

# Electrónica Digital y Microcontroladores

## Tema 4.2: Análisis y Síntesis de circuitos secuenciales

---

Josué Meneses Díaz

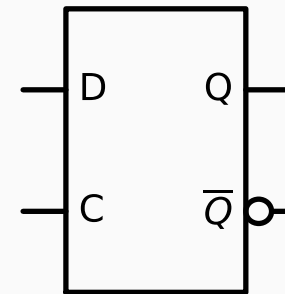
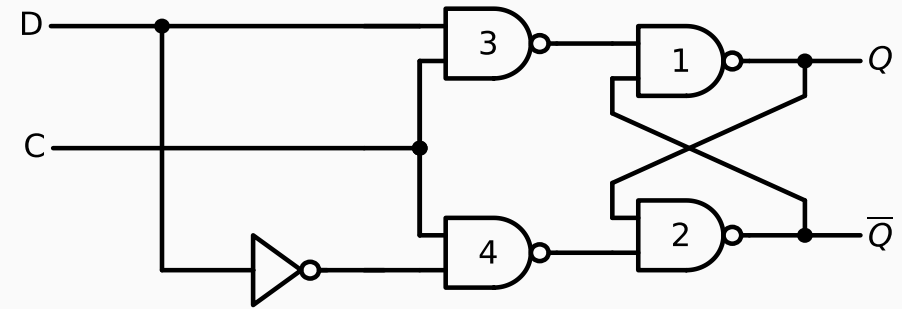
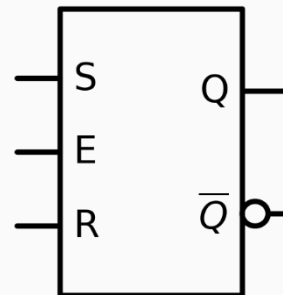
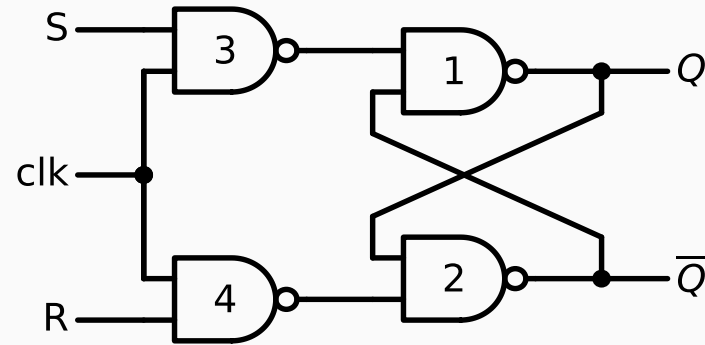
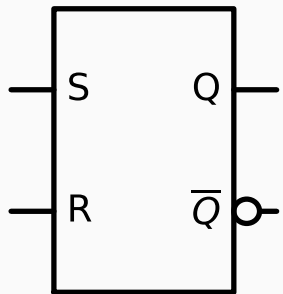
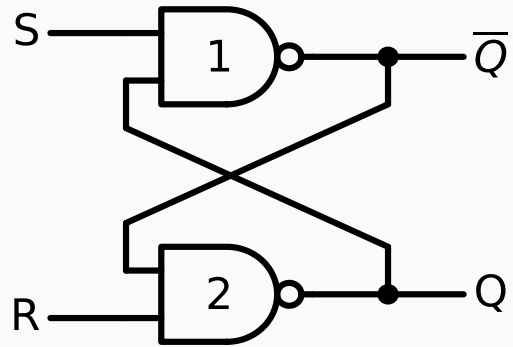
[josue.meneses@usach.cl](mailto:josue.meneses@usach.cl)

Universidad de Santiago de Chile

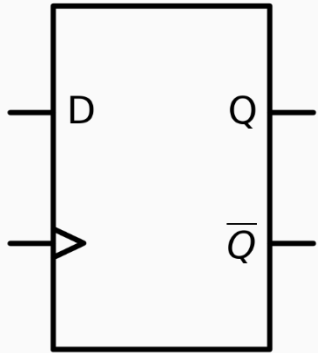
19-06-2025

- Análisis de circuitos secuenciales.
  - Tabla de estado.
  - Ecuación de estado.
  - Diagrama de estado.
- Síntesis (diseño e implementación) de circuitos secuenciales.

# Latch RS, RS con E y D

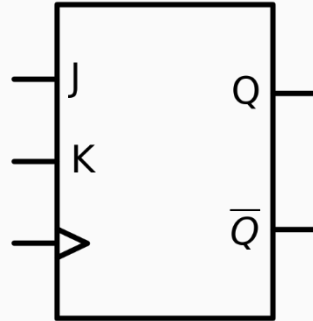


# Ecuación/tabla característica



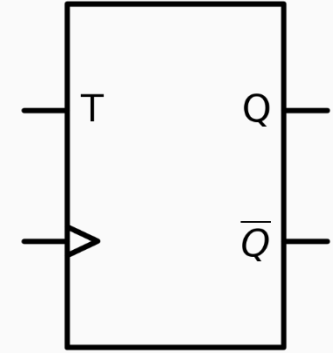
D	$Q(t + 1)$	Comentario
0	0	Restablece
1	1	Establece

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



J	K	$Q(t + 1)$	Comentario
0	0	$Q(t)$	mantiene
1	0	1	Establece
0	1	0	Reestablece
1	1	$\overline{Q(t)}$	Complementa

$$Q(t + 1) = J\overline{Q} + \overline{K}Q$$



T	$Q(t + 1)$	Comentario
0	$Q(t)$	mantiene
1	0	Complementa

$$Q(t + 1) = T \oplus Q$$

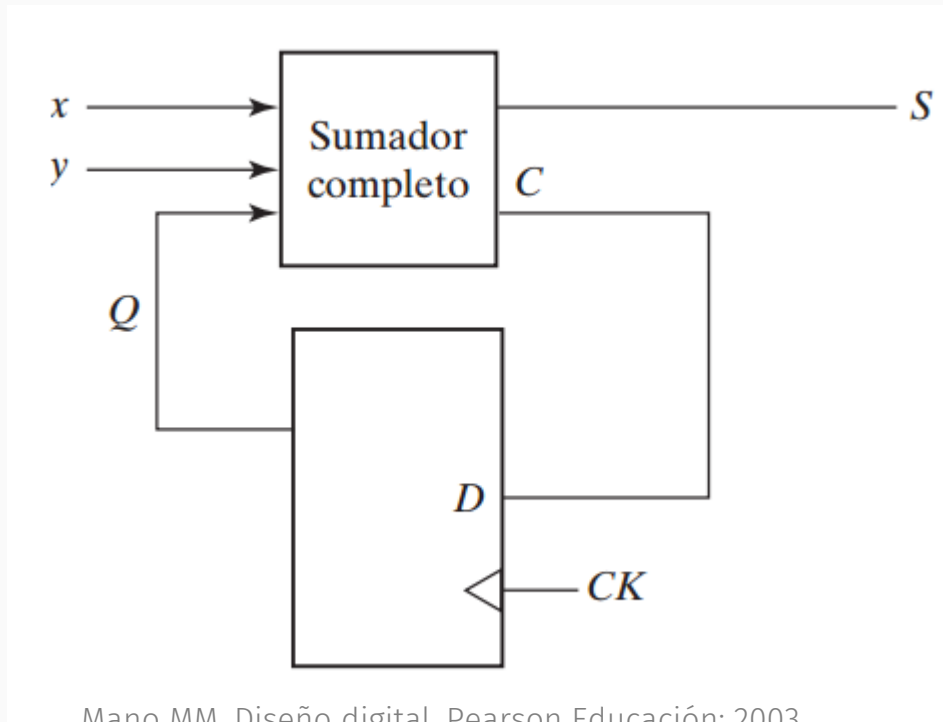
$$Q(t + 1) = T\overline{Q} + \overline{T}Q$$

