

Circuitos Secuenciales Síncronos

© Luis Entrena, Celia López, Mario García,
Enrique San Millán

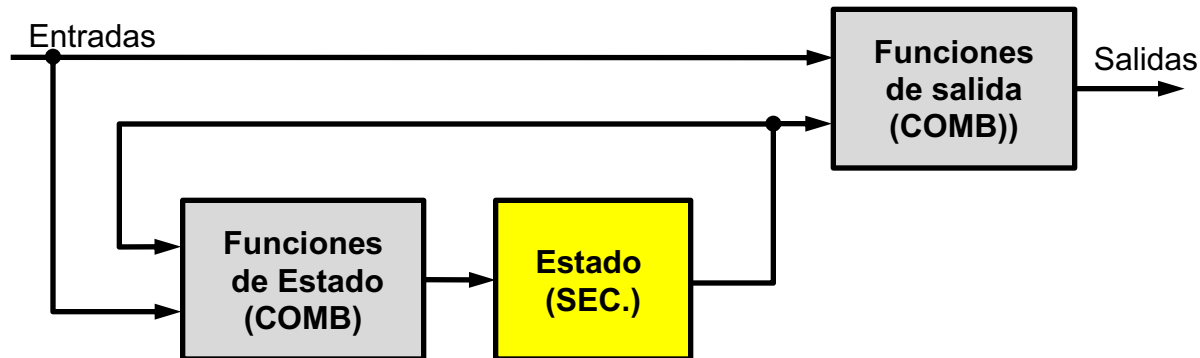
Universidad Carlos III de Madrid

Índice

- Introducción
- Máquinas de estados finitos
 - Modelo de Moore
 - Modelo de Mealy
- Análisis de circuitos secuenciales síncronos
- Síntesis de circuitos secuenciales síncronos
- Ejemplos

Introducción

- Esquema general de un circuito secuencial síncrono:



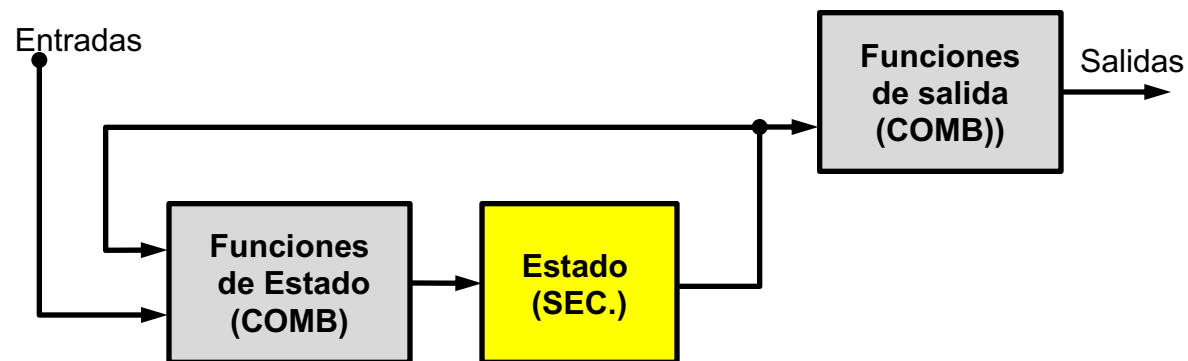
- El bloque “Estado” está formado por biestables, todos ellos sincronizados con la misma señal de reloj

Máquinas de estados

- El comportamiento de un circuito síncrono se puede representar mediante una máquina de estados (FSM, o “Finite State Machine”)
- Una máquina de estados tiene los siguientes elementos:
 - X = Entradas
 - Y = Salidas
 - Z = Estados (valores de los biestables, cambian con cada flanco de reloj)
 - δ = Funciones de estado (funciones combinacionales de entrada de los biestables)
 - λ = Funciones de salida (combinacionales)
- Una FSM se define como una secuencia de eventos en tiempos discretos. El estado Z cambia en cada evento (el cambio está definido por δ).

Modelo de Moore

- En el modelo de Moore las salidas dependen únicamente de los estados (no de las entradas)
- Máquina de estados de Moore:
 - $Z = \delta (X, Z)$
 - $Y = \lambda (Z)$
- Estructura de un circuito asociado a un modelo de Moore:

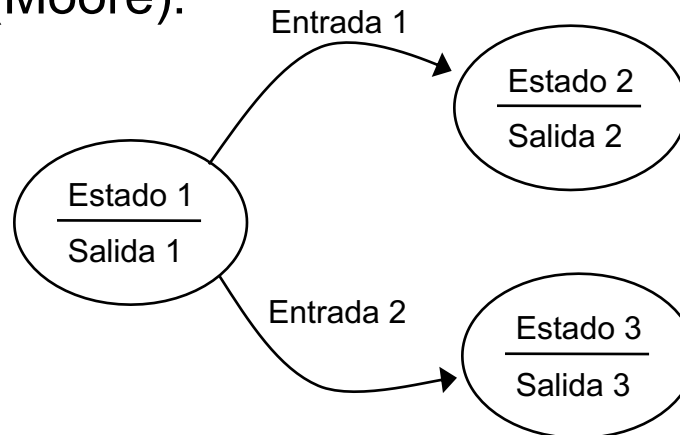


Modelo de Moore

- El reloj y el reset no aparecen en las máquinas de estados, la asociación entre estas señales en un circuito y la máquina de estados es:
 - En cada flanco de reloj se produce una transición o cambio de estado
 - El reset se utiliza únicamente para establecer el estado inicial
- En las máquinas de estados de Moore las salidas cambian únicamente si hay un cambio de estado:
 - Las salidas están sincronizadas con el reloj

