CAPITULO IV

Aplicación de la teoría binodal al diseño lógico de los automatismos secuenciales gobernados por los niveles de sus entradas

4.1. INTRODUCCION

La realización de la síntesis de los sistemas digitales secuenciales mediante los métodos convencionales entraña una gran laboriosidad así como problemas de optimización, no siempre de facil y metódica solución.

Dicha síntesis suele realizarse a partir del diagrama de estados, del cual se obtiene la tabla de fases que necesita ser simplificada posteriormente mediante la eliminación de posibles estados equivalentes y la realización de la fusión de líneas. De esta tabla fusionada se obtiene la tabla de flujo para proceder, a continuación, a las asignaciones binarias a los diferentes estados, obteniéndose por fin los mapas o matrices de excitación y de salida, simplificables ya por el método de Karnaugh.

Las mencionadas asignaciones binarias a los estados, además de tener que realizarse de forma arbitraria, y consecuentemente presentar problemas de optimización, obscurecen la visión global del problema tratado.

La aplicación de la ***"Teoría Binodal"*** (de la que expondremos seguidamente los conceptos que más nos interesan para el objetivo práctico que se persigue en éste libro) a los procesos de síntesis de sistemas secuenciales asíncronos y sincronizados da lugar a métodos más rápidos e intuitivos que los empleados actualmente, sin que en ningún momento del proceso se pierda la imagen global del sistema tratado, ya que una vez confeccionado (según ciertas normas que expondremos a lo largo del texto) un gráfico representativo de la dinámica del sistema, denominado "Grafo de secuencia", se obtienen directamente las ecuaciones lógicas que rigen el comportamiento del sistema, por simple aplicación de los teoremas binodales.

Por otra parte, en la síntesis de sistemas asíncronos (que son los que evolucionan sin precisar el control de una señal de reloj) resultará sencillo evitar las transiciones críticas y los deslizamientos de secuencia, ya que el "grafo de secuencia" contiene todas las evoluciones internas del sistema y, por tanto, las anomalias citadas podrán ser eliminadas facilmente a medida que se vaya construyendo aquél.

4.2. CONCEPTOS BINODALES BASICOS

El planteamiento de la teoría binodal (referencias bibliográficas (1) ~ (4)) se inicia con la definición de dos nuevos conceptos que denominamos “binodo” y “multinodo” y con la descripción de un diagrama que designamos con el nombre de “grafo de secuencia”. A partir de las definiciones de estas estructuras se deducen los teoremas binodales, los cuales permiten obtener, de forma rápida, las ecuaciones de salida de cualquier binodo, resultando además dichas ecuaciones simplificadas en la mayoría de los casos, o pendientes de una mínima y directa simplificación.

4.2.1. Definición general de binodo. Variables de acción

Se dice que un dispositivo cualquiera posee estructura de binodo, cuando únicamente puede encontrarse en dos situaciones (representadas por S y S) disjuntas y complementarias, pudiendo conmutar, de una de ellas a la otra, por efecto de ciertas variables que se denominan “variables de acción” (v.d.a), independientemente de que el efecto de dichas variables quede o no memorizado al desaparecer éstas.

Se distinguen dos tipos fundamentales de binodos, que son designados por: *binodo “bi” y binodo “mono” o “monodo”.*

4.2.2. Binodo “mono” o “monodo”. Gráfico representativo

Se denomina así a todo aquél binodo que necesita la presencia de una, al menos, de las variables de acción (v.d.a) del grupo de las creadoras Mr (r = 1, 2, n) y la ausencia de todas las v.d.a. del grupo de las anulatorias Pu (u = 1, 2, ... m) para sostener una de sus dos situaciones " ;“, a la que se denomina situación principal.

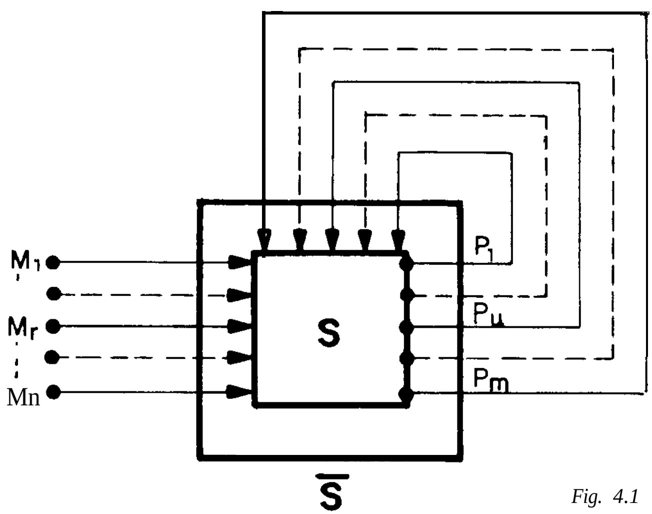


Fig. 4.1

Esta estructura binodal (que en lo sucesivo denominaremos "monodo", por simplificación de lenguaje) se representa simbólicamente por el grafo de la Fig. 4.1., en el cual se observa que la situación principal “S” existirá cuando estando presente alguna de las v.d.a. “Mr”, representadas por líneas orientadas, no exista ninguna de las v.d.a. “Pu”; es decir, el efecto de las v.d.a. anulatorias de la situación (S), Pu, tiene prioridad sobre el de las v.d.a. creadoras Mr de dicha situación, en el supuesto de que variables de ambos grupos actuen simultáneamente.