# ANÁLISIS DE CIRCUITOS SECUENCIALES

# Análisis de circuitos secuenciales

- Buscamos obtener una tabla/diagrama de la evolución temporal de las variables del circuito
  - Entradas
  - Salidas
  - Estados internos
- Poseemos tres tipos de representación:
  - Ecuación de estado
  - Tabla de estado
  - Diagrama de estado

# Análisis de circuitos secuenciales



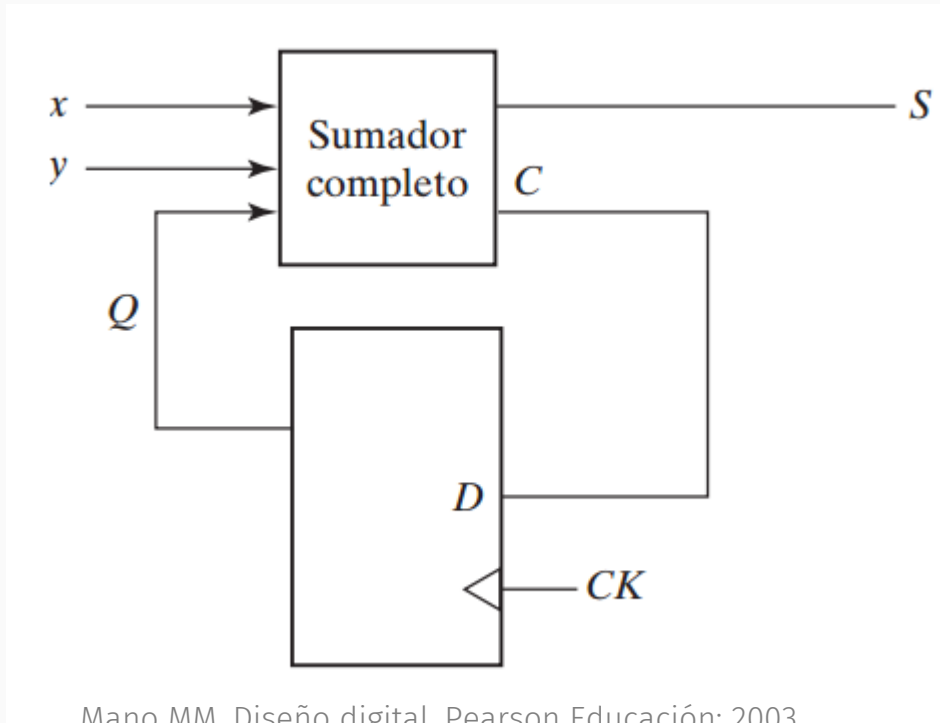
Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

- Los pasos a seguir para su análisis son:
  1. Reconocer las entradas del circuito (global).
  2. Encontrar los FF utilizados. Nombrar las entradas y salidas del FF.
  3. Identificar las salidas del circuito (global).
  4. Escribir las ecuaciones de estado del FF.
  5. Construir la tabla de estado del circuito.
  6. (Opcional) Construir el diagrama de estados del circuito.

# Análisis de circuitos secuenciales

## 1. Reconocer las entradas del circuito (global).

1. Entradas circuito: 2 entradas,  $x$  e  $y$ .

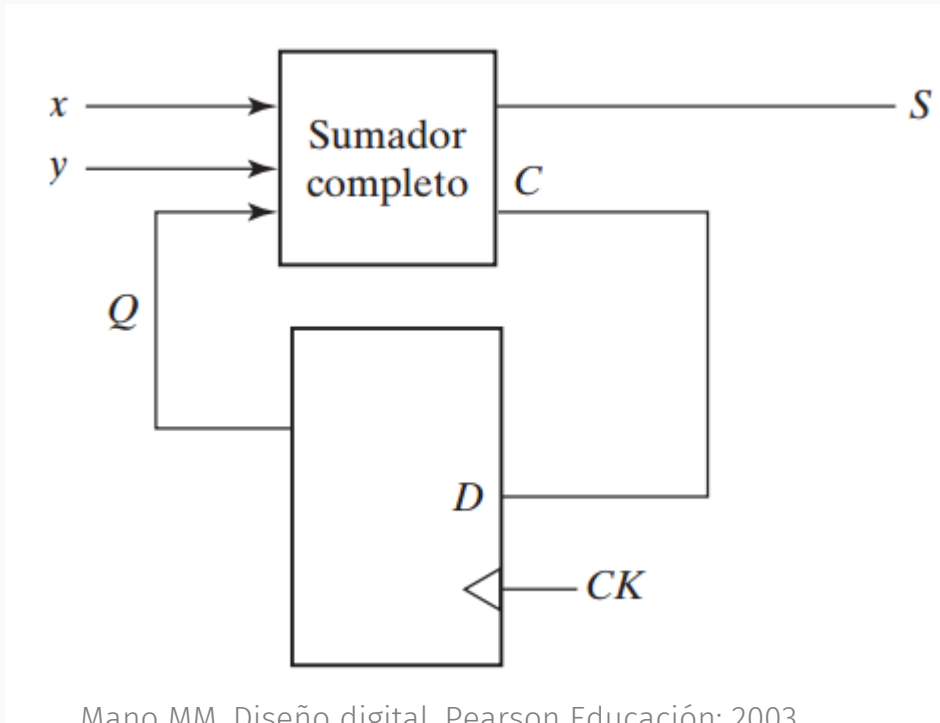


Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.



# Análisis de circuitos secuenciales

## 2. Encontrar los FF utilizados. Nombrar las entadas y salidas del FF.

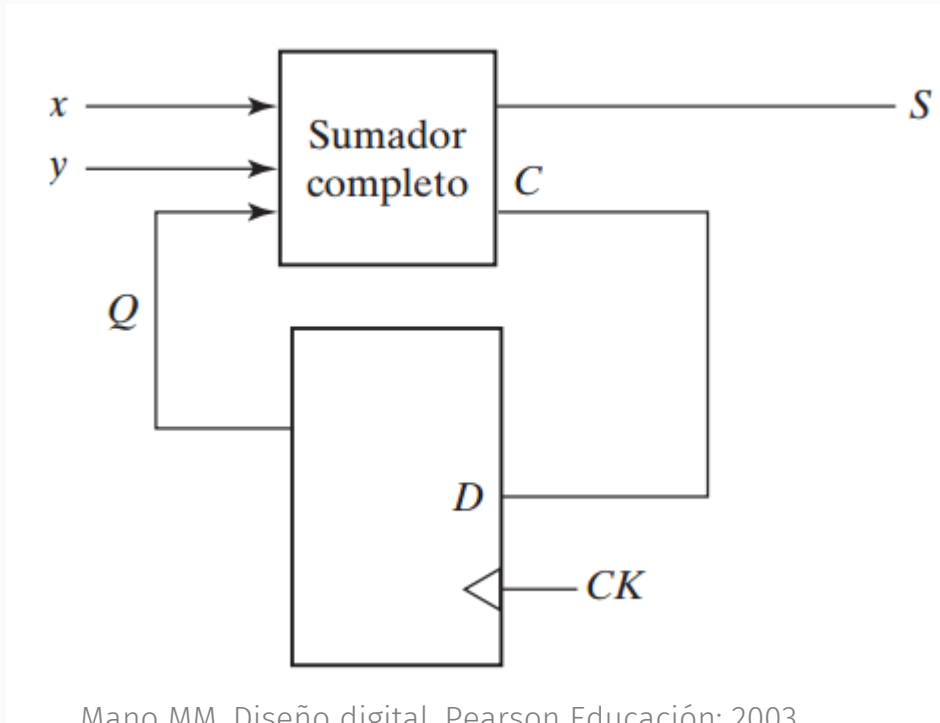


Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

1. Entradas circuito: 2 entradas,  $x$  e  $y$ .
2. Se utiliza un FF D. El Acarreo de salida se conectado a la entrada del FF D. La salida  $Q$  se conecta con el acarreo de entrada.

