10   WITH sel SELECT
11     z <= datos(0) WHEN "000",
12     datos(1) WHEN "001",
13     datos(2) WHEN "010",
14     datos(3) WHEN "011",
15     datos(4) WHEN "100",
16     datos(5) WHEN "101",
17     datos(6) WHEN "110",
18     datos(7) WHEN OTHERS;
19   -- z<= data(to_integer(unsigned(sel)))
20 END rtl; -- rtl

```

Figura 3.1.4: Multiplexor

### 3.1.4. Sumador

```

1  LIBRARY ieee;
2  USE ieee.std_logic_1164.ALL;
3  USE ieee.std_logic_arith.ALL;
4  USE ieee.std_logic_unsigned.ALL;
5
6  ENTITY adder IS
7      PORT (
8          a : IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0);
9          b : IN STD_LOGIC_VECTOR(7 DOWNTO 0);
10         ci : IN STD_LOGIC;
11         sum : OUT STD_LOGIC_VECTOR(7 downto 0);
12         co : OUT STD_LOGIC);
13 END adder;
14
15 ARCHITECTURE rtl OF adder IS
16     SIGNAL a_i, b_i, sum_i : STD_LOGIC_VECTOR
17     (8 downto 0);
18 BEGIN
19     a_i <= '0' & a;
20     b_i <= '0' & b;
21     sum_i <= a_i + b_i + ci;
22     sum <= sum_i(7 DOWNTO 0);
23     co <= sum_i(8);
24 END rtl;

```

Figura 3.1.5: Sumador con std\_logic

```

1  LIBRARY IEEE;
2  USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3  USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5  ENTITY sum8 IS PORT (
6      data1 : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
7      data2 : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
8      cin : IN STD_LOGIC;
9      cout : OUT STD_LOGIC;
10     salida : outSTD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0));
11 END sum8;
12
13 ARCHITECTURE Behavioral OF sum8 IS
14     SIGNAL misennal1 : signed (8 downto 0);
15     SIGNAL tmp : signed(0 downto 0);
16 BEGIN
17     tmp(0) <= cin;
18     misennal1 <= signed(data1(7) & data1) +
19     signed(data2(7) & data2) + tmp;
20     salida <= STD_LOGIC_VECTOR(misennal1(7
21     downto 0));
22     cout <= misennal1(8);
23 END Behavioral;

```

Figura 3.1.6: Sumador con numeric y datos con signo

```

1  LIBRARY IEEE;
2  USE IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3  USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;
4
5  ENTITY alu IS
6      PORT (
7          data1 : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
8          data2 : IN STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0);
9          op : IN STD_LOGIC;
10         salida : OUT STD_LOGIC_VECTOR (7 downto 0));
11 END alu;
12
13 ARCHITECTURE Behavioral OF alu IS
14     SIGNAL salida_aux : signed(7 downto 0);
15 BEGIN
16     Salida_aux <= signed(data1) + signed(data2) WHEN op = '0' ELSE
17     signed(data1) - signed(data2) WHEN op = '1' ELSE
18     (OTHERS => '0');
19     Salida <= STD_LOGIC_VECTOR(salida_aux);
20 END Behavioral;

```

Figura 3.1.7: Restador

## 3.2. Aritmética en VHDL

### 3.2.1. Operadores incluidos en VHDL-93 sin incluir ningún paquete

Operador	Descripción	Tipo de operando a	Tipo de operando B	Tipo del resultado
a ** b	Exponenciación	Integer / Natural	Integer/ Natural	Integer / Natural
a * b	Multiplicación	Integer / Natural	Integer / Natural	Integer / Natural
a / b	División			
a mod b	Módulo			
a rem b	Resto			
+ a	Identidad	Integer / Natural		Integer / Natural
- a	Negación			
a + b	Sumador	Integer / Natural	Integer / Natural	Integer / Natural
a - b	Resta			
a + b	Concatenación	Array 1-D, elemento	Array 1-D, elemento	Array 1-D
a = b	Igual	Cualquiera	Mismo que a	boolean
a /= b	No igual			
a sll b	Desp. Lóg. Izq.	bit_vector	Integer / Natural	bit_vector
a srl b	Desp. Lóg. Der.			
a sla b	Desp. Arit. Der.			
a sra b	Desp. Arit. Der.			
a rol b	Rotación Izq.			
a ror b	Rotación der.			
a < b	Menor que	Escalar o Array de 1-D	Mismo que a	boolean
a <= b	Menor o igual			
a > b	Mayor que			
a >= b	Mayor o igual que			
a and b	and	boolean, bit o bit_vector	Mismo que a	Mismo que a
a or b	or			
a xor b	xor			
a nand b	nand			
a nor b	nor			
a xnor b	xnor			

### 3.2.2. Operadores y funciones del paquete IEEE std\_logic\_1164

Operador	Tipo de operando a	Tipo de operando b	Tipo del resultado
not a	std_logic_vector, std_logic		Mismo que a
a and b	std_logic_vector, std_logic	Mismo que a	Mismo que a
a or b			
a xor b			
a nand b			
a nor b			
a xnor b			

Función	Tipo de operando a	Tipo de resultado
to_bit(a)	std_logic	bit
to_stdulogic(a)	bit	std_logic
to_bitvector(a)	std_logic_vector	bit_vector
to_stdlogicvector(a)	bit_vector	std_logi_vector



### 3.2.3. Operadores del paquete IEEE numeric\_std

Operador	Tipo de operando a	Tipo de operando b	Tipo de resultado
abs a- a	signed		signed
a * b	unsigned, natural, signed, integer	unsigned, natural, signed, integer	unsigned, signed
a / b			
a mod b			
a rem b			
a + b			
a - b			
a = b	unsigned, natural, signed, integer	unsigned, natural, signed, integer	boolean
a /= b			
a < b			
a <= b			
a > b			
a >= b			

### 3.2.4. Funciones de conversión de datos o casting

Para la conversión de señales de un tipo a otro se deben usar las siguientes funciones y operaciones de casting:

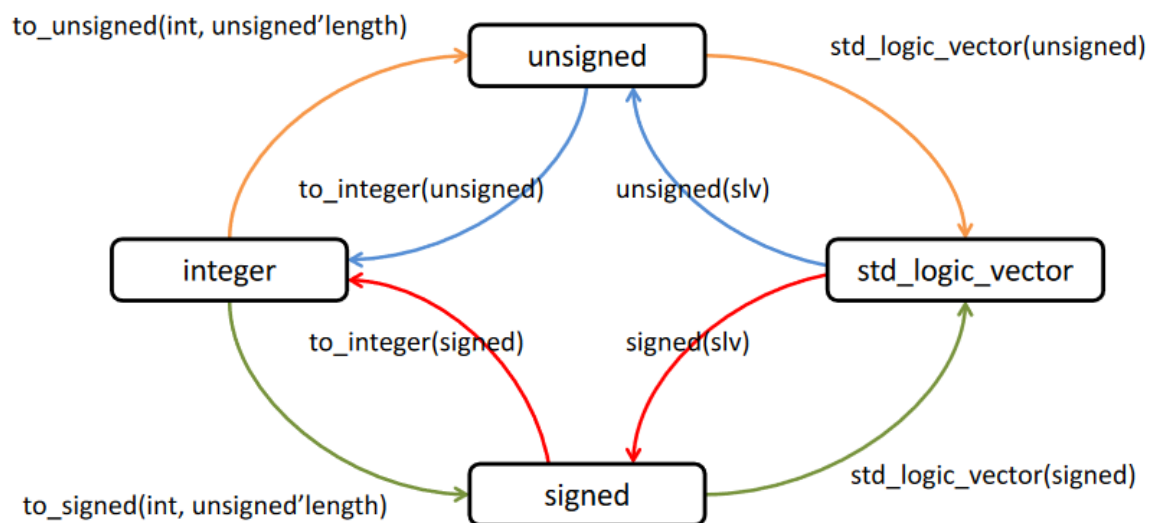


Figura 3.2.1: Funciones de conversión de tipos

## 3.3. Unidades funcionales multifunción

En este apartado se estudia la estructura del diseño y reducir la cantidad de recursos HW compartiendo lógica entre distintas operaciones.