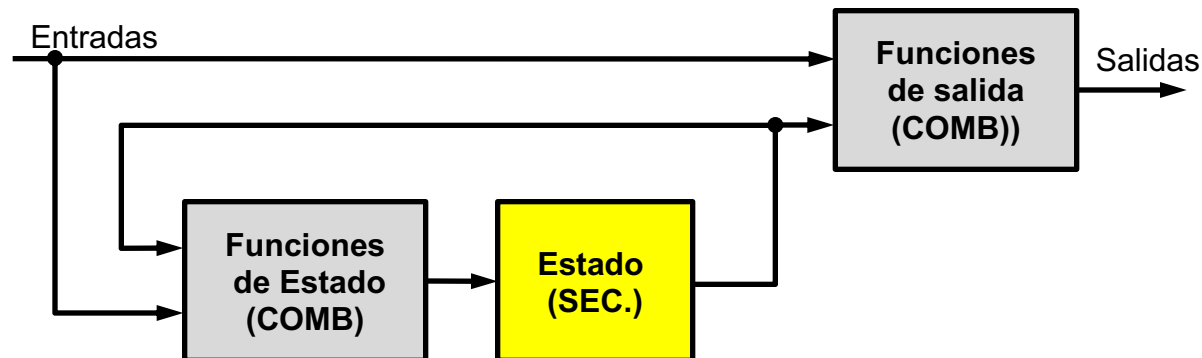
Modelo de Moore

- Una FSM se puede representar también mediante un **diagrama de estados (STG o “State Transition Graph”)**:
 - Cada estado se representa con un círculo
 - Cada transición de estado se representa con una flecha
 - Los diferentes valores de las entradas se representan en las flechas
 - En el caso del modelo de Moore, las salidas se representan dentro de cada estado
- Diagrama de estados (Moore):



Modelo de Mealy

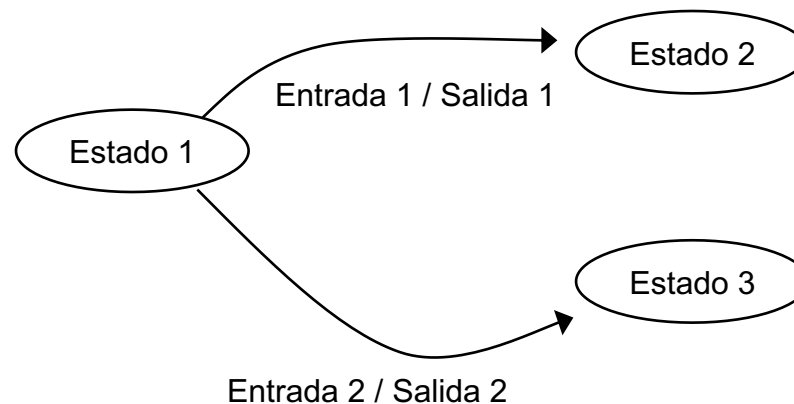
- En el modelo de Mealy las salidas dependen tanto de los estados como de las entradas (caso general)
- Máquina de estados de Mealy:
 - $Z = \delta(X, Z)$
 - $Y = \lambda(X, Z)$
- Estructura de un circuito asociado a un modelo de Mealy:



Modelo de Mealy

- **Diagrama de estados de Mealy:**

- Cada estado se representa con un círculo
- Cada transición de estado se representa con una flecha
- Los diferentes valores de las entradas se representan en las flechas
- En el caso del modelo de Mealy, las salidas se representan también en las flechas (dependen del estado y de las entradas)



Modelo de Mealy

- Igual que en Moore, el reloj y el reset no aparecen en el STG, están implícitos
- En las máquinas de estados de Mealy las salidas pueden cambiar en cualquier momento (basta con que cambie una entrada del circuito):
 - Las salidas **no** están sincronizadas con el reloj
 - NOTA: Aunque las salidas no estén sincronizadas con el reloj, el circuito sigue siendo síncrono (todos los biestables están sincronizados con el mismo reloj)

Análisis y Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- **Análisis:** A partir de un circuito obtener su funcionalidad
 - **Circuitos Combinacionales:**
 - Obtener tablas de verdad o funciones booleanas de las salidas
 - **Circuitos Secuenciales:**
 - Obtener diagrama de estados, o funciones de estado y salidas (δ y λ)
- **Síntesis:** Dada una funcionalidad, obtener la implementación de un circuito
 - **Circuitos Combinacionales:**
 - Obtener expresiones booleanas, implementar con puertas lógicas, multiplexores, decodificadores, etc.
 - **Circuitos Secuenciales:**
 - Obtener diagrama de estados e implementar las funciones de estado y de salida (δ y λ) con puertas lógicas, multiplexores, decodificadores