# Análisis de circuitos secuenciales

## 3. Identificar las salidas del circuito (global).

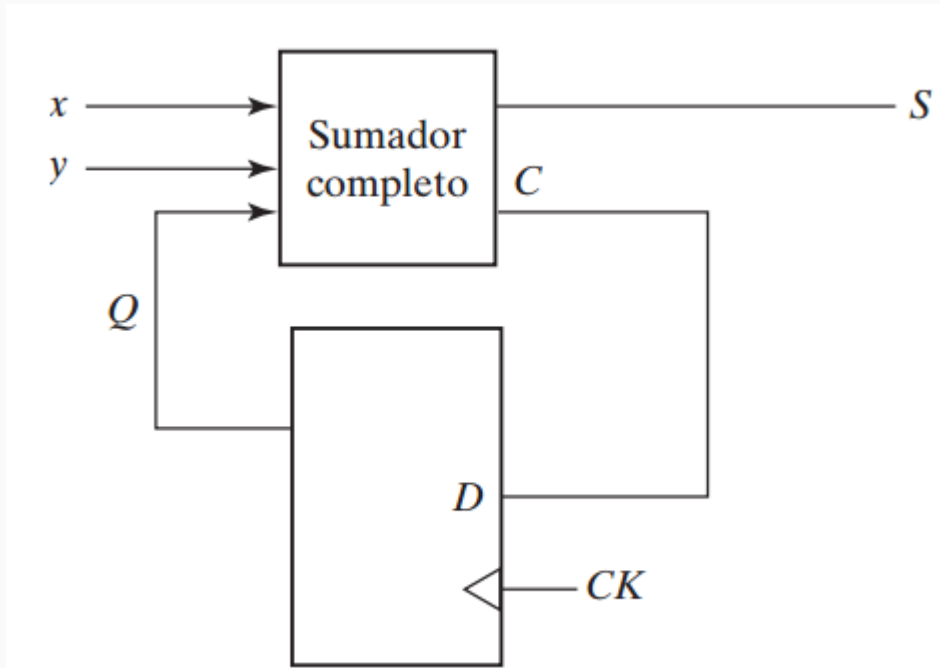


Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

1. Entradas circuito: 2 entradas,  $x$  e  $y$ .
2. Se utiliza un FF D. El Acarreo de salida se conectado a la entrada del FF D. La salida  $Q$  se conecta con el acarreo de entrada.
3. Salida  $S$  del circuito (sumador).

# Análisis de circuitos secuenciales

## 4. Escribir las ecuaciones de estado del FF.



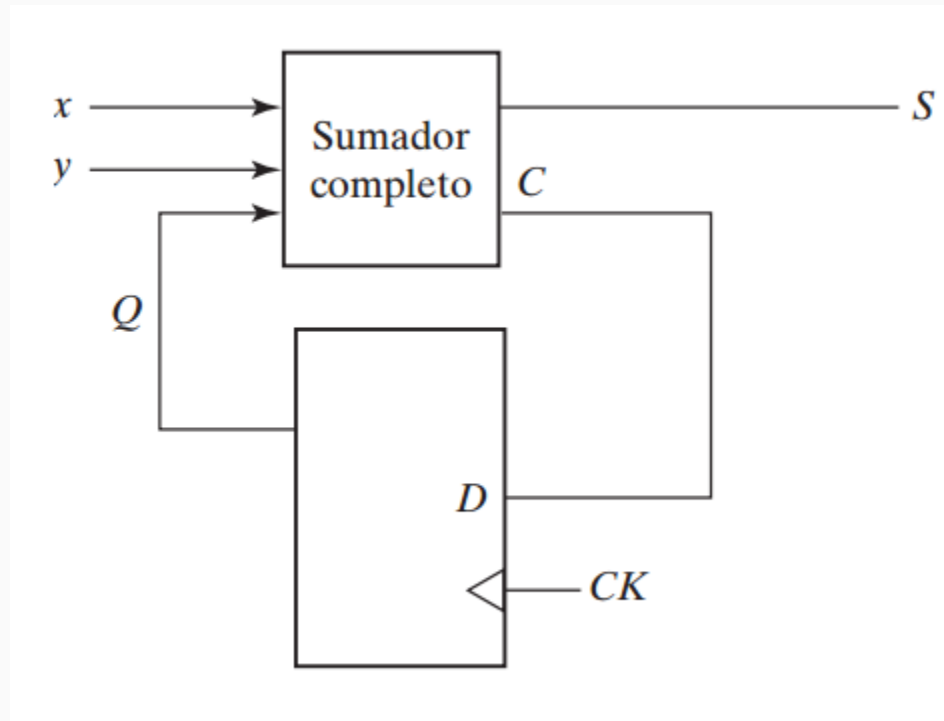
Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

1. Entradas circuito: 2 entradas,  $x$  e  $y$ .
2. Se utiliza un FF D. El Acarreo de salida se conectado a la entrada del FF D. La salida  $Q$  se conecta con el acarreo de entrada.
3. Salida  $S$  del circuito (sumador).

¿Qué son las ecuaciones de estado?  
¿Qué son las tablas de estado?  
¿Qué son los Diagramas de estado?

# Análisis de circuitos secuenciales

## Ecuaciones de estado (transición)



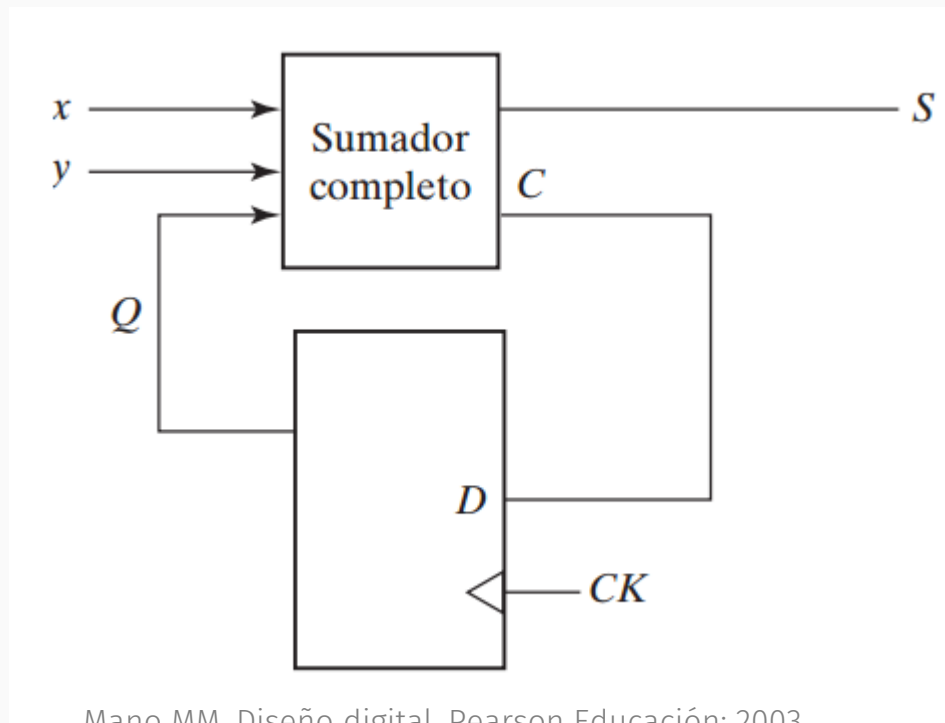
Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

