16 CONTAR PULSOS Y DIVIDIR FRECUENCIAS: DISEÑO Y CONEXIÓN DE CONTADORES

Un contador es un sistema secuencial conceptualmente muy simple: con cada pulso que recibe pasa de un estado al siguiente (cuenta el número de pulsos). Un contador módulo n presenta n estados (de 0 a n-1) y su evolución es circular: pasa de cada estado i al siguiente i+1 y del último n-1 al primero de ellos 0; su grafo de estados es un anillo, con una sola transición para cada estado (que le lleva al estado siguiente i+1).

A pesar de la sencillez de este comportamiento funcional, los contadores son extraordinariamente útiles en el diseño de sistemas digitales de medida y de control. Por ello, aunque su construcción puede realizarse aplicando la metodología general de diseño de los sistemas secuenciales síncronos (desarrollada en el capítulo anterior), se dedica el presente capítulo al diseño y conexión de contadores.

El biestable tipo T, que cambia de estado (conmuta) con cada pulso que recibe si su entrada T se encuentra a 1, resulta muy apropiado para la construcción de contadores. El diseño de contadores síncronos con biestables tipo T consiste en establecer, en forma de funciones booleanas, las situaciones en que cada biestable debe conmutar.

Es sencillo transferir a biestables D el diseño efectuado con los biestables T: basta una transformación booleana equivalente a una operación "o-exclusiva" entre la función que activa la entrada T y la salida Q del biestable.

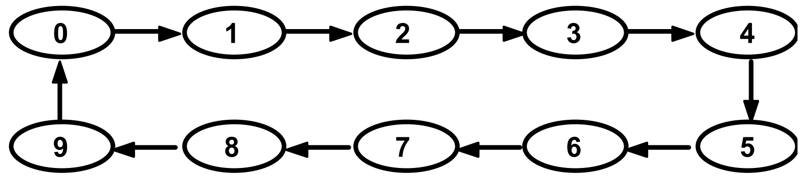
Otro aspecto de interés es la conexión de contadores para conformar otros más grandes, así como la posibilidad de respetar la codificación BCD para mantener la estructura de nuestros números decimales (base 10).

El próximo capítulo se dedica a las aplicaciones de los contadores: contaje y control de número de objetos o de sucesos; división de frecuencias; medida y multiplexado de tiempos; medida y control de frecuencias; y el siguiente (capítulo 18) trata de la modulación de anchura de pulsos, técnica que también aprovecha muy eficazmente a los contadores.

La gran utilidad de los contadores se traduce en la disponibilidad de una amplia variedad de los mismos, entre los que se cuentan los contadores «descendentes» (que descuentan) y los contadores «bidireccionales».

16.1. Biestables T y su utilidad para conformar contadores

Un contador módulo **n** es un sistema secuencial de **n** estados, numerados sucesivamente de **0** a **n-1**, cuyo grafo de estados es circular, pasando de un estado al siguiente (**i** $\rightarrow$ **i+1**) y del último al primero de ellos (**n-1** $\rightarrow$ **0**); con cada pulso el contador avanza un estado (pasa del estado **i** al estado **i+1**) y en el caso del último estado (**n-1**) pasa al primero (**0**).



Grafo de estados de un contador módulo 10 (década)

Un contador módulo **n** requiere **m** biestables, siendo **m** el menor exponente de base 2 necesario para alcanzar el número **n**:

• si **n** es potencial entera de 2:	$\mathbf{n = 2^m}$	contador completo
• si no lo es:	$\mathbf{2^{m-1} < n < 2^m}$	contador parcial.

En el primer caso (**n** potencia de 2) el contador recorre todos los estados posibles de los **m** biestables, por lo cual lo denominaremos contador «completo», mientras que en el segundo caso existen estados no alcanzados por el contador: contador «parcial».

En este capítulo trataremos sobre el diseño de contadores síncronos, aquellos cuyos biestables conmutan a la vez, en sincronía con el flanco activo en su entrada de pulsos. Resulta más sencillo diseñar contadores asíncronos pero no es recomendable en modo alguno su utilización en sistemas digitales complejos. El diseño digital actual se hace en forma síncrona por las amplias ventajas que el sincronismo proporciona (principalmente en cuanto a seguridad funcional).

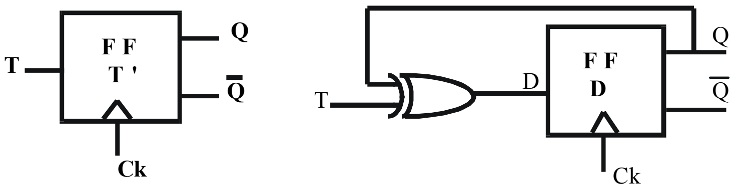
Ahora bien, habida cuenta de que en diseños reducidos pueden resultar adecuados los contadores asíncronos y, sobre todo, que en los catálogos de las familias lógicas integradas hay una amplia oferta de tales contadores no síncronos, se incluye un apéndice (*A5 Contadores asíncronos*) referido a dichos contadores asíncronos.

El diseño de contadores puede realizarse a través de los métodos generales de diseño secuencial síncrono: a partir de la tabla de evolución de los estados obtener las funciones de activación de los biestables. Ahora bien, los biestables tipo **T** facilitan en gran manera dicho diseño, sin necesidad de construir la tabla de evolución del estado, lo cual es particularmente útil en el caso de contadores de gran tamaño; y, además, la traslación de dicho diseño con biestables **T** a biestables tipo **D** se efectúa a través de una transformación booleana sencilla.

El biestable tipo **T** presenta dos entradas: la de reloj con la cual sincroniza su funcionamiento, y la entrada **T**: el biestable cambia de estado con el flanco activo de la onda de reloj siempre que **T = 1** y permanece en su estado anterior cuando **T = 0**.

El biestable **T** puede construirse a partir del biestable **D** síncrono, anteponiéndole la siguiente función de entrada que corresponde a su comportamiento: el biestable debe cambiar de estado cuando **T = 1** y debe permanecer en el mismo si **T = 0**.

$$D = T.\overline{Q} + \overline{T}.Q \; = \; T \oplus Q$$



Al utilizar los biestables **T** para configurar contadores síncronos es necesario activar la entrada **T** de cada biestable con las condiciones booleanas que determinan cuando debe conmutar:

- en el caso de contadores «completos» (módulo 2^m) la condición de conmutación de cada biestable es que todos los anteriores se encuentren a **1** (basta observar la secuencia de contaje y, en ella, el valor de los biestables anteriores al considerado en el estado previo a su conmutación); el primero de los biestables conmuta siempre;
- en caso de contadores «parciales» (módulo $n < 2^m$) será preciso añadir la condición de que todos los biestables pasen a **0** con el pulso de reloj siguiente al estado **n-1**.

