



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Sistemas secuenciales síncronos: la tabla de estados de un control de volumen

Apellidos, nombre	Martí Campoy, Antonio (amarti@disca.upv.es)
Departamento	Informàtica de Sistemes i Computadors
Centro	Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

1 Resumen de las ideas clave

En este artículo vamos a construir la **Tabla de Estados** necesaria para implementar un Sistema Secuencial Síncrono (SSS), siguiendo el modelo de autómeta de Moore. Para ilustrar este proceso y facilitar la adquisición de conocimientos y habilidades, utilizarás como ejemplo el diseño de un control de volumen sencillo, y partiremos de un diagrama de estados y de una codificación de los estados ya desarrollados.

Diseñar e implementar un SSS es un proceso con varios pasos y múltiples opciones y variantes en cada paso. Abordar todos los pasos y opciones en un solo documento es casi imposible y sería poco útil.

Por eso, en este documento partiremos de un diagrama de estados ya diseñado, y de una codificación de los estados. Este diagrama corresponde a un sencillo control de volumen, y los estados se han codificado usando codificación mínima con prioridad a las salidas.

Tu trabajo en este artículo es continuar con el diseño e implementación del SSS, diseñando o construyendo la tabla de estados.

Para poder adquirir los conocimientos y habilidades presentadas en este artículo, debes tener los conocimientos previos presentados en la tabla 1.

Tabla 1. Conocimientos previos

Conocimientos previos
1. Funciones lógicas Booleanas.
2. Circuitos combinacionales.
3. Circuitos secuenciales.
4. Conocer teóricamente los pasos necesarios para diseñar un SSS.

2 Objetivos

Una vez acabes de leer este artículo docente y reproduzcas los ejemplos presentados, deberás ser capaz de **construir** la tabla de estados de un Sistema Secuencial Síncrono siguiendo el modelo de autómeta de Moore. De este modo serás capaz de **describir** en forma tabular y sin ambigüedades el funcionamiento del circuito. Esta representación tabular recibe el nombre de **Tabla de Estados**.

3 Introducción

Como ya te he dicho, construiremos la tabla de estados a partir de una interfaz, un diagrama de estados y una codificación de los estados que nos dan, que alguien ha construido a partir de la descripción, en lenguaje natural, del comportamiento del sistema.

La Figura 1 muestra la interfaz del circuito. Del interfaz podemos extraer información muy interesante e importante: el sistema tiene tres entradas y dos salidas.

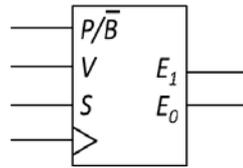


Figura 1. Interfaz del sistema

La Figura 2 muestra el diagrama de estados, una representación gráfica del comportamiento deseado para el circuito. En este diagrama de estados podemos ver que hay cuatro estados, y que las transiciones entre estados, o al mismo estado, están expresadas mediante expresiones algebraicas. Pero lo de mejor de este diagrama de estados, y de cualquier diagrama de estados, es que ya no necesitas saber nada del comportamiento del circuito, ni del significado de las entradas y salidas. Al disponer del diagrama, porque tú mismo lo has construido o te lo han proporcionado como es el caso, no necesitas ninguna información en lenguaje "humano" sobre el circuito a construir.

