



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Sistemas secuenciales síncronos: el diagrama 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 desarrollarás el proceso para construir el **Diagrama de Estados** necesario para diseñar un Sistema Secuencial Síncrono (SSS), siguiendo el modelo de autómatas de Moore. Para ilustrar este proceso y facilitar la adquisición de conocimientos y capacidades, utilizarás como ejemplo el diseño de un control de volumen sencillo.

El diseño de SSS incluye varias partes, y cada una de ellas con diferentes alternativas. Es imposible tratarlas todas en un documento breve, y explicarlas simultáneamente sólo nos llevaría a confusión. Por eso, en este documento trabajarás solamente la primera parte del diseño de un SSS, esto es, la construcción de diagrama de estados. Pero en esta primera parte también hay opciones. De las diferentes posibilidades, y que puedes encontrar bien explicadas en la bibliografía, estudiarás el diseño de los llamados autómatas de Moore, y utilizarás expresiones algebraicas en las transiciones del diagrama de estados.

Estas decisiones no se han tomado porque las opciones escogidas sean mejor que las alternativas, sino porque son más sencillas de entender o de aplicar a este caso concreto, y permiten abordar con posterioridad otras alternativas de manera autónoma.

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. La tabla de verdad y sus componentes
3. Circuitos combinacionales y 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 **diseñar** el diagrama de estados de un sistema secuencial síncrono, **dividiendo** el proceso de construcción de este diagrama en diferentes pasos, y **aplicar** los diferentes procedimientos descritos en este documento. El punto de partida para este diseño será una **descripción** no formal de la funcionalidad deseada para un sistema, y el punto final será la **obtención** de una representación gráfica y sin ambigüedades del funcionamiento del circuito. Esta representación gráfica recibe el nombre de **Diagrama de estados**.



3 Introducció

Esta es la descripció del sistema que se quiere diseñar: Se trata del control de volumen de un reproductor de música, que dispone de tres entradas y dos salidas. La entrada llamada V toma valor 1 cuando el usuario quiere modificar el volumen. La entrada P/\bar{B} toma valor 1 si el usuario quiere subir el volumen, y toma valor 0 si el usuario quiere bajar el volumen. Finalmente, la entrada S toma valor 1 cuando el usuario quiere silenciar el sistema de manera directa.

Las salidas, E_1 y E_0 , se usan para codificar los cuatro niveles de volumen posibles, desde 0 que representa silencio, hasta 3 que representa el máximo volumen.

El comportamiento del circuito debe ser el siguiente:

- Si el usuario activa la entrada V y al mismo tiempo la entrada P/\bar{B} toma valor 1, la salida de volumen se debe incrementar en una unidad, sin superar el valor de 3.
- Si el usuario activa la entrada V y al mismo tiempo la entrada P/\bar{B} toma valor 0, la salida debe reducirse en una unidad, sin bajar de cero.
- Si se activa la entrada S , el nivel de la salida de volumen debe ponerse a valor cero, independientemente del estado del resto de entradas.

4 Diseño del SSS como autómata de Moore

Dadas las especificaciones anteriores, debes diseñar un circuito secuencial síncrono que realice las tareas indicadas. Este circuito debe seguir el modelo de autómata de Moore. En el autómata de Moore el estado siguiente depende del estado actual y de las entradas, mientras que las salidas dependen únicamente del estado actual. En las salidas está la diferencia con los autómatas de Mealy.

Los pasos para diseñar y construir un SSS son: interfaz, diagrama de estados, tabla de estados, función de excitación, función de transición e implementación de los circuitos. En este documento estudiarás los dos primeros pasos, el diseño de la interfaz y la construcción del diagrama de estados.

4.1 Interfaz

La interfaz es una representación gráfica y simbólica del circuito a diseñar, especificando completamente las entradas y las salidas del circuito y sus nombres. Es un paso sencillo pero importante, por ser la primera vez que veremos nuestro circuito. La figura 1 muestra la interfaz. Atento a tres cosas muy importantes: los nombres de las entradas y salidas se escriben dentro de la caja, y nunca fuera; aparece una entrada de reloj, como tienen todos los circuitos secuenciales; y normalmente las entradas se ubican a la izquierda y las salidas a la derecha.