De forma que, para construir un contador completo, las entradas **T** de los sucesivos biestables deben recibir las siguientes funciones booleanas:

$T_0 = 1$

$T_1 = q_0$

$T_2 = q_1.q_0$

$T_3 = q_2.q_1.q_0$ Contador módulo 16

… … …

$T_i = q_{i-1}.q_{i-2}. \dots .q_2.q_1.q_0$

Estos términos boleanos, que contienen el producto de todos los dígitos anteriores en forma afirmada, se corresponden al contaje directo en binario: cuando se completan todos los dígitos anteriores (*se llenan a 1*) es cuando se produce un arrastre de una unidad al dígito siguiente.

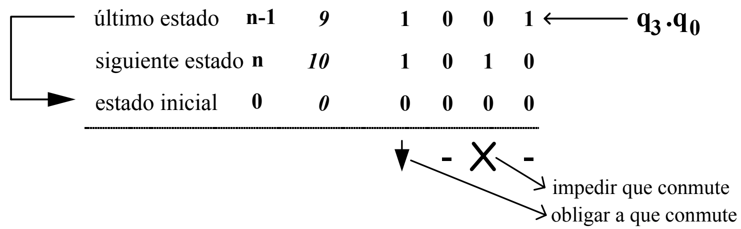
Para convertir un contador «completo» en contador «parcial» módulo **n**, basta incluir en las anteriores expresiones de T_i las condiciones booleanas necesarias para que el último estado **n-1** pase al estado inicial **0**. Para ello puede utilizarse el término mínimo reducido correspondiente a **n-1**, definido como el producto de aquellas variables de estado cuyo valor en dicho estado es **1**, y basta considerar el valor booleano de cada biestable en el estado **n-1** y el que tendría en el estado **n**:

- aquellos biestables cuyo valor en el estado **n** sería **0** no requieren modificación alguna ya que a partir del estado **n-1** asumirán directamente, como estado siguiente, el valor booleano **0**;
- cuando un biestable vale **1** en el estado **n-1** y su valor en el estado **n** continúa siendo **1**, es preciso forzar su conmutación añadiendo en la activación de su entrada **T**, mediante suma booleana, el término mínimo reducido correspondiente a **n-1**;
- en el caso de un biestable cuyo valor es **0** en **n-1** y su valor en el estado **n** sería **1** hay que evitar su conmutación, condicionando la activación de la entrada **T**, mediante producto booleano, con el negado del término mínimo reducido de **n-1**.

Por ejemplo, para configurar un contador módulo 10 (década):

- el último estado es el 9 **1001** y tras dicho estado debe alcanzarse el inicial **0000**, siendo así que en su evolución normal el contador pasaría al estado 10 **1010**;
- no es preciso ocuparse de los biestables primero q_0 y tercero q_2: su valor en 10 es **0**;
- es necesario evitar la conmutación del segundo q_1 y obligar a conmutar al cuarto q_3;
- el término mínimo reducido correspondiente al último estado (9 **1001**) es $q_3.q_0$.

Obsérvese que no es necesario utilizar el término mínimo completo, ya que el término mínimo reducido vale **1** para dicho estado; también vale **1** para algunos estados posteriores, pero tales estados no son alcanzables en el contaje. Así, por ejemplo, $q_3.q_0$ vale **1** para el 9 y, también, para el 11 (**1011**), el 13 (**1101**) y el 15 (**1111**); pero el contaje módulo 10 pasa de 9 a 0, de forma que nunca se llega a los otros estados con valor **1**.



Con lo cual, las condiciones de activación de las entradas **T** son las siguientes:

$T_0 = 1$

$T_1 = q_0 . \overline{(q_3.q_0)} = \overline{q_3}.q_0$

$T_2 = q_1.q_0$

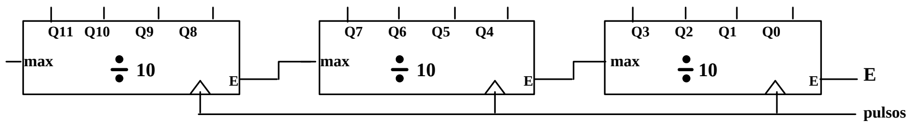
$T_3 = q_2.q_1.q_0 + q_3.q_0$

Conexión de contadores síncronos

Para conectar entre sí contadores síncronos, a fin de configurar un contador más amplio, es necesario añadir a cada contador una entrada de habilitación de contaje **E** y una salida que se active cuando el contador alcanza el estado máximo **máx**; de esa forma conectando la salida **máx** de un contador con la entrada **E** del siguiente, el segundo de los contadores se incrementará en una unidad cuando el primero de ellos haya alcanzado el valor máximo de su contaje.

La entrada de habilitación **E** condicionará, a través de producto booleano directo, todas las funciones de activación de las entradas $\mathbf{T_i}$ de los biestables; la salida **máx** coincide con el término mínimo reducido correspondiente al último estado **n-1** multiplicado booleanamente por la habilitación **E**:

$$T_0 = E$$
$$T_1 = E.\overline{q_3}.q_0$$
$$T_2 = E.q_1.q_0$$
$$T_3 = E.q_2.q_1.q_0 + E.q_3.q_0$$
$$\text{máx} = E.q_3.q_0$$



contador síncrono módulo 10 x 10 x 10

El contador de la figura anterior es un contador módulo 1000 (10 x 10 x 10) que cuenta en BCD, ya que cada uno de los contadores que lo componen es módulo 10 (contador década); sus salidas pueden representarse sobre visualizadores de 7 segmentos, a través de sendos conversores de BCD en 7 segmentos.

Borrado de contadores

Generalmente los contadores disponen de una entrada de borrado cuya activación lleva a sus biestables al estado **0**. El borrado puede ser asíncrono, a través de la correspondiente entrada **Clr** o **Reset** de borrado de cada uno de los biestables, o síncrono, con una entrada **B** que actúa sobre la función booleana de las entradas **T** de habilitación de los biestables; el borrado asíncrono se produce inmediatamente después de activar la entrada de borrado **Clr**, mientras que el borrado síncrono **B** se ejecuta en el flanco activo de reloj.