Análisis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Análisis: Obtener tabla de transiciones, calcular δ y λ , y obtener diagrama de estados.
- Ejemplo:

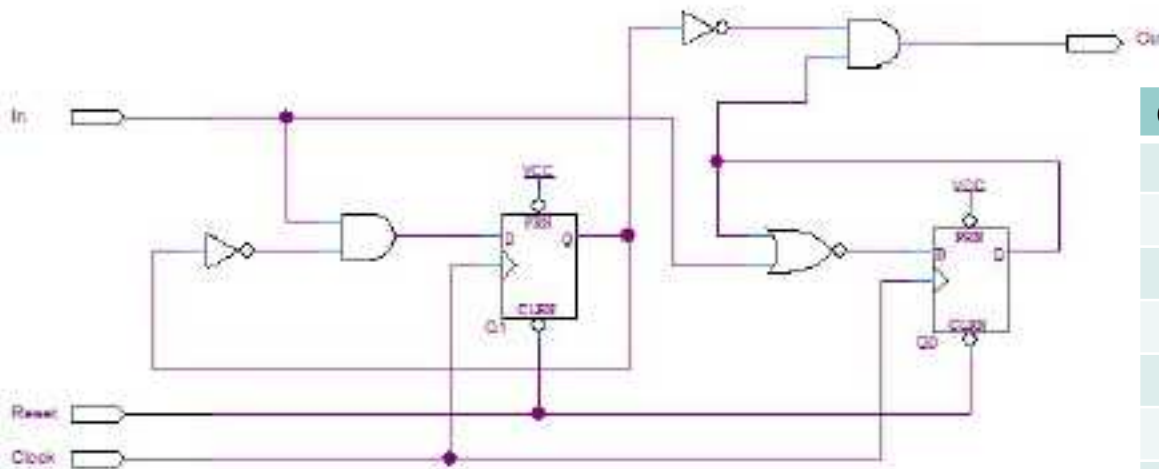


Tabla de transiciones:

Q1	Q0	In	D1	D0	Q1+	Q0+	Out
0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0

$$\delta \Rightarrow \begin{cases} D_0 = \overline{Q_0} + In \\ D_1 = \overline{Q_1} \cdot In \end{cases}$$

$$\lambda \Rightarrow Out = \overline{Q_1} \cdot Q_0$$

Análisis de Circuitos Secuenciales Síncronos

Tabla de transiciones:

Q1	Q0	In	D1	D0	Q1+	Q0+	Out
0	0	0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	1	1	0	1	0	1
1	0	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0

Diagrama estados (Mealy):

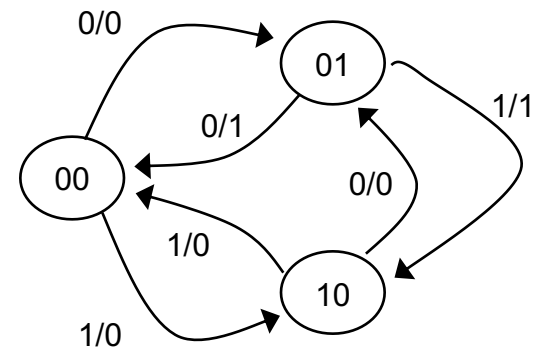
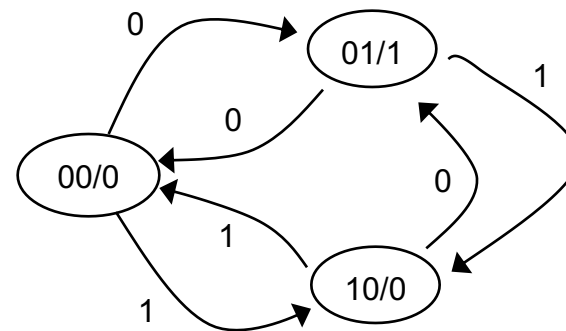


Diagrama estados (Moore):



Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- A partir de la descripción de la funcionalidad de un circuito secuencial, los pasos a seguir para obtener la implementación son:
 1. Obtener diagrama de estados
 2. Codificación de estados
 3. Obtener Tablas de salidas y de transiciones de estados
 4. Tabla inversa de biestables (o tabla de excitación)
 5. Obtener funciones de salida
 6. Obtener funciones de estado
 7. Implementación
- La diferencia entre Moore y Mealy está en las funciones de salida

Tabla de excitación (o tablas inversas) de biestables

- Tablas inversas o tablas de excitación:
 - Describen todas las posibles de combinaciones de entradas que permiten pasar del estado actual Q al estado siguiente Q^+