Para ello agruparemos Unidad Funcional (UF) sencillas en UF más complejas, esto se conoce como UF multifunción. Esto lo utilizaremos cuando la UF multifunción y el coste de conexión es menor que el coste de las UF sencillas. Para lograr esto utilizaremos un algoritmo de particionamiento y un grafo de compatibilidad.

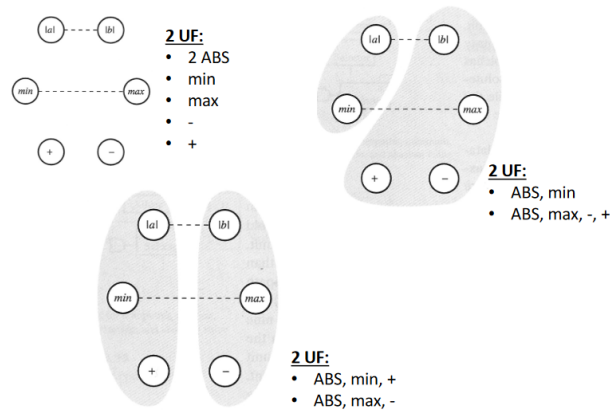


Figura 3.3.1: Optimización de múltiples UF

### 3.4. Redes iterativas

Las redes iterativas son conjuntos de módulos idénticos, cada uno conectado exclusivamente a los módulos vecinos.

Una red iterativa 1-D de orden  $k$  es una implementación de una función de  $n$  variables, donde:

- $(n/k)$  celdas idénticas,  $G$ , con:
  - Entradas externas  $x$ , e internas  $c$
  - Salidas externas  $z$ , e internas  $c$

$$C_{j+1} = G(x_j, c_j)$$

$$Z_j = F(x_j, c_j)$$

- Celdas de los extremos pueden simplificarse aprovechando las condiciones de contorno

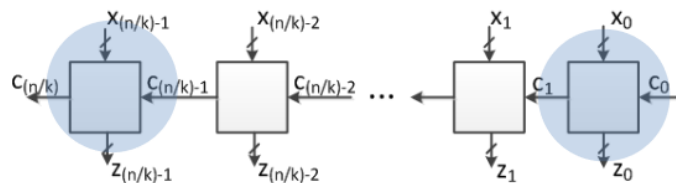


Figura 3.4.1: Ejemplo Red Iterativa 1-D

#### 3.4.1. Diseño

Primero determinamos el valor de  $k$ , el equilibrio entre la complejidad de las celdas ( $n \times k$  de entradas) y el  $n \times k$  de celdas (retardo total).

Después determinamos los valores que deben transmitirse entre los módulos intermedios (salidas internas) y el valor de la salida externa del último módulo.

Finalmente hacemos la descripción de alto nivel de los bloques intermedios, la implementación de las funciones de conmutación de los bloques, y la simplificación de las celdas inicial y final.

### 3.4.2. Temporización

Retardo ( $\Delta$ )

- Función de retardo de las salidas externas de cada celda  $\Delta_o$
- Función de retardo de las salidas internas de cada celda  $\Delta_c$

$$\Delta = \left(\frac{n}{k} - 1\right) \Delta_c + \max(\Delta_o, \Delta_c)$$

### 3.4.3. Redes 1-D en VHDL

En este ejemplo se diseñará una red de resolución de propiedades iterativa con n entradas y n salidas. LA salida  $Z_i = 1$  si  $X_i = 1$  y  $X_j \forall j > i$

```

1 ENTITY celda IS
2   PORT (
3     x, c_in : IN STD_LOGIC;
4     c_out, z : OUT STD_LOGIC);
5 END celda;
6
7 ARCHITECTURE arch OF celda IS
8 BEGIN
9   c_out <= c_in OR x;
10  z <= x AND (NOT(c_in));
11 END arch; -- arch

```

```

1 gen1 : FOR i IN 0 TO M GENERATE
2   u : celda PORT MAP(X(i), C(i), C(i + 1), Z(i));
3 END GENERATE gen1;

