

4

LOGICA SECUENCIAL

4-1 INTRODUCCION

Los circuitos digitales que se han considerado hasta ahora han sido combinatorios, donde las salidas en cualquier punto del tiempo dependen completamente de las entradas que se presenten en ese momento. Aunque todo sistema digital tendrá probablemente un circuito combinatorio, en la práctica la mayoría de los sistemas además incluyen elementos de almacenamiento, lo que requiere que el sistema se describa en términos de circuitos secuenciales.

En la figura 4-1 se presenta un diagrama de bloques de un circuito secuencial. Este consta de un circuito combinatorio y elementos de almacenamiento que juntos forman un sistema de retroalimentación. Los elementos de almacenamiento son dispositivos que pueden almacenar información binaria en su interior. La información binaria almacenada en cualquier momento dado define el *estado* del circuito secuencial. El circuito secuencial recibe información binaria de entradas externas, las cuales, junto con el estado presente de los elementos de almacenamiento, determi-

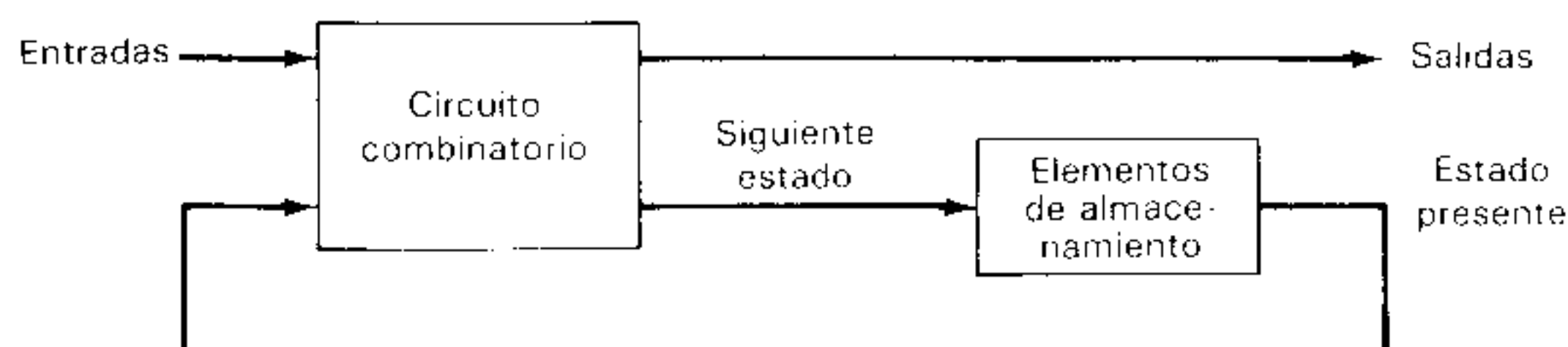


FIGURA 4—1

Diagrama de bloques de un circuito secuencial

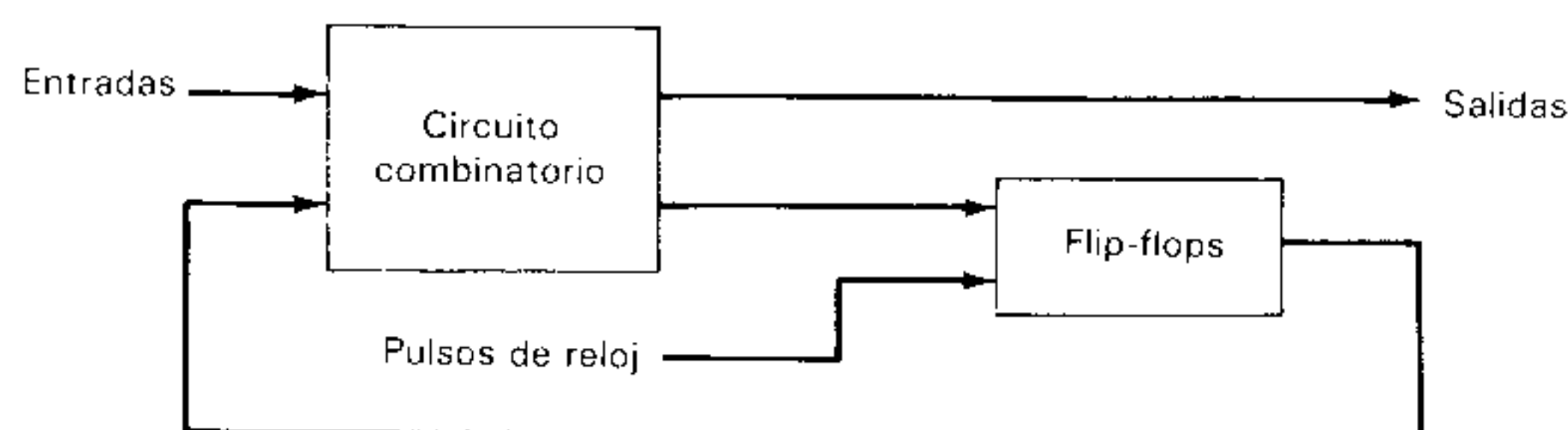
nan el valor binario de las salidas, así como la condición para cambiar el estado de los elementos de almacenamiento. El diagrama de bloques demuestra que las salidas de un circuito secuencial son función no sólo de entradas externas sino también del estado presente de los elementos de almacenamiento, cuyo estado siguiente, es así mismo, función de las entradas y del estado presente. Por lo tanto, un circuito secuencial se especifica por medio de una secuencia temporal de entradas, salidas y estados internos.

Existen dos tipos principales de circuitos secuenciales, y su clasificación depende de la sincronización de las señales. Un *circuito secuencial sincrónico* es un sistema cuyo comportamiento puede definirse a partir del conocimiento de sus señales en instantes discretos. El comportamiento de un *circuito secuencial asincrónico* depende del orden en el que cambien las entradas, y el estado del circuito puede ser afectado en cualquier instante. Los elementos de almacenamiento que se utilizan comúnmente en circuitos secuenciales asincrónicos son dispositivos con retraso de tiempo. La capacidad de almacenamiento de un dispositivo con retraso de tiempo se debe a que la señal tarda un tiempo finito en propagarse por el dispositivo. En la práctica, la demora de propagación interna de las compuertas lógicas tiene duración suficiente para producir el retraso que se necesita de manera que quizá no sean necesarias las unidades de demora o retraso reales. En los sistemas asincrónicos del tipo compuertas, los elementos de almacenamiento constan de compuertas lógicas donde la demora en la propagación proporciona el espacio de almacenamiento requerido. Por lo tanto, un circuito secuencial asincrónico puede considerarse como un circuito combinatorio con retroalimentación. Debido a la retroalimentación entre compuertas lógicas, el sistema puede operar de manera impredecible y algunas veces incluso hacerse inestable. Los diversos problemas que se encuentran en los sistemas asincrónicos imponen muchas dificultades al diseñador, y por este motivo se utilizan en muy contadas ocasiones.

Un circuito secuencial sincrónico se vale de señales que afectan a los elementos de almacenamiento sólo en instantes discretos. La sincronización se logra a través de un dispositivo de sincronización llamado *generador de señales de reloj* que produce una sucesión periódica de *pulsos de reloj*. Estos se distribuyen en todo el sistema de tal manera que los elementos de almacenamiento sólo sean afectados a la llegada de cada pulso. En la práctica, los pulsos de reloj se aplican con otras señales que especifican el cambio requerido en los elementos de almacenamiento. Las salidas de elementos de almacenamiento cambian sólo cuando hay pulsos de reloj. Los circuitos secuenciales sincrónicos que utilizan pulsos de reloj en la entrada de elementos de almacenamiento reciben el nombre de *circuitos secuenciales controlados por reloj* y son del tipo que se encuentra con mayor frecuencia en la práctica. Rara vez manifiestan problemas de inestabilidad y su sincronización se divide fácilmente en pasos discretos independientes, cada uno de los cuales puede considerarse por separado.

Los elementos de almacenamiento que se emplean en circuitos secuenciales controlados por reloj reciben el nombre de *flip-flops* o *multivibradores biestables*, los cuales son dispositivos de almacenamiento binario que pueden contener un bit de información. Normalmente, un circuito secuencial utilizará muchos flip-flops para almacenar tantos bits como sea necesario. El diagrama de bloques de un circuito secuencial sincrónico controlado por reloj se presenta en la figura 4-2. Las salidas pueden provenir del circuito combinatorio o bien de los multivibradores biestables,

los cuales reciben sus entradas del circuito combinatorio y también de una sucesión de pulsos que ocurren en intervalos de tiempo fijos, como se indica en el diagrama de sincronización. El siguiente estado de los flip-flops puede cambiar sólo durante una transición de pulsos de reloj. Cuando un pulso de reloj no está activo, se rompe el ciclo de retroalimentación porque las salidas de los multivibradores no pueden cambiar aun si cambian de valor las salidas del circuito combinatorio. Por lo tanto, la transición de un estado al otro ocurre sólo en intervalos de tiempo predeterminados controlados por los pulsos de reloj.



(a) Diagrama de bloques



(b) Diagrama de sincronización de pulsos de reloj

FIGURA 4—2

Circuito secuencial síncrono controlado por reloj

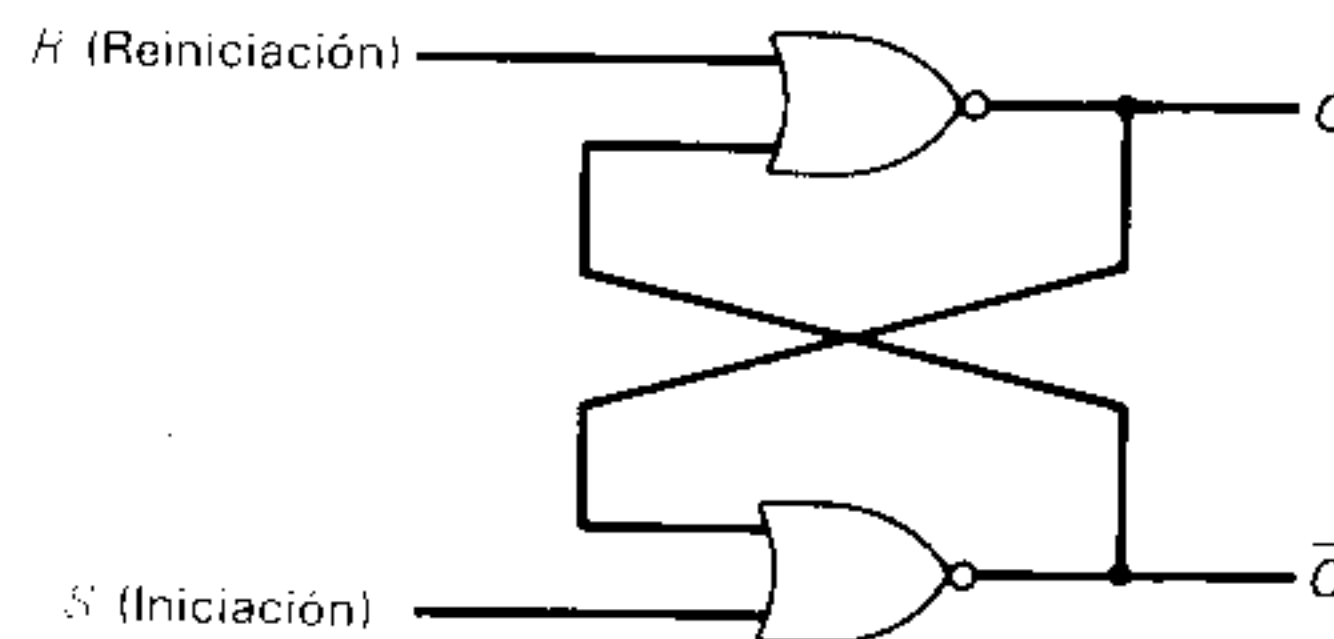
Un circuito multivibrador biestable tiene dos salidas, una para el valor normal y una para el valor complementado del bit que está almacenado en él. La información binaria puede entrar en un flip-flop de diversas maneras, lo que da origen a diferentes tipos de multivibradores biestables. En este capítulo se presentan los tipos de flip-flops disponibles, y ejemplos de su operación y propiedades lógicas. Después se procede a desarrollar métodos y procedimientos para el análisis y diseño de circuitos secuenciales síncronos controlados por reloj.

4-2 SEGUROS

Un circuito multivibrador biestable puede mantener un estado binario por tiempo indefinido (en tanto se envíe energía al circuito), hasta que una señal lo haga pasar a otro estado. Las diferencias principales entre los diversos tipos de flip-flops están en el número de entradas que tienen y la forma en que éstas afectan al estado binario. Los tipos de flip-flops más básicos operan con niveles de señales y se denominan *seguros*. Los seguros que aquí se presentan son los circuitos básicos a partir de los cuales se construyen todos los multivibradores biestables. Aunque los seguros pueden servir para almacenar información binaria, no son prácticos para utilizarse en circuitos secuenciales síncronos. Los tipos de flip-flops que se emplean en circuitos secuenciales se presentan en la sección siguiente.

Seguro SR

El seguro SR es un circuito con dos compuertas NOR o dos compuertas NAND acopladas en cruz. Tiene dos entradas rotuladas S por iniciación y R por reiniciación. El seguro SR que se construye con dos compuertas NOR acopladas en cruz se ilustra en la figura 4-3. El seguro tiene dos estados útiles. Cuando la salida $Q = 1$ y $\bar{Q} = 0$, se dice que está en el estado de iniciación. Cuando $Q = 0$ y $\bar{Q} = 1$, está en el estado de reiniciación. Las salidas Q y \bar{Q} son normalmente complementos mutuos. Un estado indefinido se presenta cuando ambas salidas son iguales a 0. Esto ocurre cuando ambas entradas son iguales a 1 al mismo tiempo.



(a) Diagrama de lógica

S	R	Q	\bar{Q}	
1	0	1	0	Estado iniciado
0	0	1	0	
0	1	0	1	Estado reiniciado
0	0	0	1	
1	1	0	0	Indefinido

(b) Tabla de funciones

FIGURA 4-3

Seguro SR con compuertas NOR

En condiciones normales, ambas entradas del seguro permanecen en 0 a menos que tenga que cambiarse el estado. La aplicación de un 1 momentáneo a la entrada S hace que el seguro pase al estado de iniciación. La entrada S debe regresar a 0 antes de que puedan ocurrir otros cambios. Como se muestra en la tabla de funciones, hay dos condiciones de entrada que hacen que el circuito se encuentre en el estado de iniciación. La primera condición es la acción que debe tomar la entrada S para llevar al circuito al estado de iniciación. Al eliminar la entrada activa de S queda el circuito en el mismo estado. Después de que ambas entradas regresan a 0 es posible cambiar al estado de reiniciación aplicando momentáneamente un 1 a la entrada R . Después podemos eliminar el 1 de R y el circuito se mantiene en el estado de reiniciación. En consecuencia, cuando las entradas S y R son iguales a 0, el seguro puede encontrarse en el estado de iniciación o de reiniciación, dependiendo de qué entrada haya sido 1 antes del cambio.

Si se aplica un 1 a las entradas S y R del seguro, ambas salidas pasan a 0. Esto produce un estado indefinido porque da origen a un siguiente estado impredecible cuando ambas entradas regresan a 0. También infringe el requisito de que las salidas Q y \bar{Q} se complementen una a la otra. En operación normal, esta condición se evita asegurándonos de que no se apliquen unos (1) a ambas entradas en forma simultánea.

El seguro SR con dos compuertas NAND acopladas en cruz se ilustra en la figura 4-4. Este opera con ambas entradas normalmente en 1, a menos que tenga que cambiarse el estado del seguro. La aplicación de un 0 momentáneo a la entrada S hace que la salida Q pase a 1, colocando el seguro en el estado de iniciación. Cuando la entrada S regresa a 1, el circuito se mantiene en el estado de iniciación. Después de que ambas entradas vuelven a 1, podemos cambiar el estado del seguro colocando

un 0 en la entrada R . Esto hace que el circuito pase al estado de reiniciación y que permanezca ahí aun después de que ambas entradas vuelvan a 1. La condición de que está indefinido para el seguro NAND es cuando ambas entradas son iguales a 0 simultáneamente.

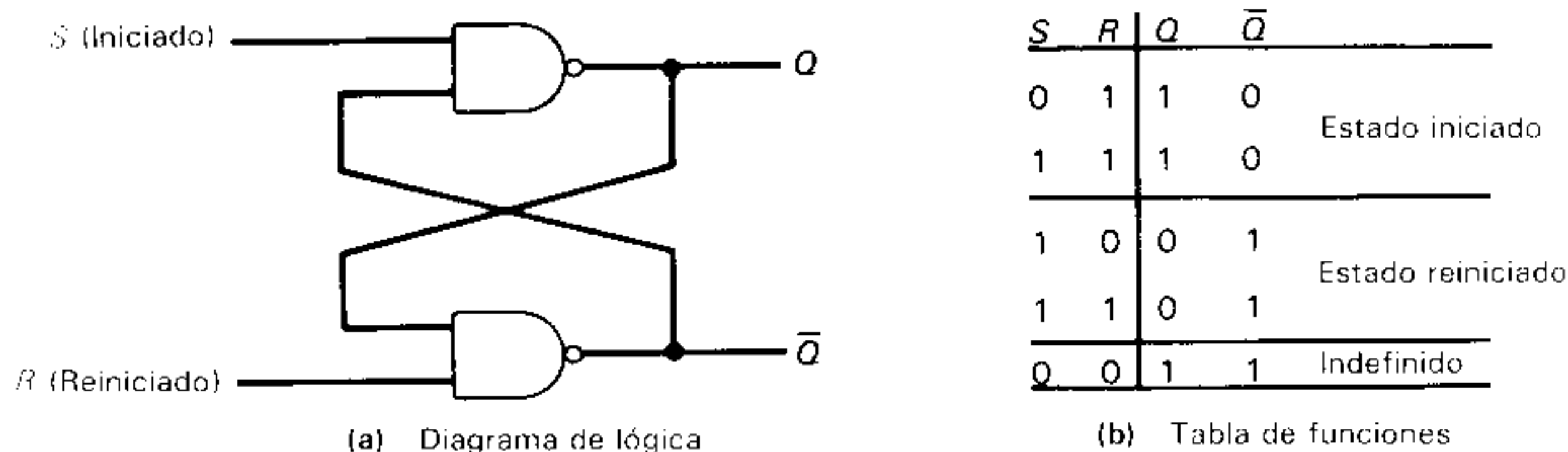


FIGURA 4—4

Seguro SR con compuertas NAND

Al comparar el seguro NAND con el NOR vemos que las señales de entrada de la NAND requieren los valores de complemento de las que se utilizan para el seguro NOR. Como el seguro NAND requiere una señal 0 para cambiar su estado, a veces se denomina seguro $\bar{S}\text{-}\bar{R}$. La barra que está arriba de las letras indica que las entradas deben estar en su forma de complemento para activar el circuito.