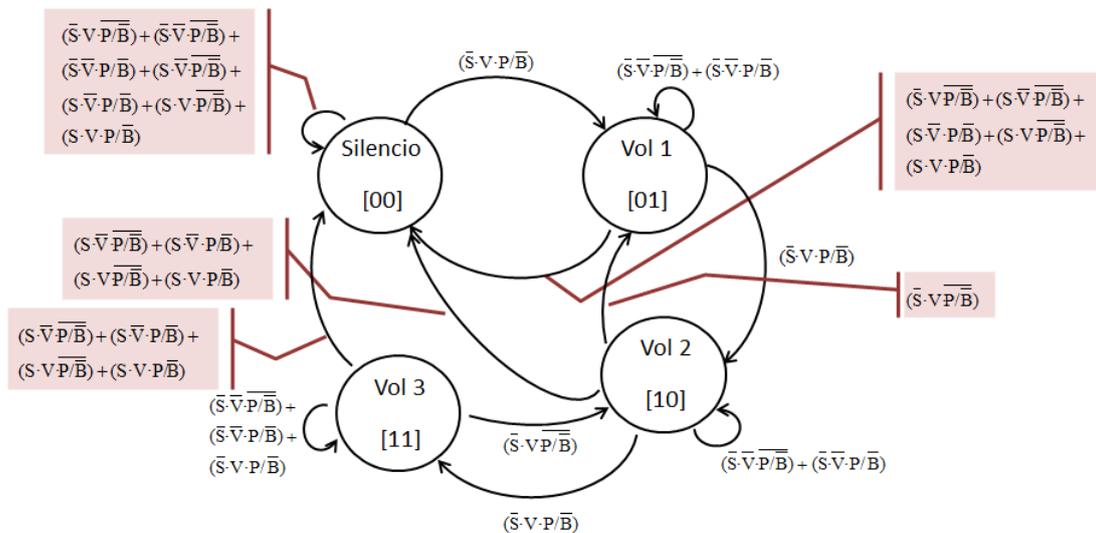


Figura 2. Diagrama de estados del control de volumen

La Tabla 2 muestra la codificación. En este caso se trata de una codificación mínima con prioridad a las salidas, es decir, haciendo coincidir el código del estado con sus salidas, lo que permitirá obtener un circuito de salida mínimo.

Tabla 2. Codificación de los estados con codificación mínima con prioridad a la salida

Nombre simbólico	Código Q_1Q_0
Silencio	00
Vol 1	01
Vol 2	10
Vol 3	11

4 Tabla de estados

La tabla de estados debe reflejar sin ambigüedades el comportamiento del circuito, de igual forma que hace el diagrama de estados. Por tanto, lo que vamos a hacer es traducir una representación gráfica (diagrama de estados) a una representación tabular (tabla de estados).

La tabla de estados se divide, verticalmente, en tres grandes bloques.

El primer bloque, a la izquierda, es donde se representa el estado actual del SSS. Los diferentes estados se representan por su codificación binaria, y es conveniente que los ordenes de menor a mayor según su código numérico.

En segundo bloque, más grande y complejo, en el centro, es donde se representa el estado siguiente en función del estado actual y de las entradas. El estado actual está implícito en la fila, pero los valores de las entradas tienen que explicitarse. Por tanto, es un bloque con múltiples columnas, tantas como valoraciones (combinaciones posibles) de las entradas existan.

El tercer bloque corresponde a las salidas, y es el más sencillo de completar, ya que en un autómata de Moore la salida depende sólo del estado, y esta información ya está claramente descrita en el diagrama de estados.

La Tabla 3 muestra la estructura de una tabla de estados genérica. El número de filas de esta tabla, sin contar las cabeceras, es el número de estados que tiene el sistema.

Tabla 3. Estructura de una tabla de estados genérica.

Estado actual $Q(t)$	Estado siguiente $Q(t+1)$				Salidas
	Entradas				
	Valoración 1	Valoración 2	...	Valoración n	
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮

Ahora ya podemos construir la tabla de estados a partir de la estructura presentada, de la codificación de los estados y del diagrama de estados. Tenemos cuatro estados, lo que nos dice que necesitaremos 4 filas. Por otro lado, tenemos tres variables de entrada, lo que nos dice que el bloque central tendrá ocho columnas, por lo que la tabla completa tendrá 10 columnas.

4.1 Tabla de estados

En primer lugar rellenamos el bloque del estado actual. Esto es muy sencillo, ya que se trata sólo de escribir los estados codificados en orden ascendente. Puedes verlo en la Tabla 4.

Tabla 4. Tabla de estados con el estado actual.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas								
00									
01									
10									
11									

El segundo paso es escribir las 8 valoraciones que pueden tomar las entradas. Es muy importante que indiques claramente el orden en que usas las variables, e incluso que escribas la expresión algebraica que corresponde a cada valoración, bien en su forma de minitérmino o maxitérmino, y también la valoración en binario. Toda esta información te ayudará a trasladar la información del diagrama de estados a la tabla de estados. En nuestro caso usaremos minitérminos ya que las transiciones del diagrama de estados están expresadas con minitérminos. La Tabla 5 muestra las diferentes valoraciones de las entradas.