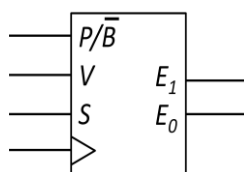


Figura 1. Interfaz del sistema



4.2 Diagrama de estados

En este apartado construiremos juntos el diagrama de estados para el sistema de ejemplo.

4.2.1 El diagrama de estados

El diagrama de estados es el segundo paso, y puede ser el más complicado de todos, ya que lo que pretendemos hacer es traducir la lista de “deseos”, es decir, las especificaciones, a una representación formal.

El diagrama nos dice de manera gráfica como funciona, o como se comporta nuestro sistema. Si el diagrama de estados está bien construido, no hay posibilidad de confundir el funcionamiento del sistema. El diagrama de estados es a los circuitos secuenciales lo mismo que la tabla de verdad es a los circuitos combinacionales.

En el diagrama de estados la señal de reloj está implícita, y por tanto no se dibuja. Pero el sistema cambia de un estado a otro sólo cuando se produce un flanco de reloj, como bien ya sabes.

Dos son los elementos que forman un diagrama de estados: los estados y las transiciones. Los estados se representan por círculos y tienen un nombre simbólico que identifica a cada estado, y un valor para las salidas. Las transiciones se representan por flechas, y tienen asociadas unas expresiones algebraicas que dicen qué valor de las entradas hace saltar al sistema de un estado al otro. Pero vamos a empezar a construir el diagrama y seguro que todo lo que te he contado te queda claro.

4.2.2 Construcción del diagrama de estados

En primer lugar, debes elegir un estado del sistema y empezar la construcción del diagrama de estados por él. Cualquier estado es bueno para empezar, pero creo que estarás de acuerdo conmigo que una buena opción es empezar por el estado en que el volumen es cero, es decir, silencio. Y “silencio” puede ser un buen nombre para este estado. ¿Y cuál será la salida de este estado? Lo tienes claro, ¿no? La salida es cero, pero en binario escribiremos 00. La figura 2 representa el primer paso en la construcción del diagrama de estados.

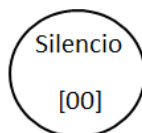


Figura 2. Primer estado del sistema

Hasta ahora ha sido bastante fácil, ¿verdad? La cosa se complica en este momento. Ahora tenemos que añadir nuevos estados. En algunos problemas es muy fácil ver cuáles son los estados que tendrá el sistema, pero hay otros que no nos facilitan el trabajo. Por ello, lo mejor que puedes hacer es ser sistemático. Del estado que hemos creado iremos hacia otros estados en función de los valores de las entradas, ¿de acuerdo? Entonces, construiremos una tabla donde colocaremos todas las posibles combinaciones de las entradas y la expresión algebraica del minitérmino correspondiente, y también anotaremos lo que hay que hacer para cada una de las combinaciones, y sabiendo esto, sabremos el estado al que hay que ir. La tabla 2 muestra todas las posibles combinaciones de las entradas, y para



entenderla mejor, una pequeña explicación de que quiere decir cada combinación. A continuación, dice lo que hay que hacer para cada entrada y cuál será el estado destino. También muestra las expresiones algebraicas de cada uno de los minitérminos.