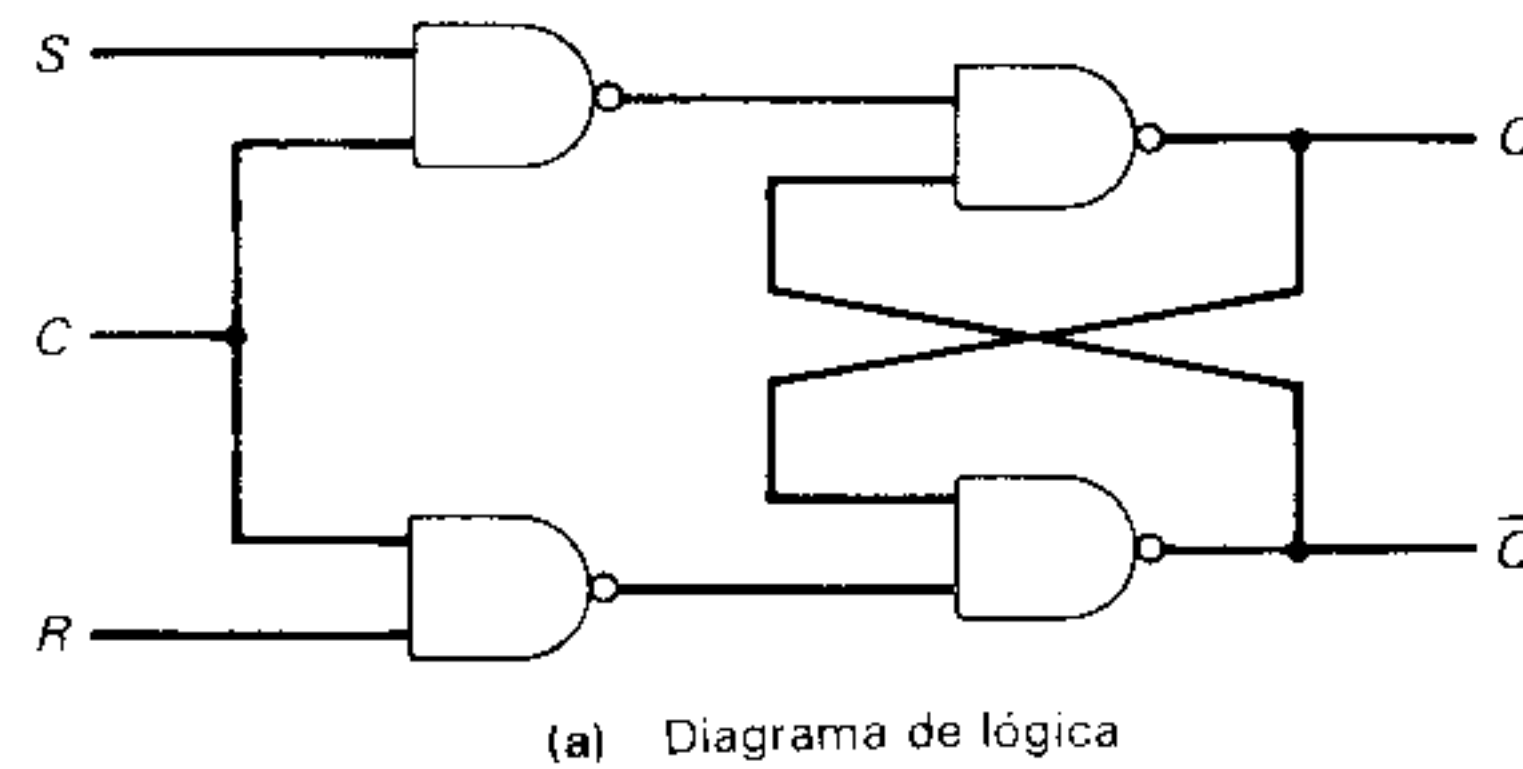
La operación del seguro SR básico se puede mejorar colocando una entrada de control adicional que determine cuándo se puede cambiar el estado del seguro. En la figura 4-5 se muestra un seguro SR con una entrada de control. Este consta del seguro SR básico y dos compuertas NAND adicionales. La entrada de control C actúa como una señal habilitadora para las otras dos entradas. La salida de las compuertas NAND se mantiene en el nivel 1 lógico en tanto que la entrada de control permanezca en 0. Esta es una condición inmóvil para el seguro SR. Cuando la entrada de control pasa a 1, la información de la entrada S o R pasa al seguro SR. Se llega al estado de iniciación cuando $S = 1$, $R = 0$ y $C = 1$. En uno u otro caso, cuando C vuelve a 0, el circuito se mantiene en su estado presente. Cuando la entrada de control inhabilita el circuito aplicando un 0 a C , el estado de la salida no cambia, sin importar los valores de S y R . Más aún, cuando $C = 1$ y las entradas S y R son iguales a 0, el estado del circuito no cambia. Estas condiciones se presentan en la tabla de funciones que acompaña al diagrama.

Una condición indeterminada ocurre cuando las tres entradas son iguales a 1. Esta condición coloca ceros en ambas entradas del seguro SR básico que lo coloca en el estado indefinido. Cuando la entrada de control regresa a 0, no se puede determinar positivamente el siguiente estado porque éste depende de si la entrada S o la R cambian a 0 primero. Esta condición indeterminada hace difícil de manejar el circuito de la figura 4-5 y rara vez se utiliza en la práctica. No obstante, es un circuito importante porque todos los demás seguros y multivibradores biestables se construyen a partir de él. Debe mencionarse que algunas veces el seguro SR con entrada de control se conoce como flip-flop SR (o RS). Sin embargo, para calificar como flip-flop o multivibrador biestable, el circuito debe cumplir los requisitos que se mencionan en la siguiente sección.

Seguro

D —

C —



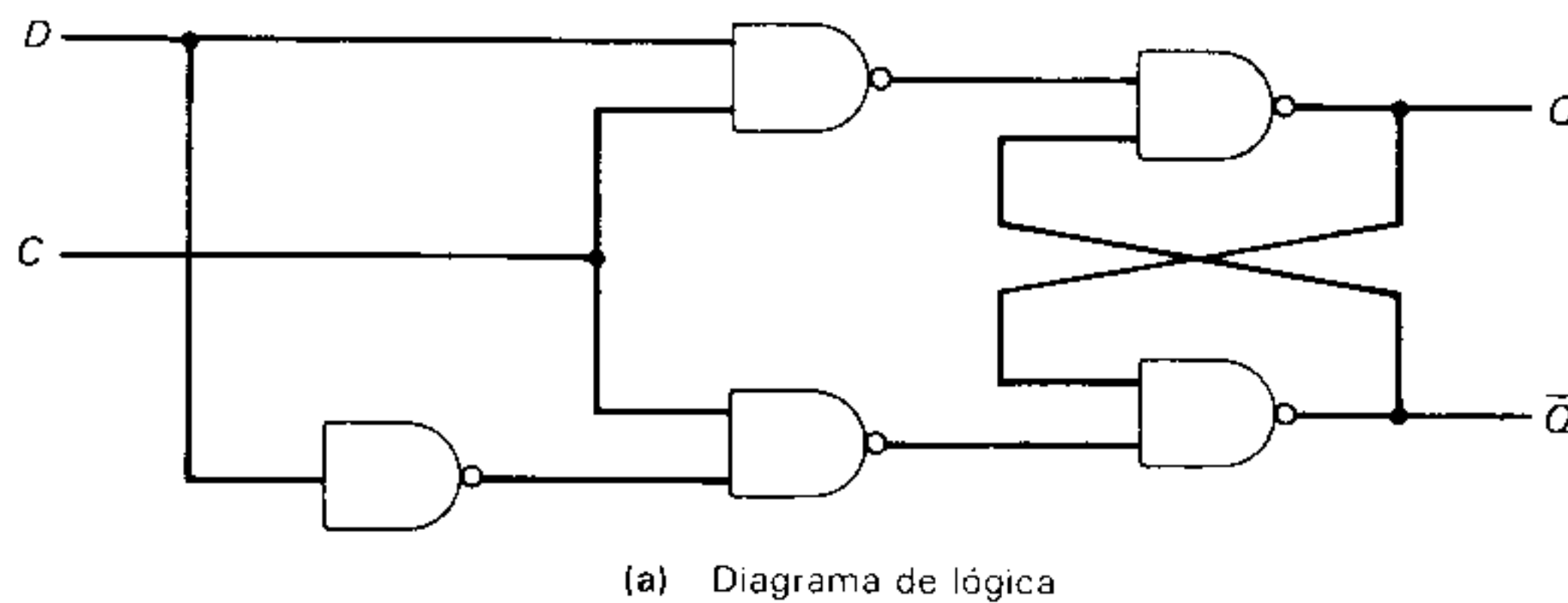
C	S	R	Estado siguiente de Q
0	X	X	No hay cambio
1	0	0	No hay cambio
1	0	1	Q = 0; Estado reiniciado
1	1	0	Q = 1; Estado iniciado
1	1	1	Indeterminado

(b) Tabla de funciones

FIGURA 4-5
Seguro SR con entrada de control

Seguro D

Una manera de eliminar la condición indeseable del estado indeterminado en el seguro SR consiste en asegurar que las entradas S y R nunca sean iguales a 1 al mismo tiempo. Esto se hace en el seguro D que se muestra en la figura 4-6. Este cerrojo tiene sólo dos entradas, D (datos) y C (control). La entrada D va directamente a la entrada S , y su complemento se aplica a la entrada R . En tanto que la entrada de control esté en 0, el seguro SR acoplado en cruz tiene ambas entradas en el nivel 1 y el circuito no puede cambiar de estado sin importar el valor de D . La entrada D se muestrea cuando $C = 1$. Si D es 1, la salida Q cambia a 1 colocando el circuito en el estado de iniciación. Si D es 0, la salida Q pasa a 0 y el circuito cambia al estado de reiniciación.



C	D	Estado siguiente de Q
0	X	No hay cambio
1	0	Q = 0; Estado reiniciado
1	1	Q = 1; Estado iniciado

(b) Tabla de funciones

FIGURA 4-6
Seguro D

El seguro se designa así por su capacidad para contener *datos* en su espacio de almacenamiento interno. Es adecuado para utilizarse como almacenamiento temporáneo de información binaria entre una unidad y su entorno. La información binaria presente en la entrada de datos del seguro D se transfiere a la salida Q cuando se habilita la entrada de control. La salida sigue la entrada de datos en tanto que la habilitación se mantenga activa. Cuando se inhabilita la entrada de control, la información binaria que estaba presente en la entrada de datos al momento en que ocurrió la transición se retiene en la salida Q hasta que se vuelve a habilitar la entrada de control.

El seguro D se puede construir con compuertas de transmisión, según se indica en la figura 4-7. (La compuerta de transmisión se define en la figura 2-37.) La entrada C controla dos compuertas de transmisión TG. Cuando $C = 1$, la TG conectada a la entrada D tiene una trayectoria cerrada y la conectada a la salida Q tiene una trayectoria abierta. Por lo tanto la salida sigue a la entrada de datos en tanto que C se mantenga activa. Cuando C cambia a 0, la primera TG desconecta la entrada D del circuito y la segunda TG produce una trayectoria cerrada entre los dos inversores en la salida. Por lo tanto el valor que estaba presente en la entrada D al tiempo en que C cambió de 1 a 0 se retiene en la salida Q .

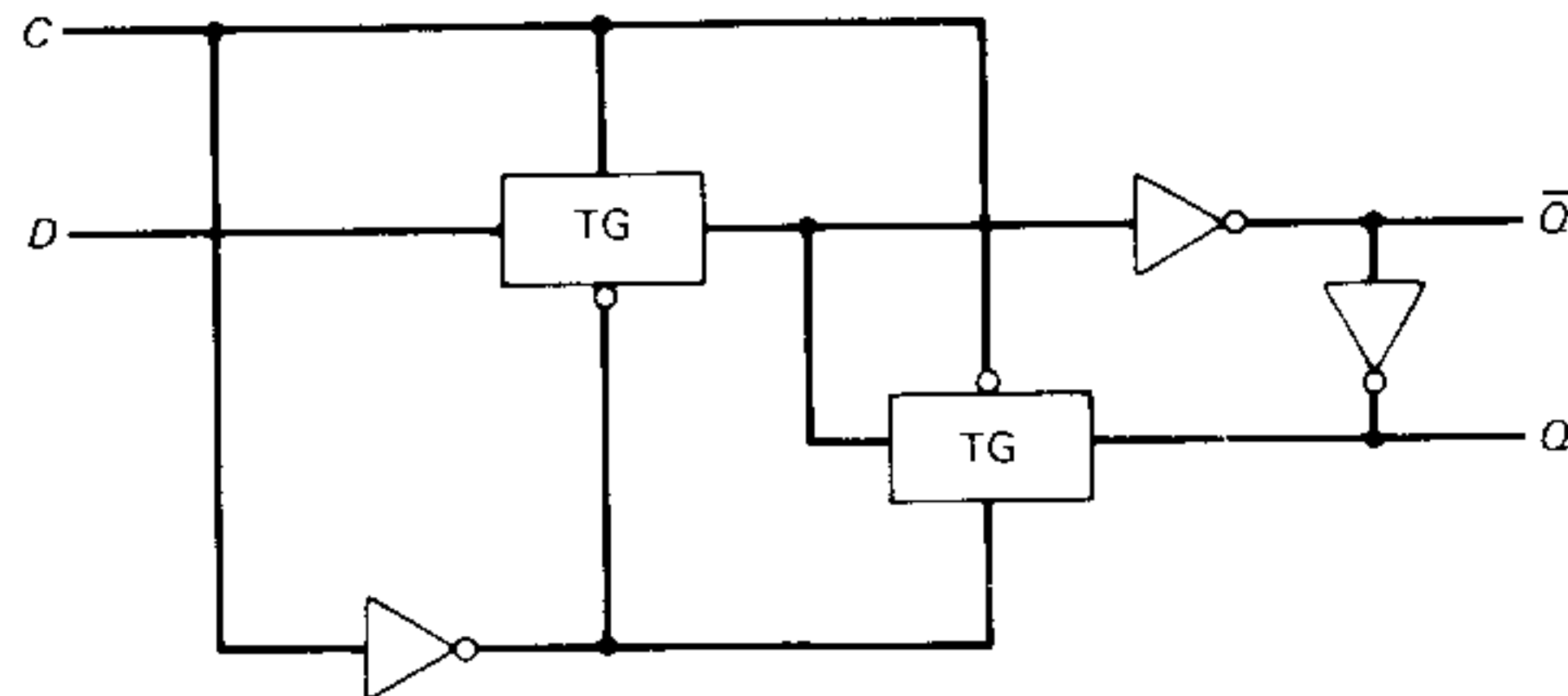


FIGURA 4—7
Seguro D con compuertas de transmisión

4-3 MULTIVIBRADORES BIESTABLES (FLIP-FLOPS)

El estado de un seguro de un multivibrador biestable es conmutado por un cambio momentáneo en la entrada de control. Este cambio recibe el nombre de *activador* y se dice que la transición que produce activa el flip-flop. El seguro D con pulsos de reloj en su entrada de control es básicamente un flip-flop que se activa toda vez que el pulso pasa al nivel 1 lógico. En tanto que la entrada de pulsos permanezca en el nivel activo, cualquier cambio en la entrada de datos modificará el estado del seguro.

Como se puede ver en el diagrama de bloque de la figura 4-2, un circuito secuencial tiene una trayectoria de retroalimentación de las salidas de los multivibradores al circuito de combinación. Como consecuencia, las entradas de datos de los flip-flops se determinan en parte de las salidas de los mismos y de otros flip-flops. Cuando se utilizan seguros para los elementos de almacenamiento, se presenta una grave dificultad. Las transiciones de estado de los seguros empiezan tan pronto como cambia el pulso al nivel 1 lógico. El nuevo estado de un seguro puede aparecer en la salida mientras el pulso se mantiene activo. Esta salida se conecta a las entradas de los seguros a través de un circuito combinatorio. Si las entradas que se aplican a los seguros siguen cambiando mientras el pulso de reloj se mantiene en el nivel 1 lógico, los seguros empezarán a responder a nuevos valores, y se puede presentar un nuevo estado de salida. Esto da origen a una situación impredecible porque el estado de los seguros puede seguir cambiando en tanto que el pulso de reloj se mantiene en el nivel

Flip-flop

activo. Debido a esta operación poco confiable, la salida de un seguro no se puede aplicar a la entrada del mismo o de otro seguro cuando todos los seguros sean activados por una misma fuente de pulsos de reloj.

Los circuitos multivibradores biestables se construyen de tal manera para hacerlos operar en forma adecuada cuando sean parte de un circuito secuencial que emplee un generador común de pulsos de reloj. Existen dos formas en las que se puede modificar un seguro para formar un flip-flop confiable. Una forma consiste en emplear dos seguros en una configuración especial que separe la salida del flip-flop para que no sea afectada mientras cambia su entrada. Este tipo de circuito se denomina multivibrador biestable flip-flop *amo-esclavo*. Otra forma consiste en producir un flip-flop que se active sólo durante una *transición* de una señal de 0 a 1 (o de 1 a 0) y se desactive mientras dure el pulso de reloj. Este tipo de circuito recibe el nombre de flip flop *activado por flanco*. Ahora procederemos a mostrar la construcción de ambos tipos de multivibradores biestables.

Flip-flop amo-esclavo

El flip-flop o multivibrador biestable amo-esclavo consta de dos seguros y un inversor. En la figura 4-8 se muestra un flip-flop amo-esclavo de tipo D. El primer seguro D se denomina amo y, el segundo, esclavo. Cuando la entrada de pulsos de reloj C es 0, la salida del inversor es 1. El seguro esclavo se habilita y su salida Q es igual a la salida del amo, Y . El seguro amo se inhabilita porque $C = 0$. Cuando el pulso de entrada cambia al nivel 1 lógico, los datos de la entrada D externa se transfieren al amo. Sin embargo, el esclavo se inhabilita en tanto que el pulso se mantenga en el nivel 1 porque su entrada C es igual a 0. Cualquier cambio en la entrada D externa cambia la salida Y del amo pero no puede afectar la salida Q del esclavo. Cuando el pulso regresa a 0, el amo se desactiva y se separa de la entrada D . Al mismo tiempo se habilita el esclavo y el valor de Y se transfiere a la salida del multivibrador biestable en Q .