```

Figura 3.4.3: Generador de celdas conectadas

Figura 3.4.2: Ejemplo de celda de la red

```

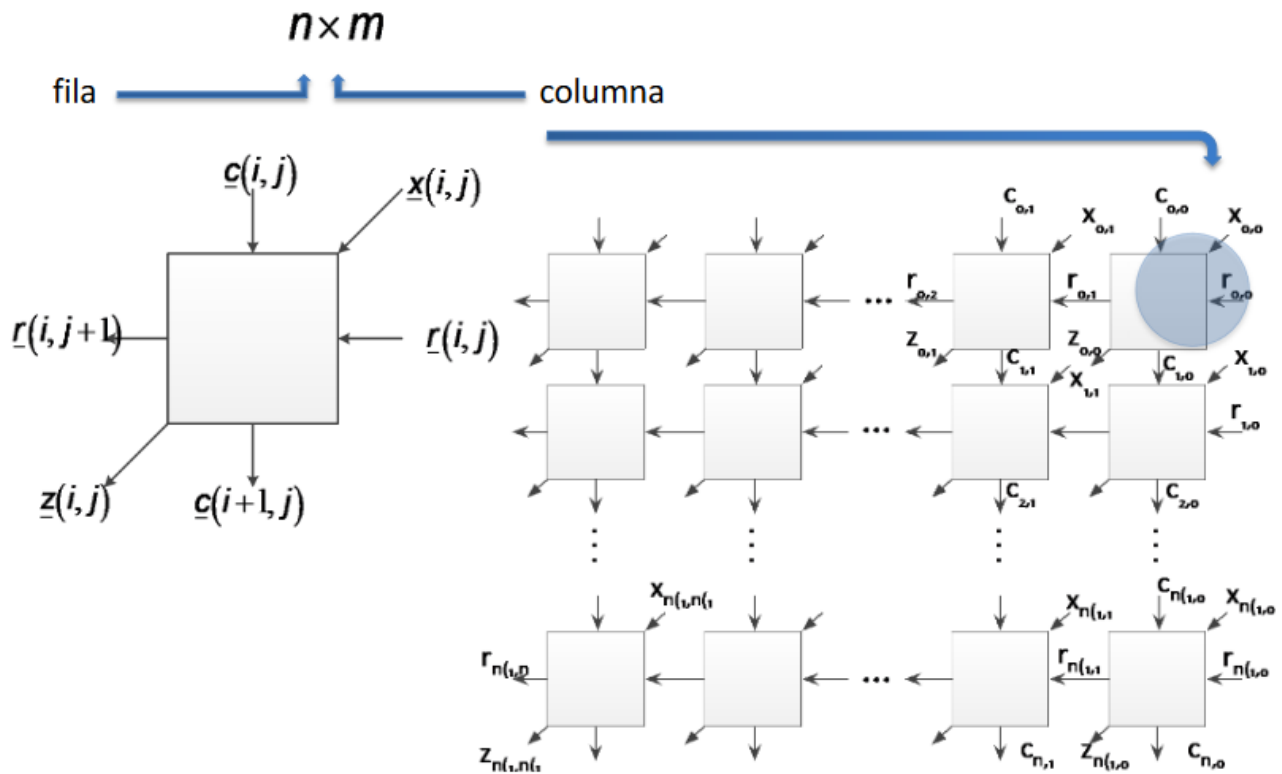
1 ENTITY red IS
2   GENERIC (n : NATURAL := 4);
3   PORT (
4     x : IN STD_LOGIC_VECTOR(n - 1 DOWNT0 0);
5     z : OUT STD_LOGIC_VECTOR(n - 1 DOWNT0 0));
6 END red;
7
8 ARCHITECTURE arch OF red IS
9
10  SIGNAL c : STD_LOGIC_VECTOR(n DOWNT0 0);
11  COMPONENT celda
12    PORT (
13      x, c_in : IN STD_LOGIC;
14      c_out, z : OUT STD_LOGIC);
15  END COMPONENT;
16
17 BEGIN
18  gen1 : FOR i IN 0 TO M GENERATE
19    u : celda PORT MAP(X(i), C(i), C(i + 1), Z(i));
20  END GENERATE gen1;
21  C(n) <= '0'; -- Condicion de entorno
22 END arch; -- arch

```

Figura 3.4.4: Ejemplo red iterativa con generate

### 3.4.4. Redes iterativas 2-D

Array de celdas idénticas conectadas con sus vecinas. Cada celda (i,j) posee:



Para generar una matriz 2D tendremos que usar dos bucles anidados.

### 3.5. Técnicas de mejora del rendimiento

La utilización de diseños combinacionales bastante grandes (datos de entrada a partir de 32 bits), hace que el tiempo asociado al cambio crítico sea grande y el retardo de la red elevado. En las redes iterativas la última celda no podrá generar su salida hasta que no haya recibido su señal intermedia. Esta señal interna ha tenido que atravesar  $n - 1$  celdas que componen la red, por lo tanto el retardo es muy elevado si  $n$  es grande.

#### 3.5.1. Redes de anticipación

Para reducir el retardo de las redes iterativas, anticiparemos el valor de la señal que se propaga entre celdas.

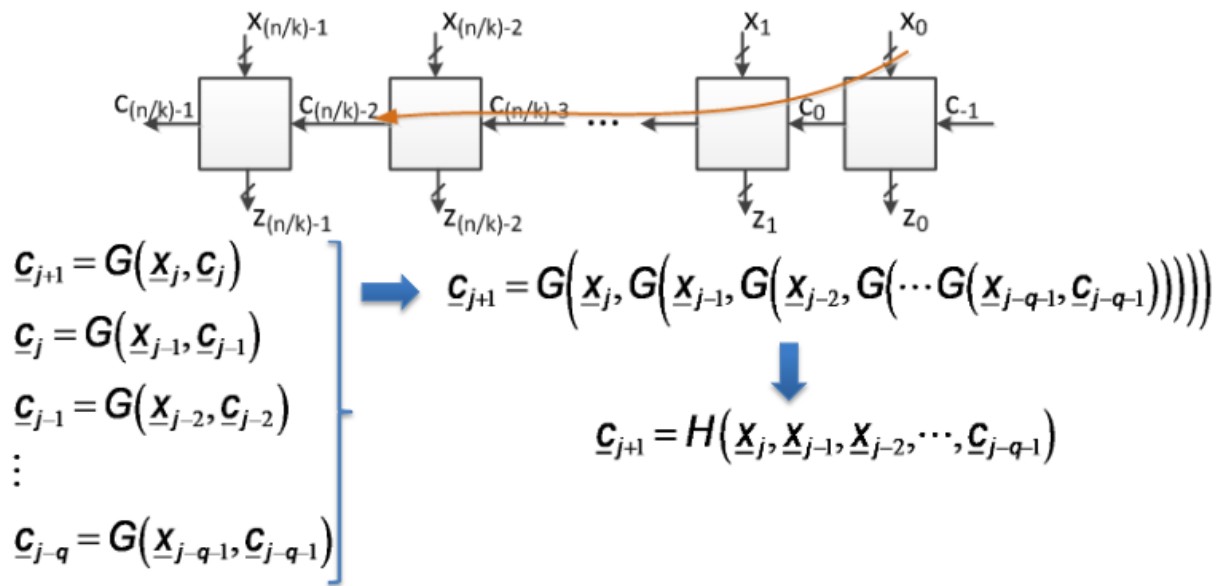


Figura 3.5.1: Red iterativa sin anticipación

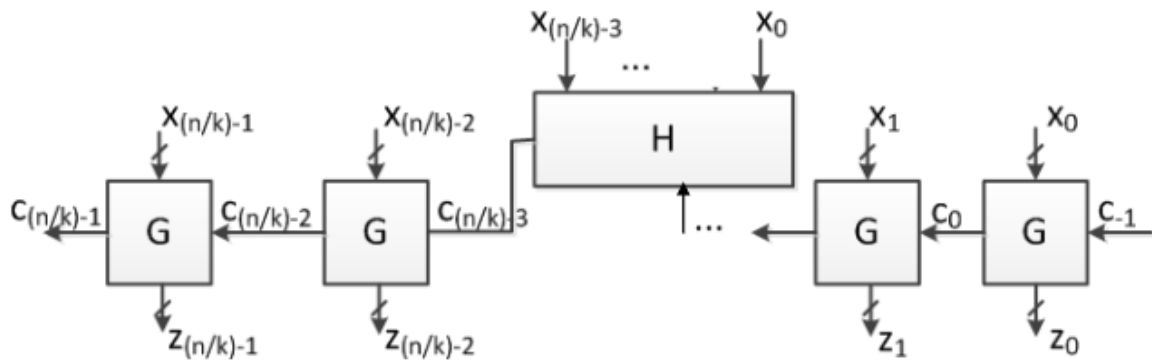


Figura 3.5.2: Red iterativa con anticipación

### 3.5.2. Redes en árbol

Implementar una función de  $n$  entradas usando bloques de  $k$  entradas:

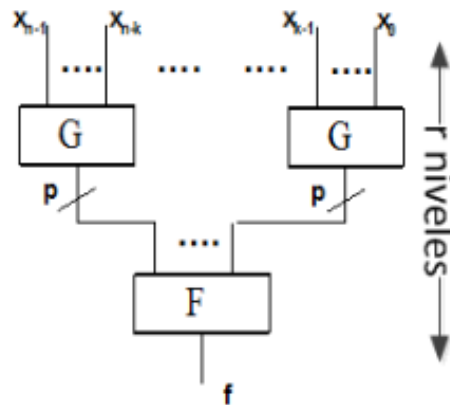


Figura 3.5.3: Red en árbol

- Módulo  $G$ :  $k$  entradas y  $p$  salidas  $\rightarrow \frac{n}{k}$  módulos
- Módulo  $F$ :  $p \frac{n}{k}$  entradas
- Retardo:  $(r - 1) \Delta_G + \Delta_F$

## 3.6. Errores de diseño

### 3.6.1. Lazos combinacionales

Estructuras lógicas que contienen realimentación sin ningún elemento síncrono en el camino. Por ejemplo  $A \leq A + 1$ ; VHDL no permitirá ni la simulación ni la síntesis de este diseño.

