

Circuitos secuenciales

Circuitos combinatorios \equiv Funciones Booleanas:

El resultado **solo** depende de sus entradas.

También necesitamos circuitos que puedan **recordar** su estado.

Ejemplo: una memoria.

Además, en algunos casos necesitamos que la salida no dependa solo de su entrada, sino del **estado** en el que se encuentra.

Ejemplo: un contador.

A estos circuitos se les denomina **secuenciales**.

Diseño de circuitos

Los circuitos digitales se pueden ver desde dos puntos de vista: análisis digital y síntesis digital:

El **Análisis Digital** explora la relación entre las entradas a un circuito y sus salidas.

La **Síntesis Digital** crea diagramas lógicos utilizando los valores expresados en una tabla de verdad.

Cuando se diseña un circuito digital, se debe considerar el comportamiento físico de los circuitos electrónicos.

Es decir, existen retardos de **propagación**, los cuales pueden llegar a incidir cuando las señales toman distintos caminos.

Inclusive, puede llegar a ocurrir que el comportamiento del sistema difiera del esperado inicialmente (es decir la tabla de verdad todo el sistema no es la esperada).

Circuitos sincrónicos

- ▶ Los circuitos sincrónicos funcionan sobre la base del **tiempo**.
- ▶ Es decir, las salidas dependen no solo de las entradas.
- ▶ Comienza a jugar el **estado** en que estaba el circuito y el tiempo.

Relojes

En general, necesitamos una forma de ordenar los diferentes eventos que producen **cambios de estados**.

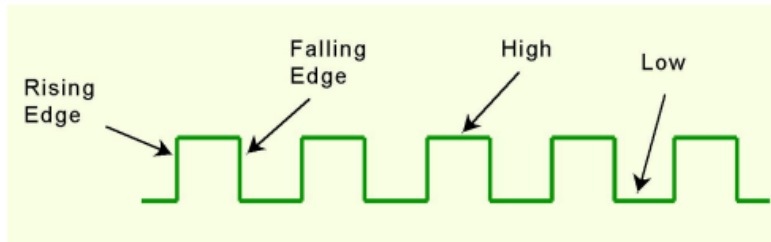
Para esto usamos relojes:

Un **reloj** (clock) es un circuito capaz de producir señales eléctricas oscilantes, con una frecuencia uniforme.



Cambios de estado

Los cambios de estado se producen en cada tick de reloj.



Los circuitos pueden tomar diferentes partes de la señal de clock para sincronizarse:

Cambio de flanco: se detecta cuando hay un cambio en la señal, puede ser flanco ascendente (rising edge) o descendente (falling edge).

Nivel: se verifica que la señal alcance cierto nivel, puede ser alto (high, es decir, un 1) o bajo (low, es decir, un 0).

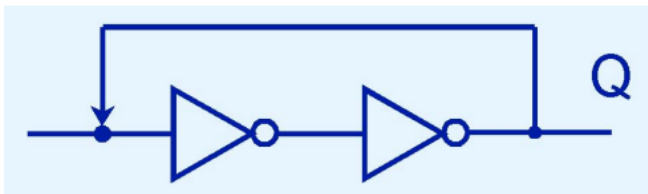
Los componentes vienen diseñados para detectar un tipo de señal de clock. Cuál usar es algo que se elige durante el diseño.

Realimentación

Para retener sus valores, los circuitos secuenciales recurren a la **realimentación** (*feedback*). La realimentación se produce cuando una salida se conecta a una entrada.

Ejemplo simple:

Si Q fuera 0 siempre lo será. Si fuera 1, siempre será 1, ¿por qué?