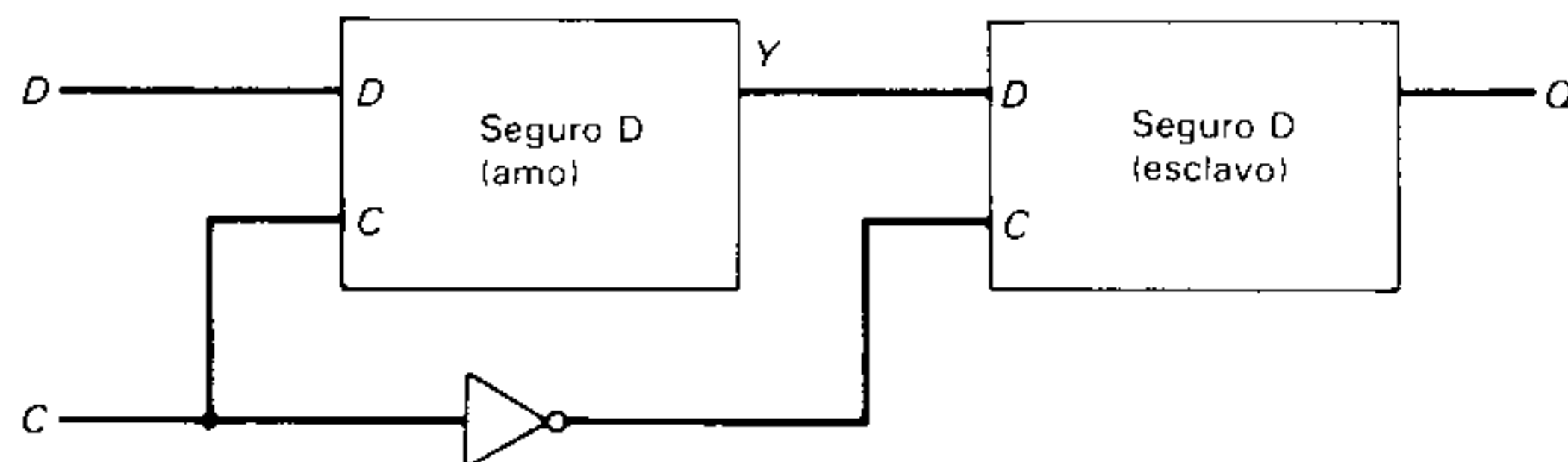


FIGURA 4—8
Flip-flop D amo-esclavo

Las relaciones de sincronización que se ilustran en la figura 4-9 muestran la secuencia de sucesos que ocurren en el flip-flop amo-esclavo de tipo D. Supóngase que inicialmente el flip-flop está en el estado de reiniciación antes de la aparición de un pulso; de modo que $Y = 0$ y $Q = 0$. La entrada de datos D es igual a 1 y el siguiente pulso de reloj debe cambiar el multivibrador biestable al estado de iniciación con $Q = 1$. Después de la transición del pulso de 0 a 1, se inicia el seguro amo y cambia

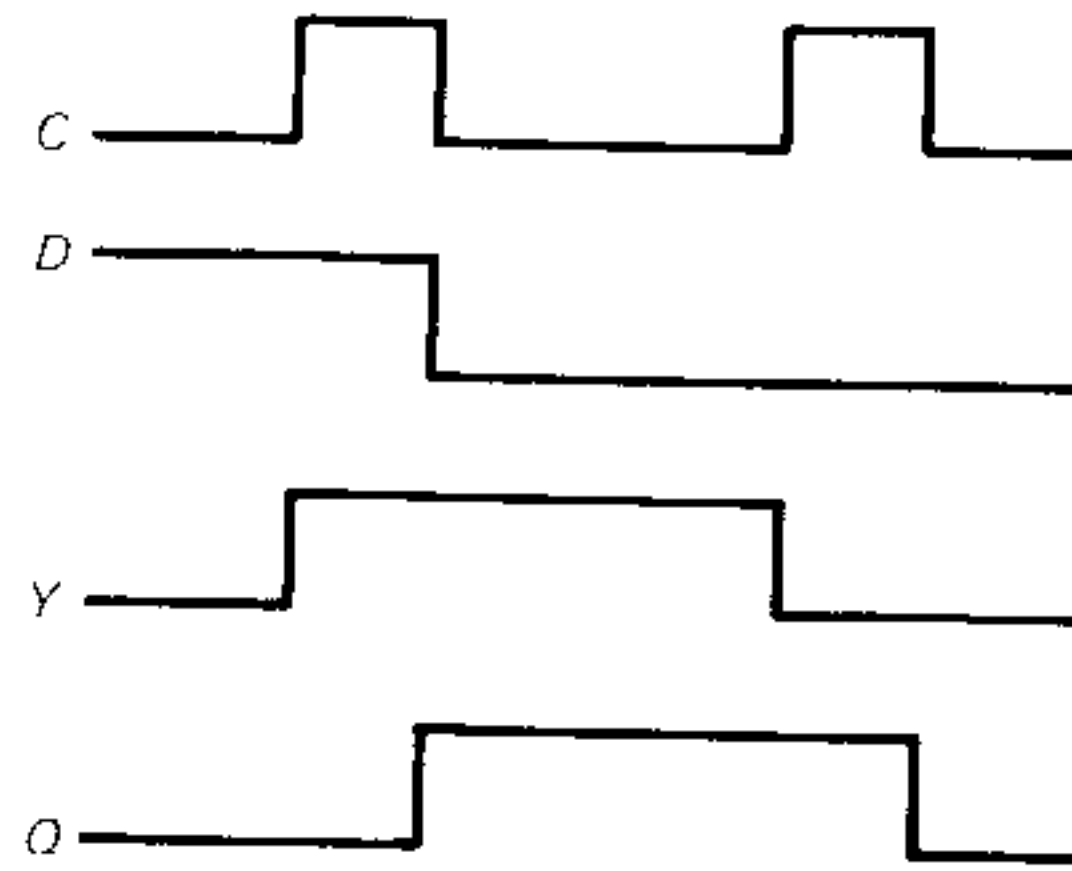


FIGURA 4—9

Relación de sincronización con un flip-flop amo-esclavo

Y a 1. El seguro esclavo no se ve afectado porque su entrada C es 0. Como el amo está en un circuito interno, su cambio de estado no se advierte en la salida Q . Aunque la entrada pueda estar cambiando, la salida del flip-flop se mantiene en su estado previo. Cuando el pulso regresa a 0, la información del amo puede pasar a través del esclavo, haciendo la salida externa $Q = 1$. La entrada externa D puede cambiar al mismo tiempo que el pulso hace su transición negativa. Esto se debe a que una vez que la entrada C alcanza el valor 0, se inhabilita el amo y su entrada de datos no tiene efecto sino hasta que se presenta el siguiente pulso de reloj. El diagrama de sincronización de la figura 4-9 continúa con un segundo pulso de reloj que encuentra la entrada D externa en 0. El circuito cambia a 0 conmutando primero la salida del amo y luego la del esclavo.

Si reemplazamos el seguro D amo de la figura 4-8 por un seguro SR con entrada de control, obtendremos un flip-flop SR amo-esclavo. Recuerdese que el multivibrador SR tiene la condición indeseable de producir un siguiente estado indeterminado cuando las entradas S y R son iguales a 1 (véase la tabla de funciones de la figura 4-5) y en consecuencia rara vez se emplea.

Una versión modificada del flip-flop SR que elimina la condición indeseable es el multivibrador JK. En este tipo de flip-flop, la condición de que ambas entradas sean iguales a 1 hace que la salida complemente su valor. El flip-flop JK amo-esclavo se muestra en la figura 4-10. El amo es un seguro SR donde la entrada de control recibe los pulsos de reloj. El esclavo es un seguro D que opera con el complemento del pulso de reloj. La entrada J se comporta como la entrada S para iniciar el flip-flop. La entrada K es semejante a la entrada R para reiniciar el multivibrador biestable. La única diferencia entre los flip-flops SR y JK es su respuesta a la condición cuando ambas entradas son iguales a 1. Como se puede verificar en el diagrama, esta condición complementa las salidas del flip-flop JK. Esto se debe a la conexión de retroalimentación de las salidas a las entradas. Cuando $Q = 1$ y $K = 1$ la entrada R es igual a 1. La entrada S es 0, aun si $J = 1$, puesto que \bar{Q} , siendo el complemento de Q , debe ser 0. El siguiente pulso de reloj reiniciará el flip-flop y cambiará la salida Q a 0. Análogamente, si comenzamos con $Q = 0$, el pulso de reloj iniciará el flip-flop y cambiará la salida Q a 1. En uno u otro caso, la condición de $J = 1$ y $K = 1$ hace que las salidas del multivibrador biestable se complementen en respuesta a un pulso de reloj.

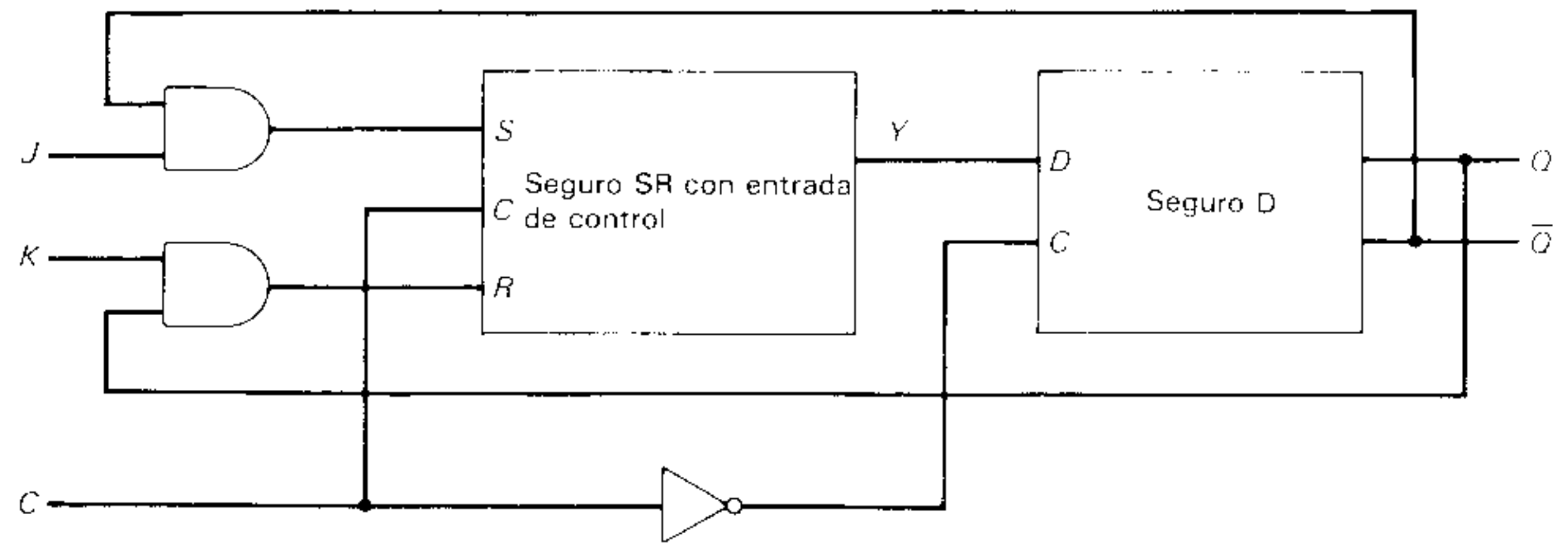


FIGURA 4—10

Flip-flop JK amo-esclavo

Ahora considérese un sistema secuencial que contenga muchos flip-flops amo-esclavo, donde las salidas de algunos multivibradores se dirijan a las entradas de otros. Supóngase que los pulsos de reloj de todos los flip-flops se sincronizan y ocurren simultáneamente. Al inicio de cada pulso de reloj, algunos de los amos cambian de estado, pero todos los esclavos se mantienen en el estado previo. Eso significa que las salidas de los flip-flops siguen estando en el estado presente mientras los amos internos han cambiado al siguiente estado. Después de que el pulso de reloj vuelve a 0, algunas de las salidas cambian de estado, pero ninguno de los nuevos estados tiene ningún efecto en ninguno de los amos hasta el siguiente pulso. Por lo tanto los estados de los multivibradores de un sistema sincrónico pueden cambiar en forma simultánea durante el mismo pulso de reloj, aunque las salidas de los flip-flops estén conectadas a entradas de los mismos u otros flip-flops. Esto es posible porque el nuevo estado aparece en las salidas sólo después de que el pulso de reloj ha regresado a 0.

Para que la operación de un circuito secuencial sea confiable, todas las señales deben propagarse de las salidas de los multivibradores biestables, pasando por el circuito combinatorio y de vuelta a las entradas de los flip-flops amo-esclavo, mientras que el pulso de reloj se mantiene en el nivel 0 lógico. Cualquier modificación que ocurra en las entradas de flip-flops después de que el pulso regresa al nivel 1 lógico no es reconocida por las salidas. En la mayoría de las aplicaciones, la amplitud del pulso de reloj es muy estrecha en comparación con el periodo de reloj que vuelve más larga la duración de bajo nivel del reloj. Como el amo se activa en la transición positiva del pulso y el esclavo en la transición negativa, el amo-esclavo se clasifica como un multivibrador biestable *activado por pulso*.

Flip-flop o multivibrador biestable activado por flanco

Un multivibrador biestable *activado por flanco* ignora el pulso mientras se encuentra en un nivel constante pero se activa sólo durante la *transición* de la señal del reloj. Algunos flip-flops activados por flanco se activan en el flanco positivo (transición de 0 a 1) y otros en el flanco negativo (transición de 1 a 0).

El diagrama de lógica de un flip-flop activado por flanco positivo de tipo D se muestra en la figura 4-11. Este consta de tres seguros SR. Dos seguros responden a las entradas externas *D* (datos) y *C* (control). El tercero produce las salidas del multi-

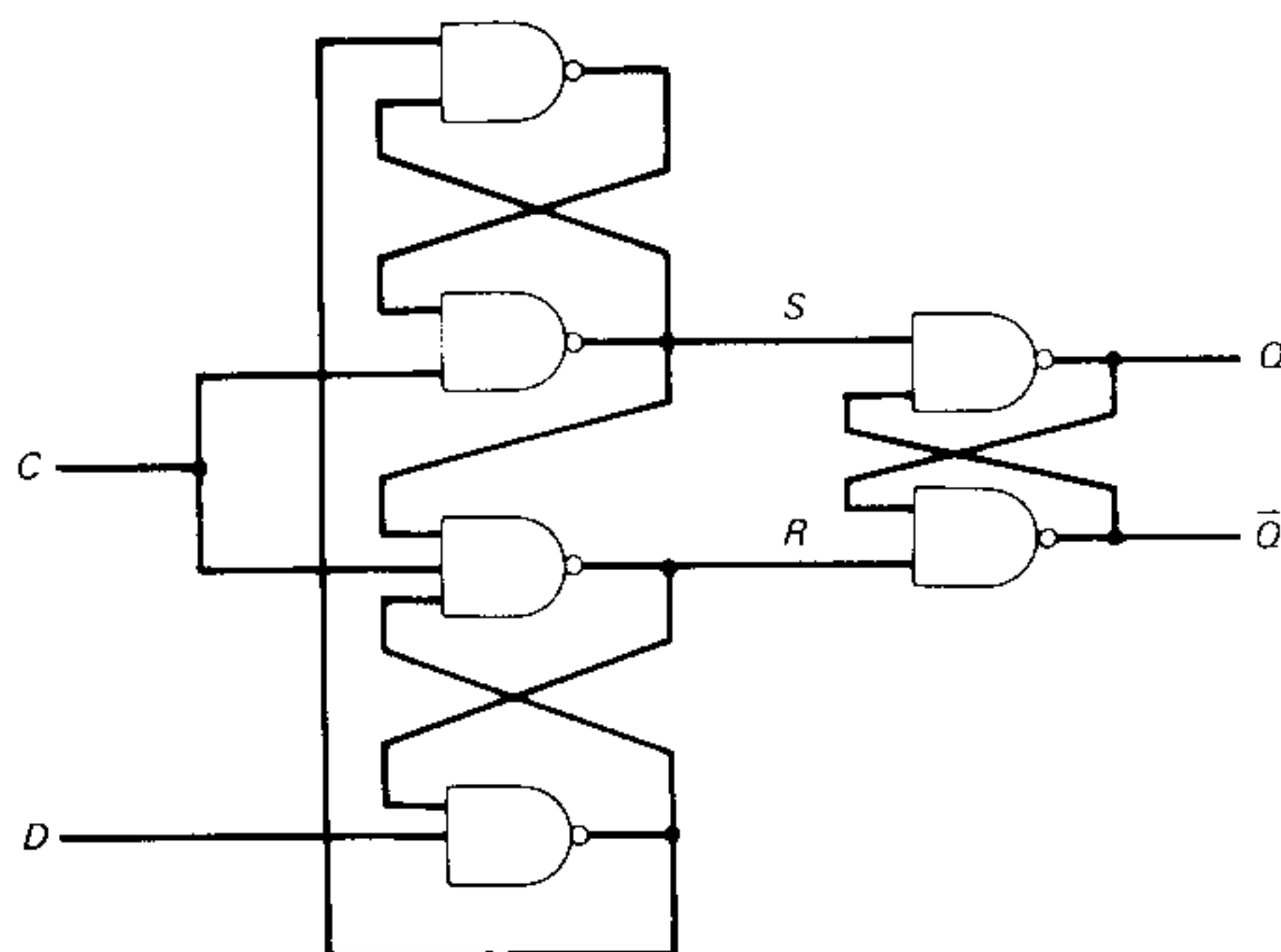


FIGURA 4-11

Flip-flop activado por flanco positivo de tipo D

vibrador. Las entradas S y R del seguro de salida se mantienen en el nivel 1 lógico cuando $C = 0$. Esto hace que la salida permanezca en su estado presente. La entrada D puede ser igual a 0 o 1. Si $D = 0$ cuando C se vuelve 1, R cambia a 0. Esto hace que el flip-flop cambie al estado de reiniciación haciendo $Q = 0$. Si ahora, mientras $C = 1$, hay un cambio en la entrada D , la terminal R se mantiene en 0. Por lo tanto, el flip-flop se bloquea y no responde a ningún otro cambio en la entrada D hasta que el reloj regrese a 0 y ocurra otra transición positiva. En forma análoga, si $D = 1$ cuando C pasa de 0 a 1, S cambia a 0. Esto hace que el circuito pase al estado de iniciación haciendo $Q = 1$. Cualquier cambio en D mientras $C = 1$ no afecta a la salida.

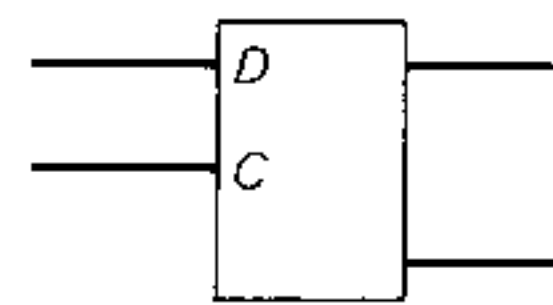
En resumen, cuando el reloj de entrada del flip-flop activado por flanco positivo hace una transición positiva, el valor de D se transfiere a Q . Una transición negativa de 1 a 0 no afecta a la salida; tampoco se ve afectada cuando C se encuentra en el nivel 1 lógico o en el nivel 0 lógico, estables. Por lo tanto este tipo de multivibrador biestable responde a la transición de 0 a 1 y a nada más.

La sincronización de la respuesta de un flip-flop a datos y reloj de entrada debe tomarse en cuenta cuando se utilicen multivibradores biestables activados por flanco. Existe un tiempo mínimo llamado *tiempo de formación* en el que la entrada D debe mantenerse en un valor constante antes de la transición del reloj. Análogamente, hay un tiempo definido llamado *tiempo de contención* en el que la entrada D no debe cambiar después de la aplicación de la transición positiva del pulso. El *tiempo de demora en la propagación* del multivibrador biestable se define como el intervalo de tiempo entre el flanco activador y la estabilización de la salida al nuevo estado. Estos y otros parámetros se especifican en manuales de datos de circuitos integrados.

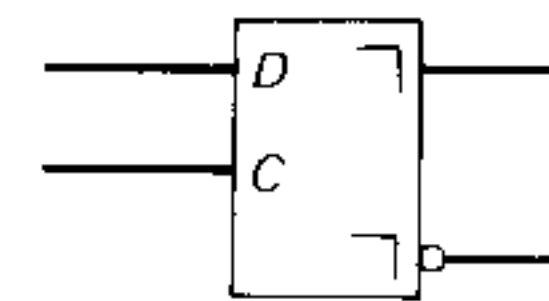
Símbolos gráficos estándar

Los símbolos gráficos estándar de los diversos tipos de multivibradores biestables se presentan en la figura 4-12. Un flip-flop o seguro está designado por un bloque de

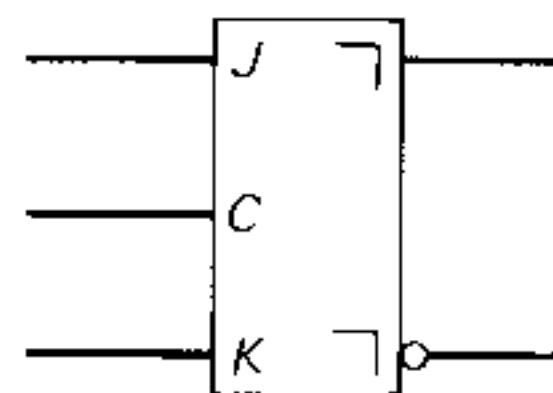
forma rectangular con entradas a la izquierda y salidas a la derecha. Una salida designa el estado normal del flip-flop, y la otra con un círculo pequeño designa la salida de complemento. El símbolo gráfico del seguro D o flip-flop D tiene entradas D y C indicadas dentro del bloque. El símbolo gráfico del multivibrador biestable JK tiene entradas J , K y C en el interior. El seguro D no tiene otros símbolos además de las entradas D y C . El amo-esclavo se considera como un flip-flop activado por flanco y se indica como tal con un símbolo L de cabeza en frente de las salidas. Esto sirve para indicar que la señal de salida cambia en el flanco descendente del pulso. El flip-flop activado por flanco tiene un símbolo en forma de punta de flecha enfrente de la letra C para designar una *entrada dinámica*. El símbolo indicador dinámico denota que el multivibrador biestable responde a las transiciones de flanco positivo de los pulsos del reloj de entrada. Un pequeño círculo fuera del bloque junto con el indicador dinámico designa una transición de flanco negativo para activar el circuito.