### 3.6.2. Errores de diseño en circuitos combinacionales

Si implementamos la lógica combinacional mediante un process:

- **Error 1:** no incluir todas las entradas en la lista de sensibilidad
- **Error 2:** no terminar una sentencia if con un else
- **Error 3:** no especificar el valor de alguna salida en alguna de las ramas de la sentencia if

En los errores 2 y 3 se añadirá un latch, lo que implica lógica secuencial.

## 4 | Diseño algorítmico

### 4.1. Introducción

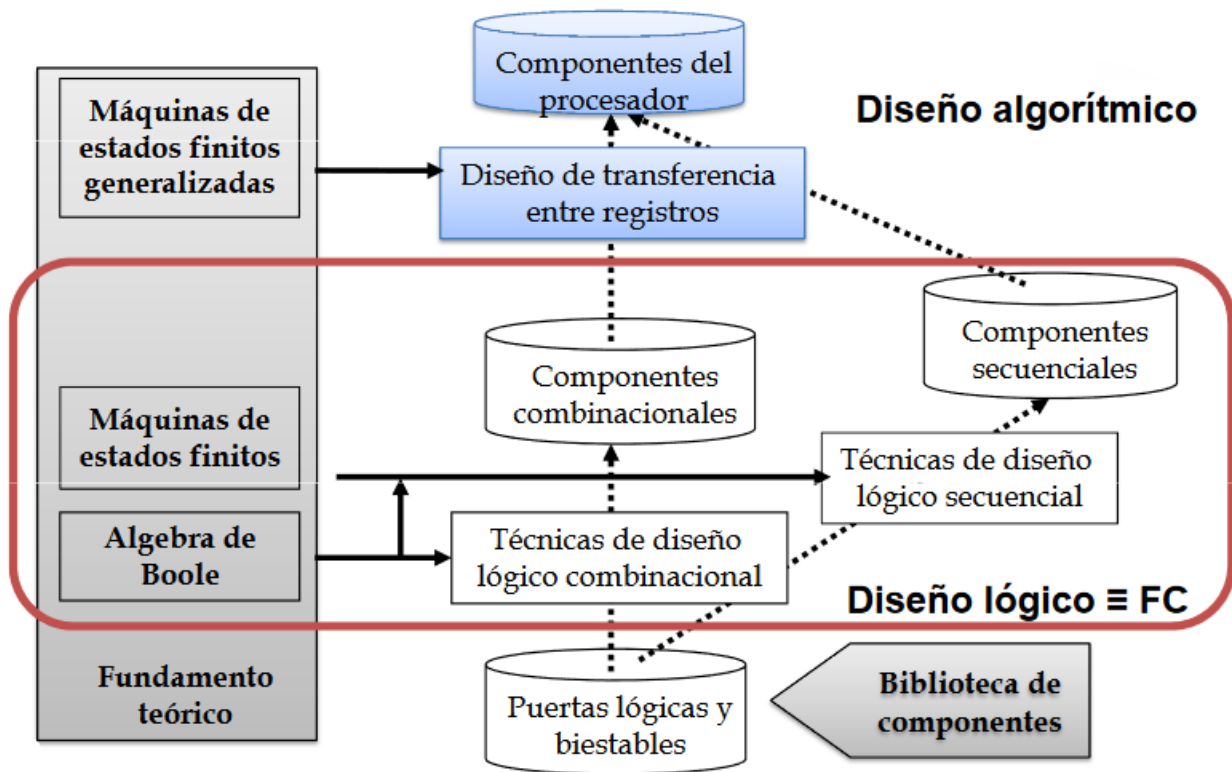


Figura 4.1.1: Flujo de diseño

### 4.2. Máquinas de estados: repaso

#### 4.2.1. Máquinas de estados finitos (FSM)

**Mealy:** un cambio en la entrada en cualquier instante influye inmediatamente en la salida.

$$Z(t) = H(X(t), S(t))$$

$$S(t+1) = G(X(t), S(t))$$

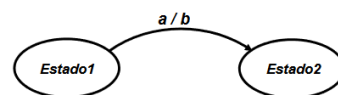


Figura 4.2.1: Ejemplo estados Mealy

**Moore:** sólo el cambio del estado influye en la salida

$$Z(t) = H(S(t))$$

$$S(t+1) = G(X(t), S(t))$$

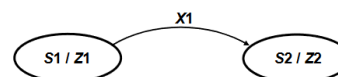


Figura 4.2.2: Ejemplo estados Moore

### 4.2.2. Funcionamiento síncrono

La hipótesis de funcionamiento síncrono de los sistemas secuenciales supone que:

- El estado sólo cambia cada vez que el ciclo de reloj y el cambio es simultáneo en todos los bits del cambio de estado.
- Tras un cambio de estado, las entradas de los bits del registro de estado tienen tiempo para alcanzar un valor estable antes del siguiente cambio de estado.

## 4.3. Elementos de memoria: repaso

Cuando estamos diseñando un sistema secuencial uno de los elementos HW más importantes son los elementos de almacenamiento:

- Almacenan el estado actual del sistema (máquina de control)
- Almacenan valores intermedios (registros de datos)

El elemento de memoria más sencillo es el **biestable**. Se denomina biestable porque presenta dos únicos estados estables: Salida 0 o Salida 1. Sirve para almacenar un bit de información.