Tabla 5. Tabla de estados con las combinaciones de las entradas, expresadas en binario y mediante minitérminos.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas: S, V, P/B								
	000 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	001 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	010 $\bar{S} \cdot V \cdot \overline{P/B}$	011 $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	100 $S \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	101 $S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	110 $S \cdot V \cdot \overline{P/B}$	111 $S \cdot V \cdot P/B$	
00									
01									
10									
11									

Ahora viene el paso más complicado, no por complejo, que no lo es, sino por delicado. Es el momento de completar el bloque central, y para ello tenemos que ir estado por estado y mirar en el diagrama de estados cuál es el estado siguiente para cada una de las combinaciones de las entradas.

El procedimiento es sencillo, sólo tenemos que responder a la pregunta: si estoy en el estado A y las entradas son xxx, ¿cuál es el estado siguiente? Vamos a verlo en detalle con un par de casos.

Vamos a empezar por el estado 00, que corresponde con "Silencio". Este estado sólo tiene dos transiciones, una que vuelve al mismo estado y otra que pasa al estado 01 ("Vol 1"). Esta transición al estado 01 corresponde con la combinación de entradas 011, también expresada como $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$ tal como puedes ver en el diagrama de estados. Por tanto, en la intersección de la fila del estado 00 con las entradas 011 ($\bar{S} \cdot V \cdot P/B$) pondremos 01, que es el estado al que debe ir el sistema para esta combinación concreta de las entradas. Para el resto de las columnas pondremos 00,



ya que para cualquier otra combinación de las entradas, el sistema debe quedarse en el estado 00. En la Tabla 6 puedes ver el resultado de este paso.

Tabla 6. Tabla de estados con los estados siguientes para el estado 00.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas: S, V, P/B								
	000 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	001 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	010 $\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	011 $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	100 $S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	101 $S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	110 $S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	111 $S \cdot V \cdot P/B$	
00	00	00	00	01	00	00	00	00	
01									
10									
11									

Vamos a ver ahora otro caso, completando la fila correspondiente al estado 01, es decir, "Vol 1". Si miras el diagrama de estados, hay tres transiciones de salida, y una de entrada, pero a nosotros sólo nos interesan las transiciones de salida. A continuación tenemos los posibles estados de destino, desde el estado 01, con sus transiciones:

- Desde el estado 01 al 00, cuando las entradas son 010 ($\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$) o 100 ($S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$) o 101 ($S \cdot \bar{V} \cdot P/B$) o 110 ($S \cdot V \cdot P/\bar{B}$) o 111 ($S \cdot V \cdot P/B$).
- Desde el estado 01 al 01, cuando las entradas son 000 ($\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$) o 001 ($\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$).
- Desde el estado 01 al 10, cuando las entradas toman valor 011 ($\bar{S} \cdot V \cdot P/B$).

Una vez sabemos cuál es el estado destino para cada valoración de las entradas, sólo tenemos que trasladar esta información a la tabla, tal como muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla de estados con los estados siguientes para el estado 01.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas: S, V, P/B								
	000 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	001 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	010 $\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	011 $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	100 $S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	101 $S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	110 $S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	111 $S \cdot V \cdot P/B$	
00	00	00	00	01	00	00	00	00	
01	01	01	00	10	00	00	00	00	
10									
11									

Ahora deberíamos repetir el proceso anterior con el estado 10, es decir, extraer del diagrama de estados cuál es el estado destino desde 10 para cada combinación de las entradas. Desde el estado 10 salen cuatro transiciones, que son:

- Desde el estado 10 al 00, cuando las entradas son 100 ($S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$) o 101 ($S \cdot \bar{V} \cdot P/B$) o 110 ($S \cdot V \cdot P/\bar{B}$) o 111 ($S \cdot V \cdot P/B$).
- Desde el estado 10 al 01, cuando las entradas toman el valor 010 ($\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$).
- Desde el estado 10 al 10, cuando las entradas son 000 ($\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$) o 001 ($\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$).
- Desde el estado 10 al 11 cuando las entradas toman valor 011 ($\bar{S} \cdot V \cdot P/B$).