La ausencia de la situación S, representada por el contorno cuadrangular externo en la Fig. 4.1, no es una magnitud física disponible simultáneamente con la S, ya que representa únicamente el estado de reposo o desactivación del binodo “mono” (esta es la razón de la adjetivación “mono” con que se designa esta estructura binodal). La característica que acabamos de mencionar es una de las diferencias existentes entre el “monodo” y el binodo “bi” que se definirá posteriormente, y en el cual no podrá hablarse propiamente de situación de reposo y situación principal, ya que ambas tendrán en principio similares características.

4.2.3. Binodo “bi”. Grafo de secuencia representativo

Se denomina binodo “bi” a todo aquél binodo que se mantiene en la situación en la que se encuentra aunque desaparezca la v.d.a. que la originó, siempre y cuando no exista otra v.d.a. de efecto antagónico que le haga bascular a la situación opuesta.

Debe ser evitada en el binodo “bi” la acción simultánea de dos o más v.d.a. de efectos antagónicos, ya que se produciria una indeterminacion en sus situaciones; más adelante se detallará la forma de evitar esta indeterminación en el supuesto de acciones simultáneas inevitables.

El grafo de secuencia del binodo “bi” puede expresarse en cualquiera de las tres formas indicadas en la Fig. 4.2.

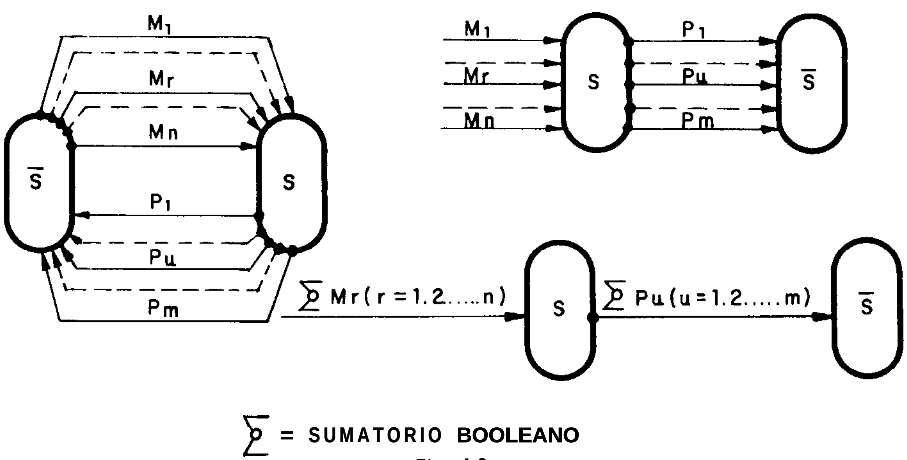


Fig. **4.2**

La situación S se produce (S = "1" lógico) cuando encontrándose el binodo en $\bar{S}$ ($\bar{S}$ = "1") aparece una o varias de las variables Mr (r = 1,2, . . . n), y se produce $\bar{S}$ cuando encontrándose el binodo en S aparece una o varias de las variables Pu (u = =1,2 . ..m).

A diferencia del "monodo", este binodo proporciona dos situaciones S y $\bar{S}$, cuyas magnitudes físicas (de distinto nivel lógico) pueden ser utilizadas simultáneamente.

4.2.4. **Multinodo . Grafo de secuencia**

Bajo la denomianción de multinodo se incluye a toda estructura constituida por varios binodos influenciados entre sí. Como consecuencia aparecerán numerosas situaciones que a su vez podrán actuar como v.d.a. o bien como condicionantes de otras v.d.a. de los diferentes binodos.

Nos encontraremos, pues, con v.d.a. internas, externas, temporizadas, diferenciadas, etc., así como compuestas; es decir, en forma de expresiones booleanas de varias variables simples.

Cada una de las múltiples situaciones parciales del multinodo pueden proporcionar al exterior, de forma simultánea, una acción física que se denomina salida.

La configuración global de las situaciones de los binodos intregrantes de un multinodo define el "instante situacional" del sistema, el cual al ir variando a lo largo del tiempo (como consecuencia de la aparición de las distintas v.d.a.) irá dando lugar a los diferentes ***estados internos*** del sistema.