Para añadir al contador una entrada de borrado síncrono **B** es necesario inhibir la conmutación (para que ningún biestable que se encuentre a **0** pase a **1**) y, también, es preciso forzar la conmutación de aquellos biestables que se encuentren en **1**: para ello, además de anular, multiplicando por $\overline{B}$, las funciones de activación de las entradas $\mathbf{T_i}$, es necesario añadirles un término $+B.q_i$ para obligar a conmutar si $\mathbf{q_i = 1}$.

En el caso del contador módulo 10 (década) las expresiones resultantes serán las siguientes (borrado prioritario: se borra aunque la habilitación sea nula **E = 0**):

$$T_0 = E.\overline{B} + B.q_0$$
$$T_1 = E.\overline{B}.\overline{q_3}.q_0 + B.q_1$$
$$T_2 = E.\overline{B}.q_1.q_0 + B.q_2$$
$$T_3 = E.\overline{B}.q_2.q_1.q_0 + E.\overline{B}.q_3.q_0 + B.q_3 = E.\overline{B}.q_2.q_1.q_0 + E.q_3.q_0 + B.q_3$$
$$\text{máx} = E.q_3.q_0 .$$

Contar pulsos y dividir frecuencias

Contar pulsos puede parecer algo muy simple pero, en la práctica, tiene muchas aplicaciones. Los contadores son sumamente útiles en la realización de sistemas digitales, siendo el núcleo básico de muchos de ellos, como es el caso de relojes, temporizadores, frecuencímetros, dispositivos de sincronización,… y de un amplio número de sistemas de control y de medida. Pocos son los sistemas digitales en los que no se encuentren presentes diversos contadores, realizando operaciones variadas.

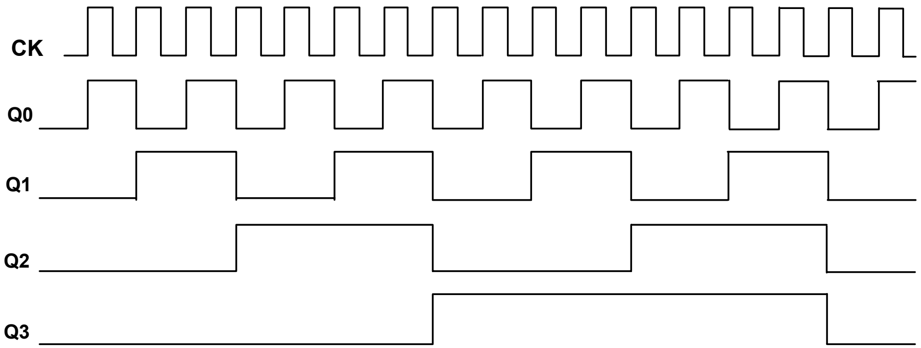
Contar pulsos permite contar objetos o contar sucesos y como resultado del contaje conocer el número de piezas producidas, el número de personas en un recinto, el número de automóviles que circulan por una carretera, el número de unidades de tiempo transcurridas (relojes y cronómetros),… Contar permite también controlar el número de objetos a incluir en un recipiente, el número de unidades de tiempo de un proceso (temporizadores), el número de marcas a recorrer (posicionamiento lineal o angular),…

Asimismo, contar pulsos en una unidad de tiempo equivale a medir la frecuencia de la señal y, con ella, la velocidad de motores (revoluciones por minuto), la velocidad de bicicletas y automóviles, el valor de una variable codificada en frecuencia,…

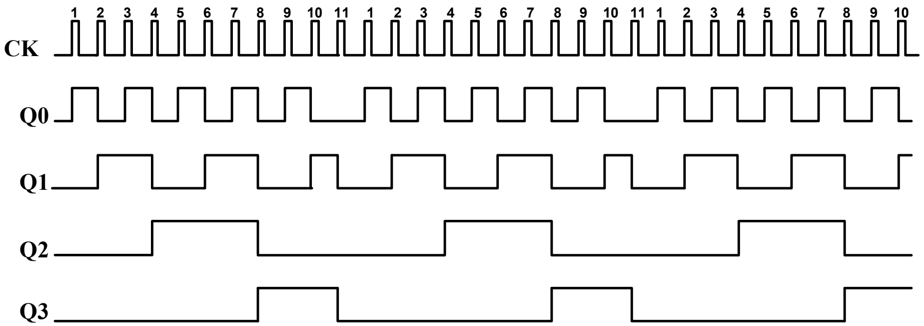
Además, los contadores permiten configurar controles de tipo todo/nada en que cada período de tiempo resulta dividido en dos intervalos activo/inactivo. El resultado de este control *on*/*off* es una modulación de la anchura de pulsos (capítulo 18) con aplicaciones en control de potencia, conversión número-tensión (conversores digital-analógicos), conversores tensión-tiempo y tensión-número (analógico-digitales), control de amplitud de señales (potenciómetros digitales),...

Un componente básico de los procesadores en los sistemas digitales que actúan bajo programa (computadores, microprocesadores, etc.) es el contador central o contador de programa, que señala la dirección de la instrucción a ejecutar y, una vez ejecutada la misma, pasa a la siguiente instrucción. Este contador ha de disponer de la posibilidad de carga paralelo a fin de poder efectuar saltos en el programa para atender a instrucciones condicionales, a subrutinas y a interrupciones.

El contaje de pulsos se encuentra asociado directamente a la división de la frecuencia de los mismos: los biestables de un contador «completo» (módulo **n** potencia entera de 2) proporcionan en sus salidas ondas digitales cuyas frecuencias son, respectivamente, la mitad (1/2), la cuarta parte (1/4), la octava parte (1/8),… ($1/2^i$)…, de la frecuencia de los pulsos de entrada.



En el caso de un contador «parcial» (módulo **n**, siendo **n** un número cualquiera), tomando como salida la de su biestable de valor más significativo, se obtiene la división por **n** de la frecuencia de los pulsos que recibe, es decir, produce un pulso en su salida por cada **n** pulsos en su entrada.