Tabla 2. Acción a realizar y estado destino en función de las entradas desde el estado "Silencio"

	$S \ V \ P/\bar{B}$	Significado de las entradas	¿Qué hay que hacer?	Estado destino desde el estado "Silencio"
0	$\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	El usuario no ha activado ningún botón.	Quedarnos como estamos	"Silencio"
1	$\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/B$	Se ha activado la entrada para subir el volumen, pero no se ha activado la entrada V	Quedarnos como estamos	"Silencio"
2	$\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/\bar{B} vale 0, nos dice que quiere bajar el volumen	Queremos bajar el volumen pero no podemos ir por debajo de "Silencio"	Por tanto el estado destino es "Silencio"
3	$\bar{S} \cdot V \cdot P/B$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/B vale 1, nos dice que quiere subir el volumen	Queremos subir el volumen en una unidad	Hay que buscar un nombre para este estado, que podría ser " Vol 1 "
4	$S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado la entrada de silencio	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
5	$S \cdot \bar{V} \cdot P/B$	Están activas la entrada de silencio y la de subir el volumen, pero no la de cambiar el volumen	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
6	$S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	Están activas la entrada de silencio y la cambiar el volumen, y nos dice que bajemos el volumen	La entrada de silencio es prioritaria, por tanto nos quedamos en "silencio"	"Silencio"
7	$S \cdot V \cdot P/B$	Todas las entradas activas...	La entrada de silencio es prioritaria, por tanto nos quedamos en "silencio"	"Silencio"

Como han aparecido **dos** transiciones y un nuevo estado, hay que actualizar el diagrama de estados. En las transiciones hay que indicar cuál es la entrada que provoca el cambio de estado indicado por la transición. Además, el nuevo estado es necesario que tenga especificadas sus salidas: si el estado llamado "Vol 1" es el siguiente a "Silencio", su salida deberá ser 01₂, ¿no? Puedes verlo en la figura 3.

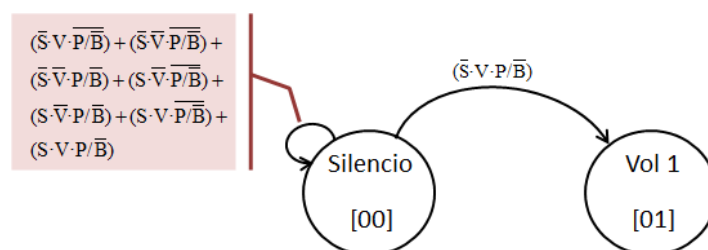


Figura 3. Diagrama de estados con dos estados y transiciones desde el estado silencio



Puedes ver en la figura 3 que la transición que vuelve al estado silencio es la suma lógica (OR) de todos los minitérminos que representan a las entradas para las que, desde el estado silencio, hay que ir al estado silencio.

Como tenemos un nuevo estado en el diagrama, hay que repetir el proceso que hemos hecho antes para añadir las transiciones que saldrán de este estado "Vol 1" y puede que también para añadir nuevos estados. Es decir, construiremos una tabla donde escribiremos todas las posibles entradas y el estado al que queremos ir para cada una de estas entradas desde el estado "Vol 1". Esta es la tabla 3.

Tabla 3. Acción a realizar y estado destino en función de las entradas desde el estado "Vol 1"

	$S \ V \ P/\bar{B}$	Significado de las entradas	¿Qué hay que hacer?	Estado destino desde el estado "Vol 1"
0	$\bar{0} \ \bar{0} \ \bar{0}$ $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	El usuario no ha activado ningún botón.	Quedarnos como estamos	"Vol 1"
1	$0 \ 0 \ 1$ $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	Se ha activado la entrada para subir el volumen, pero no se ha activado la entrada V	Quedarnos como estamos	"Vol 1"
2	$0 \ 1 \ 0$ $\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/\bar{B} vale 0, nos dice que quiere bajar el volumen	Queremos bajar el volumen en una unidad	Por tanto el estado destino es "Silencio"
3	$0 \ 1 \ 1$ $\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/\bar{B} vale 1, nos dice que quiere subir el volumen	Queremos subir el volumen en una unidad	Hay que buscar un nombre para este estado, que podría ser " Vol 2 "
4	$1 \ 0 \ 0$ $S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado la entrada de silencio	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
5	$1 \ 0 \ 1$ $S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	Están activas la entrada de silencio y la de subir el volumen, pero no la de cambiar el volumen	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
6	$1 \ 1 \ 0$ $S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	Están activas la entrada de silencio y la cambiar el volumen, y nos dice que bajemos el volumen	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"
7	$1 \ 1 \ 1$ $S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	Todas las entradas activas...	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"

Ahora volvemos a dibujar el diagrama de estados, añadiéndole el nuevo estado "Vol 2" y las transiciones correspondientes. Debes tener en cuenta que aparecen **tres** nuevas transiciones. Puedes ver estas transiciones y el nuevo estado en la figura 4. Por cierto, la salida del nuevo estado es 10_2 , que es el siguiente nivel de volumen.