En la Fig. 4.3, se muestra, a modo de ejemplo, el grafo de secuencia de un multinodo, el cual nos proporciona una visión global y dinámica de todas las evoluciones del programa operacional que representa.

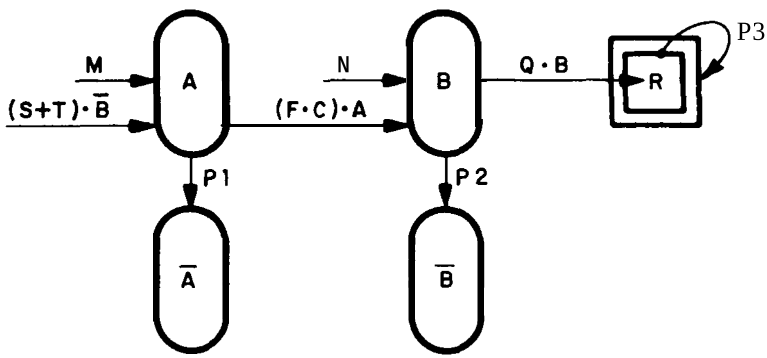


Fig. 4.3

Para aclarar los conceptos expuestos, explicamos a continuación el significado del grafo de secuencia de la figura anterior.

En primer lugar, se observa que este multinodo está constituido por dos binodos "bi" y un "monodo".

La situación A es creada por la v.d.a. M, o bien por la booleana (S + T), pero condicionada está última a la existencia de B, es decir, tiene que valer "1" la expresión $(S + T) \cdot \bar{B}$. La situación complementaria de A, o sea $\bar{A}$, será creada por la acción de P1.

La situación B es creada por la acción de la variable N, o por la booleana F.C condicionada a la existencia de A, y será borrada, es decir creada su complementaria $\bar{B}$, por la acción de la variable P2.

La situación R será creada por Q condicionada a B, o sea, por $Q \cdot B$, y borrada por P3.

4.3. INTRODUCCION A LA SINTESIS BINODAL DE AUTOMATISMOS SECUENCIALES GOBERNADOS POR LOS NIVELES DE SUS ENTRADAS

Las ecuaciones de los sistemas lógicos combinacionales, llamados así porque la salida depende únicamente de la combinación final de las variables de entrada, pueden obtenerse facilmente, como ya hemos visto en el capítulo II, a partir de sencillas tablas de verdad. Pero, gran número de automatismos industriales no dependen, solamente, de la combinación de las variables de entrada, sino también del orden seguido en la actuación de dichas variables y del estado en que se encontraba el sistema. En este caso nos encontramos ante un sistema SECUENCIAL que además se caracteriza porque las variables que intervienen en la secuencia pueden estar temporizadas o diferenciadas.

Dado que el objetivo de este capítulo es presentar un método práctico para el diseño de automatismos secuenciales, únicamente estamos exponiendo aquellas partes de la teoría binodal de las que se pueda deducir una aplicación práctica inmediata a los sistemas que nos ocupan. Como consecuencia de ello, nos hemos permitido sacrificar la rigurosidad científica, en algunos casos, en beneficio de la sencillez.

Enunciamos a continuación, en forma sencilla y sin demostración*, los teoremas binodales que aplicaremos en la síntesis de sistemas secuenciales, para pasar inmediatamente a la resolución de varios problemas de automatismos, los cuales aclararán aquellos conceptos que no hayan quedado suficientemente comprendidos en la exposición teórica.

4.3.1. Teorema del binodo "bi".

La expresión matemática de este teorema aplicada al binodo "bi" genérico de la Fig. 4.2. es la siguiente:

(*) En el Apéndice II se realiza la demostración de los teoremas binodales.

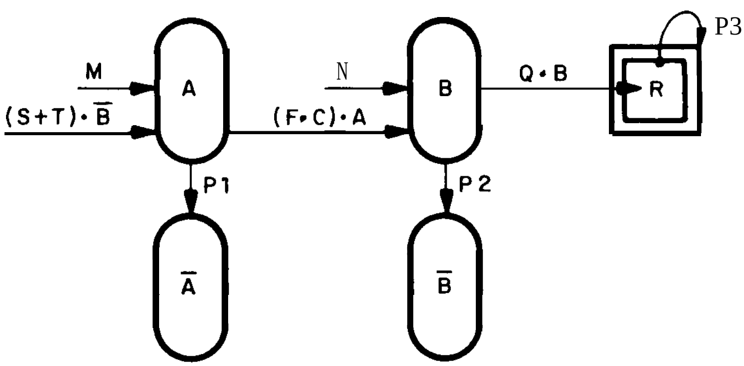
$$S_{(t)} = \left[\left(S + \sum_{r=1}^{n} Mr \right) \cdot \prod_{u=1}^{m} \overline{Pu} \right]_{(t-\tau)}$$

en donde: Σ y $\prod$ son el sumatorio y el productorio booleano respectivamente, t el instante considerado y τ el tiempo de conmutación del binodo en cuestión.