- Especifica el siguiente estado del FF en función del estado actual y las entradas del circuito, consideramos entonces:
  - Las ec. características propias de cada FF.
  - Los circuitos combinacional en las entradas de los FF.

$$Q(t + 1) = f(Q(t))$$

# Análisis de circuitos secuenciales

## 4. Escribir las ecuaciones de estado del FF.



Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

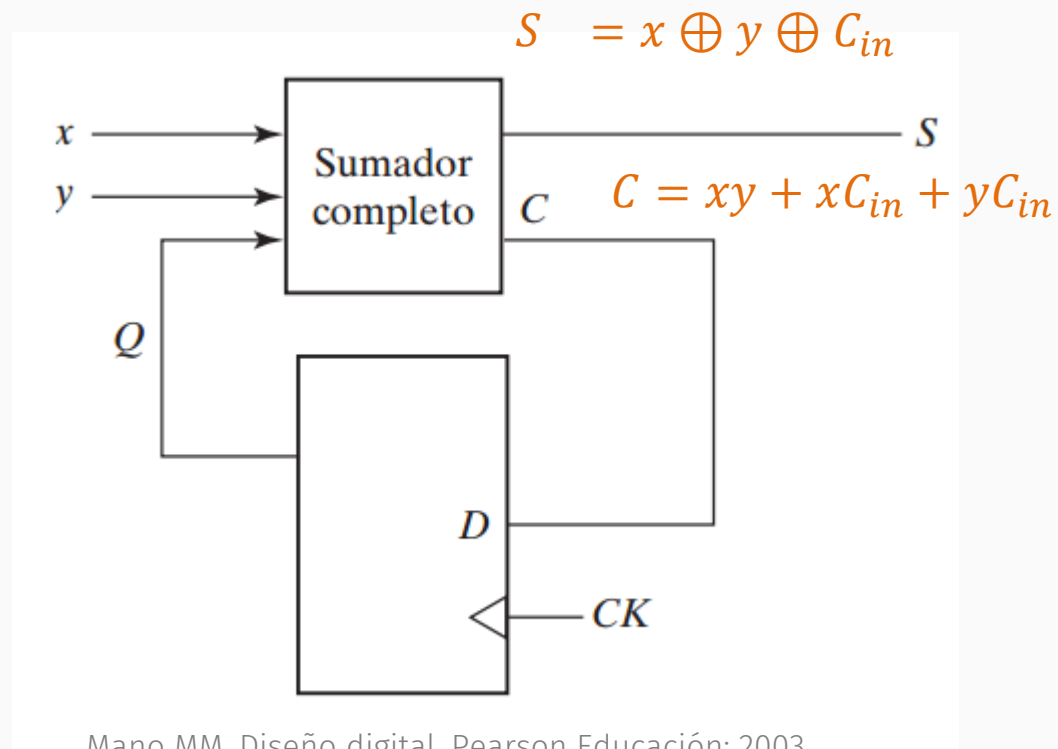
1. Entradas circuito: 2 entradas,  $x$  e  $y$ .
2. Se utiliza un FF D. El Acarreo de salida se conectado a la entrada del FF D. La salida  $Q$  se conecta con el acarreo de entrada.
3. Salida  $S$  del circuito (sumador).

$$S = x \oplus y \oplus C_{in}$$

$$C = xy + xC_{in} + yC_{in}$$

# Análisis de circuitos secuenciales

## 5. Construir la tabla de estado del circuito.



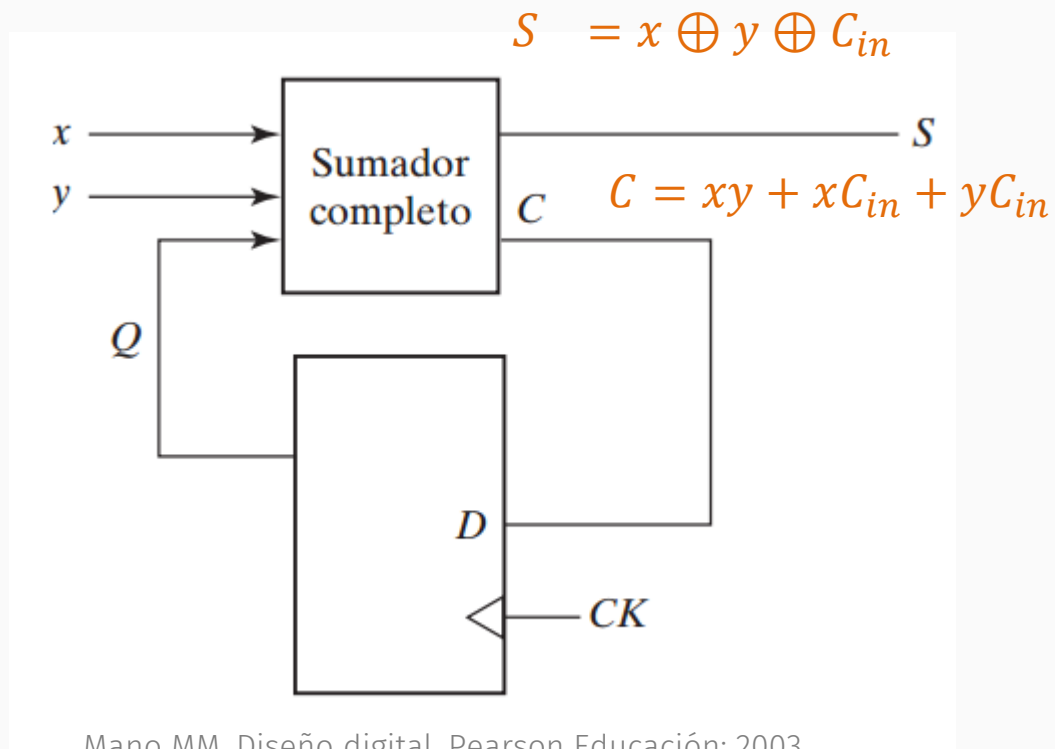
Mano MM. Diseño digital. Pearson Educación; 2003.  
Ejercicio 5.7.

$$D_Q = xy + xQ + yQ \quad \text{Ec. Entrada}$$
$$Q(t+1) = xy + xQ + yQ \quad \text{Ec. Estado}$$
$$S = x \oplus y \oplus Q(t) \quad \text{Ec. salida}$$

E. Actual	Entrada		E. siguiente	Salida
$Q(t)$	$x$	$y$	$Q(t+1)$	$S$
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

# Análisis de circuitos secuenciales

## 5. Construir la tabla de estado del circuito.



$$D_Q = xy + xQ + yQ \quad \text{Ec. Entrada}$$
$$Q(t+1) = xy + xQ + yQ \quad \text{Ec. Estado}$$
$$S = x \oplus y \oplus Q(t) \quad \text{Ec. salida}$$

E. Actual	Entrada		E. siguiente	Salida
$Q(t)$	$x$	$y$	$Q(t+1)$	$S$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

# Análisis de circuitos secuenciales

## Diagrama de Estado

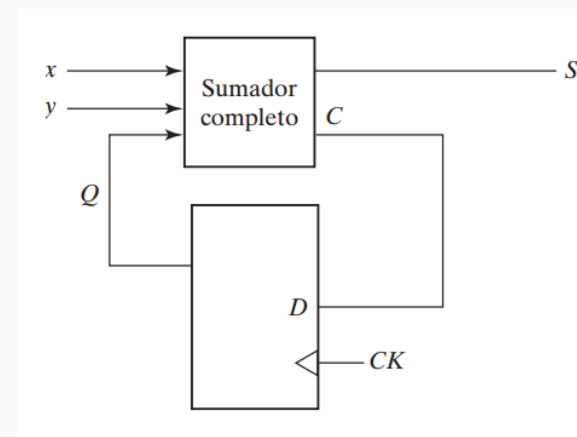
Representar el funcionamiento de un circuito secuencial de forma gráfica.