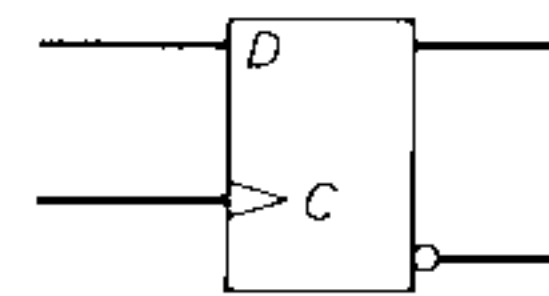
Seguro D



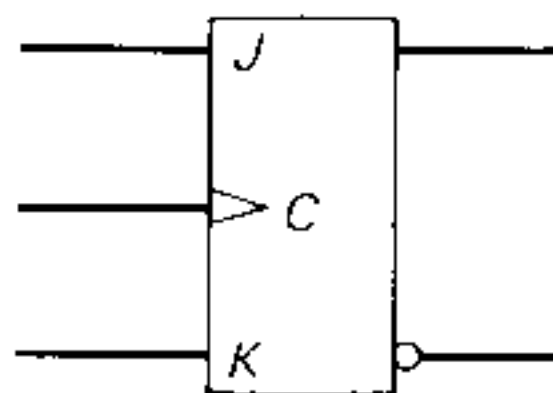
Flip-flop D amo-esclavo



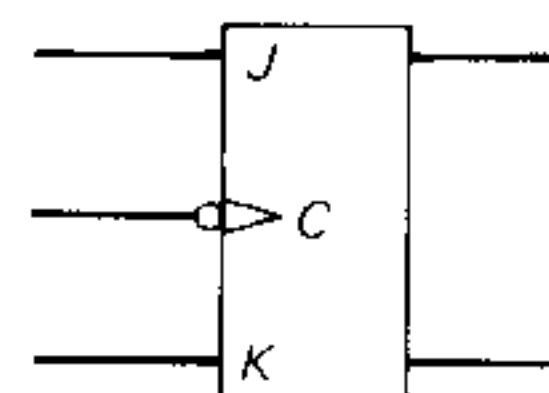
Flip-flop JK amo-esclavo



Flip-flop D activado por flanco positivo



Flip-flop JK activado por flanco positivo



Flip-flop JK activado por flanco negativo

FIGURA 4-12

Símbolos gráficos estándar de seguro y flip-flops

Cuando se utilizan diferentes tipos de flip-flops en el mismo circuito secuencial, debemos asegurarnos de que todas las salidas de los multivibradores cambien simultáneamente, ya sea que respondan a la transición positiva o a la negativa del pulso. Los flip-flops que se comporten contrario a la transición de polaridad adoptada pueden modificarse por medio de la adición de inversores en sus entradas de reloj. Un procedimiento preferido consiste en generar pulsos positivos y negativos en el generador de reloj maestro. Apliquense los pulsos positivos a flip-flops activados por pulsos (amo-esclavo) y activados por flanco negativo, y pulsos negativos a los flip-

flops activados por flanco positivo. En esta forma todas las salidas de los multivibradores cambiarán simultáneamente.

En este libro se supondrá que todos los flip-flops son del tipo activado por flanco positivo. Esto producirá un símbolo gráfico estándar o uniforme y diagramas de sincronización consistentes.

Tabla de características

Una tabla de características define las propiedades lógicas de un multivibrador biestable describiendo su operación en forma tabular. Las tablas de características de cuatro tipos de flip-flops se presentan en la tabla 4-1. Estas definen el siguiente estado como función de las entradas y el estado presente. $Q(t)$ se refiere al estado presente antes de la aplicación de un pulso. $Q(t + 1)$ es el estado siguiente un periodo de reloj después. Nótese que la entrada de pulsos en C no figura en la tabla de características, pero se implica que ocurre entre el tiempo t y $t + 1$.

TABLA 4—1
Tablas de características de flip-flops

(a) Flip-flop JK				(b) Flip-flop SR			
J	K	Q(t+1)	Operación	S	R	Q(t+1)	Operación
0	0	Q(t)	No hay cambio	0	0	Q(t)	No hay cambio
0	1	0	Reiniciación	0	1	0	Reiniciación
1	0	1	Iniciación	1	0	1	Iniciación
1	1	$\overline{Q(t)}$	Complemento	1	1	?	Indeterminada

(c) Flip-flop D			(d) Flip-flop T		
D	Q(t+1)	Operación	T	Q(t+1)	Operación
0	0	Reiniciación	0	Q(t)	No hay cambio
1	1	Iniciación	1	$\overline{Q(t)}$	Complemento

La tabla de características del multivibrador biestable JK muestra que el estado siguiente es igual al estado presente cuando las entradas J y K son iguales a 0. Esto se puede expresar como $Q(t + 1) = Q(t)$, lo que indica que el pulso de reloj no produce ningún cambio de estado. Cuando $K = 1$ y $J = 0$, el siguiente pulso de reloj reinicia el flip-flop con $Q(t + 1) = 1$. Con $J = 1$ y $K = 0$, el multivibrador se inicia con $Q(t + 1) = 1$. Cuando J y K son iguales a 1, el siguiente estado cambia al complemento del estado presente que se puede expresar como $Q(t + 1) = \overline{Q(t)}$.

El flip-flop SR es semejante al JK cuando S se sustituye por J y R por K , salvo en el caso indeterminado. El signo de interrogación del estado siguiente cuando S y R son iguales a 1 indica un siguiente estado impredecible. El multivibrador SR es importante sólo por razones históricas. Su símbolo gráfico es semejante al JK con las entradas marcadas con S y R en vez de J y K .

El siguiente estado de un flip-flop D depende sólo de la entrada D y es independiente del estado presente. Esto se puede expresar como $Q(t + 1) = D(t)$. Nótese que el multivibrador biestable D no tiene condición de cambio. Esta condición se

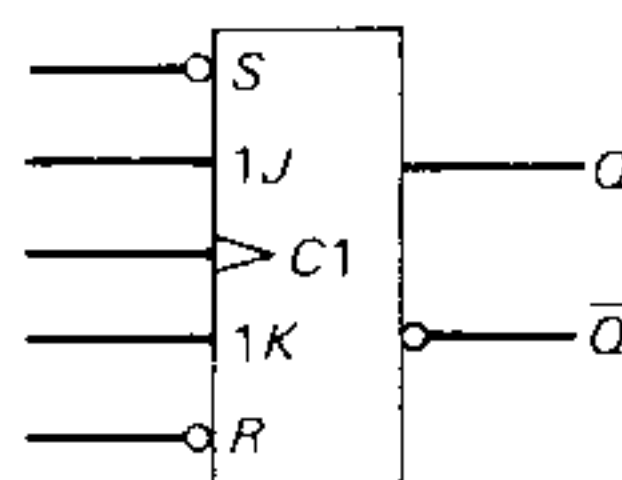
puede obtener inhabilitando los pulsos de reloj de la entrada C o bien dejando los pulsos de reloj y volviendo a conectar la salida a la entrada D cuando el estado del flip-flop deba mantenerse sin cambio.

El flip-flop T (articulador) que se presenta en la tabla 4-1 se obtiene a partir de un flip-flop JK cuando las entradas J y K están enlazadas. El símbolo gráfico del multivibrador T es el mismo que el de JK salvo que las entradas J y K están conectadas por el exterior para producir una sola entrada marcada como T . La tabla de características tiene sólo dos condiciones. Cuando $T = 0$ ($J = K = 0$) un pulso de reloj no cambia de estado. Cuando $T = 1$ ($J = K = 1$) un pulso de reloj complementa el estado del multivibrador biestable. Al igual que el SR, el flip-flop T es importante sólo por motivos históricos y se obtiene sin dificultad a partir del JK cuando se necesita.

Entradas directas

Los multivibradores biestables de que se dispone en paquetes de circuitos integrados ofrecen entradas especiales para iniciar y reiniciar el flip-flop en forma asincrónica. Estas entradas suelen denominarse iniciación directa y reiniciación directa, y afectan a la salida en el *nivel* negativo (o positivo) de la señal sin que se necesite un reloj. Cuando se enciende la fuente de energía de un sistema digital, los estados de sus multivibradores biestables pueden ser cualquiera. Las entradas directas sirven para llevar todos los flip-flops de un sistema digital a un estado inicial antes de su operación controlada por reloj.

El símbolo gráfico del flip-flop JK con iniciación y reiniciación directas se ilustra en la figura 4-13. Las anotaciones $C1$, $1J$ y $1K$ son ejemplos de dependencia de control. Una entrada rotulada como Cn , donde n es un número cualquiera, es una entrada de control que controla todas las otras entradas que empiezan con el número n . En este caso, $C1$ controla las entradas $1J$ y $1K$. S y R no tienen un 1 en frente de la letra y, por lo tanto, no son controlados por un reloj en $C1$. Las entradas S y R tienen un pequeño círculo en la línea de entrada para indicar que están activas cuando se encuentran en el nivel 0 lógico.



(a) Símbolo gráfico

S	R	C	J	K	Q	\bar{Q}
0	1	X	X	X	1	0
1	0	X	X	X	0	1
0	0	X	X	X	1	1
1	1	↑	0	0	No hay cambio	
1	1	↑	0	1	0 1	
1	1	↑	1	0	1 0	
1	1	↑	1	1	Complemento	

(b) Tabla de funciones

FIGURA 4-13

Flip-flop JK con iniciación y reiniciación directas

La tabla de funciones especifica la operación del circuito. Los tres primeros registros de la tabla especifican la operación de las entradas directas S y R . Estas entradas se comportan como un seguro NAND SR (véase la figura 4-4) y son independientes del reloj y de las entradas J y K . Los últimos cuatro registros de la tabla de funciones especifican la operación del reloj cuando las entradas S y R se encuentran

inactivas y en el nivel 1 lógico. El reloj en C se presenta con una flecha dirigida hacia arriba que indica que el flip-flop es del tipo que se activa por flanco positivo. Las entradas J y K responden al reloj en la forma habitual.

4-4 PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS

El comportamiento de un circuito secuencial se determina a partir de las entradas, las salidas y el estado de sus multivibradores biestables. Las salidas y el estado siguiente son función de las entradas y del estado presente. El análisis de un circuito secuencial consiste en obtener una descripción adecuada que demuestre la secuencia temporal de entradas, salidas y estados de los flip-flops.

Un diagrama de lógica se reconoce como un circuito secuencial si éste incluye flip-flops. Los multivibradores pueden ser de cualquier tipo y el diagrama de lógica puede o no incluir un circuito combinatorio. En esta sección presentamos una representación algebraica para especificar el diagrama de lógica de un circuito secuencial. Luego se presenta una tabla y un diagrama de estados que describen el comportamiento del circuito secuencial. En toda la sección se utilizarán ejemplos específicos para ilustrar los diversos procedimientos.

Ecuaciones de entrada

El diagrama de lógica de un circuito secuencial consta de flip-flops y compuertas combinatorias. El conocimiento de este tipo de multivibradores biestables utilizados y una lista de funciones booleanas para el circuito combinatorio, ofrecen toda la información que se necesita para trazar el diagrama de lógica del circuito secuencial. La parte del circuito combinatorio que genera las señales de las entradas de los flip-flops, se puede describir mediante un conjunto de funciones booleanas llamadas *ecuaciones de entrada*. Adoptaremos la convención de utilizar el símbolo de entrada del multivibrador biestable para denotar la variable de la ecuación de entrada y un subíndice para designar el nombre del flip-flop. Para poner un ejemplo, considérense las siguientes ecuaciones de entrada de flip-flops.

$$J_A = XB + \bar{Y}C$$

$$K_A = Y\bar{B} + C$$

J_A y K_A son dos variables booleanas. Los símbolos J y K son las entradas de un flip-flop JK. La letra subíndice A es el nombre simbólico del diagrama de lógica de la figura 4-14. Al flip-flop JK se le ha asignado una letra A , que es el símbolo de salida. Este tiene dos entradas, J y K , y un reloj de entrada C . El circuito combinatorio representado en el diagrama, es la ejecución de la expresión algebraica dada por las ecuaciones de entrada. Las salidas del circuito combinatorio, denotadas por J_A y K_A , se aplican después a las entradas J y K del flip-flop A .

De este ejemplo vemos que una ecuación de entrada de un flip-flop es una expresión booleana de un circuito combinatorio. El símbolo subíndice es un nombre de variable de la salida del circuito combinatorio. Esta salida está conectada siempre a la entrada de un multivibrador biestable; de aquí el nombre de ecuación de entrada.

Tab

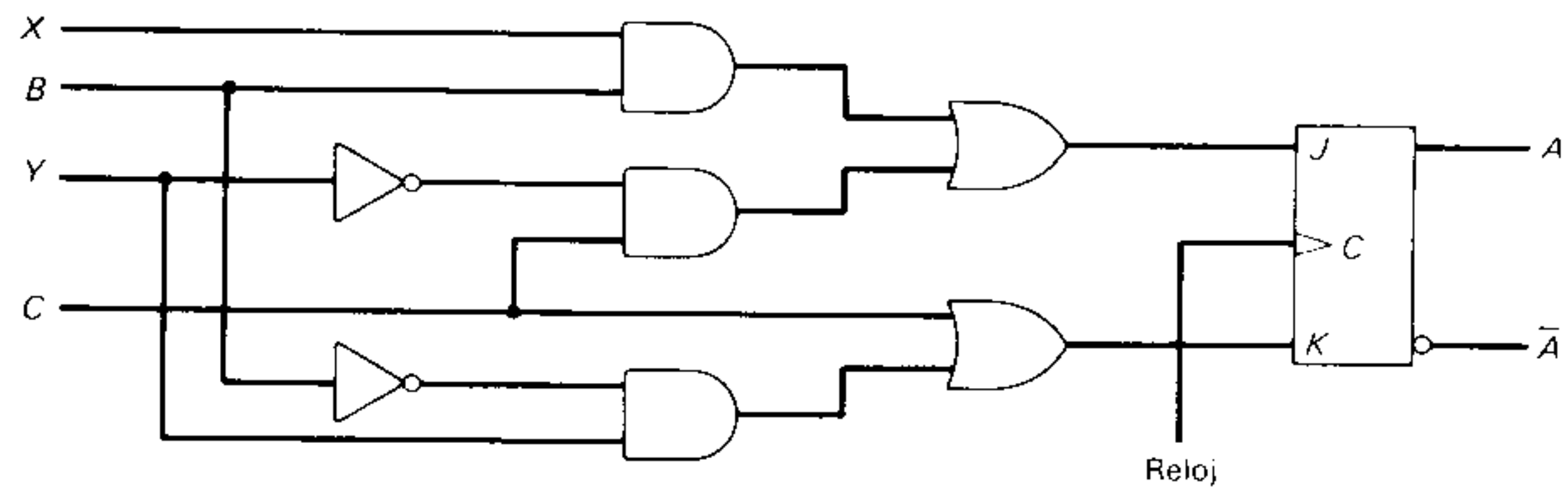


FIGURA 4-14

Ejecución de ecuaciones de entrada

Las ecuaciones de entrada de multivibradores biestables constituyen una expresión algebraica adecuada para especificar el diagrama de lógica de un circuito secuencial. Estas implican el tipo de flip-flop a partir del símbolo alfabético, y especifican completamente el circuito combinatorio que excita a los multivibradores. El tiempo no está incluido en forma explícita en estas ecuaciones pero resulta implícito del reloj en la entrada C del multivibrador.

En la figura 4-15 se presenta un ejemplo de circuito secuencial, el cual consta de dos flip-flops de tipo D, una entrada X y una salida Y ; puede especificarse por medio de las ecuaciones siguientes:

$$D_A = AX + BX$$

$$D_B = \bar{A}X$$

$$Y = (A + B)\bar{X}$$

Las dos primeras son las ecuaciones de entrada de los flip-flops y la tercera ecuación especifica la salida Y . Nótese que las ecuaciones de entrada especifican el símbolo D que es el mismo que el símbolo de entrada de los multivibradores biestables. Los subíndices A y B designan los nombres de salida dados a los dos flip-flops.

Tabla de estados

La secuencia de tiempo de entradas, salidas y estados de flip-flops puede enumerarse en una *tabla de estados*. La tabla de estados del circuito de la figura 4-15 se muestra en la tabla 4-2, y consta de cuatro secciones rotuladas como *estado presente*, *entrada*, *estado siguiente* y *salida*. La sección del estado presente muestra los estados de los flip-flops A y B en cualquier tiempo dado t . La sección de salida da un valor de X para cada estado presente posible. La sección del estado siguiente muestra los estados de los flip-flops un periodo de reloj después al tiempo $t + 1$. La sección de salida da el valor de Y para cada estado presente.