### 4.3.1. Tipos de biestables

Según su comportamiento lógico:

- S-R
- D
- J-K
- T

S	R	Q+
0	0	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	proh.

D	Q+
0	0
1	1

J	K	Q+
0	0	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	$\bar{Q}$

T	Q+
0	Q
1	$\bar{Q}$

Figura 4.3.1: Tabla de verdad de los distintos tipos de biestables

Según su comportamiento temporal:

- Latch
- Latch síncrono (sensible a nivel)
- Flip-Flop disparado por flanco
- Flip-flop maestro-esclavo

<i>Ecuaciones Características</i>	
R-S:	$Q+ = S + \bar{R} Q$
D:	$Q+ = D$
J-K:	$Q+ = J \bar{Q} + \bar{K} Q$
T:	$Q+ = T \bar{Q} + \bar{T} Q$

Deducidas a partir de diagramas de Karnaugh para  $Q(t+1) = Q+ = f(\text{Entradas}, Q)$

Figura 4.3.2: Ecuaciones características de los distintos tipos de biestables



### 4.3.2. Biestables asíncronos: Latch

La salida cambia cuando cambian las entradas:

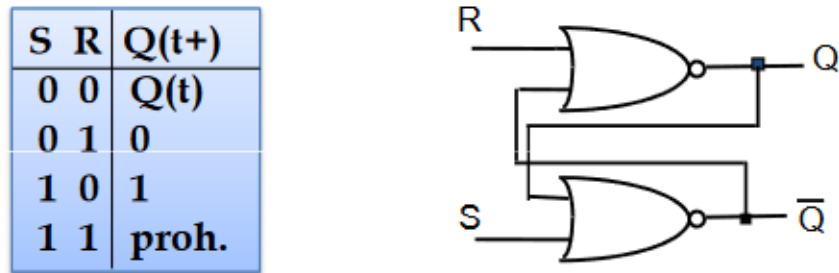


Figura 4.3.3: Ejemplo Latch S-R

### 4.3.3. Biestable síncrono sensible a nivel: Latch síncrono

La salida cambia cuando está activa la señal de capacitación (enable)

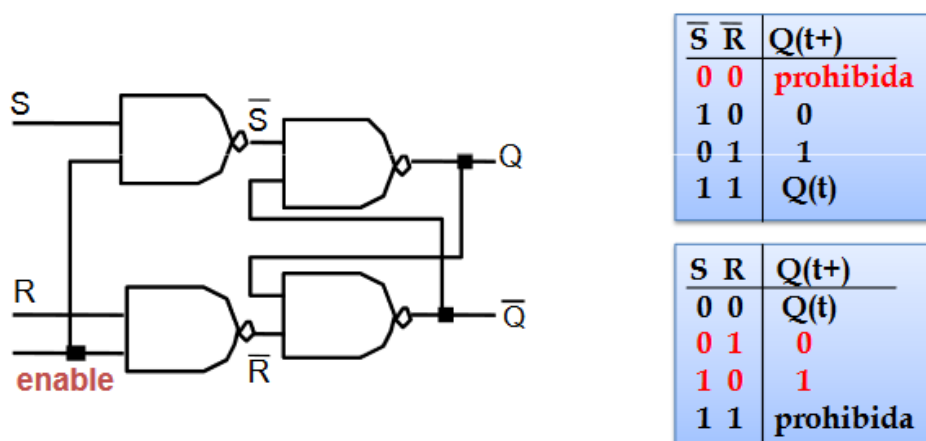


Figura 4.3.4: Ejemplo Latch síncrono S-R

Para que este biestable sea un tipo D, debemos cambiar el enable para que sea un clk

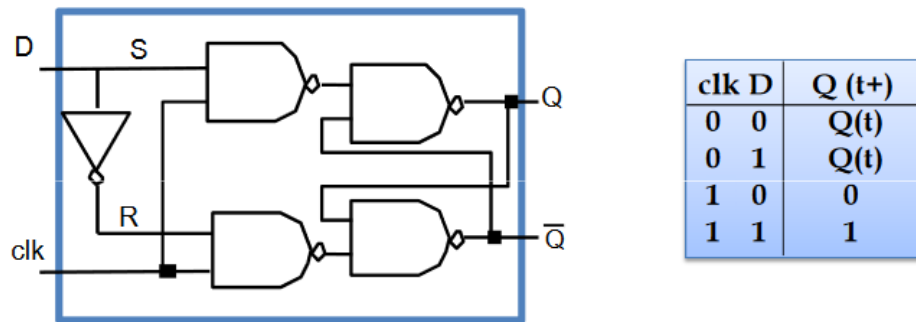


Figura 4.3.5: Ejemplo Latch tipo D

#### 4.3.4. Problemas

Si utilizamos latches debemos garantizar que el pulso de reloj sea más corto que el retardo del latch y que las entradas se mantienen constantes durante el pulso del reloj.

Una alternativa es usar Flip-Flops, que son más fiables. Son disparados por flanco: la salida sólo varía durante la transición del reloj (que es una entrada dinámica).

#### 4.3.5. Flip-Flop disparado por flanco

- $\text{clk} = 0$ 
  - $R = 1$  y  $S = 1$  independientemente del valor de D
  - $P1 = \bar{D}$  y  $P2 = \overline{P1} = D$
- $\text{clk} = 0 \rightarrow 1$ 
  - $S = \overline{P2} = \bar{D}$  y  $R = \overline{P1} = D$
- $\text{clk} = 1$ 
  - Los cambios en D no afectan a R y S

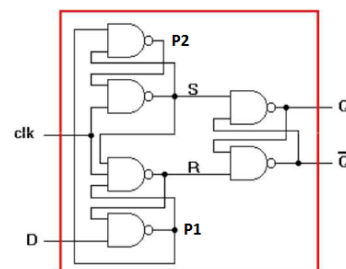


Figura 4.3.6: Ejemplo Flip-Flop disparado por flanco

#### 4.3.6. Biestable maestro-esclavo: FF

Se lee la entrada en un nivel y se modifica la salida en el contrario:

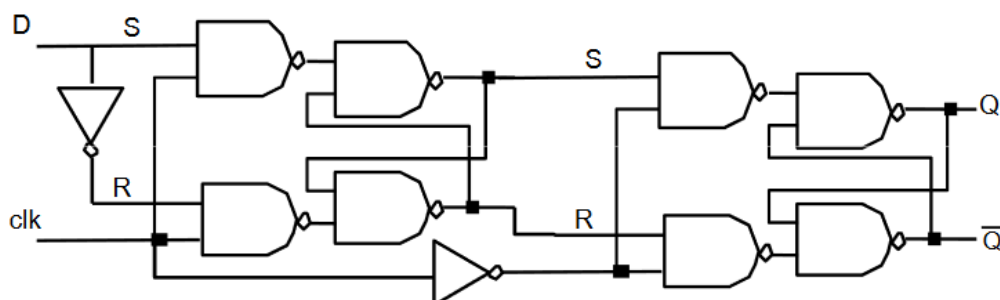


Figura 4.3.7: Biestable Maestro-Esclavo

### 4.3.7. Comparación del comportamiento temporal de los biestables

Tipo	¿Cuándo se muestrean las entradas?	¿Son válidas las entradas?