Y la Tabla 9 muestra cómo quedaría al trasladar estas transiciones a la tabla de estados.

Tabla 8. Tabla de estados con los estados siguientes para el estado 10.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas: S, V, P/B								
	000 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	001 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	010 $\bar{S} \cdot V \cdot \overline{P/B}$	011 $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	100 $S \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	101 $S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	110 $S \cdot V \cdot \overline{P/B}$	111 $S \cdot V \cdot P/B$	
00	00	00	00	01	00	00	00	00	
01	01	01	00	10	00	00	00	00	
10	10	10	01	11	00	00	00	00	
11									

Y para terminar con el bloque central de la tabla de estados, repetiríamos nuevamente el proceso anterior pero para el estado 11. Esto te lo dejo propuesto como ejercicio, aunque en la Tabla 9 tienes la solución.

Para finalizar la construcción de la tabla de estados nos queda un paso muy sencillo, que es añadir las salidas. En un autómata de Moore las salidas dependen únicamente del estado actual, por lo que sólo hay que mirar el diagrama de estados, ver cuál es la salida para cada estado, y trasladar el valor de la salida a la fila correspondiente al estado. Un detalle importante. En este sistema cada estado tiene una salida diferente, pero eso no siempre es así. Es muy normal que varios estados tengan la misma salida, por lo que puede haber valores repetidos en el último bloque de la tabla de estados. Donde no puede haber valores repetidos es en la primera columna, la del estado actual, ya que no puede haber dos estados con el mismo código.

La Tabla 9 muestra la tabla de estados de nuestro sistema con todas las filas y columnas completas.

Tabla 9. Tabla de estados completa.

Estado actual Q(t)	Estado siguiente Q(t+1)								Salidas
	Entradas: S, V, P/B								
	000 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	001 $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	010 $\bar{S} \cdot V \cdot \overline{P/B}$	011 $\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	100 $S \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/B}$	101 $S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	110 $S \cdot V \cdot \overline{P/B}$	111 $S \cdot V \cdot P/B$	
00	00	00	00	01	00	00	00	00	00
01	01	01	00	10	00	00	00	00	01
10	10	10	01	11	00	00	00	00	10
11	11	11	10	11	00	00	00	00	11

4.2 Transiciones imposibles

En algunos diagramas de estados puede darse el caso que desde un estado y para una combinación de entradas no haya especificado ningún estado destino, es decir, no hay ninguna transición. Esto puede ser bien porque esa combinación de entradas es imposible o bien porque no importa cuál es el estado siguiente si se produce dicha entrada. En ese caso, en la tabla de estados la celda correspondiente a dicha transición

se rellena con X o cualquier otro símbolo que indique que el destino no está especificado. Puedes pensar que si el destino no está especificado se podría escribir cualquier destino, ya que no importa. Y tienes razón, el circuito final funcionaria correctamente. Pero si dejamos indicado con X que la transición es imposible podremos simplificar el circuito combinacional de estado siguiente cuando empecemos a diseñar los circuitos, ya que esta X se convertirá en una entrada indiferente en la tabla de verdad.

5 Ejercicio

Te propongo que hagas la tabla de estados para el SSS descrito por la interfaz y el diagrama de estados y utilizando la codificación mínima de Gray de la Figura 3. Antes de hacer la tabla responde a las siguientes preguntas:

- ¿Cuántas filas tendrá la tabla de estados, sin contar las cabeceras?
- ¿Cuántas columnas tendrá la tabla de estados?

Al final del documento tienes la solución, pero es muy importante que intentes resolverlo antes de mirar la solución.