La obtención de una tabla de estados consiste en enumerar primero todas las combinaciones binarias posibles de estado presente y entradas. En este caso tenemos ocho combinaciones binarias, de la 000 a la 111. Después, los valores del estado siguiente se determinan a partir del diagrama de lógica o a partir de las ecuaciones de entrada. Para un flip-flop D tenemos la relación $A(t + 1) = D_A(t)$. Esto quiere decir que el estado siguiente del flip-flop A es igual al valor presente de su entrada D (véa-

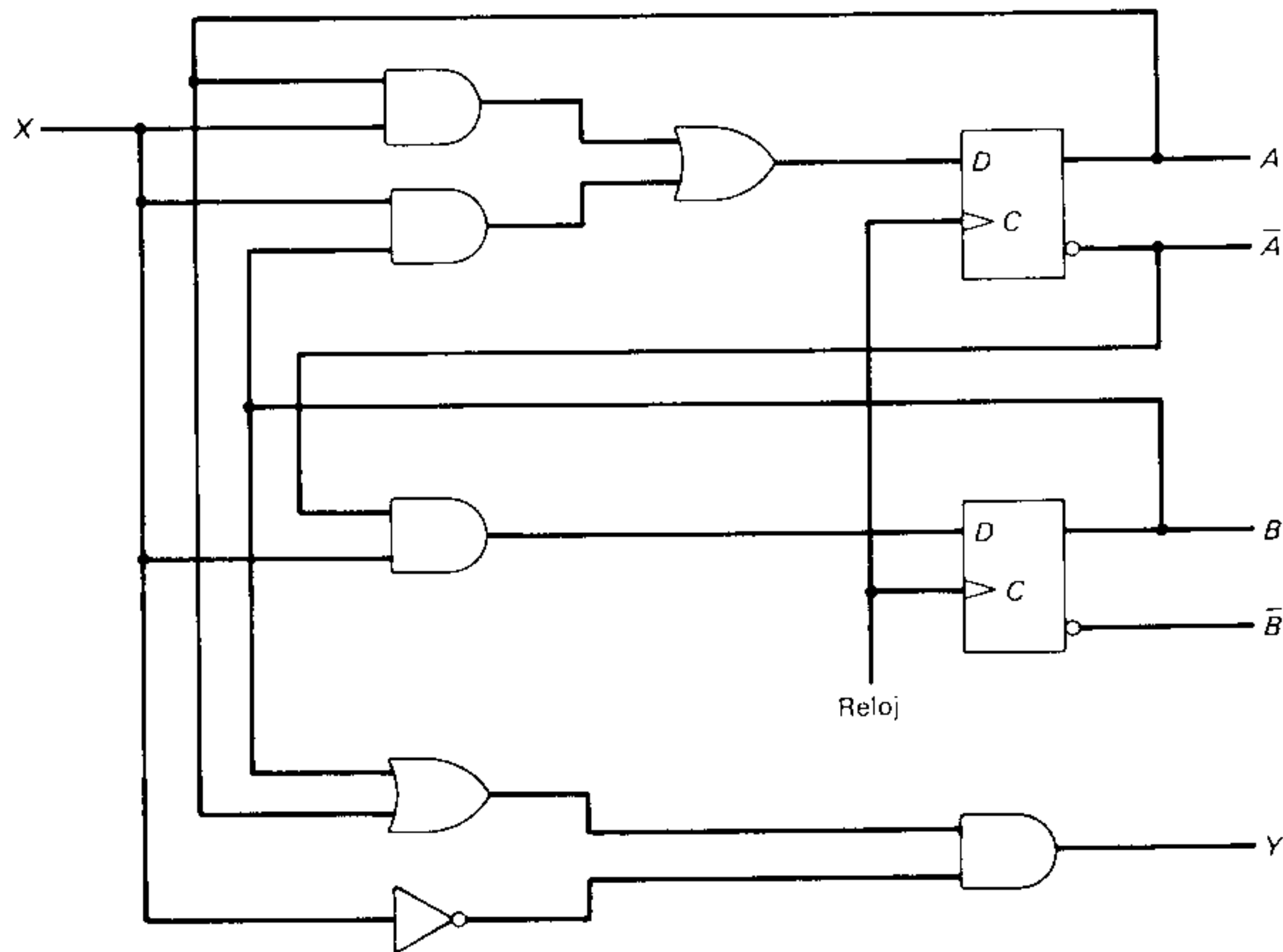


FIGURA 4—15
Ejemplo de un circuito secuencial

TABLA 4—2
Tabla de estados del circuito de la figura 4-15

Estado presente		Entrada X	Estado siguiente		Salida Y
A	B		A	B	
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	0
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0

se la tabla 4-1). El valor de la entrada D se especifica en la ecuación de entrada como función del estado presente de A y B y la entrada X . Por lo tanto, el estado siguiente del multivibrador A debe satisfacer la ecuación

$$A(t + 1) = D_A = AX + BX$$

La sección del estado siguiente de la tabla de estados en la columna A tiene tres unos donde el estado presente y el valor de entrada satisfacen las condiciones $AX = 11$ o $BX = 11$. En forma análoga, el estado siguiente del flip-flop A debe satisfacer la ecuación

$$B(t + 1) = D_B = \bar{A}X$$

y es igual a 1 cuando el estado presente de A es 0 y la entrada X es igual a 1. La columna de salida se determina a partir de la ecuación de salida

$$Y = A\bar{X} + B\bar{X}$$

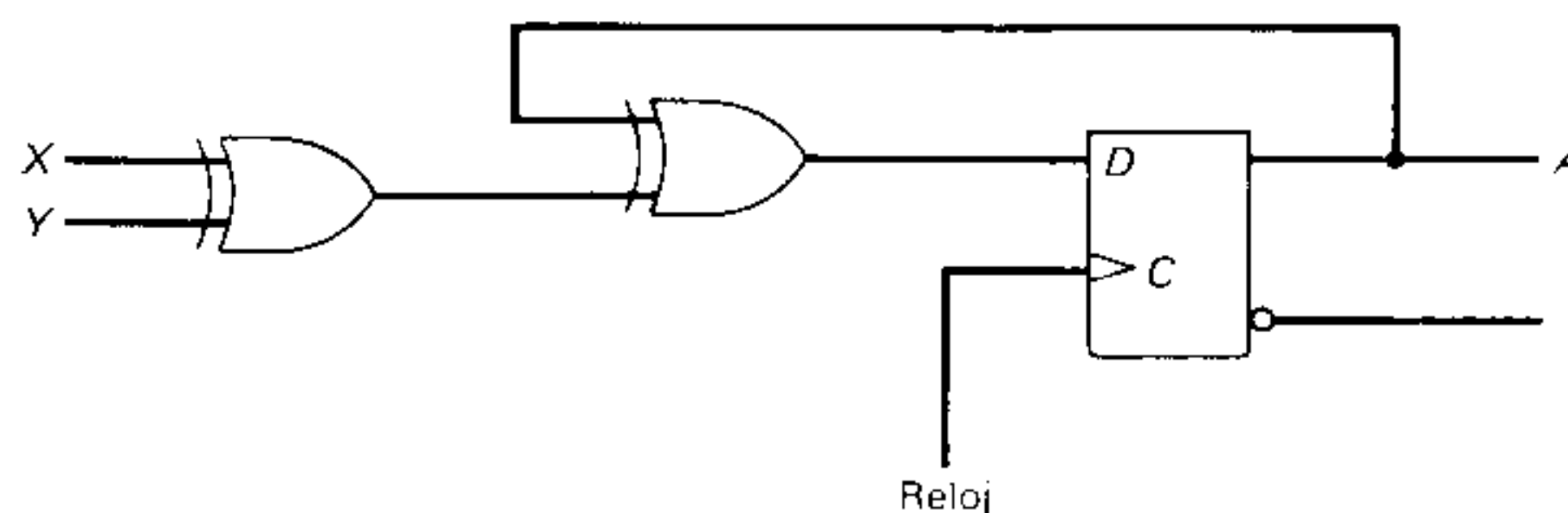
La tabla de estados de un circuito secuencial cualquiera con flip-flops de tipo D se obtiene por el procedimiento descrito en el ejemplo anterior. En general, un circuito secuencial con m flip-flops y n entradas necesita 2^{m+n} renglones en la tabla de estados. Los números binarios del 0 al $2^{m+n} - 1$ están incluidos en las columnas del estado presente y de entradas. La sección del estado siguiente tiene m columnas, una para cada flip-flop. Los valores binarios del estado siguiente se derivan directamente de las ecuaciones de entrada del flip-flop D. La sección de salida tiene tantas columnas como variables de salida hay. Su valor binario se obtiene a partir del circuito o de la función booleana en la misma forma que en la tabla de verdad.

Las salidas externas de un circuito secuencial pueden provenir de compuertas lógicas o de salidas de multivibradores biestables. La sección de salida de la tabla de estados se necesita sólo si hay salidas de compuertas lógicas. Cualquier salida externa tomada directamente de multivibradores biestables ya figura en las columnas del estado presente de la tabla de estados. Por lo tanto, la sección de salida de la tabla de estados se excluye si no hay salidas externas de compuertas.

Para poner un ejemplo, supóngase que se desea obtener el diagrama de lógica y la tabla de estados de un circuito secuencial que especifica la ecuación de entrada

$$D_A = A \oplus X \oplus Y$$

El símbolo D_A implica un flip-flop de tipo D con salida designada por la letra A . Las variables X y Y se toman como entradas. El diagrama de lógica y la tabla de estados se muestran en la figura 4-16. La tabla de estados tiene una columna para el estado presente y dos para las entradas. No hay salidas externas. La columna del estado siguiente se obtiene de la ecuación de entrada que especifica una función impar (refiérase a la sección 2-7).



Estado presente			Entradas		Estado siguiente	
A			X	Y	A	
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1
0	1	0	1	0	1	1
0	1	1	0	1	0	0
1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1

(a) Diagrama de lógica

(b) Tabla de estados

FIGURA 4-16

Diagrama de lógica y tabla de estados $D_A = A \oplus X \oplus Y$

Análisis con flip-flops JK

Hasta ahora hemos considerado la tabla de estados de circuitos secuenciales que emplean multivibradores biestables de tipo D, y en ese caso los valores del estado siguiente se obtienen directamente de las ecuaciones de entrada. Para circuitos con otros tipos de flip-flops como JK, los valores del estado siguiente se obtienen siguiendo un procedimiento de dos pasos:

- 1. Obténganse los valores binarios de cada ecuación de entrada de los flip-flops en términos del estado presente y de variables de entrada.
- 2. Utilícese la característica del flip-flop correspondiente de la tabla 4-1 a fin de determinar el estado siguiente.

Para ilustrar este procedimiento, considérese el circuito secuencial con dos flip-flops *A* y *B* y una entrada *X* especificada por las siguientes ecuaciones de entrada:

$$\begin{aligned} J_A &= B & K_A &= B\bar{X} \\ J_B &= \bar{X} & K_B &= A\bar{X} + \bar{A}X \end{aligned}$$

La tabla de estados se presenta en la tabla 4-3. Los valores binarios colocados en las columnas rotuladas como entradas de los flip-flops no son parte de la tabla de estados. Estos se necesitan con el fin de evaluar el estado siguiente, según se especifica en el paso 1 del procedimiento antes citado. Estos valores binarios se obtienen directamente de las cuatro ecuaciones de entrada en forma similar a la que se utiliza para obtener una tabla de verdad a partir de una expresión algebraica. El siguiente estado de cada flip-flop se evalúa a partir de las entradas *J* y *K* correspondientes y la tabla de características del multivibrador JK que se presenta en la tabla 4-1. Hay cuatro casos que se deben considerar. Cuando *J* = 1 y *K* = 0, el estado siguiente es 1. Cuando *J* = 0 y *K* = 1, el estado siguiente es 0. Cuando *J* = *K* = 0, no hay cambio de estado y el valor del estado siguiente es el mismo que el estado presente. Cuando *J* = *K* = 1, el bit del estado siguiente es el complemento del bit del estado presente. En la tabla se presentan ejemplos de los dos últimos casos cuando el estado presente y la entrada (*ABX*) es 100. *J_A* y *K_A* son igual a 0 y el estado presente de *A* es 1. Por lo tanto, el es-

TABLA 4—3
Tabla de estados de un circuito con flip-flops JK

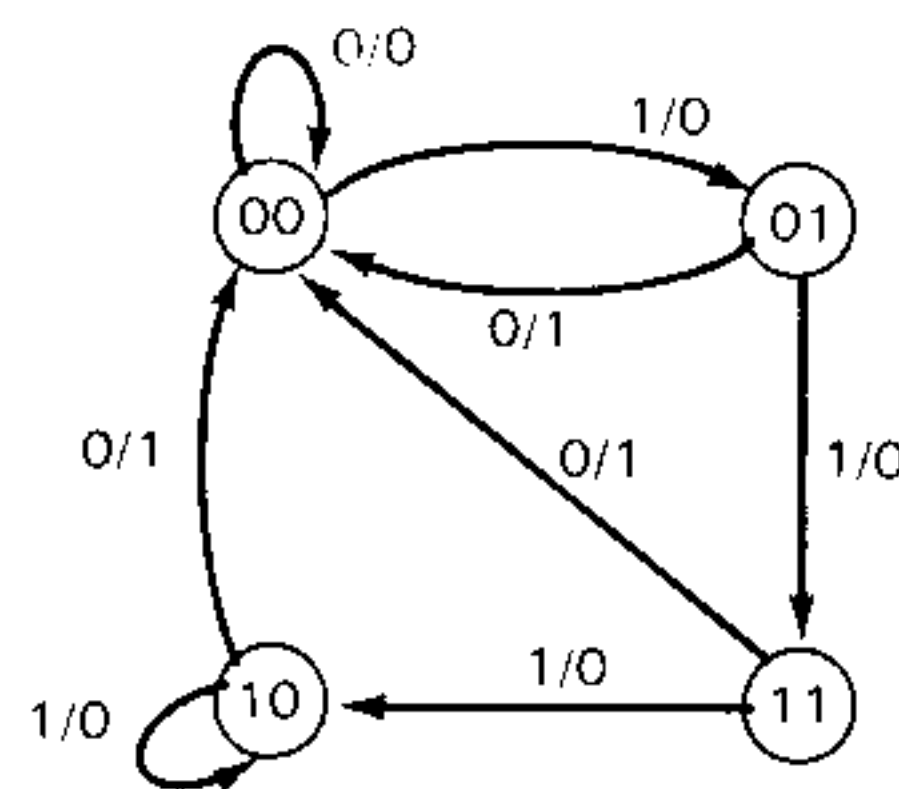
Estado presente		Entrada	Estado siguiente		Entradas del flip-flop			
<i>A</i>	<i>B</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>J_A</i>	<i>K_A</i>	<i>J_B</i>	<i>K_B</i>
0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1	1	0
0	1	1	1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	0	0	0

Diagram

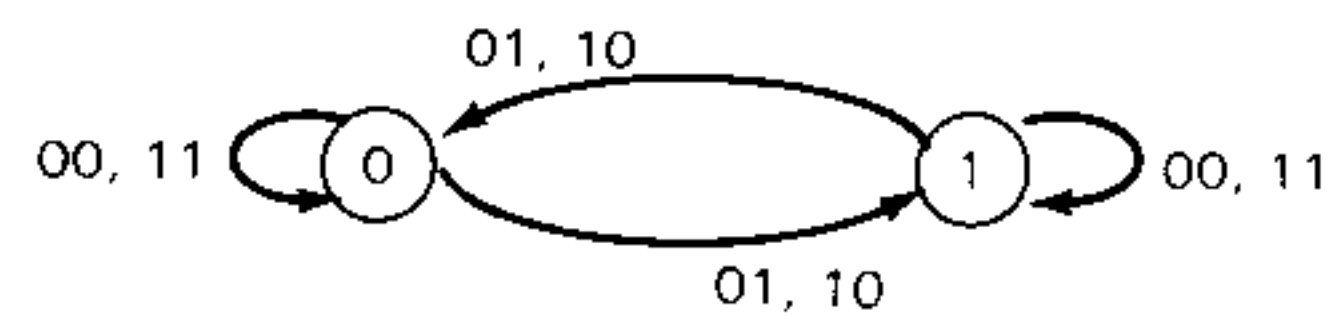
tado siguiente de A se mantiene sin cambio y es igual a 1. En el mismo renglón de la tabla, J_B y K_B son igual a 1. Como el estado presente de B es 0, el siguiente estado de B se complementa y cambia a 1.

Diagrama de estados

La información que se obtiene en una tabla de estados puede representarse gráficamente en forma de un diagrama de estados, en el cual un estado se representa por un círculo, y la transición entre estados se indica a través de líneas dirigidas que conectan los círculos. En la figura 4-17 se dan ejemplos de diagramas de estado. El diagrama de la parte (a) es del circuito secuencial de la figura 4-15 y la tabla de estados de la tabla 4-2. El diagrama de estados ofrece la misma información que la tabla de estados y se obtiene directamente de éste. El número binario contenido en cada círculo identifica el estado de los flip-flops. Las líneas dirigidas se rotulan con dos números binarios separados por una diagonal. El valor de entrada durante el estado presente se rotula primero y el número que va después de la diagonal indica la salida durante el estado presente. Por ejemplo, la línea dirigida del estado 00 al 01 se rotula como 1/0, lo que significa que cuando el circuito secuencial está en el estado presente 00 y la entrada es 1, la salida es 0. Después de la siguiente transición del reloj, el circuito pasa al estado siguiente, 01. La misma transición del reloj puede cambiar el valor de entrada. Si la entrada cambia a 0 entonces la salida se convierte en 1, pero si la entrada permanece en 1 la salida se queda en 0. Esta información se obtiene del diagrama de estados junto con las dos líneas dirigidas que salen del círculo con el estado 01. Una línea dirigida que conecta a un círculo con este mismo indica que no hay cambio de estado.



(a) Del circuito de la figura 4-15 y la tabla 4-2



(b) Del circuito de la figura 4-16

FIGURA 4-17

Diagramas de estados

El diagrama de estados de la figura 4-17(b) corresponde al circuito secuencial de la figura 4-16. Aquí se tiene sólo un flip-flop con dos estados. Hay dos entradas binarias y no hay salida. La diagonal no se incluye cuando no hay salidas y sólo las entradas se indican a lo largo de las líneas dirigidas. Hay dos condiciones de entrada para cada transición de estado en el diagrama y se encuentran separadas por una coma. Normalmente, cuando hay dos variables de entrada, cada estado tendrá cuatro líneas dirigidas emanando del círculo correspondiente, una para cada combinación binaria de los valores de entrada.

No hay diferencia entre una tabla y un diagrama de estados, salvo en la forma de representación. La tabla de estados es más fácil de obtener de un diagrama de lógica y ecuaciones de entrada dados. El diagrama de estados se deduce directamente de la tabla de estados, ofrece una vista pictórica de transiciones de estado y es la forma adecuada para la interpretación humana de la operación del circuito. Por ejemplo, el diagrama de la figura 4-17(a) muestra con claridad que, comenzando en el estado 00, la salida es 0 en tanto que la entrada se mantenga en 1. La primera entrada 0 después de una cadena de unos da una salida de 1 y devuelve el circuito al estado inicial de 00. El diagrama de estados de la figura 4-17(b) señala que el circuito se mantiene en un estado dado en tanto que las dos entradas tengan el mismo valor (00 u 11). Sólo hay una transición de estado cuando las dos entradas son diferentes (01 o 10).

4-5 DISEÑO CON MULTIVIBRADORES BIESTABLES D

El diseño de circuitos secuenciales controlados por reloj comienza a partir de un conjunto de especificaciones y culmina en un diagrama de lógica o una lista de funciones booleanas de la cual se puede obtener el diagrama de lógica. En contraste con un circuito combinatorio, que especifica totalmente una tabla de verdad, un circuito secuencial requiere de una tabla de estados para su especificación. El primer paso en el diseño del circuito secuencial es obtener una tabla de estados o una representación equivalente, como un diagrama de estados.

Un circuito secuencial sincrónico está formado de flip-flops y compuertas combinatorias. El diseño del circuito consiste en elegir los multivibradores biestables y hallar una estructura de circuito combinatorio que, junto con los flip-flops, produzca un circuito que cumpla con las especificaciones señaladas. El número de flip-flops se determina a partir del número de estados en el circuito, entendiendo que n flip-flops pueden representar hasta 2^n estados binarios. El circuito combinatorio se obtiene a partir de la tabla de estados evaluando las ecuaciones de entrada y las funciones de salida de los multivibradores. De hecho, cuando se determinan el tipo y número de flip-flops, el proceso de diseño implica una transformación de un problema de circuito secuencial a uno de circuito combinatorio. En esta forma se pueden aplicar las técnicas de diseño de circuitos combinatorios.

Procedimiento de diseño

En esta sección se presenta un procedimiento de diseño de circuitos secuenciales con flip-flops de tipo D. El diseño con un flip-flop JK o de cualquier otra clase se convierte en la sección que sigue. El procedimiento de diseño se ejecuta siguiendo los pasos que se indican a continuación:

1. Obténgase la tabla de estados a partir del planteamiento del problema o del diagrama de estados.
2. Determinéense las ecuaciones de entrada de los flip-flops a partir de las condiciones de estado siguiente de la tabla de estados.
3. Derívense las funciones de salida si hay condiciones de entrada en la tabla de estados.

4. Simplifiquense las ecuaciones de entrada y funciones de salida.
5. Trácese el diagrama de lógica con flip-flops D y compuertas combinatorias, como lo especifican las ecuaciones de entrada y funciones de salida.

El procedimiento de diseño se ilustrará por medio del ejemplo que sigue. Se desea diseñar un circuito secuencial controlado por reloj que opere de acuerdo con el diagrama de estados que se presenta en la figura 4-18. El diagrama especifica cuatro estados, una entrada y una salida. Se necesitan dos flip-flops D para representar los cuatro estados. Rotúlense las salidas de los multivibradores biestables con las letras *A* y *B*, la entrada con *X* y la salida con *Y*.