Latch sin reloj	siempre	retardo de propagación desde el cambio en la entrada
Latch sensible a nivel	reloj en alta ( $T_{setup}$ y $T_{hold}$ a cada lado del eje de bajada)	retardo de propagación desde flanco de subida del reloj
Flip-Flop flanco de subida	transición de reloj de baja a alta ( $T_{setup}$ y $T_{hold}$ a cada lado del eje de subida)	retardo de propagación desde flanco de subida de reloj
Flip-Flop flanco de bajada	transición de reloj de alta a baja ( $T_{setup}$ y $T_{hold}$ a cada lado del eje de bajada)	retardo de propagación desde flanco de bajada del reloj

### 4.3.8. Registros

Hay de distintos tipos:

- Según temporización:
  - Disparado por nivel



Figura 4.3.8: registros según nivel

- Disparado por flanco



Figura 4.3.9: registros según nivel

- Según funcionalidad
  - Parallel-Input Parallel-Output (PIPO)
  - Serial-Input Parallel-Output (SIPO)
  - Parallel-Input Serial-Output (PISO)
  - Serial-Input Serial-Output (SISO)

## 4.4. Diseño Algorítmico

El diseño algorítmico es una modo de especificación e implementación de sistemas digitales, que permite sistematizar y automatizar en gran medida su construcción. Parte siempre de una especificación en la que el comportamiento del sistema se describe en forma de un algoritmo (cómo calcular la salida en función de la entrada). Esto se implementa con una unidad de control y una ruta de datos.

Los sistemas algorítmicos son sistemas secuenciales síncronos. El comportamiento está definido implícitamente: no se especifica el valor de  $z$  si no el modo de calcularlo (el algoritmo).

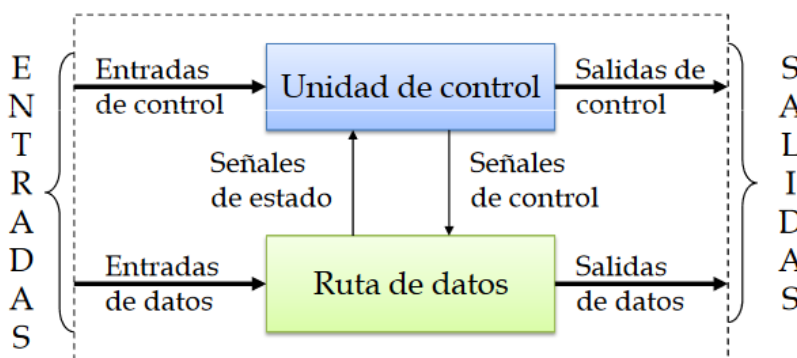


Figura 4.4.1: Modelo de sistema algorítmico

#### 4.4.1. Proceso de diseño: resumen

Primero se define el sistema: se especifican las entradas, salidas, función y bloques disponibles. Seguidamente se crea un diagrama Algorithmic State Machine (ASM): obtenemos un conjunto ordenado y finito de operaciones y un modelo de máquina de estados generalizada.

Por último, diseñamos la unidad de control, la ruta de datos y las ensamblamos

##### 1. Estudio de la especificación:

- Esquema de pasos secuenciales a seguir (algoritmo)
- Posible HW a utilizar (módulos específicos completos)

##### 2. Creación de un diagrama ASM partiendo de las conclusiones del apartado 1, crear un diagrama que cumpla las especificaciones.

##### 3. Diseño de la unidad de control:

- Codificar cada uno de los estados del ASM
- Codificar el cambio de estado
  - Mediante señales internas de control
  - Mediante señales externas de control
- Codificar las señales de control hacia la ruta de datos: cada estado tendrá asociados unos valores de todas las señales que controlan los módulos complejos

##### 4. Diseño de la ruta de datos:

- Interconectar las señales de control externas e internas a los módulos
- Interconectar las señales de control (obtenidas en el apartado 3) a los módulos de la ruta de datos

#### 4.4.2. Diagrama de Máquina de Estados Algorítmica (ASM)

Esta es una forma gráfica de representar el algoritmo. Los elementos de un diagrama son:

- Cajas de estado: asignaciones y operaciones simultáneas.
- Cajas de decisión: bifurcación condicional con dos posibilidades.
- Cajas de salida condicional: asignaciones que se realizan cuando se cumple una condición.
- Bloque ASM: una caja de estado con red de cajas de decisión y de salida condicional.

# 5 | Memoria

## 5.1. Introducción

### 5.1.1. Jerarquía de Memoria

Un computador típico está formado por diversos niveles de memoria organizados de forma jerárquica:

- Registros de la Central Processing Unit (CPU)
- Memoria Cache
- Memoria Principal
- Memoria Secundaria
- Almacenamiento en cintas o CDs-DVDs

El coste de todo el sistema de memoria excede al coste de la CPU, es muy importante optimizar su uso.

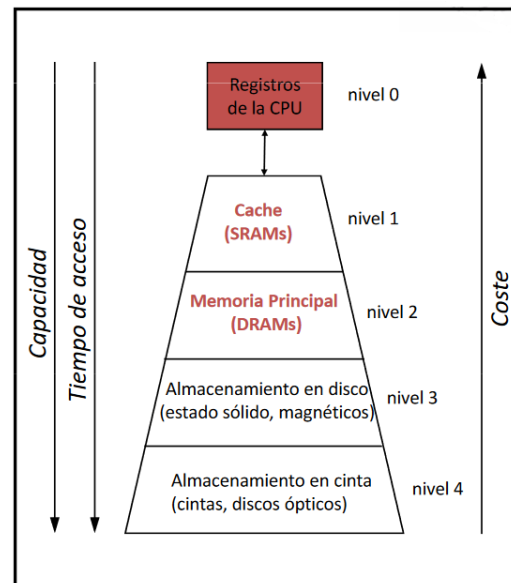


Figura 5.1.1: Jerarquía de memoria

Desde los años 90 el procesador trabaja más rápido que la memoria, tres de cada 4 ciclos se dedican a esperar a la memoria. Se necesitarán más de 32 bytes cada 2 ns.

Tipo de memoria	Bytes por acceso	Tiempo de acceso (ns)	\$ por MByte
SRAM - Cache (on-chip)	10	0.1	1-100
SRAM - Cache (off-chip)	100	2-5	1-10
DRAM	1000	10-100	0.1
Disco magnético	1000	5000000 - 20000000	0.001

La diferencia de rendimiento entre procesadores y memorias ha ido incrementando en las últimas décadas.