Son contruidos a partir de una **tabla de estados**.

- Estados posibles -> circulo.
- Cada estado/circulo es unido mediante flechas.
- Sobre las uniones se escribe la entrada(s) y salida(s) que generan el cambio de estado

Si  $x$  es la entrada e  $y$  la salida ->  $x/y$ .

E. Actual	Entrada		E. siguiente	Salida
$Q(t)$	$x$	$y$	$Q(t + 1)$	$S$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1





# Análisis de circuitos secuenciales

## 6. (Opcional) Construir el diagrama de estados del circuito.

- Estados posibles -> círculo.
- Cada estado/círculo es unido mediante flechas.
- Sobre las uniones se escribe la entrada(s) y salida(s) que generan el cambio de estado

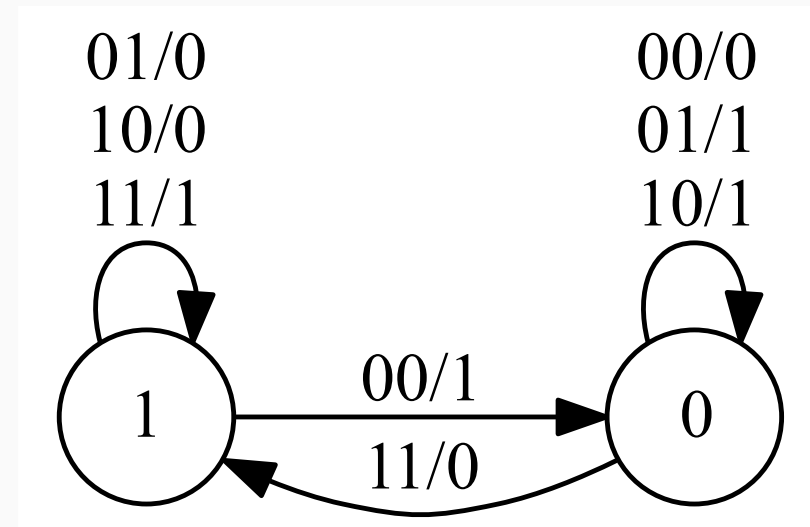
Si  $x$  es la entrada e  $y \rightarrow x/y$ .

E. Actual	Entrada		E. siguiente	Salida
$Q(t)$	$x$	$y$	$Q(t + 1)$	$S$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

# Análisis de circuitos secuenciales

## 6. (Opcional) Construir el diagrama de estados del circuito.

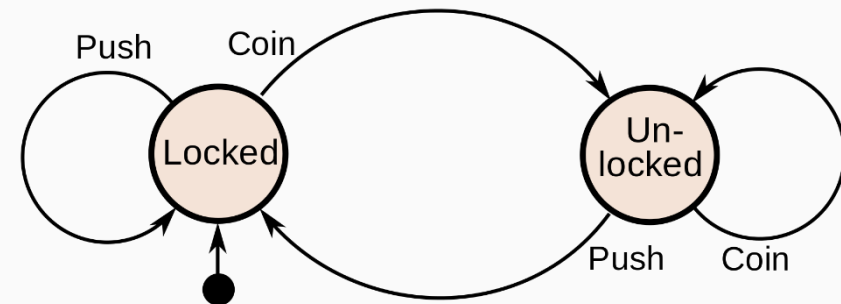
E. Actual	Entrada		E. siguiente	Salida
$Q(t)$	$x$	$y$	$Q(t + 1)$	$S$
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1



# SÍNTESIS DE CIRCUITOS SECUENCIALES

# Síntesis de circuito secuencial

1. Diseñar un diagrama de estados del problema a resolver.
  2. Asignar valores binarios a cada uno de los estados del problema.
  3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria. En este punto hay que definir que FF serán utilizados en el diseño.
  4. Deducir las ecuaciones de entrada y salida del circuito secuencial de cada FF.
  5. Dibujar el diagrama de circuito final.
- Este tipo de diseño es denominado **Máquina de estado finito o FSM** (finite state machine).



Finite state machine, Wikipedia.

# Ejemplo de Síntesis

1. Diseñar un diagrama de estados del problema a resolver.

## Problema:

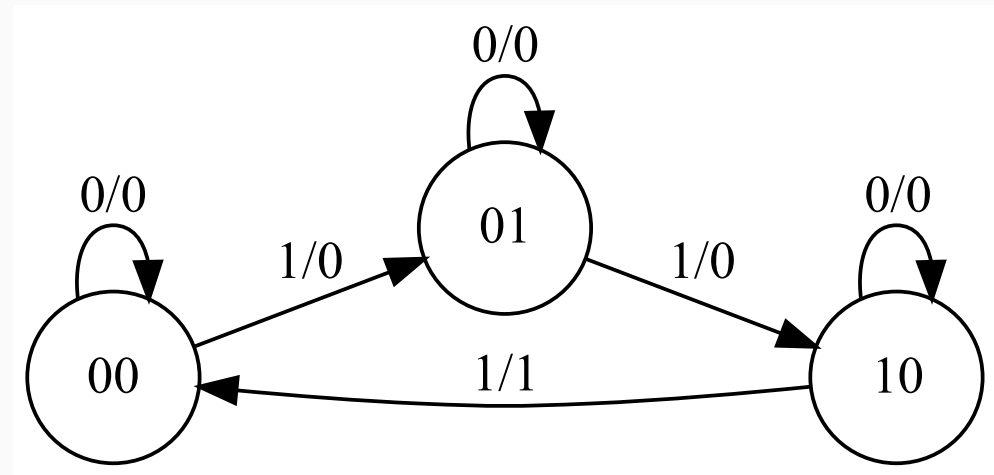
Se propone diseñar un contador de 3 números consecutivos (0, 1, 2) utilizando **FF T**. El contador avanza cuando ingrese un 1 lógico al circuito. Luego de llegar al último valor, el circuito tiene que volver al primer número y enviar un valor de 1 lógico fuera del circuito.

# Ejemplo de Síntesis

2. Asignar valores binarios a cada uno de los estados del problema.

## Problema:

Se propone diseñar un contador de 3 números consecutivos (0, 1, 2) utilizando **FFT**. El contador avanza cuando ingrese un 1 lógico al circuito. Luego de llegar al último valor, el circuito tiene que volver al primer número y enviar un valor de 1 lógico fuera del circuito.

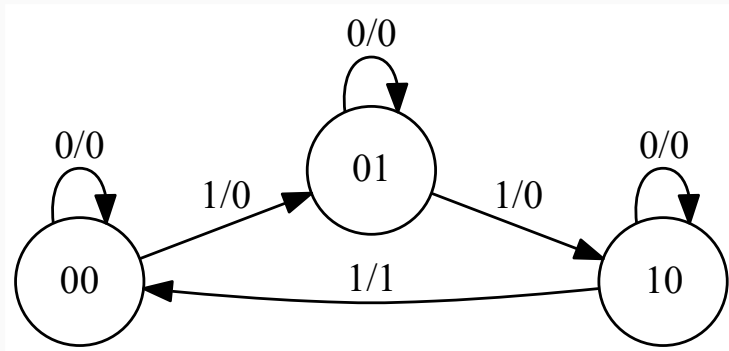


# Ejemplo de Síntesis

## 3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria.

Durante el proceso de diseño se conoce la transición de estado actual y siguiente del circuito. Se desea conocer *las condiciones de entrada del flip-flop* que dan pie a la transición requerida.