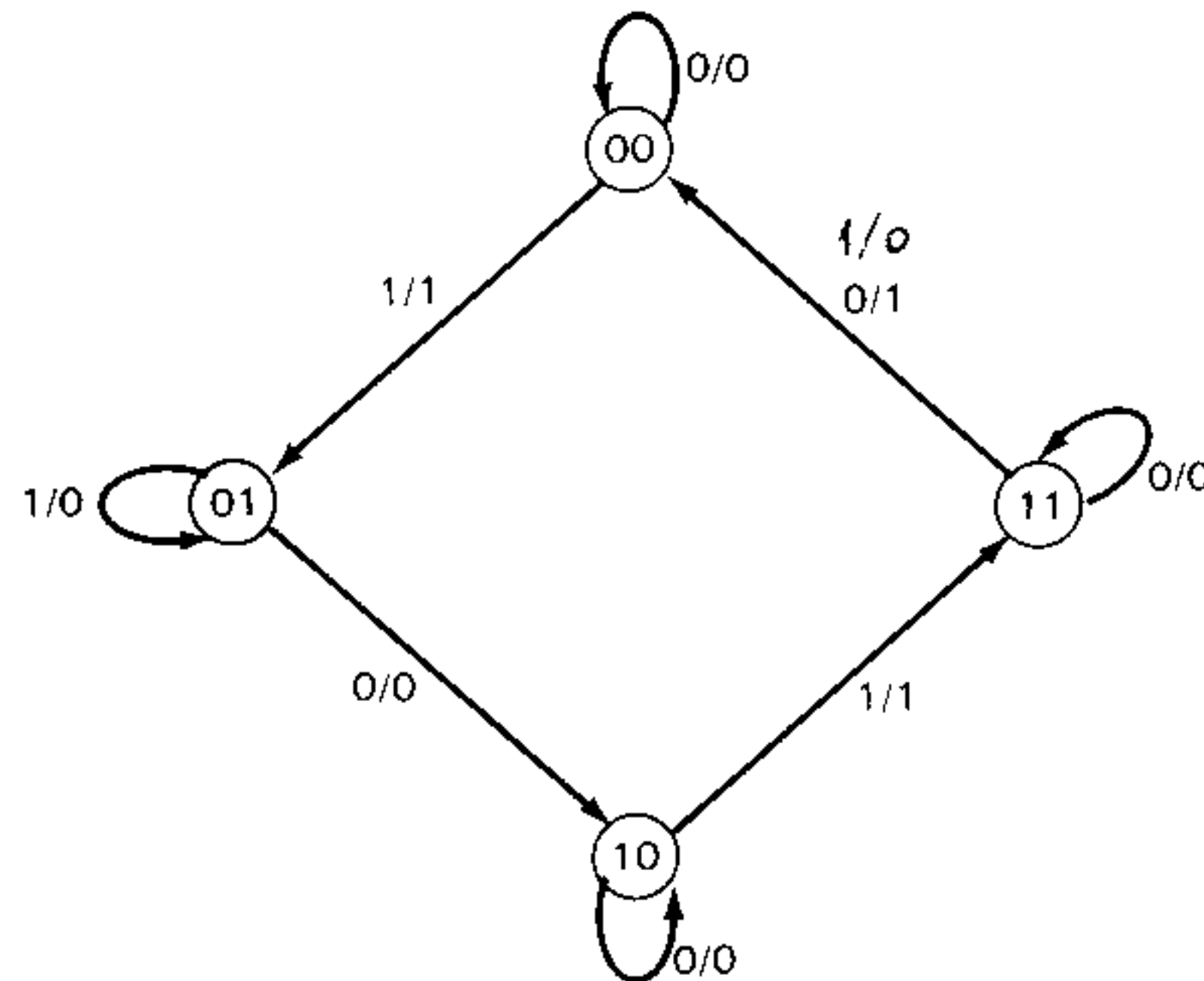


FIGURA 4—18

Diagrama de estados del ejemplo de diseño

La tabla de estados del circuito se presenta en la tabla 4-4. Esta se obtiene directamente del diagrama de estados. Las ecuaciones de entrada de los multivibradores biestables se obtienen a partir de los valores del estado siguiente. La función de salida está dada por los valores binarios de *Y*. Las tres ecuaciones booleanas de las com-

TABLA 4—4

Tabla de estados del ejemplo de diseño

Estado presente		Entrada <i>X</i>	Estado siguiente		Salida <i>Y</i>
<i>A</i>	<i>B</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	1
0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	1
1	1	0	1	1	0
1	1	1	0	0	0

puertas combinatorias se pueden expresar como una suma de minitérminos de las variables de estado presente A y B y la variable de entrada X .

$$A(t + 1) = D_A(A, B, X) = \Sigma m(2, 4, 5, 6)$$

$$B(t + 1) = D_B(A, B, X) = \Sigma m(1, 3, 5, 6)$$

$$Y(A, B, X) = \Sigma m(1, 5)$$

Las funciones booleanas se simplifican por medio de los mapas representados en la figura 4-19. Las funciones simplificadas son:

$$D_A = A\bar{B} + B\bar{X}$$

$$D_B = \bar{A}X + \bar{B}X + AB\bar{X}$$

$$Y = \bar{B}X$$

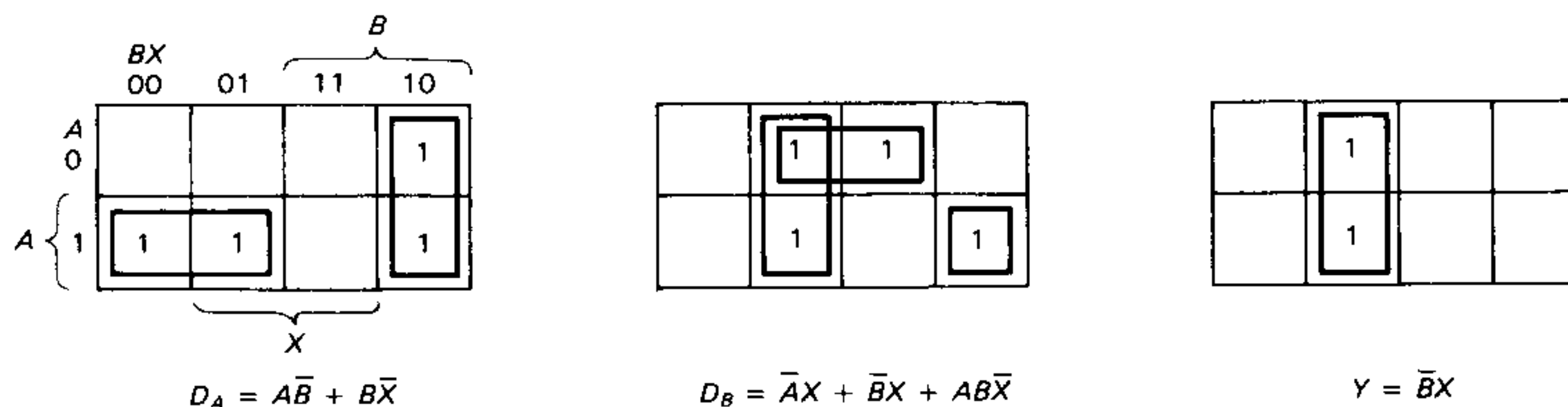


FIGURA 4—19

Mapas de ecuaciones de entrada y salida Y

El diagrama de lógica del circuito secuencial se presenta en la figura 4-20.

Diseño con estados no usados

Un circuito con n flip-flops tendría 2^n estados binarios. Hay ocasiones en que un circuito secuencial utiliza un número menor de estados máximo posible. Los estados que no se usan para especificar el circuito secuencial no se incluyen en la tabla de estados. Cuando se simplifican las ecuaciones de entrada, los estados no usados se pueden tratar como condiciones no importa.

Considérese la tabla de estados que se presenta en la tabla 4-5, la cual define tres multivibradores biestables, A , B y C , y una entrada X . No hay columna de salida que se refiera a que los multivibradores biestables sirven como salidas del circuito. Con tres flip-flops es posible especificar ocho estados, pero la tabla de estados cita sólo cinco estados. Hay tres estados no usados que no están incluidos en la tabla. Estos son los estados binarios 000, 110 y 111. Cuando se incluye una entrada de 0 o 1 con los valores de estado presente no usados se obtienen seis combinaciones no usadas de las columnas del estado presente y de entradas. Estas son 0000, 0001, 1100, 1101, 1110 y 1111. Estas seis combinaciones no figuran en la tabla de estados y se pueden tratar como minitérminos no importa.

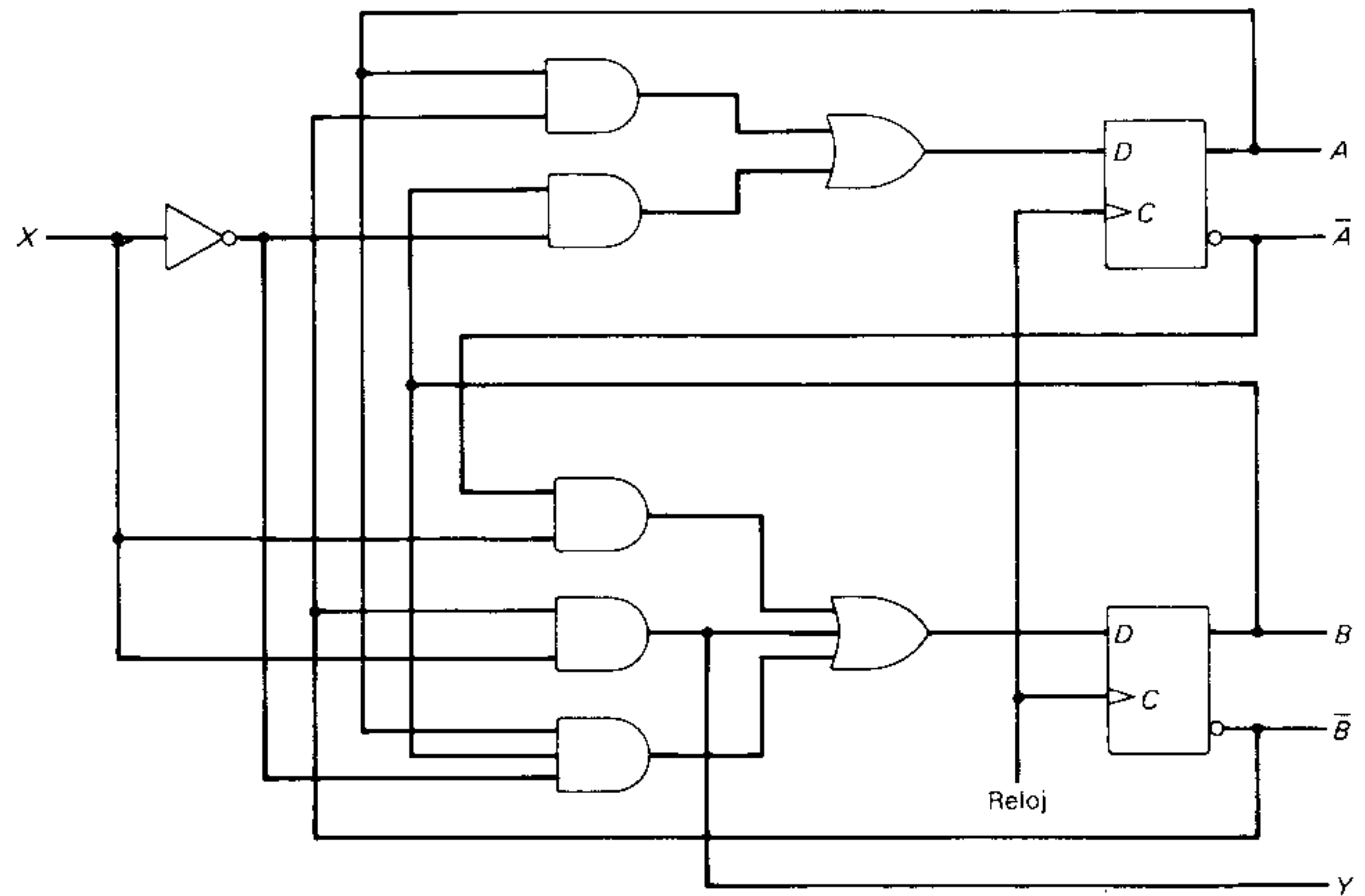


FIGURA 4—20

Diagrama de lógica de un circuito secuencial con flip-flops D

TABLA 4—5

Tabla de estados del segundo ejemplo de diseño

Estado presente			Entrada X	Estado siguiente		
A	B	C		A	B	C
0	0	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0	0
0	1	1	0	0	0	1
0	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0

Las tres ecuaciones de entrada de los flip-flops D se obtienen a partir de los valores del estado siguiente y se simplifican en los mapas de la figura 4-21. Cada mapa tiene seis minitérminos no importa en los cuadrados correspondientes a los números binarios 0, 1, 12, 13, 14 y 15. Las ecuaciones simplificadas son

$$D_A = AX + BX + \overline{B}\overline{C}$$

$$D_B = \overline{A}\overline{C}\overline{X} + \overline{A}\overline{B}X$$

$$D_C = \overline{X}$$

El diagrama de lógica se puede obtener directamente de las ecuaciones de entrada y no se trazará aquí.

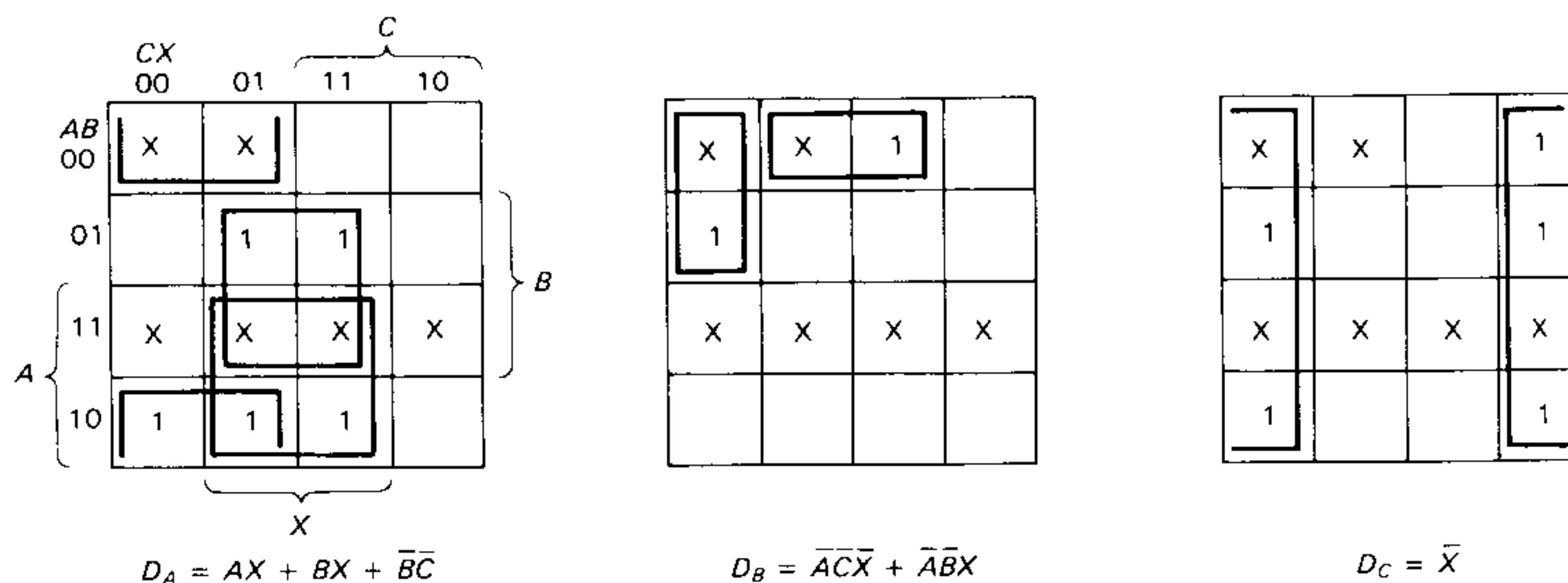


FIGURA 4—21

Mapas para simplificar ecuaciones de entrada

Un factor que se ha rechazado hasta ahora en el diseño es el estado inicial de un circuito secuencial. Como no se sabe en qué estado quedarán los flip-flops cuando se encienda la fuente de energía de un sistema digital, se acostumbra construir un interruptor *de reiniciación* amo para iniciar los estados de todos los multivibradores biestables del sistema. Típicamente, la señal de reiniciación amo se aplica a todos los flip-flops en sus entradas asincrónicas (véase la figura 4-13) antes de que se inicien las operaciones controladas por reloj. En la mayoría de los casos, los multivibradores biestables se reinician a 0, pero algunos se pueden iniciar a 1, dependiendo del estado inicial que se desee.

Hay ocasiones en las que el circuito no se reinicia a ningún estado inicial en particular y puede terminar en un estado no usado. En estos casos es necesario asegurarnos de que el circuito pase finalmente a uno de los estados válidos, de manera que pueda reanudar la operación normal. En caso contrario, si el circuito secuencial circula entre estados no usados, no habrá manera de devolverlo a su secuencia pretendida de transiciones de estado. Aunque se puede suponer que esta condición indeseable no ocurrirá, un diseñador cauteloso debe cerciorarse de que si ocurre, el circuito reanudará sus operaciones adecuadas después de algunos pulsos de reloj.

Se dijo antes que los estados no usados de un circuito secuencial pueden tratarse como condiciones no importa. Cuando se diseña el circuito, los n flip-flops del sistema pueden estar en cualesquiera de 2^n estados posibles. Si algunos de éstos se tomaran como condiciones no importa, debería analizarse el circuito para determinar el efecto de estos estados no usados. El estado siguiente de un estado no usado puede determinarse a partir del análisis del circuito. En cualquier caso, siempre conviene analizar un circuito obtenido de un diseño para asegurarnos de que no se hayan cometido errores durante el proceso de diseño.

Como ejemplo ilustrativo, analizaremos el circuito secuencial obtenido del diseño previo para determinar el efecto de los estados no usados. El análisis del circuito se puede realizar por el método que se describió en la sección anterior. También pueden ser de ayuda los mapas de las ecuaciones de entrada. Necesitamos comenzar

entrada y

	1
	1
x	x
	1

\bar{x}

cial de un
cuando se
uir un in-
ibradores
todos los
se inician
ivibrado-
do del es-

al en par-
asegurar-
nera que
encial cir-
a preten-
indesea-
l circuito

n tratarse
del siste-
se toma-
rminar el
do puede
conviene
ayan co-

del dise-
circuito
También
comenzar

partiendo del diagrama de lógica o de las ecuaciones de entrada que especifican el diagrama de lógica y obtener la tabla de estados, incluyendo los ocho estados que pueden mantener los tres multivibradores biestables. Si la tabla de estados derivada coincide con la información de la tabla 4-5, entonces sabemos que el diseño es correcto. Además, debemos determinar los estados siguientes a partir de los estados no usados 000, 110 y 111.

Los mapas de la figura 4-21 pueden ayudar a encontrar el estado siguiente a partir de cada uno de los estados no usados. Tómese por ejemplo el estado no usado 000. Si el circuito exhibe una señal de ruido y pasa erróneamente al estado 000, una entrada $X = 0$ transferirá el circuito a algún estado siguiente y una entrada $X = 1$ lo transferirá a otro estado siguiente (o al mismo). Primero analizamos el minitérmino $ABCX = 0000$ en los tres mapas (estado presente 000 y entrada 0). Notamos que este minitérmino se toma con los unos de la función en los tres casos. Esto quiere decir que las salidas de los tres flip-flops D pasarán a 1 durante la siguiente transición del reloj, haciendo que el estado siguiente sea 111. El minitérmino $ABCX = 0001$ (estado presente 000 y entrada 1) se incluye con los unos en D_A y D_B y con los ceros en D_C . En consecuencia, el estado siguiente en este caso será 110. El efecto de los otros dos estados no usados puede determinarse en forma semejante a partir de los minitérminos 1100 al 1111.

El resultado del análisis se muestra en el diagrama de estados de la figura 4-22. El circuito opera según el diseño en tanto que se mantenga en los estados 001, 010, 011, 100 y 101. Si el circuito es forzado a uno de los estados no usados 000, 110 o 111 debido a una alteración externa, finalmente pasa a uno de los estados válidos en uno o dos periodos del reloj. Por lo tanto se dice que el circuito es *autocorrectivo*, porque al final pasa a un estado válido del cual sigue operando según se requiere.

Una situación indeseable ocurre si el circuito, cuando se encuentra en un estado no usado, circula y permanece entre estados no usados para todas las combinaciones de entradas posibles. Es importante analizar el circuito para ver que esto no suceda. Si pasa, el circuito debe rediseñarse especificando estados siguientes válidos a partir de estados presentes no usados para asegurarnos de que el circuito vuelva a su operación normal entre los estados válidos.