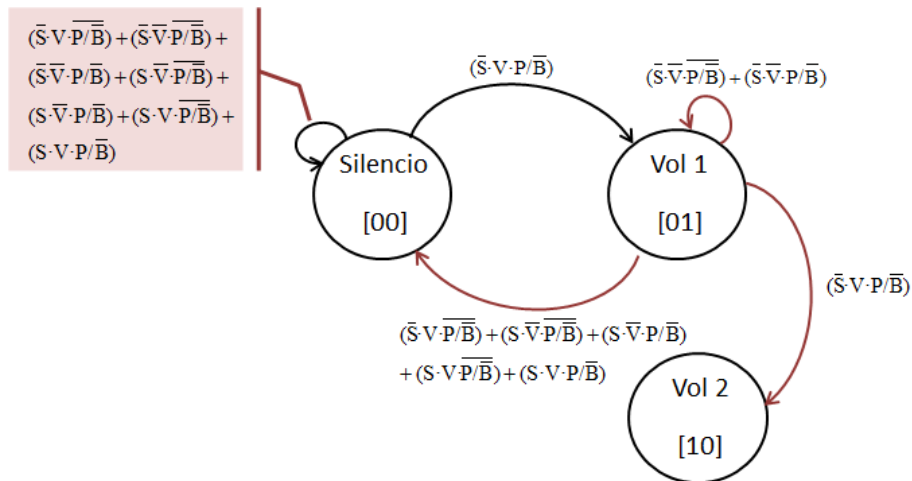


Figura 4. Diagrama de estados con tres estados y las nuevas transiciones desde el estado "Vol 1"

Como ha aparecido un nuevo estado, "Vol 2", hay que repetir el proceso para obtener las transiciones que salen de este estado y, puede ser, nuevos estados. Construimos la tabla 4 que nos dará las transiciones desde el estado "Vol 2".

Taula 4. Acció a realitzar y estado destino en funció de las entradas desde el estado "Vol 2"

	S V P/ \bar{B}	Significado de las entradas	¿Qué hay que hacer?	Estado destino desde el estado "Vol 2"
0	$\bar{0} \ \bar{0} \ \bar{0}$ $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/\bar{B}}$	El usuario no ha activado ningún botón.	Quedarnos como estamos	"Vol 2"
1	$\bar{0} \ \bar{0} \ 1$ $\bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	Se ha activado la entrada para subir el volumen, pero no se ha activado la entrada V	Quedarnos como estamos	"Vol 2"
2	$\bar{0} \ 1 \ \bar{0}$ $\bar{S} \cdot V \cdot \overline{P/\bar{B}}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/ \bar{B} vale 0, nos dice que quiere bajar el volumen	Queremos bajar el volumen en una unidad	Por tanto el estado destino es "Vol 1"
3	$\bar{0} \ 1 \ 1$ $\bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/ \bar{B} vale 1, nos dice que quiere subir el volumen	Queremos subir el volumen en una unidad	Hay que buscar un nombre para este estado, que podría ser "Vol 3"
4	$1 \ \bar{0} \ \bar{0}$ $S \cdot \bar{V} \cdot \overline{P/\bar{B}}$	El usuario ha activado la entrada de silencio	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
5	$1 \ \bar{0} \ 1$ $S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B}$	Están activas la entrada de silencio y la de subir el volumen, pero no la de cambiar el volumen	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
6	$1 \ 1 \ \bar{0}$ $S \cdot V \cdot \overline{P/\bar{B}}$	Están activas la entrada de silencio y la cambiar el volumen, y nos dice que bajemos el volumen	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"
7	$1 \ 1 \ 1$ $S \cdot V \cdot P/\bar{B}$	Todas las entradas activas...	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"

Desde la tabla 4 podemos añadir el nuevo estado al diagrama, y las **cuatro** transiciones que han aparecido para "Vol 2". Lo tienes en la figura 5, y las salidas del estado "Vol 3" son 11₂.