Las tablas de excitación establecen que valor de entrada tiene que tener el FF para los estados determinados en la tabla.



$$Q(t + 1) = T \oplus Q$$

Tabla de excitación FF T

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

$$Q(t + 1) = J\bar{Q} + \bar{K}Q$$

Tabla de excitación FF JK

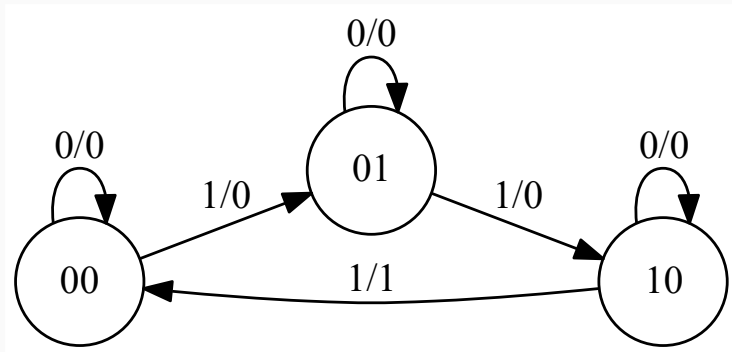
$Q(t)$	$Q(t + 1)$	J	K
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

# Ejemplo de Síntesis

## 3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria.

Durante el proceso de diseño se conoce la transición de estado actual y siguiente del circuito. Se desea conocer *las condiciones de entrada del flip-flop* que dan pie a la transición requerida.

Las tablas de excitación establecen que valor de entrada tiene que tener el FF para los estados determinados en la tabla.



$$Q(t + 1) = T \oplus Q$$

Tabla de excitación FF T

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

$$Q(t + 1) = J\bar{Q} + \bar{K}Q$$

Tabla de excitación FF JK

$Q(t)$	$Q(t + 1)$	J	K
0	0	0	X
0	1	X	1
1	0	1	X
1	1	X	0



# Ejemplo de Síntesis

## 3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria.

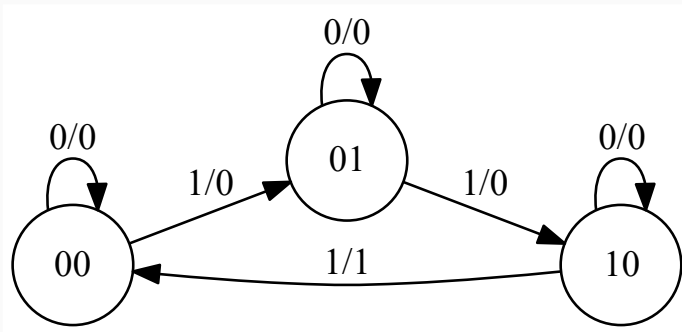


Tabla de excitación FF T

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

Estado Actual		Entrada	E. siguiente		Salida	Entrada FF T	
A	B		A	B		$T_A$	$T_B$

# Ejemplo de Síntesis

## 3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria.

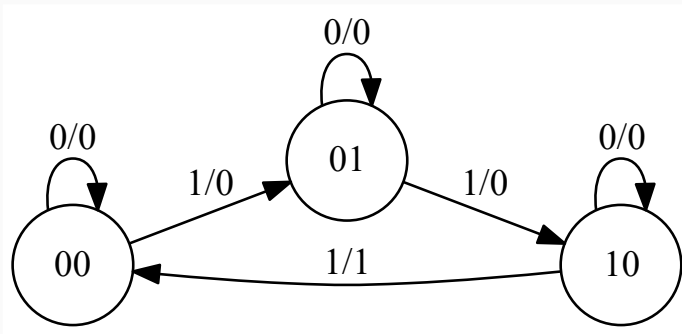


Tabla de excitación FF T

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

Estado Actual		Entrada	E. siguiente		Salida	Entrada FF T	
A	B		A	B		$T_A$	$T_B$
0	0	0	0	0	0		
0	0	1	0	1	0		
0	1	0	0	1	0		
0	1	1	1	0	0		
1	0	0	1	0	0		
1	0	1	0	0	1		

# Ejemplo de Síntesis

## 3. Armar una tabla de estados utilizando codificación binaria.

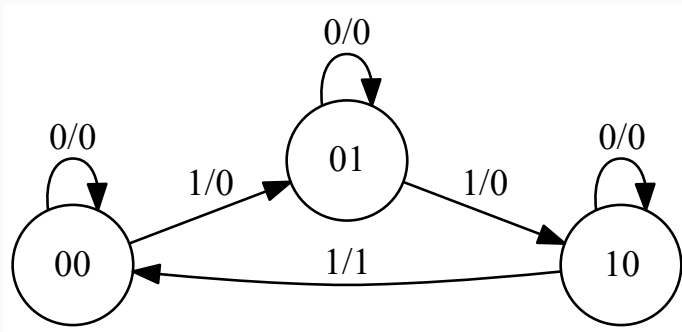


Tabla de excitación FF T

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

Estado Actual		Entrada	E. siguiente		Salida	Entrada FF T	
A	B		A	B		$T_A$	$T_B$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0

# Ejemplo de Síntesis

4. Deducir las ecuaciones de entrada y salida del circuito secuencial de cada FF.

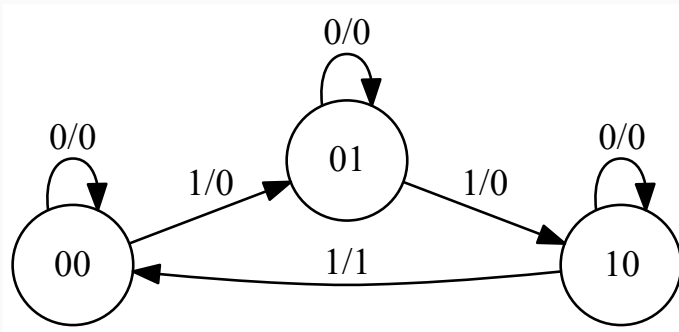


Tabla de excitación FF T

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

Estado Actual		Entrada	E. siguiente		Salida	Entrada FF T	
A	B	x	A	B	Y	$T_A$	$T_B$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	1	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0	0	0
1	0	1	0	0	1	1	0

$$T_A = \bar{A}Bx + A\bar{B}x$$

$$T_B = \bar{A}\bar{B}x + \bar{A}Bx$$

$$y = A\bar{B}x$$

# Ejemplo de Síntesis

## 5. Dibujar el diagrama de circuito final.

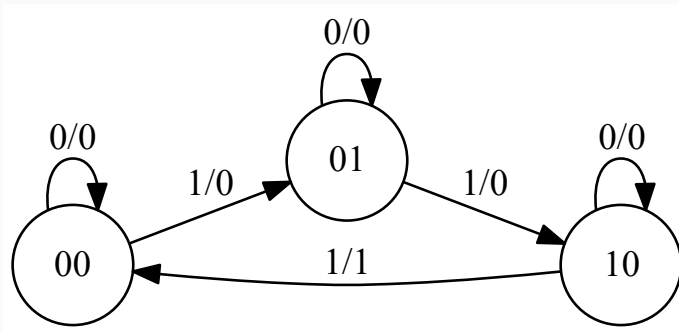
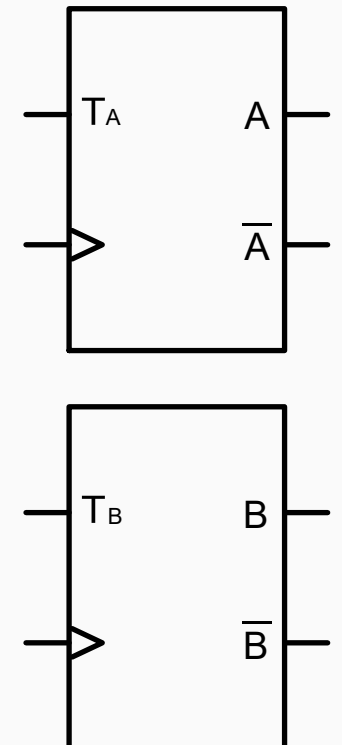