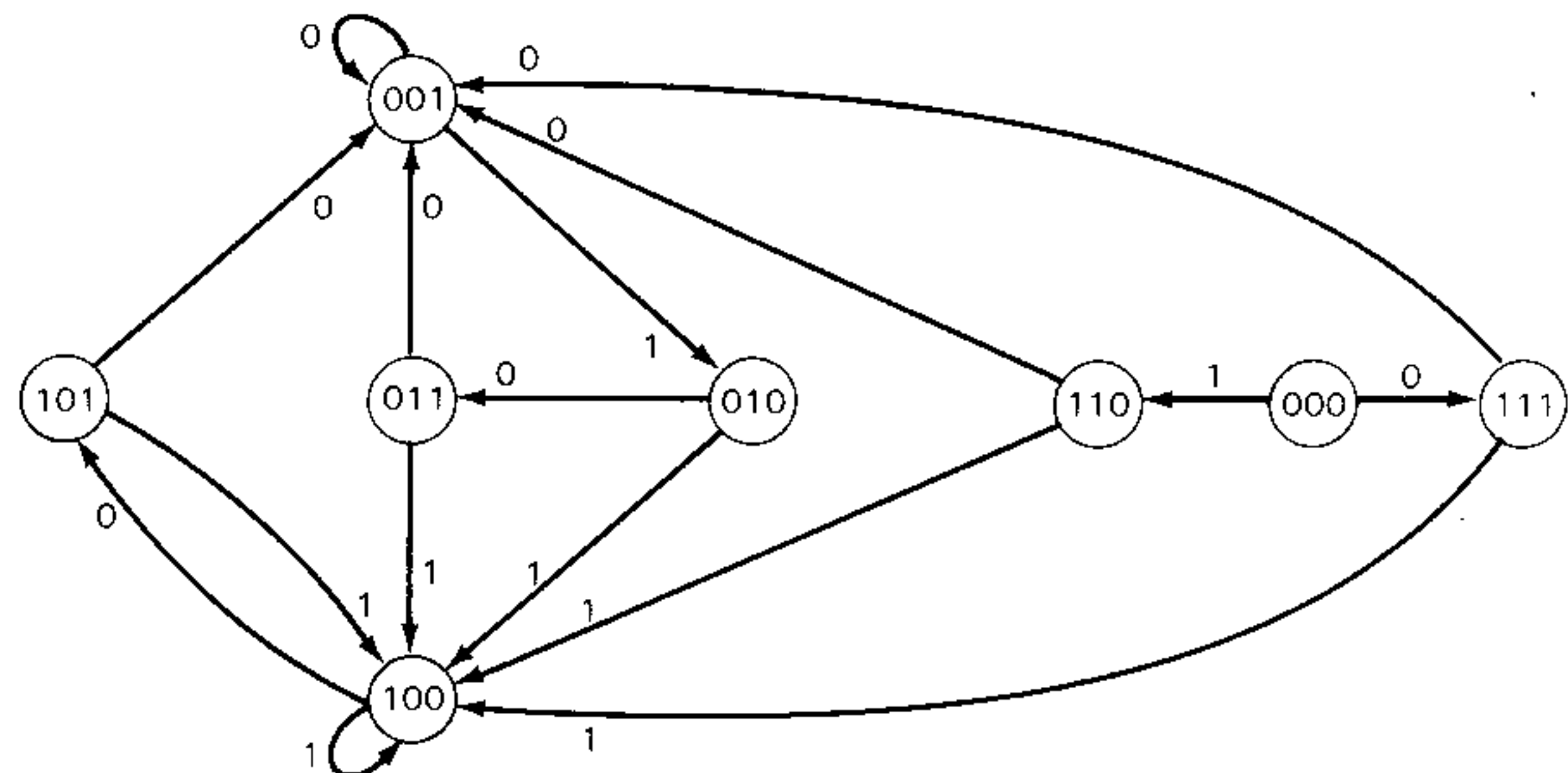


FIGURA 4-22

Diagrama de estados de un circuito con estados no usados

4-6 DISEÑO CON MULTIVIBRADORES BIESTABLES JK

El diseño de un circuito secuencial con flip-flops que no sean del tipo D se complica debido a que las ecuaciones de entrada del circuito deben obtenerse en forma indirecta a partir de la tabla de estados. Cuando se emplean flip-flops de tipo D, las ecuaciones de entrada se obtienen directamente del siguiente estado. Este no es el caso de los flip-flops JK y de otros tipos. A fin de determinar las ecuaciones de entrada de estos multivibradores biestables, es necesario obtener una relación funcional entre la tabla de estados y las ecuaciones de entrada.

Tabla de excitación de multivibradores biestables o flip-flops

Las tablas de características de flip-flops que se presentan en la tabla 4-1 producen el valor del siguiente estado cuando se conocen el estado presente y las entradas. Estas tablas son útiles para el análisis de circuitos secuenciales y para definir la operación de los multivibradores. Durante el proceso de diseño generalmente se conoce la tran-

TABLA 4—6
Tablas de excitación de flip-flops

(a) Flip-flop JK				(b) Flip-flop SR			
$Q(t)$	$Q(t + 1)$	J	K	$Q(t)$	$Q(t + 1)$	S	R
0	0	0	X	0	0	0	X
0	1	1	X	0	1	1	0
1	0	X	1	1	0	0	1
1	1	X	0	1	1	X	0

(c) Flip-flop D			(d) Flip-flop T		
$Q(t)$	$Q(t + 1)$	D	$Q(t)$	$Q(t + 1)$	T
0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0

sición del estado presente al estado siguiente y se desea determinar las condiciones de entrada de los flip-flops que provocarán la transición requerida. Por este motivo necesitamos una tabla donde se incluyan las entradas requeridas para un cambio de estado determinado. A esta tabla se le conoce como *tabla de excitación*.

La tabla 4-6 presenta las tablas de excitación de cuatro tipos de flip-flops distintos. Cada tabla tiene una columna para el estado presente $Q(t)$, el estado siguiente $Q(t + 1)$ y para cada entrada, a fin de demostrar cómo se logra la transición requerida. Existen cuatro transiciones posibles del estado presente al siguiente. Las condiciones de entrada que se requieren para cada una de las cuatro transiciones se determinan a partir de la información de que se dispone en la tabla de características. El símbolo X de la tabla representa una condición no importa lo que significa que no importa si la entrada es 0 o 1.

La tabla de excitación del flip-flop JK se puede obtener sabiendo cómo opera el multivibrador biestable. Considérese el primer registro de la tabla. La transición de un estado presente de 0 a uno siguiente de 0 se puede realizar en dos formas. Si $J = K$ y $K = 0$, no hay cambio de estado y el flip-flop se mantiene en 0. Si $J = 0$ y $K = 1$, el flip-flop se reinicia a 0. Esto determina que J debe ser igual a 0 pero K puede ser 0 o 1 y en uno u otro caso se obtiene la transición que se requiere. Esto se indica en el primer renglón de la tabla por medio de un 0 abajo de la J y un símbolo de condición no importa abajo de la K . La transformación de un estado presente de 0 a uno siguiente de 1 se puede hacer asimismo de dos maneras. Haciendo que $J = 1$ y $K = 0$ se inicia el flip-flop en 1. Haciendo que $J = 1$ y $K = 1$ se complementa el multivibrador de 0 a 1. En este caso es necesario que J sea igual a 1, pero no importa si K es 0 o 1; en uno u otro caso se obtiene la transición adecuada. Esta información se presenta en el segundo renglón de la tabla. De manera análoga, es posible determinar el resto de los registros de las tablas de excitación en el caso del flip-flop JK y los otros tres flip-flops.

Las tablas de excitación de los multivibradores biestables T y D no tienen condiciones no importa y se pueden especificar con una función de excitación. La tabla de excitación del flip-flop D indica que el siguiente estado es siempre igual a la entrada D y es independiente del estado presente. Esto se puede representar algebraicamente con una función de excitación.

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

Por lo tanto, los valores de la entrada D se pueden tomar directamente de los valores de la columna del estado siguiente, como se hizo en la sección anterior.

La tabla de excitación del flip-flop T muestra que la entrada T es igual a la función OR excluyente del estado presente y el estado siguiente. Esto se puede expresar por medio de la siguiente función de excitación:

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

Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño de circuitos secuenciales con flip-flops JK es el mismo que con flip-flops D, salvo que las ecuaciones de entrada se deben evaluar a partir de la transición del estado presente al siguiente que se obtiene de la tabla de excitación. Para ilustrar el procedimiento diseñaremos el circuito secuencial que especifica la tabla 4-7. Esta es igual a la tabla 4-4, pero sin la sección de salida. Además de tener columnas para el estado presente, la entrada y el estado siguiente, como en una tabla de estados convencional, la tabla indica también las condiciones de entrada de los multivibradores de las cuales se obtienen las ecuaciones de entrada. Las entradas de los flip-flops de la tabla se obtienen a partir de la tabla de estados junto con la tabla de excitación del flip-flop JK. Por ejemplo, en el primer renglón de la tabla 4-7 se tiene una transición del flip-flop A de 0 en el estado presente a 0 en el estado siguiente. En la tabla 4-6 del multivibrador JK se tiene que una transición de estados de 0 a 0 requiere que la entrada J sea 0 y que la entrada K sea no importa. De este modo, 0 y X se meten en el primer renglón bajo los rótulos J_A y K_A . Como en el primer renglón se presenta asimismo una transición del flip-flop B de 0 en el estado presente a 0 en el estado siguiente, 0 y X se insertan en el primer renglón abajo de J_B y K_B . El

TABLA 4—7
Tabla de estados con entradas de flip-flop JK

Estado presente		Entrada <i>X</i>	Estado siguiente		Entradas del flip-flop			
<i>A</i>	<i>B</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>J_A</i>	<i>K_A</i>	<i>J_B</i>	<i>K_B</i>
0	0	0	0	0	0	X	0	X
0	0	1	0	1	0	X	1	X
0	1	0	1	0	1	X	X	1
0	1	1	0	1	0	X	X	0
1	0	0	1	0	X	0	0	X
1	0	1	1	1	X	0	1	X
1	1	0	1	1	X	0	X	0
1	1	1	0	0	X	1	X	1

segundo renglón de la tabla presenta una transición del flip-flop *B* de 0 en el estado presente a 1 en el siguiente estado. En la tabla de excitación se observa que una transición de 0 a 1 requiere que *J* sea 1 y que *K* sea no importa, de modo que 1 y X se reproducen en el segundo renglón abajo de *J_B* y *K_B*. Este proceso se continúa con cada renglón de la tabla y con cada multivibrador biestable, donde las condiciones de entrada de la tabla de excitación se copian en el renglón adecuado del flip-flop particular en consideración.

Las entradas de los flip-flops de la tabla 4-7 especifican la tabla de verdad de las ecuaciones de entrada como función del estado presente *A* y *B* y la entrada *X*. Las ecuaciones de entrada se simplifican en los mapas de la figura 4-23. Los valores del estado siguiente no se utilizan durante la simplificación porque las ecuaciones de entrada son función del estado presente y de la entrada exclusivamente. Obsérvese la ventaja de utilizar flip-flops de tipo JK cuando se diseñan circuitos secuenciales. El que haya tantos registros no importa, indica que el circuito combinatorio de las ecuaciones de entrada, será probablemente más sencillo porque los minitérminos no importa suelen ayudar a obtener expresiones más simples. Si hay estados no usados en la tabla correspondiente, habrá otras condiciones no importa en el mapa.

Las cuatro ecuaciones de entrada de los dos flip-flops JK están incluidas abajo de los mapas de la figura 4-23. El diagrama de lógica del circuito secuencial se representa en la figura 4-24.

Para poner un último ejemplo, considérese el diseño de un circuito secuencial con multivibradores biestables T. Utilizando la parte de la tabla 4-7 que corresponde a la tabla de estados, obtenemos los valores binarios de las entradas del flip-flop T a partir de las funciones de excitación de *A* y *B*.

$$T_A = A(t) \oplus A(t + 1)$$

$$T_B = B(t) \oplus B(t + 1)$$

Pasando por los valores del estado presente y el estado siguiente de *A* y *B* en la tabla de estados determinamos los valores binarios de *T_A* y *T_B* en la forma siguiente. Para cada transición de estado presente a estado siguiente de 0 a 1 o de 1 a 0, se coloca un 1 en la entrada *T* correspondiente. En cada caso donde no hay cambio (de 0 a 0 o de 1 a 1) se coloca un 0 en la entrada *T* correspondiente.

1 a 1), se coloca un 0 en la entrada T correspondiente. Las ecuaciones de entrada se pueden obtener a partir de los minitérminos que producen un 1 en las columnas de entrada de los multivibradores. Ellas son

$$T_A(A, B, X) = \Sigma m(2, 7) = ABX + \bar{A}B\bar{X}$$

$$T_B(A, B, X) = \Sigma m(1, 2, 5, 7) = ABX + \bar{A}B\bar{X} + \bar{B}X$$

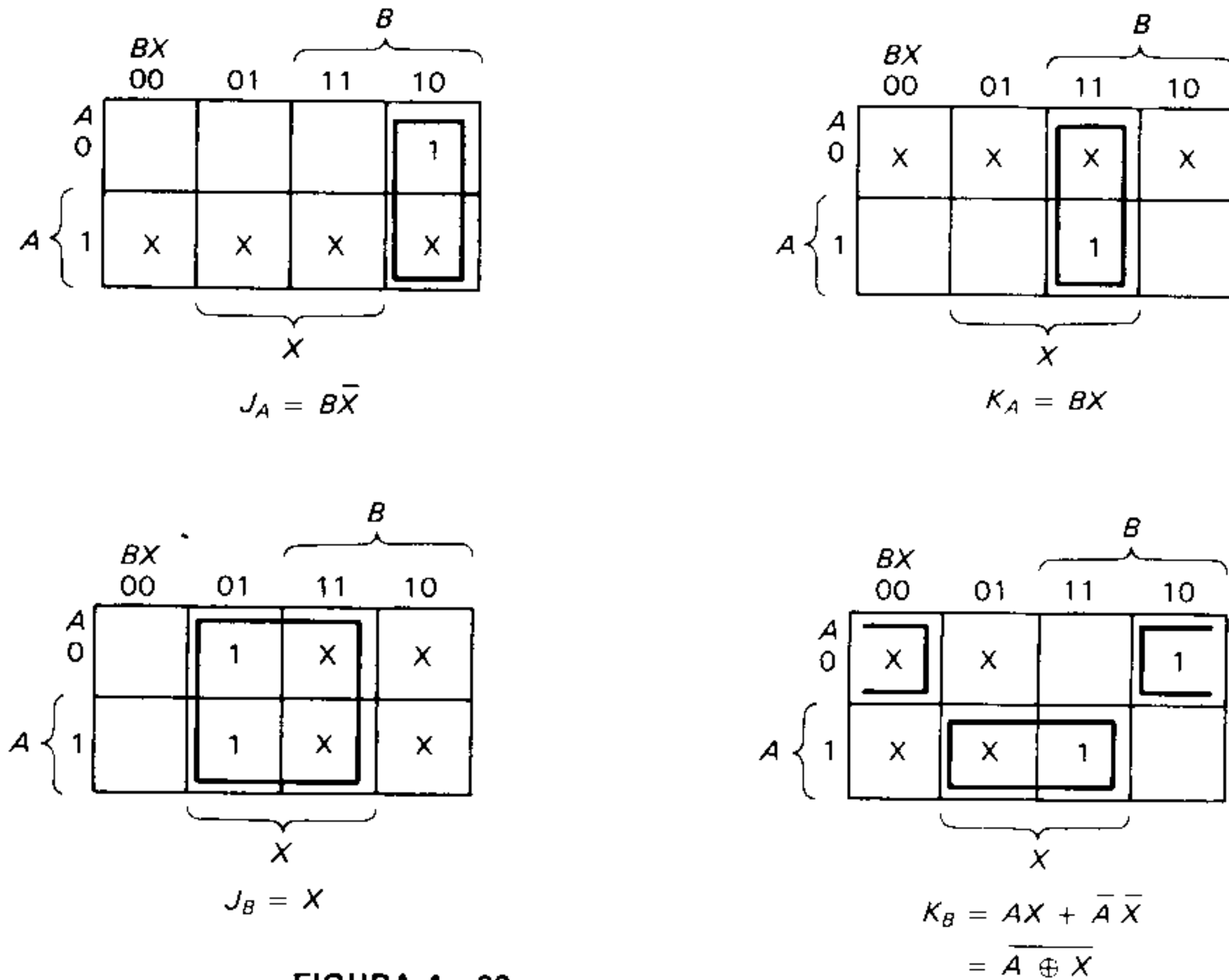


FIGURA 4-23

Mapas de ecuaciones de entrada J y K

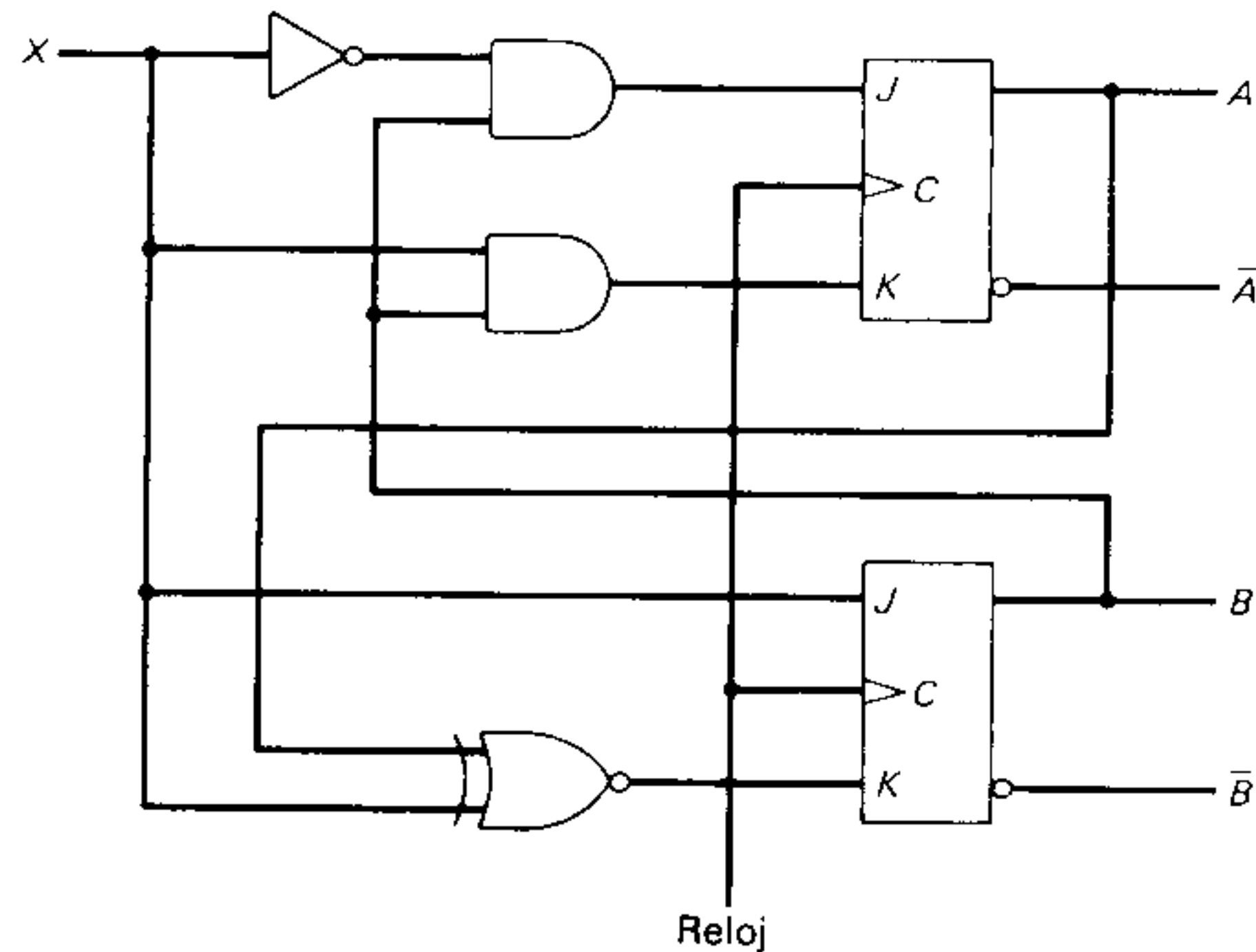


FIGURA 4-24

Diagrama de lógica de un circuito secuencial con flip-flops JK

Las expresiones algebraicas son las ecuaciones de entrada simplificadas de las cuales se pueden trazar las compuertas del circuito secuencial. El circuito consta de dos flip-flops T, tres compuertas AND, dos compuertas OR y un inversor. Recuerdese que un flip-flop T se puede construir a partir de uno JK con entradas J y K enlazadas para formar una sola entrada T .