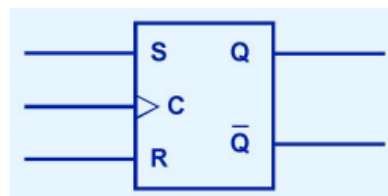
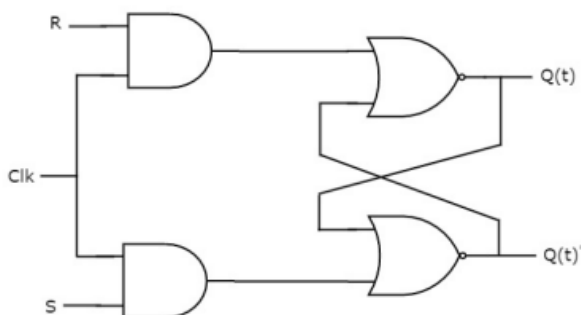


Flip-Flop SR

Uno de los circuitos secuenciales más básicos es el flip-flop SR:

SR por set - reset.

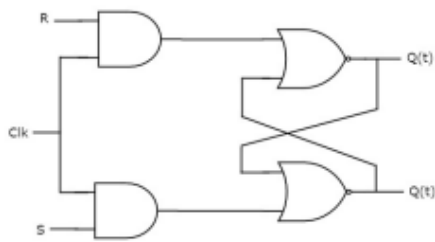
Circuito lógico y diagrama en bloque de un flip-flop SR:



La **tabla característica** describe el comportamiento del flip-flop SR.

$Q(t)$ es el valor de la salida al tiempo t .

$Q(t+1)$ es el valor de Q en el próximo ciclo de clock.



S	R	$Q(t+1)$
0	0	$Q(t)$ no hay cambios
0	1	0 (reset a uno)
1	0	1 (set a uno)
1	1	indefinido

El flip-flop SR tiene en realidad tres entradas: S, R, y su salida corriente, $Q(t)$.

Notar los dos valores **indefinidos**, cuando las entradas S y R son 1, el flip-flop es **inestable**.

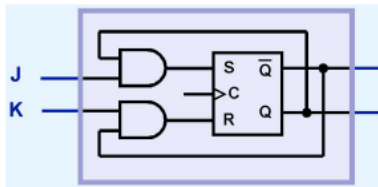
S	R	$Q(t)$	$Q(t+1)$
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	indefinido
1	1	1	indefinido

Flip-Flop JK

Si aseguramos que las entradas al SR no estarán nunca las dos en 1, el circuito se volvería estable.

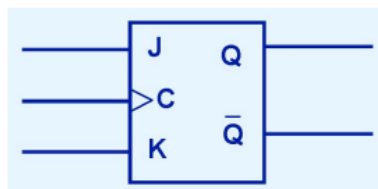
Es posible realizar esta modificación:

El flip-flop modificado se denomina JK, en honor de Jack Kilby (inventor del circuito integrado, premio Nobel de física 2000).



A la derecha podemos ver el circuito lógico de flip-flop SR modificado.

La tabla característica indica que es estable para cualquier combinación de sus entradas

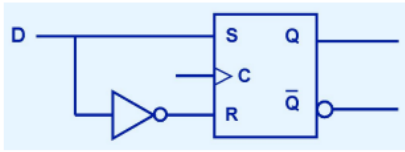


J	K	$Q(t+1)$
0	0	$Q(t)$ no hay cambios
0	1	0 (reset, ponemos cero)
1	0	1 (set, ponemos uno)
1	1	$\overline{Q}(t)$

Flip-Flop D

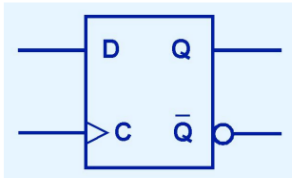
Otra modificación al flip-flop SR es el denominado flip-flop D.

Retiene el valor de la entrada al pulso de clock, hasta que cambia dicha entrada, pero al próximo pulso de clock.



D	$Q(t+1)$
0	0
1	1

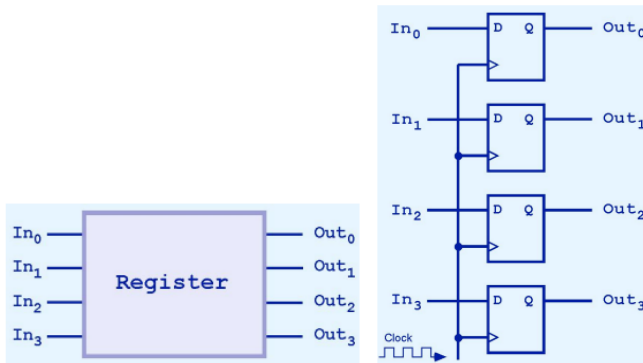
El flip-flop D es el circuito fundamental (celda) de la memoria de una computadora.