R-S latch

Q	Q+	S	R
0	0	0	X
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	X	0

J-K flip-flop

Q	Q+	J	K
0	0	0	X
0	1	1	X
1	0	X	1
1	1	X	0

D flip-flop

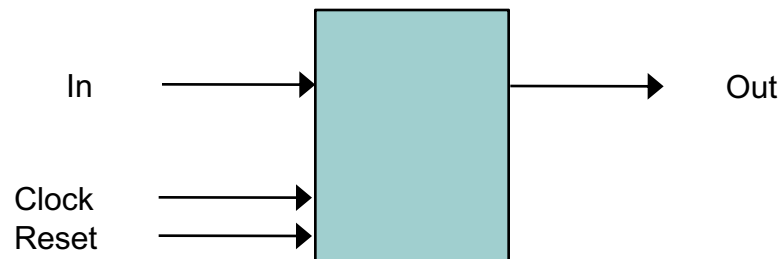
Q	Q+	D
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	1

T flip-flop

Q	Q+	T
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Problema: Diseñar un circuito secuencial síncrono que permita detectar una secuencia de tres o más unos consecutivos a través de una entrada serie.
 - La entrada se lee en cada flanco ascendente de reloj
 - La salida se activa cuando se detecta la secuencia

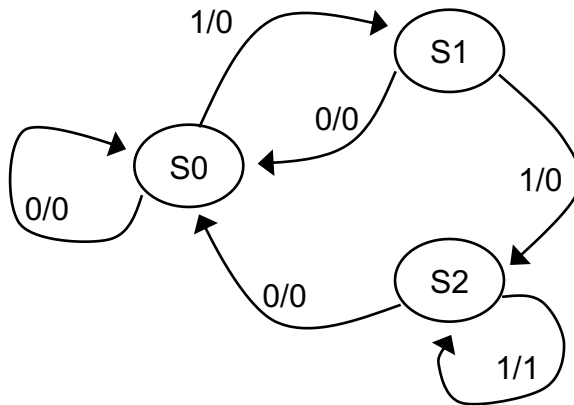


- Ejemplo de secuencia de entradas y salidas:
 - X : 0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1
 - Z : 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 1

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- **Ejemplo 1:** Mealy con biestables D:

1. Diagrama de estados:



2. Codificación de estados:

Estado	Q1	Q0
S0	0	0
S1	0	1
S2	1	1
	1	0

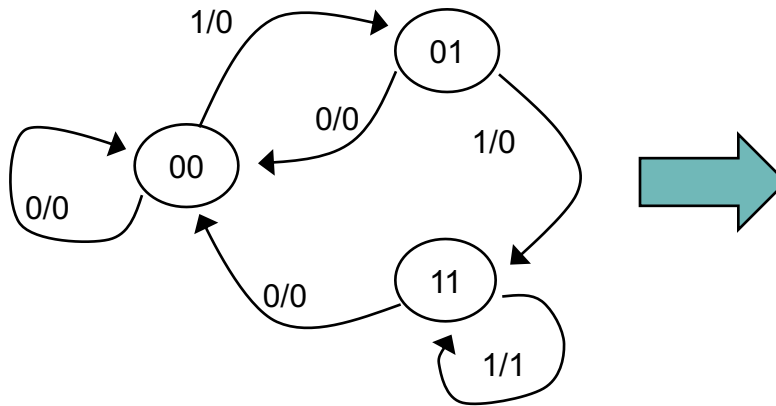


Estado no alcanzable

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D :

3. Tabla de transiciones y tabla de salidas (combinadas juntas):



In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	X	X	X
0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	1	1	1	0
1	1	0	X	X	X
1	1	1	1	1	1

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D :

4. Tabla inversa de biestables (biestables D):

In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out	D1	D0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	X	X	X	X	X
0	1	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0	X	X	X	X	X
1	1	1	1	1	1	1	1