Ondas en las salidas de un contador módulo 11

Al dividir una frecuencia por **n** (la frecuencia se hace más lenta) su período queda multiplicado por **n** (el período se hace más largo); de esta forma, pueden obtenerse señales de reloj más lentas, con unidades de tiempo mayores. Así es posible pasar de unidades de tiempo muy precisas del orden del microsegundo, obtenidas mediante osciladores con cristal de cuarzo, a tiempos de milisegundos o de segundos, por simple agrupación de **n** unidades a través de la división de su frecuencia.

16.2. Diversidad de contadores

16.2.1. Contadores descendentes

Contadores descendentes son aquellos que «descuentan», es decir, pasan del estado **i** al **i-1** y, obviamente, del estado inferior **0** al **n-1** (módulo **n**).

La condición de conmutación de un biestable en un contador descendente «completo» (módulo **n** potencia entera de 2) consiste en que todos los anteriores se encuentren a **0** (como puede comprobarse observando en la secuencia de «descontaje» el valor de los biestables anteriores al considerado en el estado previo a su conmutación):

$$T_i = \overline{q_{i-1}}.\overline{q_{i-2}}. \dots .\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

Un contador descendente «parcial» (módulo **n** que no sea potencia entera de 2) ha de forzar la transición desde el estado **0** al estado **n-1**; si el contador es «completo» desde el estado **0000...** se pasa directamente al **1111...**, de forma que para alcanzar el estado **n-1** bastará evitar la conmutación de aquellos biestables cuyo valor en dicho estado sea **0**.

El estado 0 (cero) viene identificado por la operación "**y**" extendida a las negadas de todas las salidas del contador, mientras que la situación contraria (no cero) corresponde a la operación "**o**" aplicada a todas las salidas:

$$z = \overline{q_{m-1}}.\overline{q_{m-2}}.\dots.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} = \mathrm{Nor}(q_{m-1}, q_{m-2}, \dots, q_2, q_1, q_0)$$

$$\overline{z} = q_{m-1} + q_{m-2} + \dots + q_2 + q_1 + q_0$$

Si el biestable $\mathbf{q_i}$ no tiene valor **1** en el estado **n-1** será preciso evitar que conmute a partir del estado **0**:

$$T_i = \overline{q_{i-1}}.\overline{q_{i-2}}. \dots .\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}.\overline{z} = \overline{q_{i-1}}.\overline{q_{i-2}}. \dots .\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_{n-1} + q_{n-2} + \dots + q_{i+1} + q_i)$$

Por ejemplo, en el caso de un contador módulo 10 (década) el contaje descendente ha de conducir del estado **0000** al **1001** (cuando, de por sí, pasaría al **1111**); para ello, es necesario evitar que, desde el estado 0, los biestables segundo $\mathbf{q_1}$ y tercero $\mathbf{q_2}$ conmuten. Las funciones correspondientes al contaje descendente en módulo 10 serán las siguientes:

$$z = \overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} \qquad \overline{z} = q_3 + q_2 + q_1 + q_0$$

$$T_0 = E$$

$$T_1 = E.\overline{q_0}.\overline{z} = E.\overline{q_0}.(q_3 + q_2 + q_1)$$

$$T_2 = E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.\overline{z} = E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_3 + q_2)$$

$$T_3 = E.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

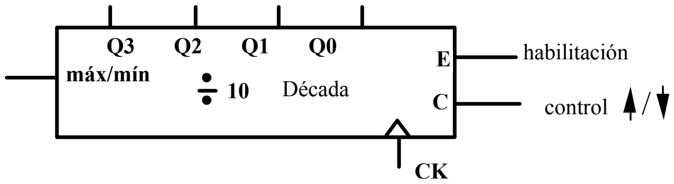
$$\text{mín} = E.z = E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

Para la conexión sucesiva de contadores descendentes han de presentar la salida de mínimo **mín** que se activará cuando el contador se encuentre a 0; dicha salida se conectará a la entrada de habilitación **E** del siguiente contador.

16.2.2. Contadores bidireccionales

Los contadores bidireccionales (contadores hacia arriba y hacia abajo: *up/down counter*) pueden contar de **0** a **n-1** y pueden también «descontar» de **n-1** a **0**, siendo controlada dicha posibilidad mediante una entrada adicional **C** (*up/down*), cuyo valor **1** determina el contaje ascendente y su valor **0** impone el descendente; obviamente al descontar el estado siguiente al **0** es el **n-1**. En tales contadores la salida para conexión de contadores **máx/mín** ha de activarse cuando el contador se encuentra habilitado y alcanza su máximo valor (**n-1**), caso de estar contando (*up*), o su valor mínimo (0), caso de encontrarse descontando (*down*).

Las funciones booleanas de activación de los biestables en un contador bidireccional pueden obtenerse agrupando las funciones correspondientes al contaje ascendente y las propias del contaje descendente, diferenciando ambas posibilidades mediante una entrada de control **C** (↑/↓).



En el caso de un contador módulo 10 (década) tomando ambas funciones de contaje ascendente (apartado 1 de este capítulo) y de contaje descendente (16.2.1):

Contaje ascendente

$$T_0 = E$$
$$T_1 = E.\overline{q_3}.q_0$$
$$T_2 = E.q_1.q_0$$
$$T_3 = E.q_2.q_1.q_0 + E.q_3.q_0$$
$$\text{máx} = E.q_3.q_0$$

Contaje descendente

$$T_0 = E$$
$$T_1 = E.\overline{q_0}.(q_3 + q_2 + q_1)$$
$$T_2 = E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_3 + q_2)$$
$$T_3 = E.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$
$$\text{mín} = E.z = E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

y, agrupando las funciones correspondientes a ambos contajes, multiplicando booleanamente por **C** las relativas al contaje ascendente y por su negado las que producen el contaje descendente, resulta:

$$T_0 = E$$
$$T_1 = C.E.\overline{q_3}.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_0}.(q_3 + q_2 + q_1)$$
$$T_2 = C.E.q_1.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_3 + q_2)$$
$$T_3 = C.E.(q_2.q_1.q_0 + q_3.q_0) + \overline{C}.E.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$
$$\text{máx / mín} = C.E.q_3.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}\ .$$

16.2.3. Contadores complejos. Contadores universales

Dada la utilidad que los contadores ofrecen para la realización de sistemas digitales existe una amplia disponibilidad de tipos diferenciados dentro de las familias lógicas integradas; algunos de ellos con prestaciones complejas como veremos a continuación.