D	$Q(t+1)$
0	0
1	1

Registros

Registro de 4 bits compuesto por 4 flip-flops D.

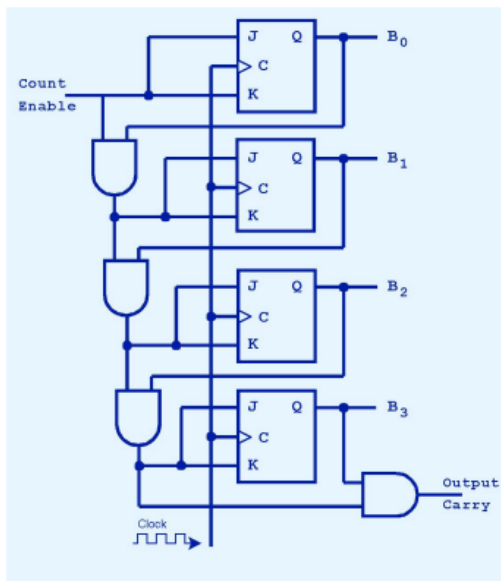


Contadores

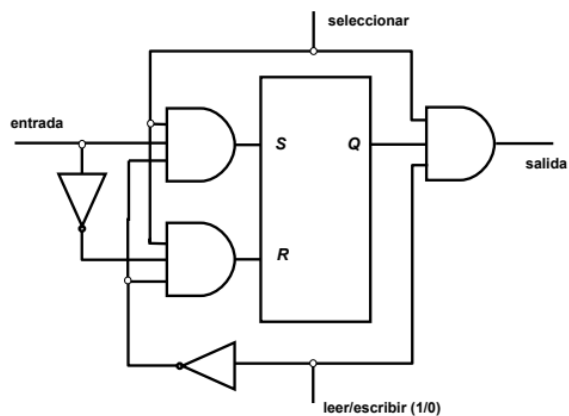
Un contador binario es otro ejemplo de circuito secuencial.

El bit de menor orden se complementa a cada pulso de clock.

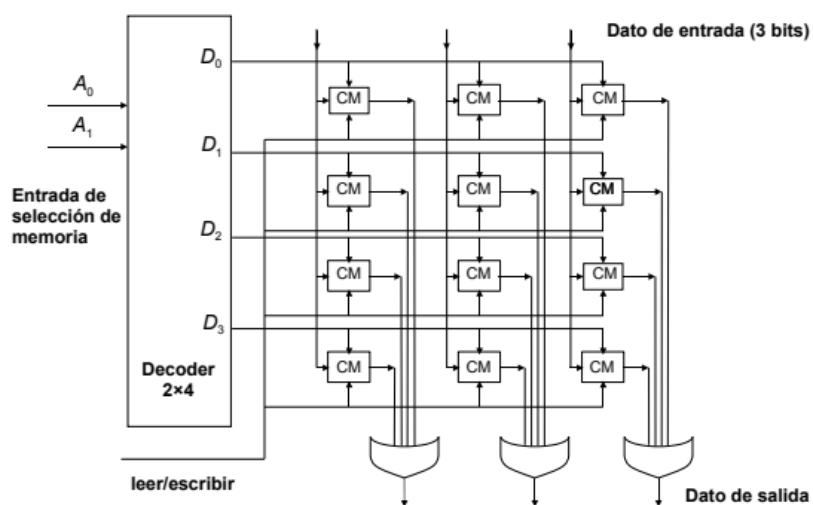
Cualquier cambio de 0 a 1, produce el próximo bit complementado, y así siguiendo a los otros flip-flops.