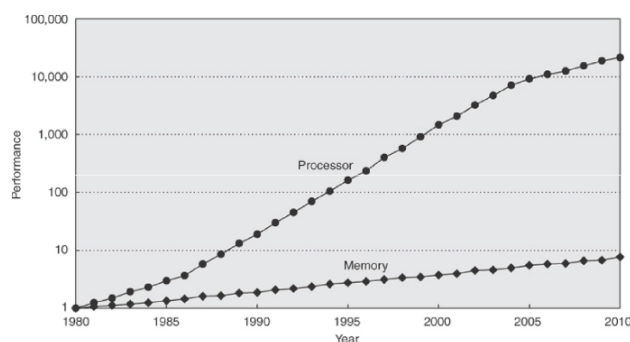


Figura 5.1.2: Comparación de rendimiento entre procesadores y memorias a lo largo de los años

## 5.2. Clasificación

### 5.2.1. Ubicación

Se distinguen entre las memorias presentes en la CPU(registros), las memorias internas (memoria cache) y memorias externas (memoria principal).

### 5.2.2. Métodos de acceso

Los principales métodos de acceso a la memoria son:

- **Acceso directo:** la información está organizada en discos físicos apilados. Cada uno de ellos está dividido en pistas y cada una de ellas tiene varios cilindros. Un grupo de cilindros concéntricos constituye un sector. El tiempo de acceso es variable, depende de la posición inicial de los cabezales del disco, respecto a la información que se va a leer.
- **Acceso aleatorio:** cada posición de memoria tiene un único método de acceso, que está cableado físicamente. El tiempo de acceso a memoria para una determinada posición de memoria es independiente de su dirección y de la secuencia de accesos previos a memoria.
- **Acceso asociativo:** las memorias asociativas son memorias de acceso aleatorio cuyas palabras no se acceden a través de ninguna dirección. Cada palabra lleva asociada un tag único(típicamente, el tag está asociado de alguna manera con la dirección, o al menos con parte de ella, donde esa palabra se almacena en otra memoria). Una palabra se puede guardar en cualquier lugar de la memoria, en otras palabras, la dirección específica donde se encuentra una palabra en un momento dado no es conocido. Por tanto, para acceder a una determinada información es necesario comprobar el tag de cada palabra en la memoria con el tag de la palabra que se desea buscar.

### 5.2.3. Tecnologías de estado sólido

- SRAM
- DRAM
- Synchronous DRAM (SDRAM)
- Electrically Erasable Programmable ROM (EEPROM)
- NAND-flash y NOR-flash

## 5.3. Parámetros

Los parámetros de medición en las memorias son:

- **Tiempo de acceso ( $T_i$ ):**
  - En memorias de acceso aleatorio es el tiempo que transcurre desde que se especifica una dirección de memoria hasta que el dato ha sido almacenado o bien está disponible para su uso.
  - En memorias de acceso secuencial/directo es el tiempo que tarda en situar el mecanismo de lectura/escritura sobre la posición deseada.
- **Tiempo de ciclo de memoria:** es aplicable solo a memorias de acceso aleatorio. Es el tiempo mínimo que debe dejarse transcurrir entre dos accesos consecutivos. Es algo mayor que el tiempo de acceso.
- **Ancho de banda o velocidad de transferencia ( $B_i$ ):** Velocidad a la que se puede transmitir datos desde/hacia una unidad de memoria. En memorias de acceso directo es igual a la inversa del tiempo de ciclo de memoria. En memorias de acceso secuencial/directo depende del tiempo de acceso medio y de la velocidad de transferencia del dispositivo.
- **Tamaño de la memoria ( $S_i$ ):** número de bytes que pueden almacenarse en el dispositivo de memoria.

- **Coste por byte ( $C_i$ ):** coste medio estimado por cada byte de memoria. El coste total de un dispositivo de memoria viene dado por  $C_i \times S_i$ .
- **Unidad de transferencia ( $X_i$ ):** Unidad de información con la que trabaja un determinado dispositivo de memoria. Puede oscilar entre un byte o una palabra, hasta bloques de varios KBytes.

Nivel de jerarquía	Acceso	Latencia	Coste(\$/MB)	Energía
On-chip cache	10 B	100 ps	1-100	1 nJ
Off-chip cache	100 B	1 ns	1-10	10-100 nJ
Memoria Principal (DRAM)	1000 B	10-100 ns	0.1	1-100 nJ por chip
Disco duro	1000 B	1 ms	0.001	100-1000 mJ

Cuadro 5.3.1: Comparativa entre distintos tipos de memorias

## 5.4. Tecnologías de memoria

### 5.4.1. SRAM

Esta es una Random Access Memory (RAM) estática. Almacena un bit en un biestable, el valor permanece mientras la memoria tenga alimentación. La ventaja de la SRAM es su rapidez, su inconveniente es que necesita 6 transistores, lo cual no permite alcanzar grandes densidades de integración.

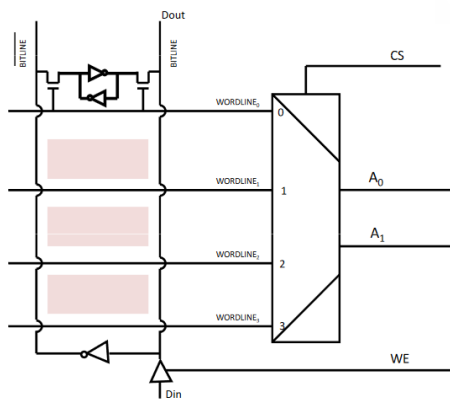


Figura 5.4.1: Celda básica de la SRAM

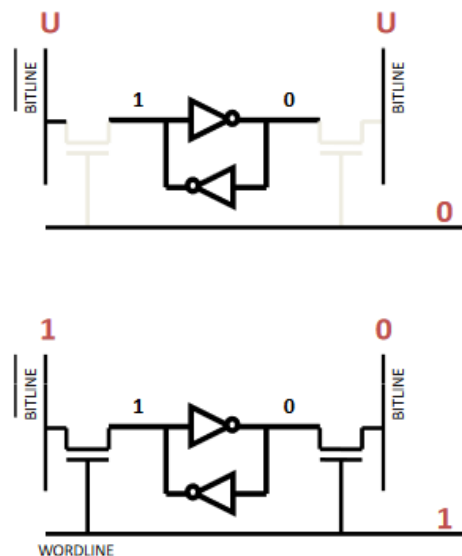


Figura 5.4.2: Operación de la SRAM

Cargamos o somos capaces de leer el valor almacenado si y sólo si WORDLINE vale 1.

### 5.4.2. DRAM

Esta es una RAM dinámica. Almacena un bit en un condensador (cargado o descargado). El condensador pierde voltaje a lo largo del tiempo por lo que tiene que ser refrescado periódicamente, por eso se dice que es una memoria dinámica. La ventaja de las memorias DRAM es su simplicidad, sólo se necesita un condensador y un transistor para almacenar un bit. Esto permite grandes densidades de integración. Es una memoria volátil, pierde rápidamente la información cuando se apaga.