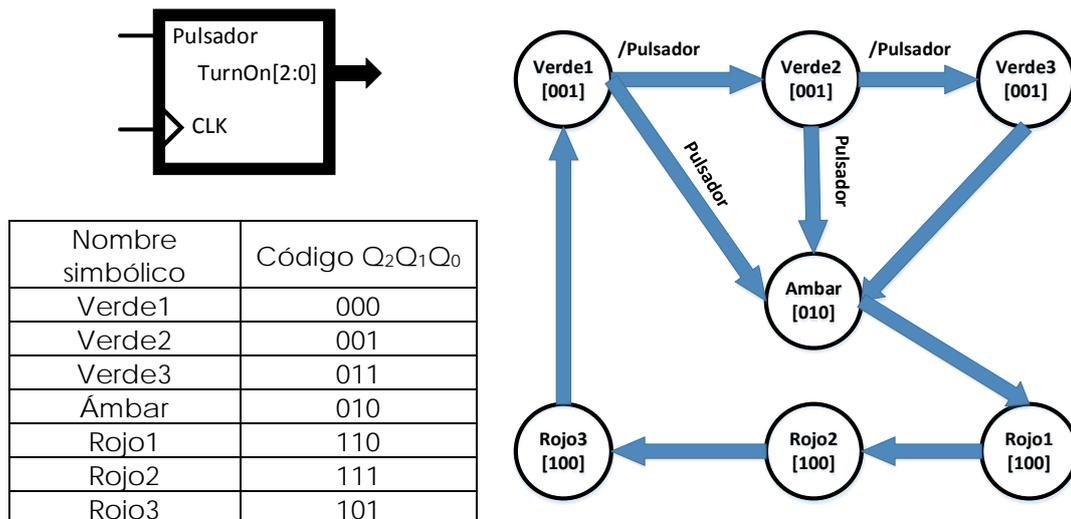


Figura 3. Interfaz, diagrama de estados y codificación mínima de Gray del control de un semáforo con prioridad al peatón.

6 Conclusiones

Una vez tenemos la interfaz, el diagrama de estados de un SSS (sistema secuencial síncrono) y la codificación de estados, bien porque lo hemos diseñado nosotros mismos o porque nos lo proporcionan, el siguiente paso hacia la implementación del sistema es la construcción de la tabla de estados.

La tabla de estados se divide en tres bloques: estado actual, estado siguiente y salidas. Es fácil rellenar la tabla de estados, pero debes ser cuidadoso, es una tarea delicada y debes prestar mucha atención. Es importante que recuerdes que para todos los estados debe estar especificado el estado siguiente para cualquier combinación de las entradas. Si alguna transición no está definida en el diagrama



de estados, deberás indicarlo poniendo X en el estado siguiente para la valoración correspondiente.

7 Bibliografía

7.1 Libros:

[1] [John F. Wakerly](#) "Digital design : principles and practices", Prentice Hall. 2006

[2] Antonio Lloris Ruiz; Alberto Prieto Espinosa; Luis Parrilla Roure "Sistemas digitales", Aravaca, Madrid : McGraw-Hill/Interamericana de España. 2003

8 Solución al ejercicio

Estas son las respuestas a las preguntas y la tabla de estados la tienes en la Tabla 10.

- ¿Cuántas filas tendrá la tabla de estados, sin contar las cabeceras? En el diagrama de estados aparecen siete estados, por lo que además de las cabeceras, la tabla tendrá siete filas.
- ¿Cuántas columnas tendrá la tabla de estados? Cualquier tabla de estados necesita una columna para el estado actual y otra columna para las salidas. Además, se necesitan tantas columnas como posibles combinaciones de las entradas. En este ejercicio hay una sola entrada, por lo que tenemos dos valoraciones, así que el bloque central tendrá dos columnas. En total, la tabla de estados tendrá cuatro columnas.

Tabla 10. Tabla de estados para el SSS del ejercicio

Estado actual $Q(t)$ $Q_2Q_1Q_0$	Estado siguiente $Q(t+1)$		Salidas
	Entrada: Pulsador		
	0 /Pulsador	1 Pulsador	
000	001	010	001
001	011	010	001
011	010	010	001
010	110	110	010
110	111	111	100
111	101	101	100
101	000	000	100