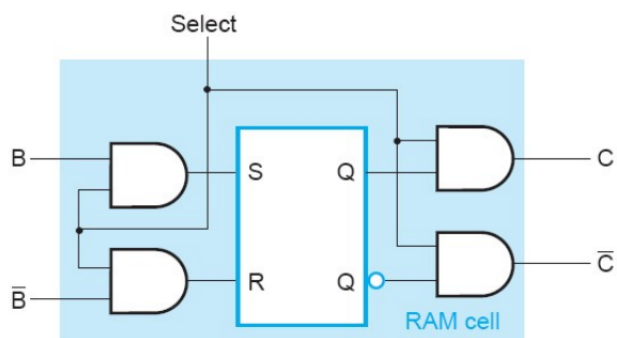
Celda de memoria



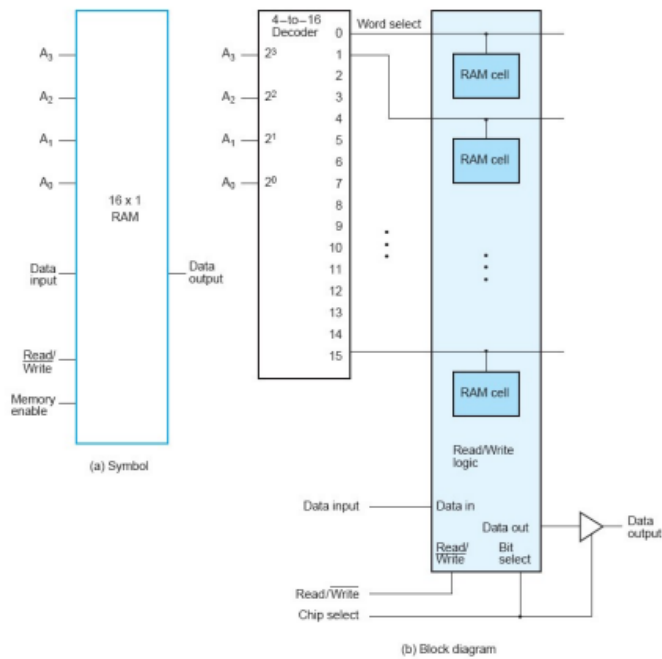
Unidad de memoria de 4 x 3 bits



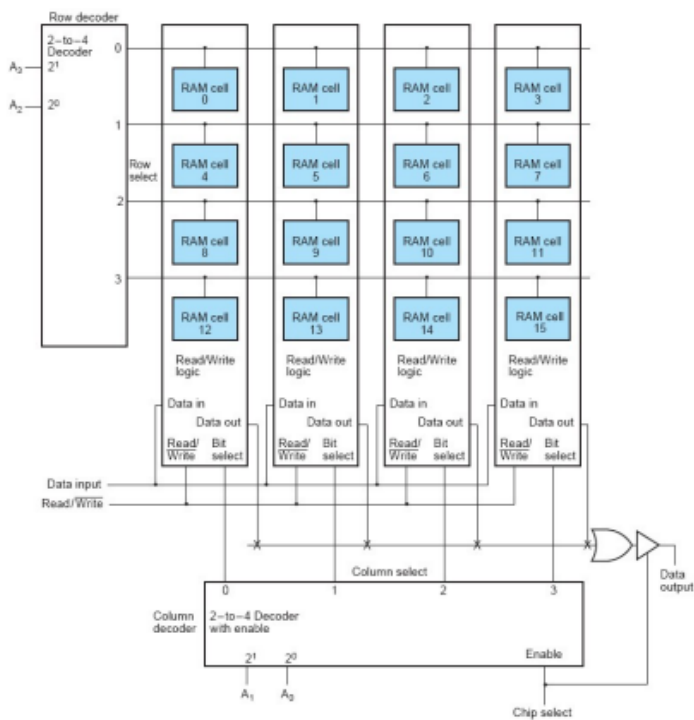
Celda de memoria



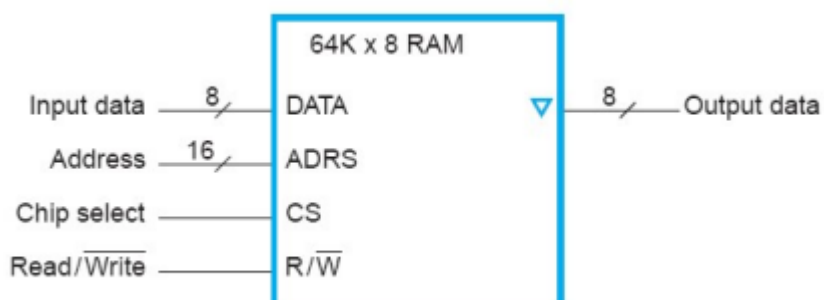
RAM de 16 x 1 bits



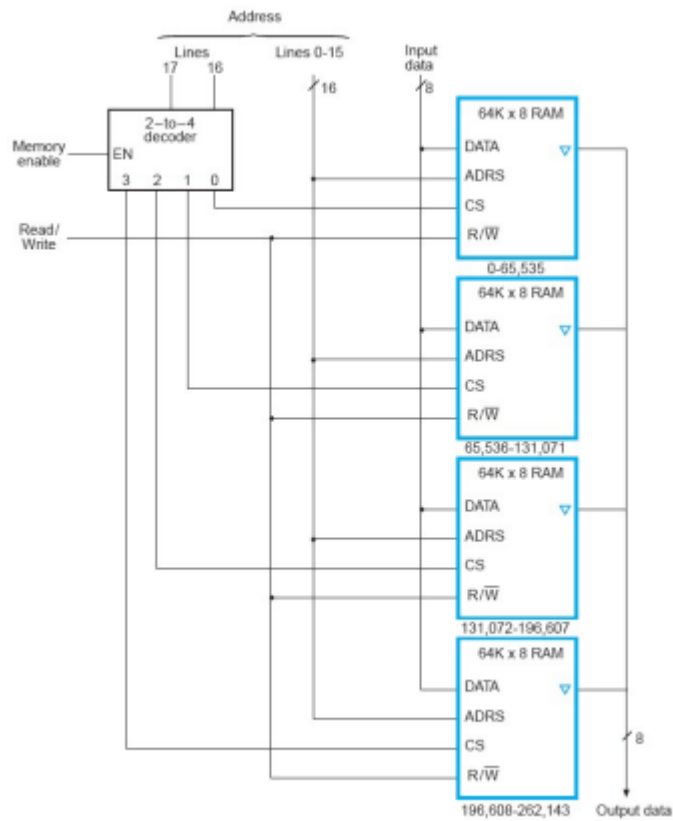
RAM de 4 x 4 bits



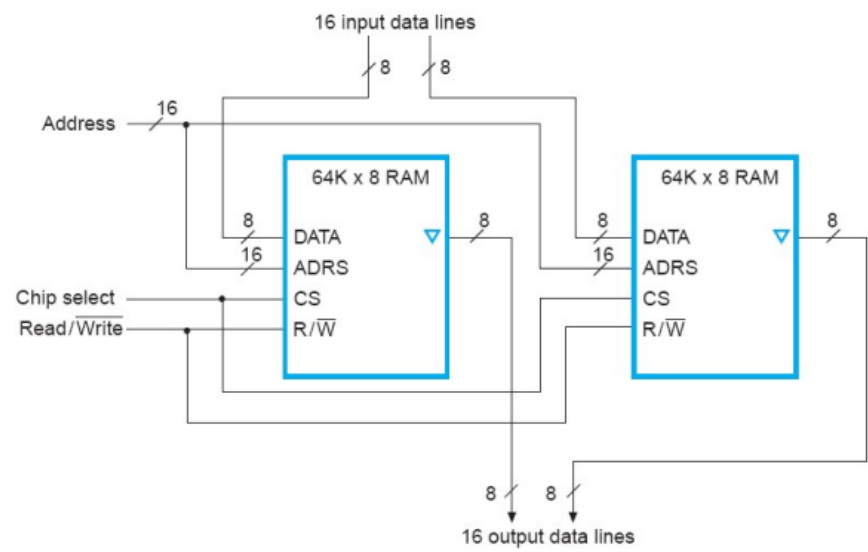