Tabla de excitación FF T

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

$$\begin{aligned}T_A &= \bar{A}Bx + A\bar{B}x \\T_B &= \bar{A}\bar{B}x + \bar{A}Bx \\y &= A\bar{B}x\end{aligned}$$



# Ejemplo de Síntesis

## 5. Dibujar el diagrama de circuito final.

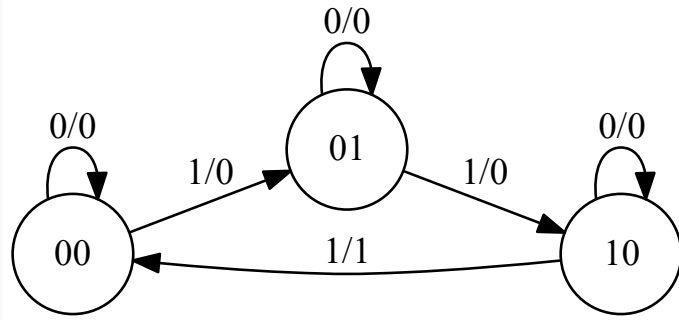
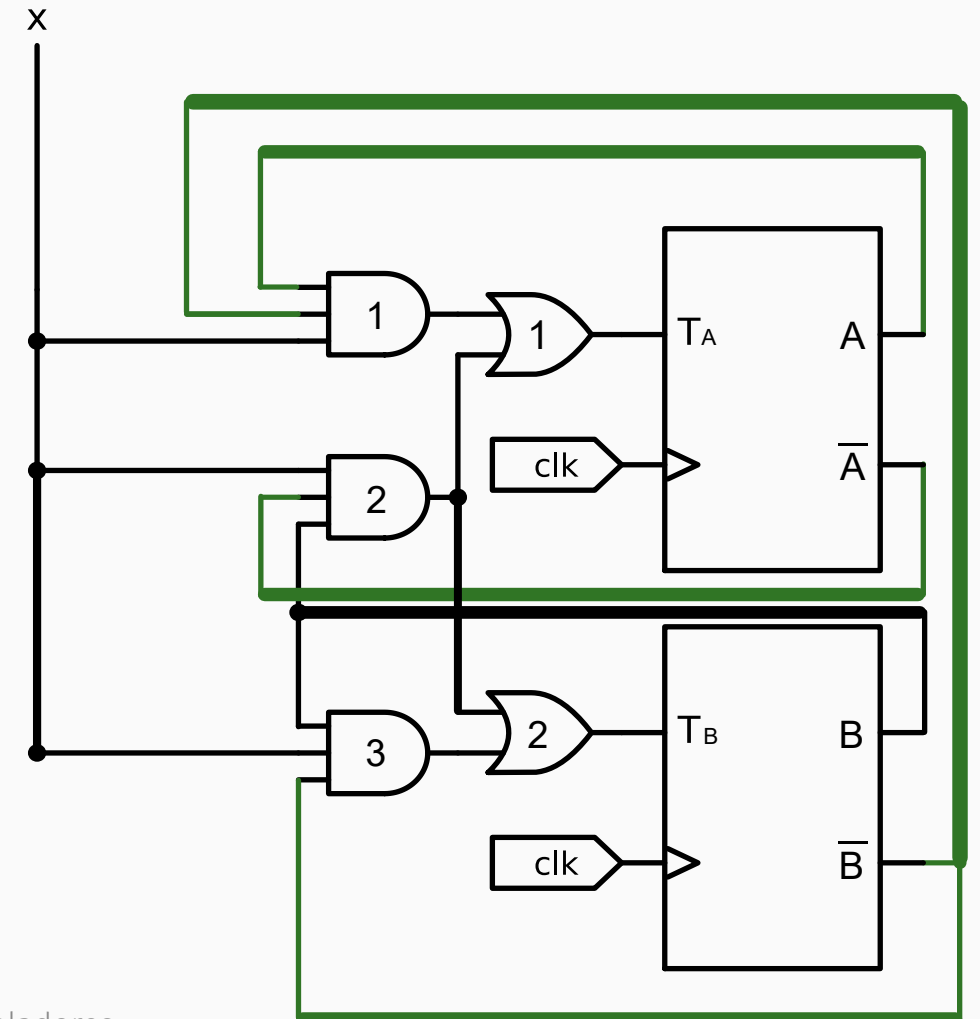


Tabla de excitación FF T

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

$$\begin{aligned}T_A &= \bar{A}Bx + A\bar{B}x \\T_B &= \bar{A}\bar{B}x + \bar{A}Bx \\y &= A\bar{B}x\end{aligned}$$



# Ejemplo de Síntesis

5. Dibujar el diagrama de circuito final.

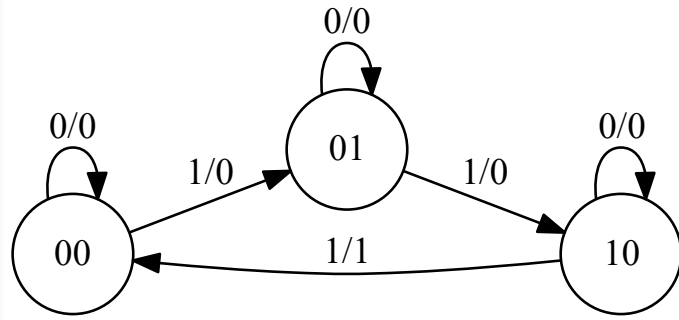
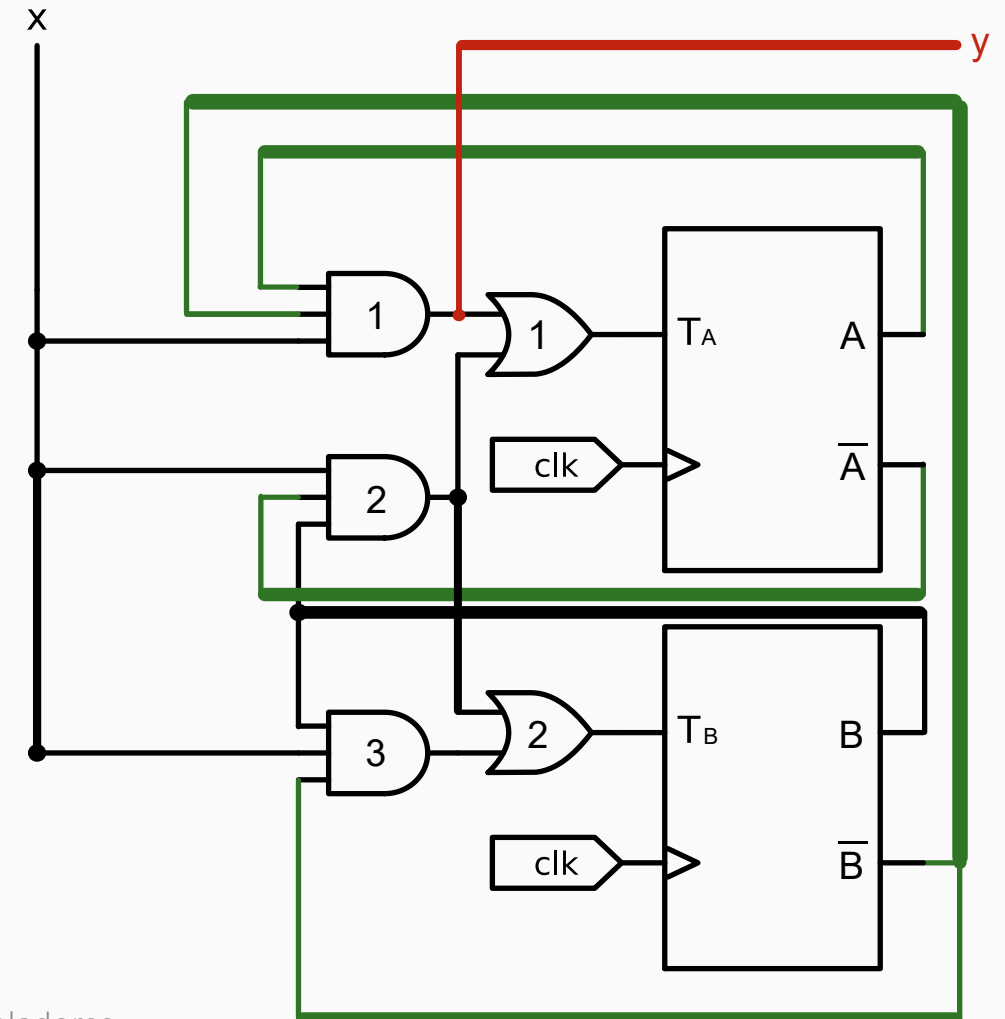