Existe un tipo de ***contadores para división de frecuencias*** (*rate multipliers*) que, a partir de un número total de pulsos **m** que llegan a su entrada, permiten el paso de un número **n** de ellos (**n < m**), programable en sus entradas de control, de forma que realizan un cambio de frecuencia según el factor **n / m**.

Asimismo, orientados a la división de frecuencias y a la temporización, existen contadores descendentes (*down*) programables a través de sus entradas paralelo (carga síncrona) y dotados de una salida que se activa cuando el contador se encuentra a cero. Conectando la salida indicadora de estado cero a la habilitación de entradas paralelo se obtiene un divisor de frecuencia por **n+1**: tras alcanzarse su valor mínimo (**0**) el contador pasa al valor **n** programado en tales entradas. En cambio, cargando inicialmente el valor **n** y activando con la salida indicadora de cero una entrada de inhibición de contaje se consigue un temporizador: el contador descuenta desde **n** hasta alcanzar el estado **0**.

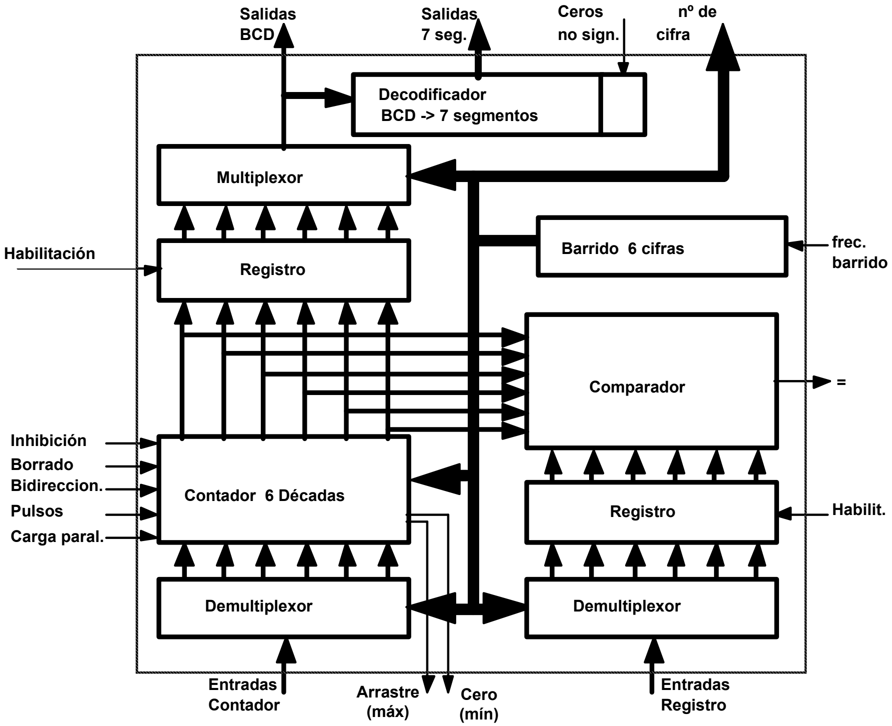
Existen integrados conteniendo varias décadas, cuyas salidas son multiplexadas sobre las mismas cuatro líneas BCD, de forma que presentan sucesivamente una a una las cifras decimales. El mismo circuito integrado incluye el multiplexor y el correspondiente contador de control del mismo, recibiendo la frecuencia deseada para el multiplexado a través de pulsos por una entrada de muestreo (SCAN) o mediante un simple condensador exterior que determina la frecuencia de muestreo.

Un paso más consiste en incluir un registro de retención que reciba las cifras de los contadores BCD, estando en este caso las salidas del registro multiplexadas sobre los cuatro terminales de salida; ello permite utilizar directamente tal integrado en aplicaciones más complejas que el simple contaje, siendo muy apropiado para la realización de frecuencímetros.

El desarrollo de esta línea de creciente complejidad y potencia de cálculo ha culminado en el concepto de ***contador universal***:

- un contador suficientemente amplio, generalmente de 6 décadas, bidireccional, con posibilidad de carga paralelo multiplexada (de forma que cada vez se almacena una de las cifras BCD), con salidas indicadoras de que se encuentra en su valor máximo y en su valor mínimo (0), junto con las correspondientes entradas de borrado e inhibición;
- un registro de retención conectado a la salida del contador, con salidas multiplexadas cifra a cifra sobre cuatro terminales BCD y, a la vez, decodificadas en 7 segmentos para atacar directamente a un visualizador;
- un segundo registro de retención programable exteriormente en forma multiplexada análoga a la del contador y cuyo contenido se compara aritméticamente con el del contador de forma que una salida exterior indica la igualdad entre ambos;

- y el sistema de multiplexado necesario para la salida de las cifras del primer registro y para la programación del contador y del segundo registro; la velocidad de muestreo se fija mediante un condensador exterior y 6 líneas individuales indican cuál de las cifras BCD se encuentra activa en cada momento.



Contador universal de 6 cifras BCD

El anterior es un posible esquema de bloques de un «contador universal»; una aplicación inmediata de tales contadores es el diseño de frecuencímetros o temporizadores para lo cual se requiere añadir muy poca circuitería adicional.

Por otra parte, existen contadores amplios de propósito particular entre los que destacan los dedicados a relojes digitales que contienen toda la circuitería necesaria para su configuración como sistemas autónomos sin más que añadir el visualizador, la alimentación de tensión y el cristal de cuarzo que genera la frecuencia inicial; tales integrados incluyen, el sistema de programación de la hora mediante simples pulsadores y la función de despertador o alarma.

Se utilizan contadores análogos de contaje horario (*real time clock* RTC) como periféricos de microprocesadores (o de otros sistemas digitales complejos), a los cuales pueden comunicar la hora mediante transmisión serie (utilizando muy pocas líneas para tal comunicación).

16.3. Diseño de contadores síncronos con biestables D

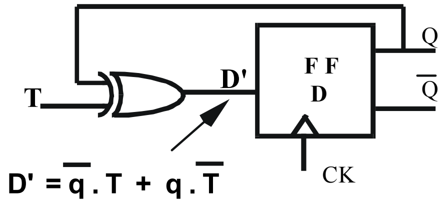
Para construir contadores con biestables síncronos tipo **D**, las funciones booleanas de activación de sus entradas $\mathbf{D_i}$ no sólo han de contener las condiciones en que el biestable cambia de estado, sino también aquellas en que conserva el estado **1**.