5. Función de salida:

In	Q1 Q0	00	01	11	10
0					X
1			1	X	

$$Out = Q_1 In$$

6. Funciones de estado

In	Q1 Q0	00	01	11	10
0					X
1		1	1		X

$$D_1 = Q_0 In$$

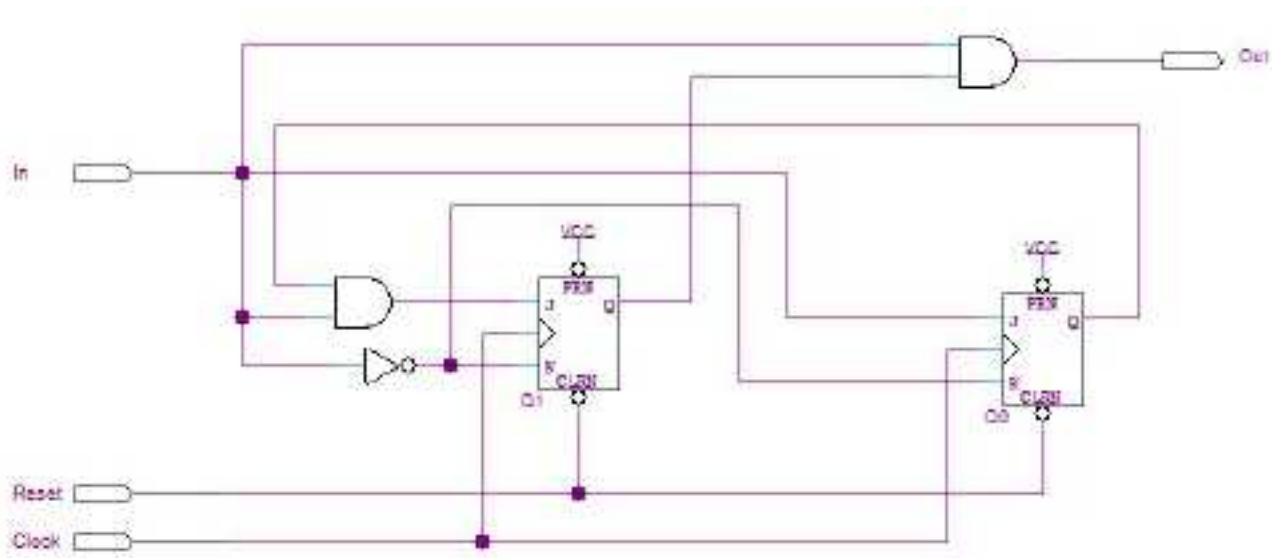
In	Q1 Q0	00	01	11	10
0					X
1		1	1	1	X

$$D_0 = In$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D:

7. Implementación



$$Out = Q_1 In$$

$$D_1 = Q_0 In$$

$$D_0 = In$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

• Ejemplo 2. Mealy con biestables J-K :

4. Tabla inversa de biestables (biestables J-K):

In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out	J1	K1	J0	K0
0	0	0	0	0	0	0	X	0	X
0	0	1	0	0	0	0	X	X	1
0	1	0	X	X	X	X	X	X	X
0	1	1	0	0	0	X	1	X	1
1	0	0	0	1	0	0	X	1	X
1	0	1	1	1	0	1	X	X	0
1	1	0	X	X	X	X	X	X	X
1	1	1	1	1	1	X	0	X	0

5. Función de salida:

$$Out = Q_1 In$$

6. Funciones de estado

		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0			X	X
	1		1	X	X

$$J_1 = Q_0 In$$

		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0	X	X	1	X
	1	X	X		X

$$K_1 = \overline{In}$$

		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0		X	X	X
	1	1	X	X	X

$$J_0 = In$$

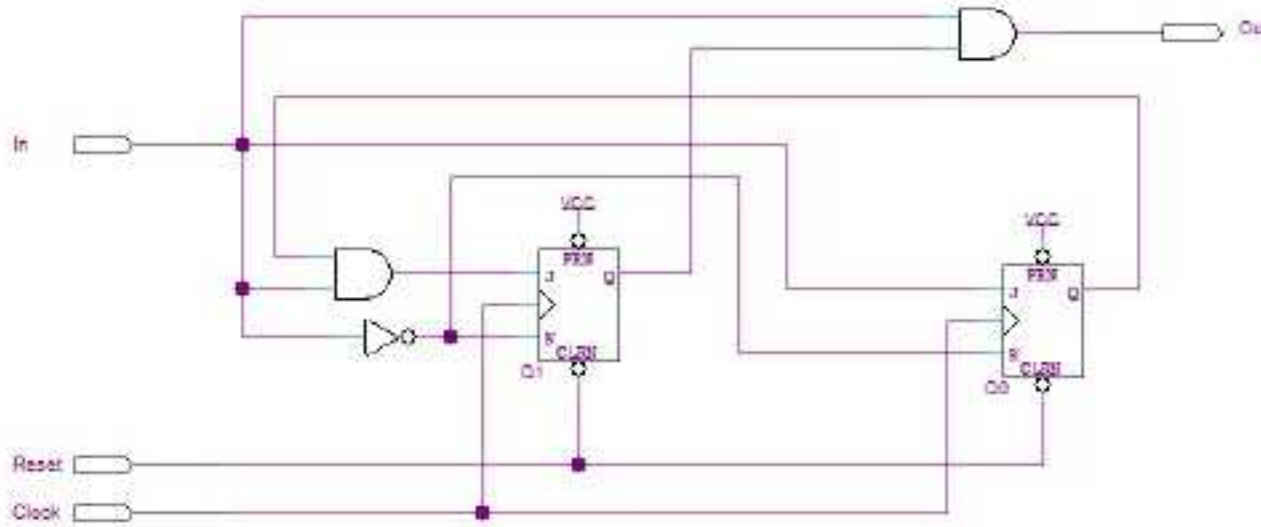
		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0	X	1	1	X
	1	X			X

$$K_0 = \overline{In}$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables J-K:

7. Implementación



$$Out = Q_1 In$$

$$J_0 = In$$

$$K_0 = \overline{In}$$

$$J_1 = Q_0 In$$

$$K_1 = \overline{In}$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

● Ejemplo 3. Mealy con biestables T :