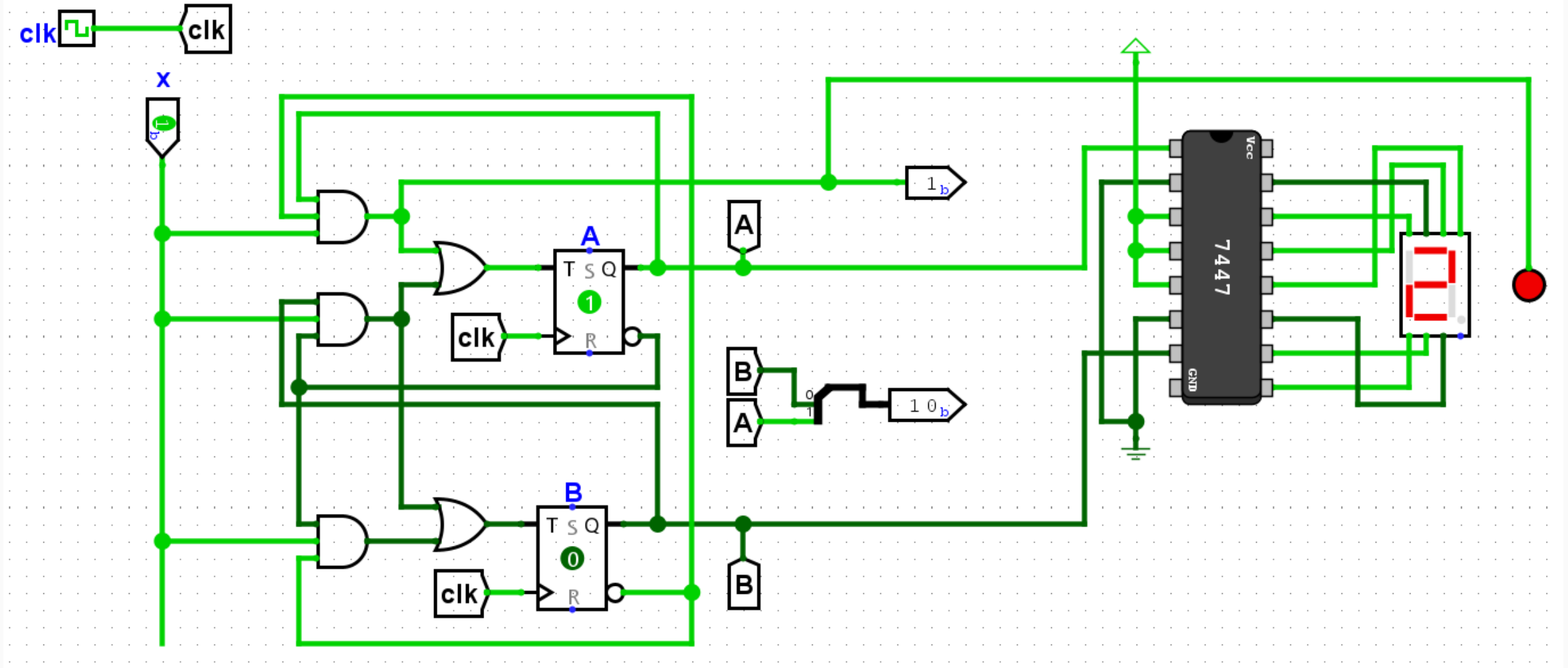
Tabla de excitación FF T

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

$$\begin{aligned}T_A &= \bar{A}Bx + A\bar{B}x \\T_B &= \bar{A}\bar{B}x + \bar{A}Bx \\y &= A\bar{B}x\end{aligned}$$



# Implementación en Logisim-evolution





# Resumen

- Es posible estudiar el comportamiento de un circuito secuencial realizando un análisis de las entradas y salidas de los FF que componen nuestro circuito.
- El circuito secuencial queda completamente definido por:
  - Tablas de estados  $\neq$  Tablas características.
  - Ecuación de estados.
  - Diagramas de estados.

# Resumen

- La síntesis de circuitos secuenciales permite diseñar e implementar circuito con los FF que deseemos.
  - Diagrama de estados
  - Tabla de estados (tabla de excitación).
  - Implementación.
- Este tipo de diseño es conocido como Maquina de estados finita o FSM (finite state machine).
- TAREA:
  - Estudiar circuitos secuenciales:
    - Registro y contadores.

# Simulación – Dado digital

- Logisim-evolution: Construir un dado digital:
  - Se conecta una señal cuadrada de alta frecuencia a la entrada del circuito.
  - Se presiona un pulsador que permita el paso de las señales al circuito secuencial.
  - El circuito tiene que mostrar en un display de 7 segmentos los números del 1-+

## Próxima Sesión

- Microcontroladores.

# Referencias y Material Complementario

- Capitulo 5. RONALD, J., WIDMER TOCCI, S. NEAL, y GREGORY L. MOSS. *SISTEMAS DIGITALES: principios y aplicaciones* . Pearson Education, 2007
- Capitulo 5. Mano, M. Morris. *Diseño digital*. Pearson Educación, 2003.
- Capitulo 7 y 8. Bignell, James W., Robert L. Donovan, y Gerardo Urbina Medel. *Electrónica digital*, 1997.
- Capitulo 13. Schilling, Donald L., y Charles Belove. «Circuitos electrónicos: discretos e integrados», 1993.
- Chapter 10.4. Horowitz, Paul, y Winfield Hill. *The art of electronics*. Cambridge Univ. Press, 2015.
- Institute, REDS. *reds-heig/logisim-evolution*. Java, 2020. <https://github.com/reds-heig/logisim-evolution>.
- Schemdraw documentation — 0.7.1 documentation.
- Graphviz - Graph Visualization Software n.d. <https://graphviz.org/> (accessed August 12, 2020).