Tomando como referencia el diseño de contadores síncronos con biestables **T**, las funciones $\mathbf{T_i}$ expresan las situaciones en las cuales el correspondiente biestable debe conmutar y, en cambio, cuando $\mathbf{T_i = 0}$ el biestable debe conservar el valor anterior; ello nos permite escribir:

$$D_i = \overline{q_i} \text{ . cuando debe conmutar } + q_i \text{ . cuando debe permanecer}$$

$$= \overline{q_i} \cdot T_i + q_i \cdot \overline{T_i}$$

expresión que se corresponde con la forma de construir un biestable **T** a partir de un biestable síncrono tipo **D**.



Por tanto, una forma sencilla de diseñar contadores con biestables tipo **D**, consiste en construir las funciones $\mathbf{T_i}$ correspondientes al diseño con biestables **T** y, a partir de ellas, aplicar la anterior transformación a biestables **D:**

$$D_i = \overline{q_i} \cdot T_i + q_i \cdot \overline{T_i} .$$

Por ejemplo, sea un contador módulo 12:

último estado	**n-1**	***11***	**1**	**0**	**1**	**1**	← $q_3.q_1.q_0$
siguiente estado	**n**	***12***	**1**	**1**	**0**	**0**	
estado inicial	**0**	***0***	**0**	**0**	**0**	**0**	
			↓	X	-	-	

$$T_0 = E$$

$$T_1 = E.q_0$$

$$T_2 = E.q_1.q_0.\overline{(q_3.q_1.q_0)} = E.\overline{q_3}.q_1.q_0$$

$$T_3 = E.q_2.q_1.q_0 + E.q_3.q_1.q_0 = E.q_1.q_0.(q_3 + q_2)$$

quedando la activación de las entradas **D_i** en la forma que sigue.

$$D_0 = \overline{q_0}.E + q_0.\overline{E} = E.\overline{q_0} + \overline{E}.q_0$$
$$D_1 = \overline{q_1}.E.q_0 + q_1.(\overline{E} + \overline{q_0}) = E.\overline{q_1}.q_0 + q_1.\overline{q_0} + \overline{E}.q_1$$
$$D_2 = \overline{q_2}.E.\overline{q_3}.q_1.q_0 + q_2.(\overline{E} + q_3 + \overline{q_1} + \overline{q_0})$$
$$= E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.q_1.q_0 + q_3.q_2 + q_2.\overline{q_1} + q_2.\overline{q_0} + \overline{E}.q_2$$
$$D_3 = \overline{q_3}.E.q_1.q_0.(q_3 + q_2) + q_3.(\overline{E} + \overline{q_1} + \overline{q_0} + \overline{q_3}.\overline{q_2})$$
$$= E.\overline{q_3}.q_2.q_1.q_0 + q_3.\overline{q_1} + q_3.\overline{q_0} + \overline{E}.q_3$$
$$max = E.q_3.q_1.q_0$$

En la función correspondiente a **D_2** puede prescindirse del término $+q_3.q_2$ ya que nunca se alcanza dicho valor (corresponde a números mayores de 11).

Para añadir una entrada de borrado síncrono **B**, basta con multiplicar por $\overline{B}$ las expresiones de activación de las entradas **D_i**, de forma que cuando **B = 1** el dato que reciben los biestables sea **0**.

$$D_0 = \overline{B}.E.\overline{q_0} + \overline{B}.\overline{E}.q_0$$
$$D_1 = \overline{B}.E.\overline{q_1}.q_0 + \overline{B}.q_1.\overline{q_0} + \overline{B}.\overline{E}.q_1$$
$$D_2 = \overline{B}.E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.q_1.q_0 + \overline{B}.q_2.\overline{q_1} + \overline{B}.q_2.\overline{q_0} + \overline{B}.\overline{E}.q_2$$
$$D_3 = \overline{B}.E.\overline{q_3}.q_2.q_1.q_0 + \overline{B}.q_3.\overline{q_1} + \overline{B}.q_3.\overline{q_0} + \overline{B}.\overline{E}.q_3$$

En las expresiones anteriores el borrado **B** es prioritario (respecto a la habilitación **E**); si se quisiera dar prioridad a la habilitación (es decir, que no se borre si no hay habilitación) será necesario dejar sin multiplicar por $\overline{B}$ el término $+\ \overline{E}.q_i$, responsable de conservar el valor del biestable en ausencia de habilitación.

A veces los contadores no empiezan en valor 0, sino que su primer estado es un número no nulo; la forma de diseñarlos es análoga, con el mismo tipo de razonamiento. Consideremos, por ejemplo, un contador módulo 6 que simule el funcionamiento de un dado y, por tanto, cuente de 1 a 6 (en lugar de 0 a 5):

último estado	**6**	**1**	**1**	**0**	← $q_2.q_1$
siguiente estado	**7**	**1**	**1**	**1**	
estado inicial	**1**	**0**	**0**	**1**	
		↓	↓	-	

$$T_0 = E$$
$$T_1 = E.q_0 + E.q_2.q_1$$
$$T_2 = E.q_1.q_0 + E.q_2.q_1 = E.q_1.(q_2 + q_0)$$

$$D_0 = E.\overline{q_0} + \overline{E}.q_0$$
$$D_1 = E.\overline{q_1}.q_0 + \overline{q_2}.q_1.\overline{q_0} + \overline{E}.q_1$$
$$D_2 = E.\overline{q_2}.q_1.q_0 + q_2.\overline{q_1} + \overline{E}.q_2$$

Si se utiliza como reloj de pulsos de dicho contador una onda de frecuencia relativamente alta y se activa la habilitación a través de un pulsador manual, el número en que se detenga al finalizar la habilitación será aleatorio y tendremos un dado «electrónico» (análogo al diseñado en 14.2.6, página 92).