4. Tabla inversa de biestables (biestables T):

In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out	T1	T0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	X	X	X	X	X
0	1	1	0	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	1	0	1	0
1	1	0	X	X	X	X	X
1	1	1	1	1	1	0	0

5. Función de salida: $Out = Q_1 In$

6. Funciones de estado

In	Q1 Q0			
	00	01	11	10
0			1	X
1		1		X

$$T_1 = Q_1 \overline{In} + \overline{Q_1} Q_0 In$$

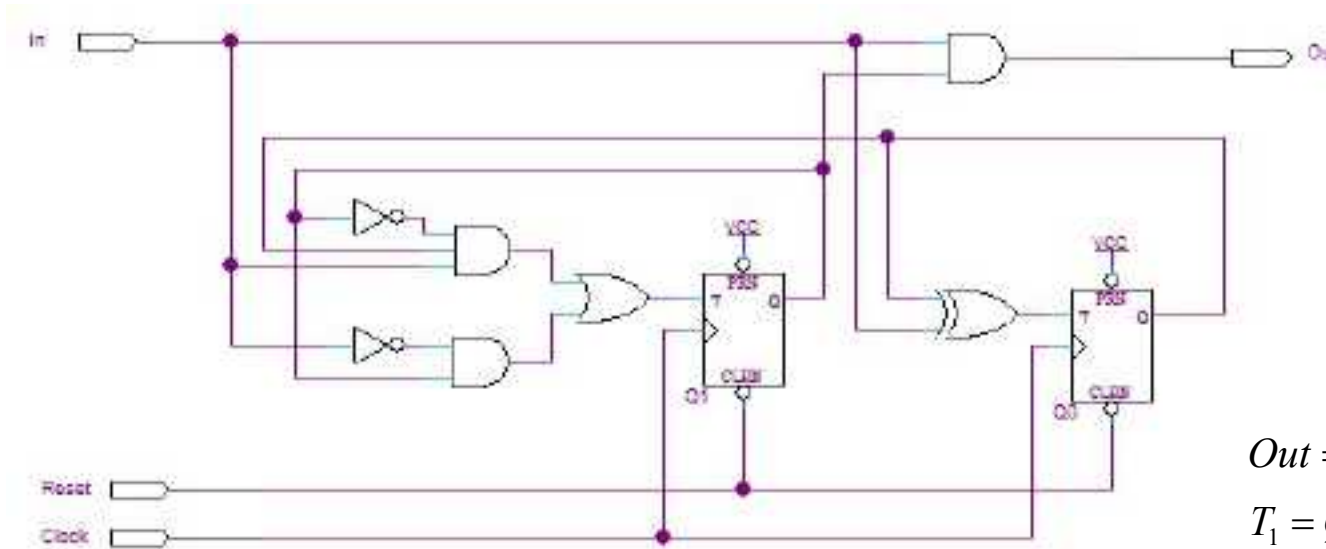
In	Q1 Q0			
	00	01	11	10
0		1	1	X
1	1			X

$$T_0 = \overline{In} Q_0 + In \overline{Q_0} = In \oplus Q_0$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables T:

7. Implementación



$$Out = Q_1 In$$

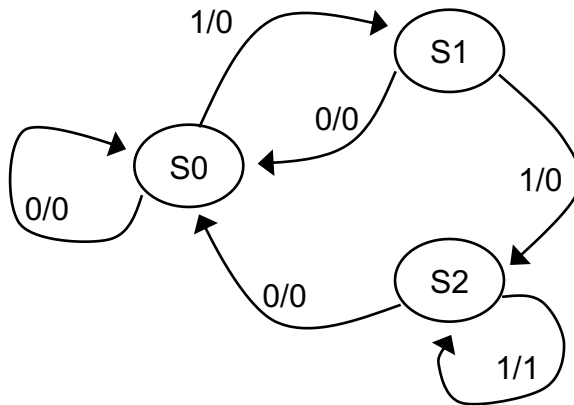
$$T_1 = Q_1 \bar{In} + \bar{Q}_1 Q_0 In$$

$$T_0 = \bar{In} Q_0 + In \bar{Q}_0 = In \oplus Q_0$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Ejemplo 4:** Mealy, otra codificación diferente:

1. Diagrama de estados:



2. Codificación de estados:

Estado	Q1	Q0
S0	0	0
S1	0	1
S2	1	0
	1	1

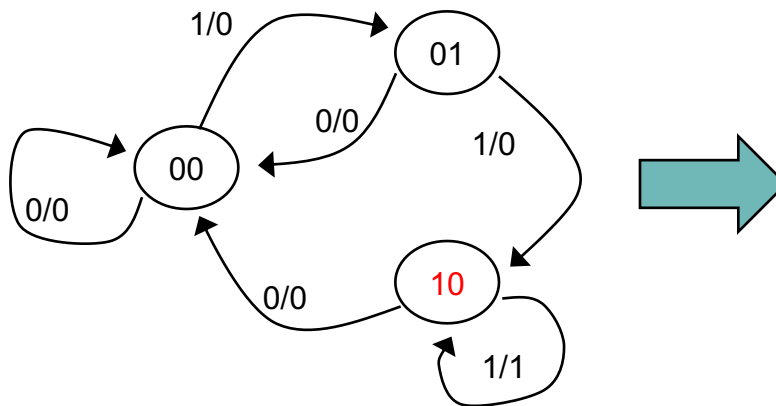


Ahora codificamos S2 de forma diferente

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D (codificación diferente):