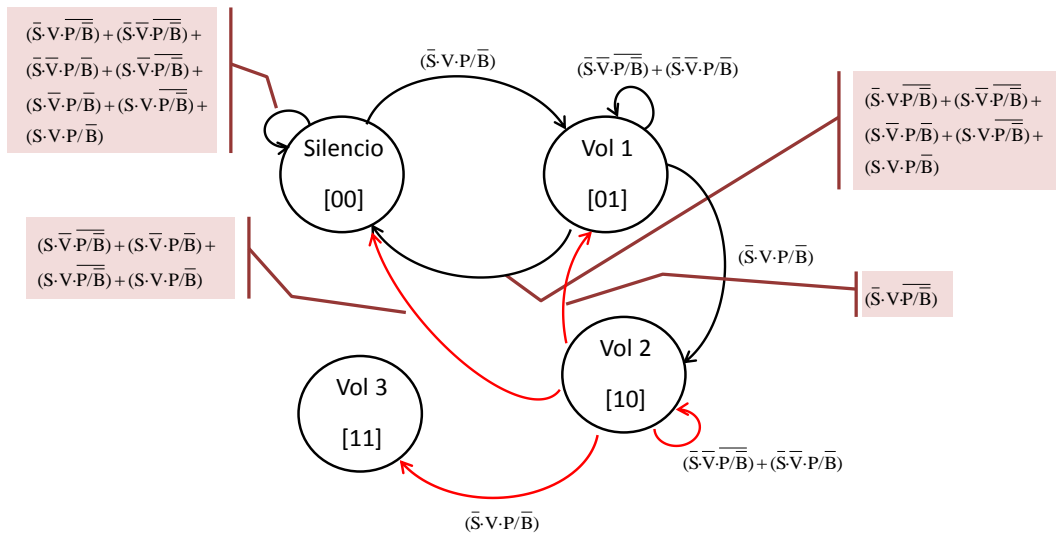


Figura 5. Diagrama de estados incluyendo el estado Vol 3 y las transiciones para el estado Vol 2

Ahora repetimos nuevamente el proceso para el nuevo estado "Vol 3". La tabla 5 muestra lo que hay que hacer cuando estamos en el estado "Vol 3".

Tabla 5. Acción a realizar y estado destino en función de las entradas desde el estado "Vol 3"

	S V P/B	Significado de las entradas	¿Qué hay que hacer?	Estado destino desde el estado "Vol 3"
0	$\begin{matrix} 0 & 0 & 0 \\ \bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	El usuario no ha activado ningún botón.	Quedarnos como estamos	"Vol 3"
1	$\begin{matrix} 0 & 0 & 1 \\ \bar{S} \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	Se ha activado la entrada para subir el volumen, pero no se ha activado la entrada V	Quedarnos como estamos	"Vol 3"
2	$\begin{matrix} 0 & 1 & 0 \\ \bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/B vale 0, nos dice que quiere bajar el volumen	Queremos bajar el volumen en una unidad	Por tanto el estado destino es "Vol 2"
3	$\begin{matrix} 0 & 1 & 1 \\ \bar{S} \cdot V \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	El usuario ha activado el cambio de volumen, y como P/B vale 1, nos dice que quiere subir el volumen	Queremos subir el volumen en una unidad, pero ya estamos al máximo. Nos quedamos como estamos.	"Vol 3"
4	$\begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	El usuario ha activado la entrada de silencio	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
5	$\begin{matrix} 1 & 0 & 1 \\ S \cdot \bar{V} \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	Están activas la entrada de silencio y la de subir el volumen, pero no la de cambiar el volumen	Queremos poner el volumen a cero	"Silencio"
6	$\begin{matrix} 1 & 1 & 0 \\ S \cdot V \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	Están activas la entrada de silencio y la cambiar el volumen, y nos dice que bajemos el volumen	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"
7	$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ S \cdot V \cdot P/\bar{B} \end{matrix}$	Todas las entradas activas...	La entrada de silencio es prioritaria, el destino es "silencio"	"Silencio"