Un segundo ejemplo: *en algunos juegos de rol se utilizan dados de 25 caras, numeradas de 1 a 25; supongamos que deseamos diseñar un contador para simular dichos dados (este contador módulo 25, que cuente de 1 a 25, ha de contar en BCD para poder representar el resultado en sendos visualizadores de 7 segmentos).*

El contador tendrá 6 biestables, los cuatro inferiores **q_3 q_2 q_1 q_0** para representar las unidades y los dos superiores **q_5 q_4** para contar hasta 2; el contador formado por los cuatro biestables inferiores **q_3 q_2 q_1 q_0** ha de ser módulo 10 (contando solamente de 0 a 9 para respetar las cifras decimales)

9	**1**	**0**	**0**	**1**	← $q_3.q_0$
10	**1**	**0**	**1**	**0**	
0	**0**	**0**	**0**	**0**	
	↓	-	X	-	

y el contador global **q_5 q_4 q_3 q_2 q_1 q_0** ha de ser módulo 25, de 1 a 25:

25	**1**	**0**	**0**	**1**	**0**	**1**	← $q_5.q_2.q_0$
26	**1**	**0**	**0**	**1**	**1**	**0**	
1	**0**	**0**	**0**	**0**	**0**	**1**	
	↓	-	-	↓	X	X	

- en **q_0** hay que imponer la condición de que no conmute en el estado 25;
- **q_1** no debe conmutar ni en el estado 9 (BCD) ni en el estado 25;
- a **q_2** es preciso obligarle a conmutar en el estado 25;
- a **q_3** hay que obligarle a conmutar en el estado 9 (BCD);
- **q_4** y **q_5** solamente deben contar cuando el contador **q_3 q_2 q_1 q_0** está en 9 (BCD)
- y a **q_5** hay que obligarle a conmutar en el estado 25:

$$T_0 = E.\overline{(q_5.q_2.q_0)} = E.\overline{q_5} + E.\overline{q_2} + E.\overline{q_0}$$

$$T_1 = E.q_0.\overline{(q_3.q_0)}.\overline{(q_5.q_2.q_0)} = E.\overline{q_3}.q_0.(\overline{q_5} + \overline{q_2})$$

$$T_2 = E.q_1.q_0 + E.q_5.q_2.q_0$$

$$T_3 = E.q_2.q_1.q_0 + E.q_3.q_0 \qquad \text{contador BCD (módulo 10)}$$

$$T_4 = E.q_3.q_0 \qquad \text{cuenta cuando el anterior está en 9}$$

$$T_5 = E.q_3.q_0.q_4 + E.q_5.q_2.q_0$$

$$D_0 = E.\overline{q_0} + q_5.q_2.q_0 + \overline{E}.q_0$$

$$D_1 = E.\overline{q_5}.\overline{q_3}.\overline{q_1}.q_0 + E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.q_0 + q_3.q_1 + q_1.\overline{q_0} + \overline{E}.q_1$$

$$D_2 = E.\overline{q_2}.q_1.q_0 + q_2.\overline{q_0} + \overline{q_5}.q_2.\overline{q_1} + \overline{E}.q_2$$

$$D_3 = E.\overline{q_3}.q_2.q_1.q_0 + q_3.\overline{q_0} + \overline{E}.q_3$$

$$D_4 = E.\overline{q_4}.q_3.q_0 + q_4.\overline{q_3} + q_4.\overline{q_0} + \overline{E}.q_4$$

$$D_5 = E.\overline{q_5}.q_4.q_3.q_0 + q_5.\overline{q_0} + q_5.\overline{q_3}.\overline{q_2} + q_5.\overline{q_4}.\overline{q_2} + \overline{E}.q_5$$

En la función correspondiente a **D1** se ha prescindido del término $+ q_5.q_2.q_1$ ya que nunca se alcanza dicho valor (corresponde al número 26).

Este contador requiere 6 biestables y puede ser programado en un bloque **PLS**, cuyas macroceldas dispongan de, al menos, 5 términos producto; utiliza solamente una entrada exterior **E**.

Contador descendente

Al pasar las funciones booleanas correspondientes al contaje descendente en módulo 10 (apartado 16.2.1), a biestables síncronos tipo **D**, resulta:

$$T_0 = E \qquad\qquad D_0 = E.\overline{q_0} + \overline{E}.q_0$$

$$T_1 = E.\overline{q_0}.(q_3 + q_2 + q_1) \qquad\qquad D_1 = E.q_3.\overline{q_1}.\overline{q_0} + E.q_2.\overline{q_1}.\overline{q_0} + q_1.q_0 + \overline{E}.q_1$$

$$T_2 = E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_3 + q_2) \qquad\qquad D_2 = E.q_3.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} + q_2.q_1 + q_2.q_0 + \overline{E}.q_2$$

$$T_3 = E.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} \qquad\qquad D_3 = E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} + q_3.q_0 + \overline{E}.q_3$$

$$\text{mín} = E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} \qquad\qquad \text{mín} = E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

En la función correspondiente a **D3** se ha prescindido de los términos $+ q_3.q_2$ y $+ q_3.q_1$ ya que nunca se alcanzan dichos valores (12 y 10).

Contador bidireccional

En el caso del contador módulo 10 (década) bidireccional (apartado 16.2.2):

$$T_0 = E$$

$$T_1 = C.E.\overline{q_3}.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_0}.(q_3 + q_2 + q_1)$$

$$T_2 = C.E.q_1.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_1}.\overline{q_0}.(q_3 + q_2)$$

$$T_3 = C.E.(q_2.q_1.q_0 + q_3.q_0) + \overline{C}.E.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0}$$

$$\text{máx / mín} = C.E.q_3.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} \; .$$

construyendo este mismo contador con biestables síncronos tipo **D**, queda:

$$D_0 = E.\overline{q_0} + \overline{E}.q_0$$

$$D_1 = C.E.\overline{q_3}.q_1.q_0 + C.q_1.\overline{q_0} + \overline{C}.E.q_3.\overline{q_1}.\overline{q_0} + \overline{C}.E.q_2.\overline{q_1}.\overline{q_0} + \overline{C}.q_1.q_0 + \overline{E}.q_1$$

$$D_2 = C.E.\overline{q_2}.q_1.q_0 + C.q_2.\overline{q_1} + C.q_2.\overline{q_0} + \overline{C}.E.q_3.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} + \overline{C}.q_2.q_1 + \overline{C}.q_2.q_0 + \overline{E}.q_2$$

$$D_3 = C.E.\overline{q_3}.q_2.q_1.q_0 + C.q_3.\overline{q_0} + \overline{C}.E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} + \overline{C}.q_3.q_0 + \overline{E}.q_3$$

$$\text{máx / mín} = C.E.q_3.q_0 + \overline{C}.E.\overline{q_3}.\overline{q_2}.\overline{q_1}.\overline{q_0} \; .$$