3. Tablas de transiciones y salidas (combinadas en una sola):



In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	1	1	X	X	X
1	0	0	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	0	1
1	1	1	X	X	X

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D :

4. Tabla inversa de biestables (biestables D):

In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	Out	D1	D0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	X	X	X	X	X
1	0	0	0	1	0	0	1
1	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	1	0
1	1	1	X	X	X	X	X

5. Función de salida:

In	Q1 Q0			
	00	01	11	10
0			X	
1			X	1

$$Out = Q_1 In$$

6. Funciones de estado

In	Q1 Q0			
	00	01	11	10
0			X	
1		1	X	1

$$D_1 = Q_0 In + Q_1 In = In(Q_0 + Q_1)$$

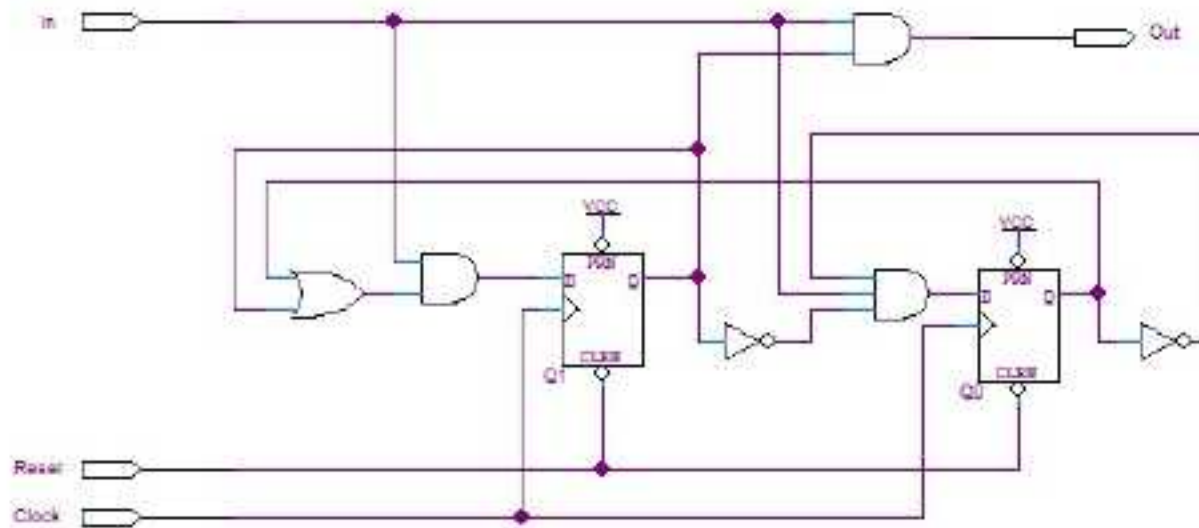
In	Q1 Q0			
	00	01	11	10
0			X	
1	1		X	

$$D_0 = \overline{Q_1} \overline{Q_0} In$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Mealy con biestables D (codificación diferente):

7. Implementación



Con esta otra codificación sale más complejo y se requieren más puertas lógicas para la implementación

$$Out = Q_1 In$$

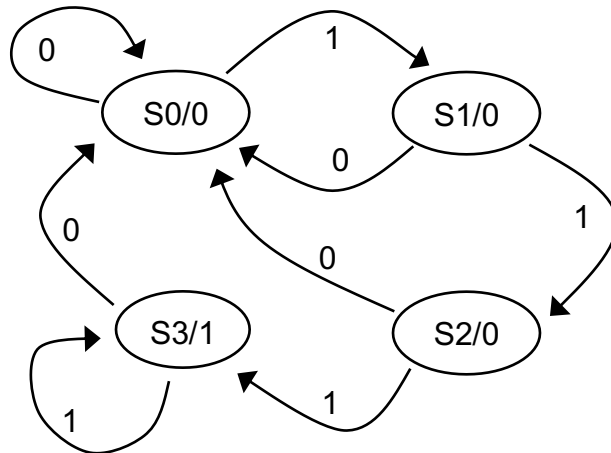
$$D_1 = In(Q_0 + Q_1)$$

$$D_0 = \overline{Q_1} \overline{Q_0} In$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- **Ejemplo 5:** Moore con biestables D:

1. Diagrama de estados:



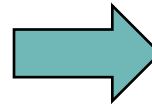
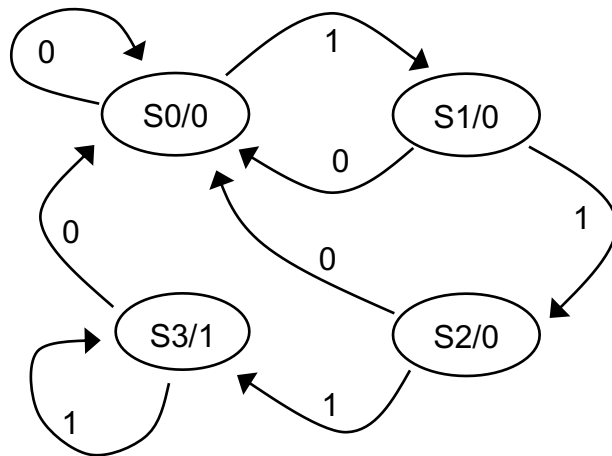
2. Codificación de estados:

Estado	Q1	Q0
S0	0	0
S1	0	1
S2	1	1
S3	1	0

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Moore con biestables D :

3. Tablas de transiciones y salidas:



In	Q1	Q0	Q1+	Q0+
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	1
1	1	0	1	0
1	1	1	1	0

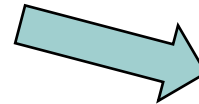
Q1	Q0	Out
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Moore con biestables D :

4. Tabla inversa de biestables (biestables D):

In	Q1	Q0	Q1+	Q0+	D1	D0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	1	0



5. Función de salida:

Q1	Q0	Out
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



$$Out = Q_1 Q_0$$

6. Funciones de estado

		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0				
	1		1	1	1

$$D_1 = Q_0 In + Q_1 In = (Q_0 + Q_1) In$$

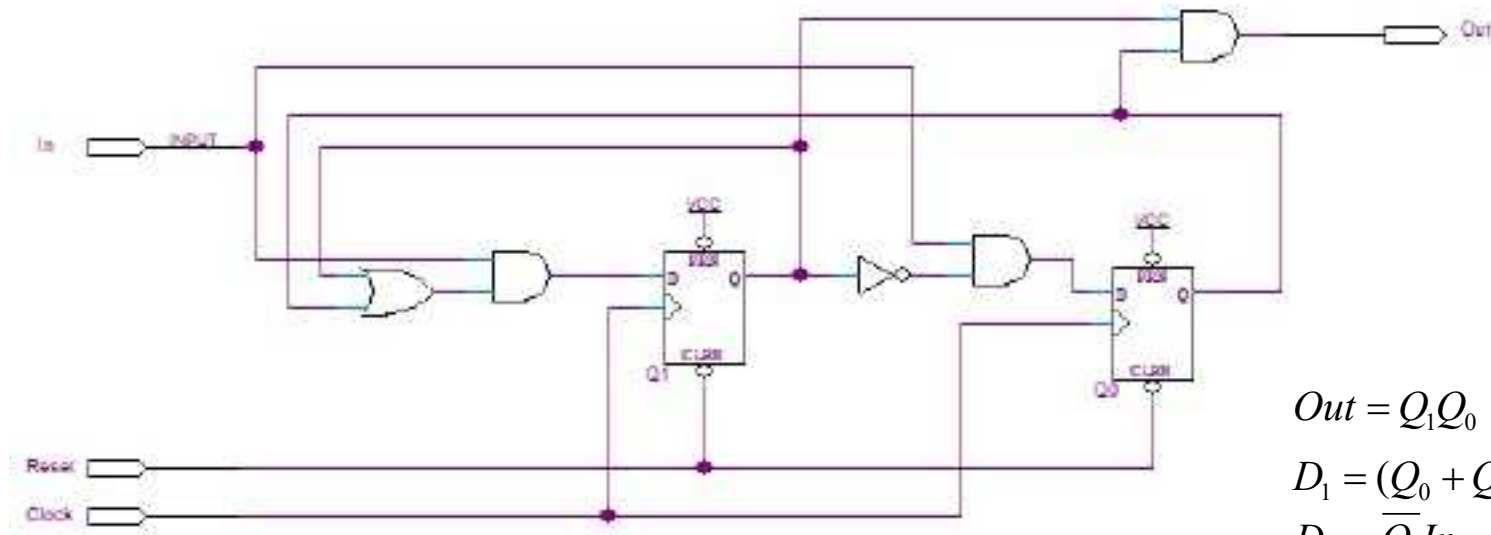
		Q1 Q0			
		00	01	11	10
In	0				
	1	1	1		

$$D_0 = \overline{Q_1} In$$

Síntesis de Circuitos Secuenciales Síncronos

- Moore con biestables D:

7. Implementación



$$Out = Q_1 Q_0$$

$$D_1 = (Q_0 + Q_1)In$$

$$D_0 = \overline{Q_1} In$$

Bibliografía

- “Circuitos y Sistemas Digitales”. J. E. García Sánchez, D. G. Tomás, M. Martínez Iniesta. Ed. Tebar-Flores
- “Electrónica Digital”, L. Cuesta, E. Gil, F. Remiro, McGraw-Hill
- “Fundamentos de Sistemas Digitales “, T.L Floyd, Prentice-Hall