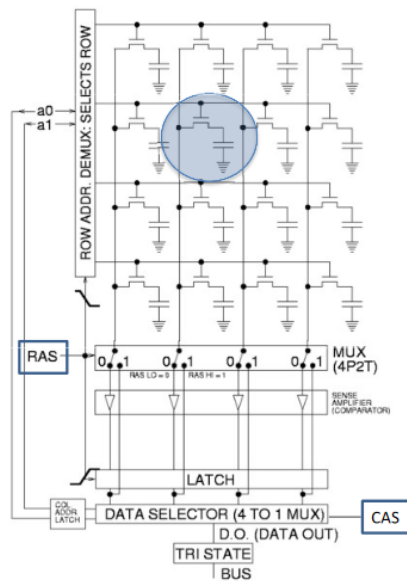


Figura 5.4.3: Celda básica de una DRAM

**LECTURA DESTRUCTIVA**

Operación de lectura RAS: 0 leyendo / 1 escribiendo (leer dato)

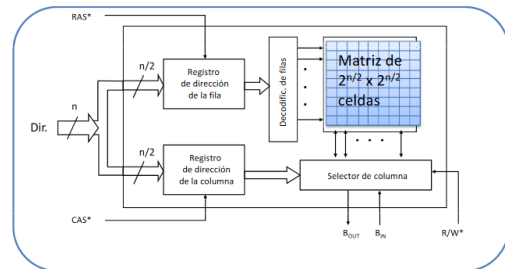


Figura 5.4.4: Organización de una DRAM

**RAS:** línea de selección de la fila

**CAS:** línea de selección de la columna

**Lectura**

Las word-line se precargan con un nivel de voltaje entre 0 y 1 (se comportan como condensadores grandes) utilizando la mitad de la dirección que hace referencia a la fila. Este valor es mayor que el que está almacenado en las celdas DRAM

Al recibir la señal RAS, se selecciona una fila y se establece una conexión entre una línea y los condensadores de las celdas. Las cargas iniciales de ambos condensadores son compartidas. La distribución de carga resultante sigue las siguientes reglas.

$$q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$$

$$\frac{q'_1}{c_1} = \frac{q'_2}{c_2}$$

$q'_1$  y  $q'_2$  serán diferentes dependiendo de la carga inicial de las celdas  $q_1$  y  $q_2$ .



# Glosario

**ASM** Algorithmic State Machine

**CPU** Central Proccesing Unit

**DRAM** Dynamic RAM

**EEPROM** Electrically Erasable Programmable ROM

**FPGA** Field-Programmable Gate Array

**HDL** Hardware Description Language

**HW** Hardware

**PIPO** Parallel-Input Parallel-Output

**PISO** Parallel-Input Serial-Output

**RAM** Random Access Memory

**ROM** Read Only Memory

**SDRAM** Synchronous DRAM

**SIPO** Serial-Input Parallel-Output

**SISO** Serial-Input Serial-Output

**SRAM** Static RAM

**STA** Static Time Analysis

**UF** Unidad Funcional

**VHDL** Lenguaje de especificación hardware definido por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) utilizado para describir circuitos digitales y la automatización de diseño electrónico. VHDL es el acrónimo que surge tras combinar los acrónimos vhsic y HDL.

# Índice de figuras

1.4.1. Ejemplo Entity . . . . .	8
1.4.2. Ejemplo Architecture . . . . .	8
1.4.3. Ejemplo Entity y Architecture . . . . .	9
1.5.1. Ejemplo When-Else . . . . .	9
1.5.2. Ejemplo With-Select-Else . . . . .	9
1.5.3. Ejemplo Process . . . . .	9
1.5.4. Ejemplo If-Then-Else . . . . .	9
1.5.5. Ejemplo Case . . . . .	9
1.5.6. Loop simple . . . . .	10
1.5.7. For Loop . . . . .	10
1.5.8. While Loop . . . . .	10
1.5.9. Ejemplo tipos personalizados . . . . .	11
1.5.10. Ejemplo Arrays . . . . .	11
1.5.11. Ejemplo Component . . . . .	11
1.5.12. Ejemplo Generate . . . . .	12
1.5.13. Ejemplo Package . . . . .	12
1.7.1. Ejemplo Clk . . . . .	13
2.3.1. Margen de setup . . . . .	16
2.3.2. Margen de setup . . . . .	16
2.3.3. Circuito retroalimentado . . . . .	17
2.4.1. Tiempo de ciclo . . . . .	18
3.1.1. Decodificador . . . . .	21
3.1.2. Código Codificador . . . . .	21
3.1.3. Código Decodificador . . . . .	22
3.1.4. Multiplexor . . . . .	22
3.1.5. Sumador con std_logic . . . . .	23
3.1.6. Sumador con numeric y datos con signo . . . . .	23
3.1.7. Restador . . . . .	23
3.2.1. Funciones de conversión de tipos . . . . .	25
3.3.1. Optimización de múltiples UF . . . . .	26
3.4.1. Ejemplo Red Iterativa 1-D . . . . .	26
3.4.2. Ejemplo de celda de la red . . . . .	27
3.4.3. Generador de celdas conectadas . . . . .	27
3.4.4. Ejemplo red iterativa con generate . . . . .	27
3.5.1. Red iterativa sin anticipación . . . . .	29
3.5.2. Red iterativa con anticipación . . . . .	29
3.5.3. Red en árbol . . . . .	30

4.1.1.	Flujo de diseño . . . . .	31
4.2.1.	Ejemplo estados Mealy . . . . .	31
4.2.2.	Ejemplo estados Moore . . . . .	31
4.3.1.	Tabla de verdad de los distintos tipos de biestables . . . . .	32
4.3.2.	Ecuaciones características de los distintos tipos de biestables . . . . .	32
4.3.3.	Ejemplo Latch S-R . . . . .	33
4.3.4.	Ejemplo Latch síncrono S-R . . . . .	33
4.3.5.	Ejemplo Latch tipo D . . . . .	34
4.3.6.	Ejemplo Flip-Flop disparado por flanco . . . . .	34
4.3.7.	Biestable Maestro-Esclavo . . . . .	34
4.3.8.	registros según nivel . . . . .	35
4.3.9.	registros según nivel . . . . .	35
4.4.1.	Modelo de sistema algorítmico . . . . .	36
5.1.1.	Jerarquía de memoria . . . . .	37
5.1.2.	Comparación de rendimiento entre procesadores y memorias a lo largo de los años . . . . .	37
5.4.1.	Celda básica de la SRAM . . . . .	39
5.4.2.	Operación de la SRAM . . . . .	39
5.4.3.	Celda básica de una DRAM . . . . .	40
5.4.4.	Organización de una DRAM . . . . .	40

# Índice de cuadros

5.3.1.Comparativa entre distintos tipos de memorias . . . . .	39
---	----