16.4. Los contadores y el sincronismo global

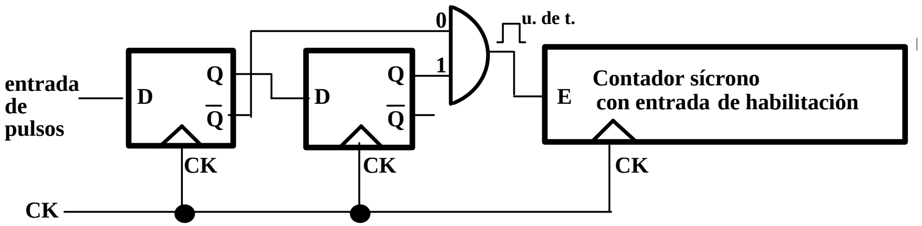
Contaje de pulsos diferentes del reloj

El diseño de sistemas digitales complejos se realiza en forma síncrona; para ello, además de utilizar contadores síncronos, conviene prestar atención a la forma de incorporarlos dentro del diseño respetando el sincronismo global del sistema.

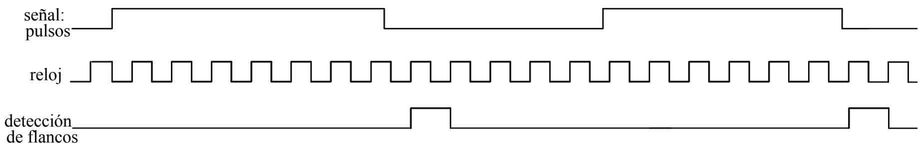
No basta con que los contadores sean síncronos, también hay que asegurar que su conexión se hace en forma síncrona. Si, por ejemplo, un contador recibe en su entrada de pulsos (entrada que actúa por flancos) cualquier señal diferente del propio reloj del sistema se pierde el sincronismo, ya que el contador cambiará su estado según el flanco activo de esa señal y no con referencia al flanco activo del reloj. Lo mismo sucede si se producen borrados asíncronos del contador (por entradas del tipo *Clear* o *Reset*).

El reloj central de un sistema secuencial síncrono es la única señal que actúa «por flancos»; cualquier otra señal debe actuar por niveles booleanos **0** y **1**. En tal sentido, cuando se desea contar pulsos diferentes a los propios de la señal de reloj, ha de transformarse el correspondiente flanco de los mismos (generalmente el de bajada, con el cual finaliza el pulso) en un pequeño pulso coincidente con una unidad de tiempo del reloj central y habilitar con dicho pulso el contaje del contador síncrono, cuyo reloj seguirá siendo el propio del sistema secuencial global.

El esquema necesario para detectar un flanco de bajada de un pulso cualesquiera (de mayor duración que la unidad de tiempo del reloj central) y transformar dicho flanco en un nivel activo **1**, cuya duración coincida con una unidad de tiempo, es simple: dos biestables sucesivos, formando un reducido registro de desplazamiento, que detecten la secuencia **10** (en una *bajada* el valor anterior del pulso será **1** y el siguiente valor del pulso será **0**). [Véase este mismo diseño realizado como ejercicio en 14.2.3, página 86.]



Este tipo de esquema de «detección de flanco» (detectar un **1** seguido de un **0** en el caso del flanco descendente o viceversa para flancos de subida) debe ser utilizado en cualquier actuación «por flancos» de una señal distinta de la del reloj central del sistema.



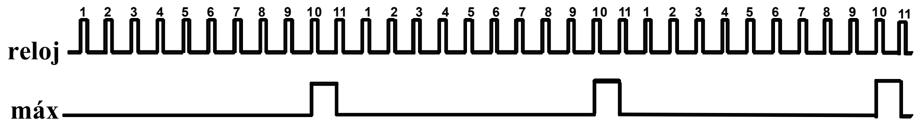
El detector de flancos es un bloque secuencial que aparece con mucha frecuencia en los diagramas de bloques correspondientes al diseño de sistemas digitales.

La señal resultante de la detección de flancos está sincronizada con el reloj del sistema, tiene la misma frecuencia que la señal de pulsos (un pulso por cada uno de entrada) pero su «tiempo en **1**» coincide con una unidad de tiempo del reloj: de esta forma, solamente habilita una vez (coincidiendo con el reloj) por cada pulso que se desea contar. Esta señal es del tipo de las ondas de temporización que trataremos a continuación.

Ondas de temporización

Las señal que se obtiene en la salida **máx** de un contador módulo **n**, alimentado con la frecuencia de reloj **CK** del sistema digital correspondiente, es una onda que se repite cada **n** pulsos de reloj (frecuencia = $\mathbf{f_{CK} / n}$) y cuyo intervalo en valor **1** coincide con una unidad de tiempo del reloj **CK**.

Por ejemplo, en el caso de un contador módulo 11, dicha señal, con amplitud en **1** de una unidad de tiempo de reloj, dividirá la frecuencia del reloj por 11:



Este tipo de formas de onda pueden ser utilizadas como señales de temporización en los sistemas síncronos: su actuación solamente se hará presente durante un pulso de reloj y podrá servir para condicionar transiciones de forma que se realicen después de haber transcurrido el intervalo de tiempo correspondiente a su período.

Asimismo, si deseamos temporizar en forma síncrona con alguna señal (bien sea una entrada al circuito digital o una señal intermedia generada por el mismo) deberá configurarse una onda de temporización en forma análoga: intervalo activo igual a una unidad de tiempo de reloj. Lo cual puede hacerse mediante un detector de flancos como el detallado en la página anterior.

Así, por ejemplo, en sistemas de control de la potencia suele interesar temporizar con la señal de cruce por cero de la red, la cual se repite cada 10 ms (dos veces por período, frecuencia de 50 Hz). Dicha señal puede obtenerse comparando la señal de la red (reducida mediante un transformador), rectificada en doble onda, con una referencia baja; posteriormente habrá que utilizar un detector de flancos para que la señal resultante actúe una sola vez (esté activa durante un solo pulso de reloj).

Dividiendo la anterior señal por 100 se tiene un período de 1 segundo; la salida **máx** del contador módulo 100 que produce tal división de frecuencia presenta un «tiempo en **1**» de una sola unidad de tiempo de reloj, de forma que puede ser utilizada como onda de temporización.