En esta tabla aparecen **tres** transiciones, pero ningún estado nuevo. Esto es muy importante, porque nos dice que hemos acabado de construir el diagrama de estados. Así pues, solo queda añadir las transiciones que aparecen en la tabla 5 y que puedes ver en la figura 6.

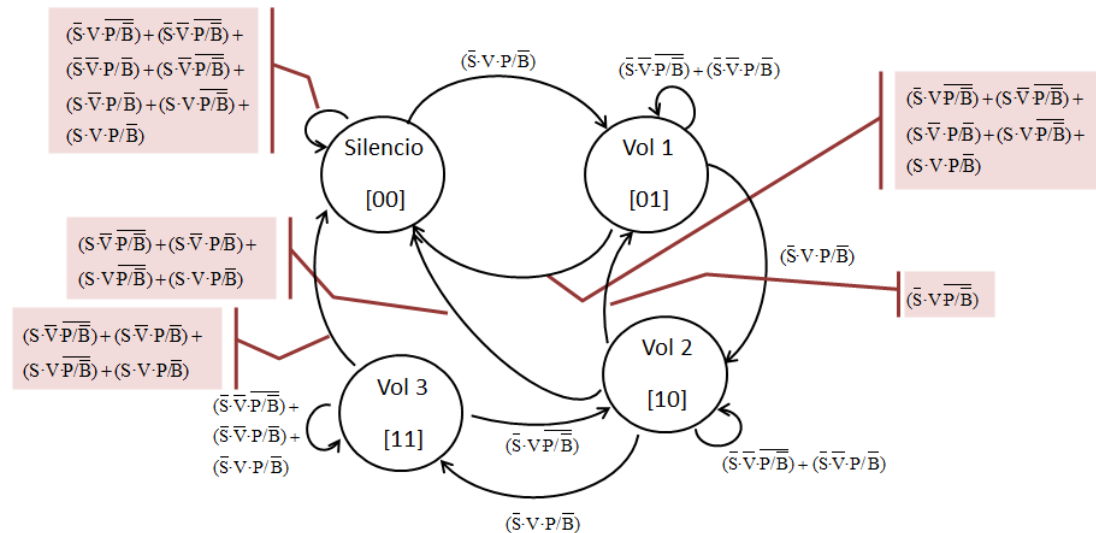


Figura 6. Diagrama de estados completo

¡Y de esta manera hemos completado el diagrama de estados!

5 Conclusiones

El primer paso para construir un SSS (sistema secuencial síncrono) es el diseño del diagrama de estados, con permiso de la interfaz, claro está. En este artículo has podido experimentar una manera sistemática y segura de diseñar un diagrama de estados. Hemos utilizado un ejemplo sencillo, el control de volumen de un reproductor de música.

Recuerda, para cada estado que tengas en el diagrama de estados, hay que hacer una tabla con todas las posibles entradas y el estado al que hay que ir para cada una de ellas. De esta manera obtendrás nuevas transiciones y estados. El proceso se repite hasta que dejan de aparecer nuevos estados.

Es necesario que recuerdes que hay muchas variantes de diagramas de estados, con expresiones simplificadas o valoraciones numéricas para indicar la causa de la transición. Pero todas estas variantes expresan el mismo concepto: la evolución de un SSS, es decir, por qué razón el SSS cambia de un estado a otro.

6 Bibliografía

6.1 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