RAM de 64K x 8 bits



RAM de 256K x 8 bits



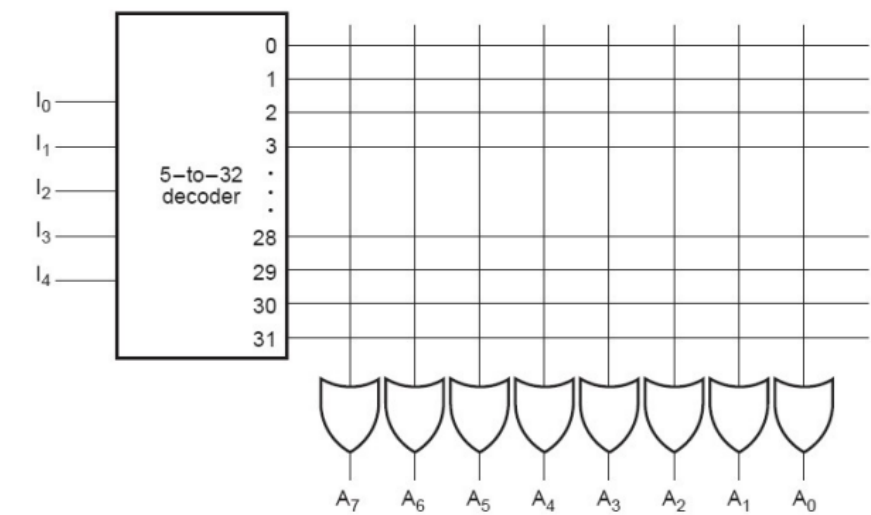
RAM de 64K x 16 bits



ROM



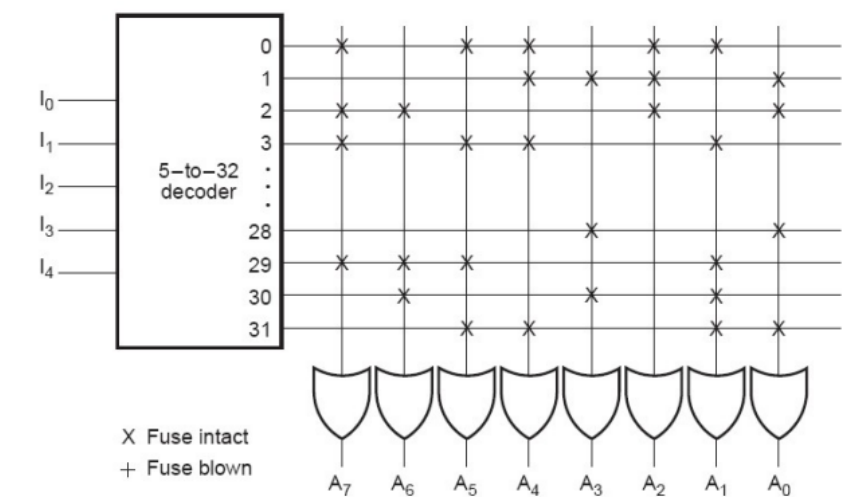
ROM vista interna



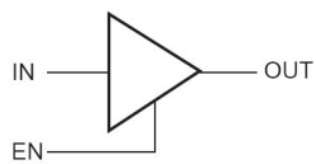
ROM tabla de verdad

Inputs					Outputs							
I_4	I_3	I_2	I_1	I_0	A_7	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1	A_0
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0
1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1

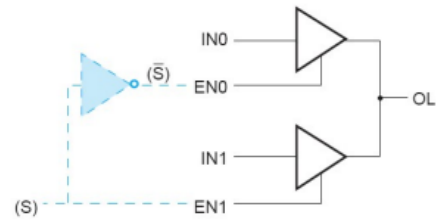
ROM 32 x 8



Buffer de 3 estados



EN	IN	OUT
0	X	Hi-Z
1	0	0
1	1	1



EN1	EN0	IN1	IN0	OL
0	0	X	X	Hi-Z
(S) 0	(S̄) 1	X	0	0
0	1	X	1	1
1	0	0	X	0
1	0	1	X	1
1	1	0	0	0
1	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1