BIBLIOGRAFIA

1. BOOTH, T. L. *Introduction to Computer Engineering*. 3a./edic. Nueva York: Wiley, 1984.
2. GIVONE, D. D. *Introduction to Switching Circuit Theory*. Nueva York: McGraw-Hill, 1970.
3. HILL, F. J. y PETERSON, G. R. *Introduction to Switching Theory and Logical Design*. 3a./edic. Nueva York: Wiley, 1981.
4. KOHAVI, Z. *Switching and Automata Theory*. 2a./edic. Nueva York: McGraw-Hill, 1978.
5. MANO, M. M. *Digital Design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984.
6. PEATMAN, J. B. *Digital Hardware Design*. Nueva York: McGraw-Hill, 1980.
7. ROTH, C. H. *Fundamentals of Logic Design*. 3a./edic. Nueva York: West, 1985.

PROBLEMAS

- 4-1 El seguro D que se muestra en la figura 4-6 puede construirse con sólo cuatro compuertas NAND. Esto se puede hacer eliminando el inversor y conectando la salida de la compuerta NAND superior a la entrada de la compuerta inferior. Demuestre que el circuito modificado es el mismo que el original obteniendo las funciones booleanas de la entrada R del seguro SR de cada circuito.
- 4-2 Obtenga el diagrama de lógica de un seguro D utilizando sólo compuertas NOR.
- 4-3 Trace el diagrama de lógica de un flip-flop amo-esclavo de tipo D utilizando compuertas de transmisión e inversores.
- 4-4 Trace el diagrama de lógica de un flip-flop amo-esclavo de tipo JK usando nueve compuertas NAND.
- 4-5 Trace el diagrama de sincronización similar a la figura 4-9 de un multivibrador biestable amo-esclavo de tipo JK durante cuatro pulsos de reloj. Muestre las señales de sincronización de C , J , K , Y y Q . Supóngase que inicialmente la salida Q es igual a 1. Con el primer pulso $J = 0$ y $K = 1$. Después en pulsos sucesivos J cambia a 1, seguido de K que cambia a 0 y luego J que vuelve a 0. Supóngase que cada entrada cambia después del flanco negativo del pulso.
- 4-6 Repita el problema 4-5 utilizando un flip-flop JK activado por flanco positivo. Muestre los diagramas de sincronización de C , J , K y Q .
- 4-7 Un flip-flop dominante de un conjunto tiene entradas de iniciación y de reiniciación. Este difiere de un multivibrador SR en que cuando S y R son igual a 1 el flip-flop es iniciado. Obtenga la tabla de características del flip-flop dominante del conjunto.
- 4-8 Un flip-flop JN tiene dos entradas, J y N . La entrada J se comporta como la entrada J de un flip-flop JK y la entrada N lo hace como el complemento de la entrada K de un multivibrador JK (es decir, $N = \bar{K}$).
 - (a) Obtenga la tabla de características del flip-flop.
 - (b) Demuestre que conectando las dos entradas se obtiene un flip-flop de tipo D.

- 4-9 Trace el símbolo gráfico de los multivibradores biestables que siguen.
- Flip-flop D activado por flanco negativo.
 - Flip-flop SR amo-esclavo.
 - Flip-flop T activado por flanco positivo.
- 4-10 Un circuito secuencial con dos flip-flops de tipo D, A y B , dos entradas X y Y , y una salida Z se especifica por medio de las ecuaciones de entrada siguientes:

$$D_A = \bar{X}Y + XA \quad D_B = \bar{X}B + XA \quad Z = B$$

- Trace el diagrama de lógica del circuito.
 - Obtenga la tabla de estados.
 - Derive el diagrama de estados.
- 4-11 Un circuito secuencial tiene tres flip-flops de tipo D, A , B y C , y una entrada X . Este se describe por medio de las siguientes ecuaciones de entrada:

$$D_A = (B\bar{C} + \bar{B}C)X + (BC + \bar{B}\bar{C})\bar{X}$$

$$D_B = A$$

$$D_C = B$$

- Derive la tabla de estados del circuito.
 - Trace dos diagramas de estados; uno para $X = 0$ y el otro para $X = 1$.
- 4-12 Un circuito secuencial tiene un flip-flop Q , dos entradas X y Y , y una salida S . Consta de un circuito sumador completo conectado a un flip-flop D como se muestra en la figura P4-12. Obtenga la tabla y el diagrama de estados del circuito secuencial.

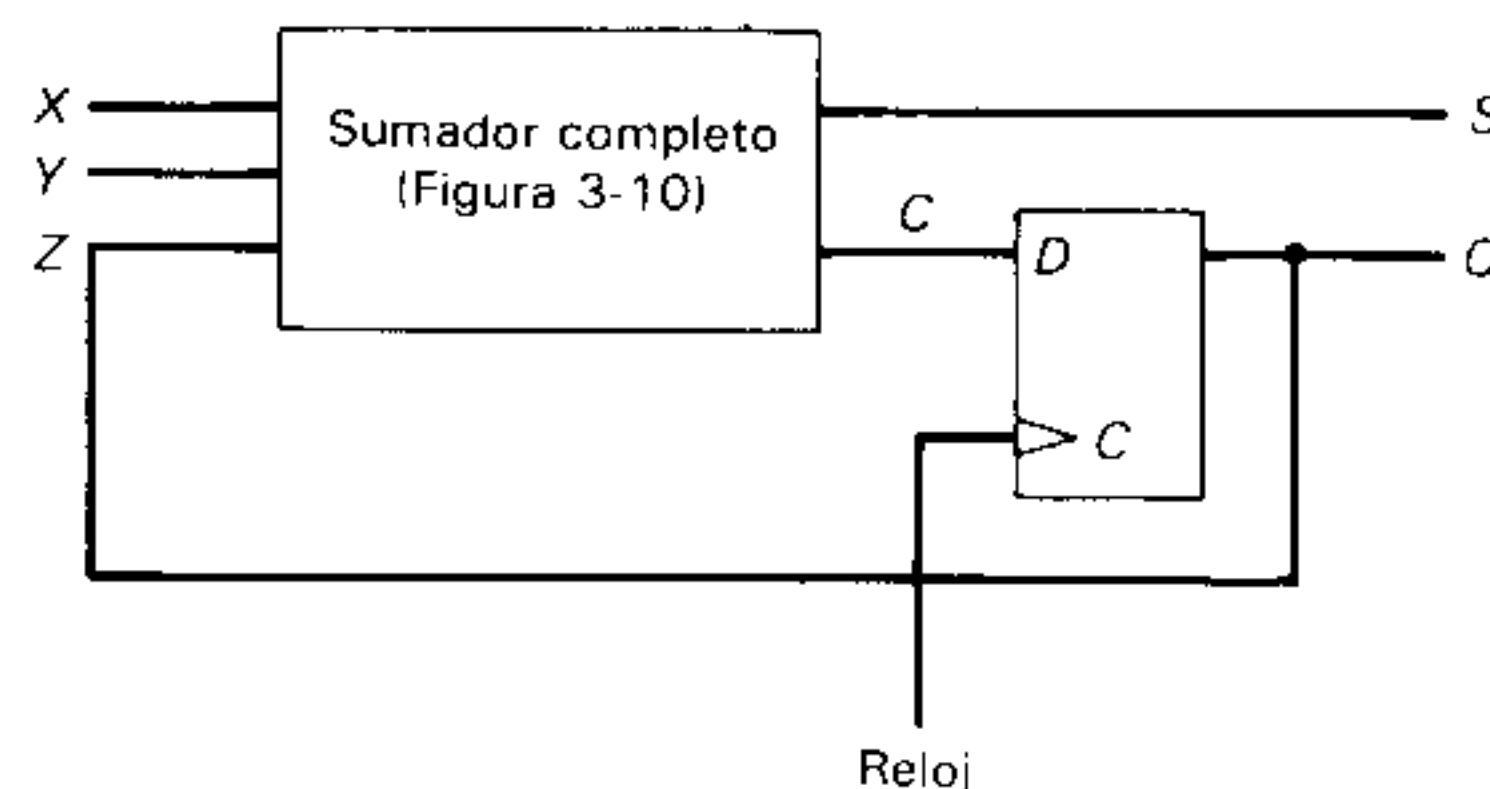


FIGURA P4-12
Circuito del problema 4-12

- 4-13 Comenzando desde el estado 00 en el diagrama de estados de la figura 4-17(a), determine las transiciones de estado y la secuencia de salida que se generarán cuando se aplique una secuencia de entrada de 010110111011110.
- 4-14 Trace el diagrama de estados del circuito secuencial que especifica la tabla de estados de la tabla 4-3.
- 4-15 Trace el diagrama de lógica de un circuito secuencial con dos flip-flops JK y una entrada. El circuito lo especifican las ecuaciones de entrada asociadas con las entradas de los multivibradores de la tabla 4-3.
- 4-16 Un circuito secuencial tiene dos flip-flops JK, una entrada X y una salida Y . El diagrama de lógica del circuito se presenta en la figura P4-16. Obtenga la tabla de estados y el diagrama de estados del circuito.

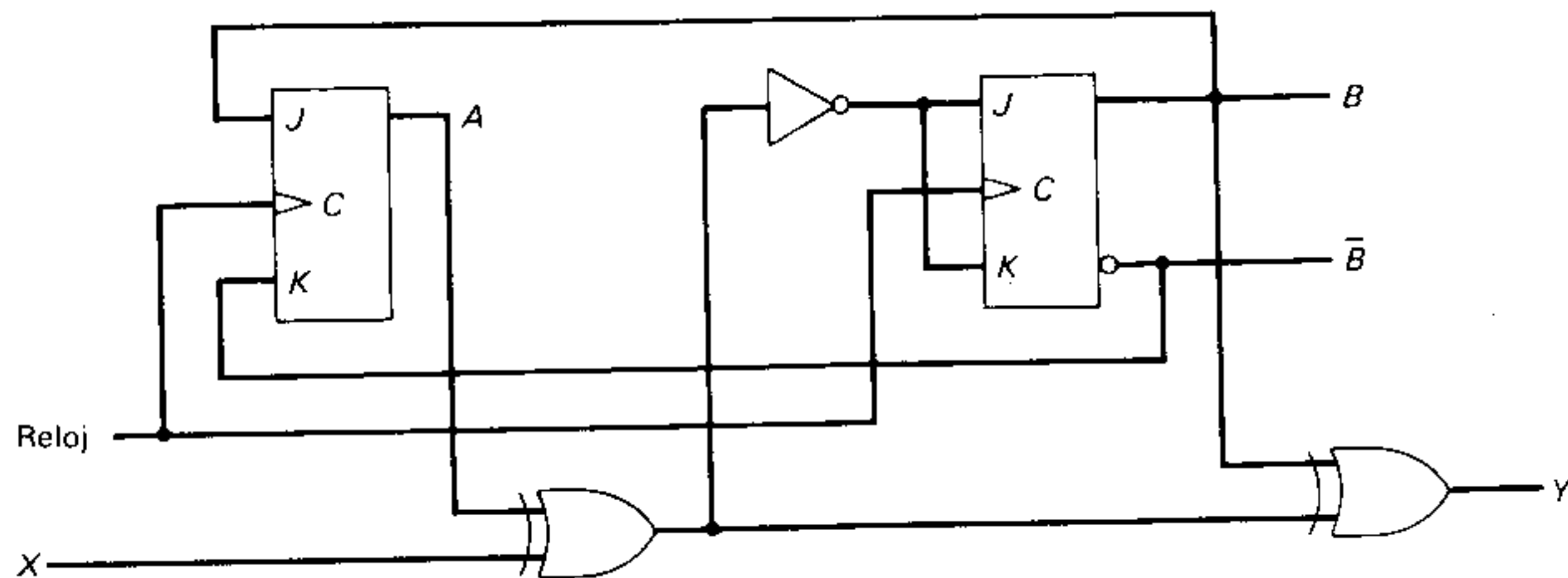


FIGURA P4—16

Circuito del problema 4-16

- 4-17 Un circuito secuencial tiene dos flip-flops JK, A y B , dos entradas X y Y , y una salida Z . Las ecuaciones de entrada y la función de salida del multivibrador biestable son las siguientes:

$$J_A = BX + \bar{B}\bar{Y} \quad K_A = \bar{B}X\bar{Y} \quad Z = AXY + B\bar{X}\bar{Y}$$

$$J_B = \bar{A}X \quad K_B = A + X\bar{Y}$$

- (a) Trace el diagrama de lógica del circuito.
 (b) Derive la tabla y el diagrama de estados.
- 4-18 Diseñe un circuito secuencial con dos flip-flops D, A y B , y una entrada X . Cuando $X = 0$, el estado del circuito se mantiene sin cambio. Cuando $X = 1$, el circuito pasa las transiciones de estado de 00 a 01 a 11 a 10 y de vuelta a 00 y se repiten.
- 4-19 Un circuito secuencial tiene tres multivibradores biestables, A , B y C , una entrada X y una salida Y . El diagrama de estados se presenta en la figura P4-19. Diseñe el circuito con flip-flops D. Analice el circuito para cerciorarse de que sea autocorrectivo.

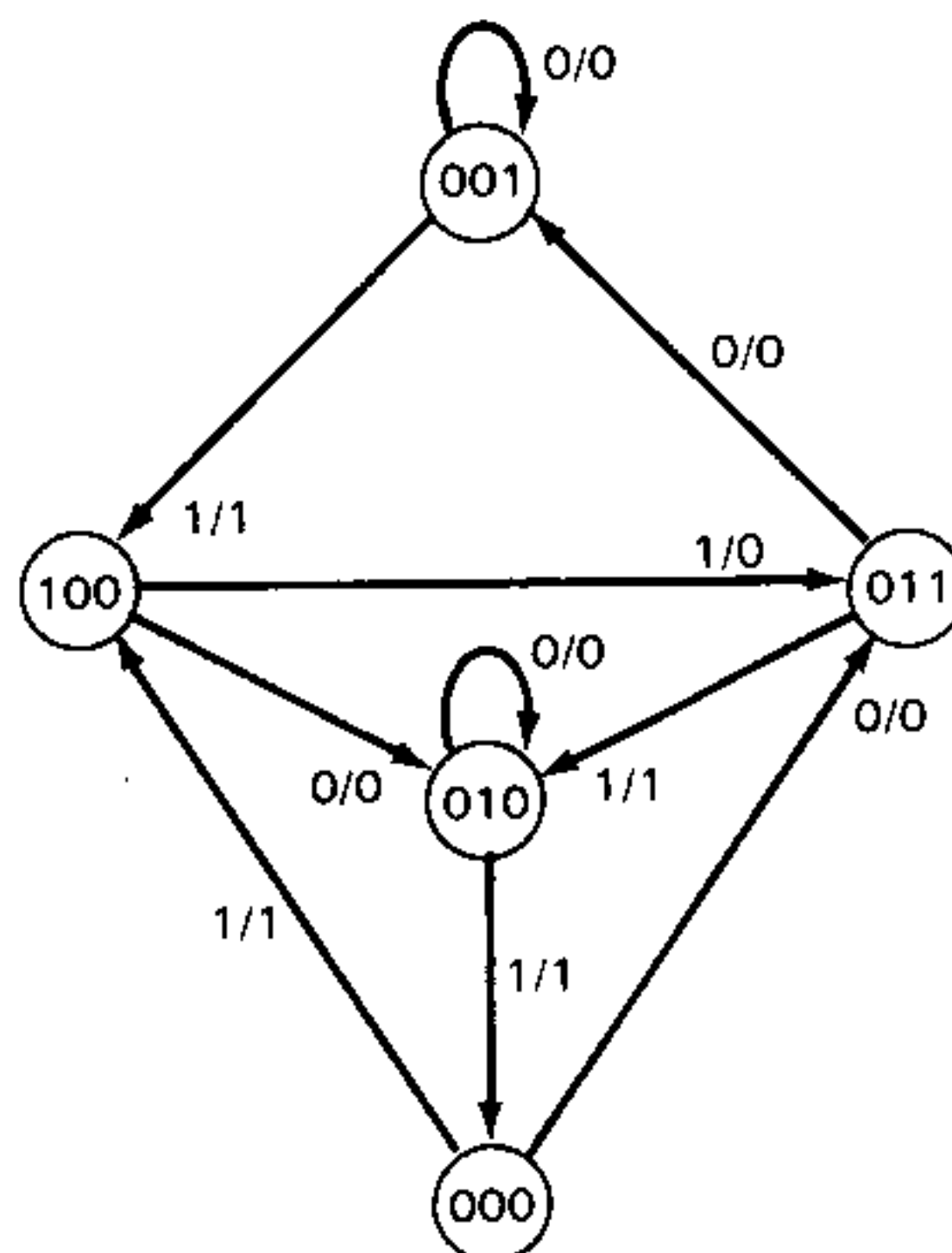


FIGURA P4—19

Diagrama de estados de los problemas 4-19 y 4-24

- 4-20 Convierta un flip-flop de tipo D en un flip-flop JK utilizando compuertas externas. Las compuertas se pueden obtener por medio de un procedimiento de diseño de un circuito secuencial comenzando a partir de una tabla de estados con la salida del flip-flop D como el estado presente y siguiente y con J y K como entradas.
- 4-21 Determine las funciones características de los flip-flops de tipo JK, D y T. La función característica es una función algebraica que expresa el siguiente estado $Q(t + 1)$ como función del estado presente $Q(t)$ y la o las entradas del flip-flop.
- 4-22 Obtenga una tabla de excitación del flip-flop JN definido en el problema 4-8.
- 4-23 Obtenga la tabla de excitación del flip-flop dominante del conjunto que se definió en el problema 4-7.
- 4-24 Diseñe un circuito secuencial del diagrama de estados de la figura P4-19 utilizando multivibradores JK. Analice el circuito para cerciorarse de que sea autocorrectivo.
- 4-25 Diseñe un circuito secuencial con dos flip-flops JK, A y B , y dos entradas E y X . Si $E = 0$, el circuito se mantiene en el mismo estado independientemente del valor de X . Cuando $E = 1$ y $X = 1$, el circuito pasa por las transiciones de estado 00 a 01 a 10 a 11 y de vuelta a 00, y repite. Cuando $E = 1$ y $X = 0$, el circuito pasa por las transiciones de estado de 00 a 11 a 10 a 01 y de regreso a 00, y repite.
- 4-26 Diseñe el circuito secuencial que especifica la tabla de estados de la tabla 4-7 utilizando flip-flops SR.
- 4-27 Utilizando la parte correspondiente a la tabla de estados de la tabla 4-7 (elimine la lista de entradas del flip-flop de J y K), determine una nueva lista de valores binarios para las entradas de dos flip-flops T, T_A y T_B . Verifique las ecuaciones de entrada de la sección 4-6 y trace el diagrama de lógica del circuito con multivibradores biestables T.