De la expresión matemática anterior podemos deducir la siguiente regla:

- “La ecuación lógica de salida de una situación cualquiera de un binodo, independiente o integrado en un multinodo, se halla sumando a la propia situación las v.d.a. que la crean, y multiplicando este resultado posteriormente por las inversas de las v.d.a. que hacen conmutar al binodo a la situación complementaria de la considerada”.

Aplicando el teorema enunciado al grafo de secuencia de la Fig. 4.3, que reproducimos nuevamente a continuación, se obtienen las ecuaciones lógicas siguientes:



Para la situación A: $A = [A + M + (S + T) \cdot \overline{B}] \cdot \overline{P}1$

Para la situación $\overline{A}$: $\overline{A} = (\overline{A} + P1) \cdot \overline{M} \cdot \overline{(S + T) \cdot \overline{B}}$

Para la situación B: $B = (B + N + F \cdot C \cdot A) \cdot \overline{P}2$

Para la situación $\overline{B}$: $\overline{B} = (\overline{B} + P2) \cdot \overline{N}\ \overline{F \,.\, C \,.\, A}$

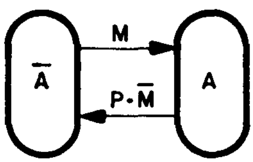
El teorema del binodo también puede expresarse mediante un 2° enunciado, cuya formulación matemática es la siguiente:

$$\boxed{S_{(t)} = \left[S \cdot \prod_{u=1}^{m} \bar{P}_u + \sum_{r=1}^{n} M_r \right]_{(t-\tau)}}$$

Las ecuaciones obtenidas para una situación mediante los dos enunciados son equivalentes, aunque tienen distinta estructura, siempre que se verifique la hipótesis de no simultaneidad de v.d.a. de efectos antagónicos.

En los casos en que se admita la simultaneidad de v.d.a. antagónicas, se demuestra que el 1.e enunciado del teorema proporciona una ecuación lógica que da prioridad al efecto de las v.d.a. de borrado sobre las de la creación de la situación, en tanto que el 2.” enunciado da prioridad a las v.d.a. creadoras de la situación. No obstante, debe quedar claro que por medio de condicionantes en el grafo de secuencia puede imponérsele a cualquiera de los dos enunciados del teorema binodal la prioridad que se desee; es decir, cualquiera de los dos enunciados responde a las exigencias de los condicionantes de prioridad introducidos en el grafo de secuencia. Así pues, las ecuaciones lógicas, una vez simplificadas serán idénticas.

Veamos un ejemplo. -En el binodo de la figura se ha dado, por medio del condicionante $\bar{M}$, prioridad a la v.d.a. M sobre la P en el caso de que exista simultaneidad:



Aplicando el 1.^{er} enunciado del teorema y simplificando la ecuación obtenida, resulta:

$$A = (A + M) \cdot \overline{P \cdot \bar{M}} = (A + M) \cdot (\bar{P} + M) = A \cdot \bar{P} + A \cdot M + M \cdot \bar{P} + M = \boxed{A \cdot \bar{P} + M}$$

Aplicando el 2.° enunciando se tiene:

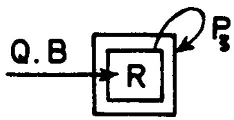
$$A = A \cdot \overline{P \cdot \bar{M}} + M = A \cdot (\bar{P} + M) + M = A \cdot \bar{P} + A \cdot M + M = \boxed{A \cdot \bar{P} + M}$$

Puede comprobarse la identidad de los dos resultados.

4.3.2. **Teorema** del “monodo”

“la ecuación lógica de la salida de un “monodo” se obtiene aplicando el 1.er enunciado del teorema del binodo, pero sin repetir como sumando la monosituación.

Así pues, la ecuación del “monodo” R del grafo de secuencia que venimos considerando, será la siguiente:



$$R=(Q \cdot B) \cdot \overline{P}_3$$

- El monodo carece de memoria puesto que es una estructura combinacional, y únicamente aparecerá en los grafos como elemento accesorio de alguna salida de binodo.

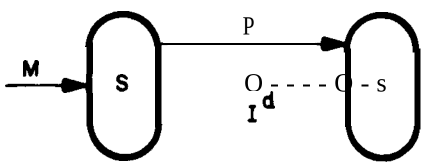
Para facilitar la comprensión del método se plantean, seguidamente,varios problemas prácticos de síntesis, realizándose el grafo de secuencia y deduciéndose las ecuaciones lógicas correspondientes.

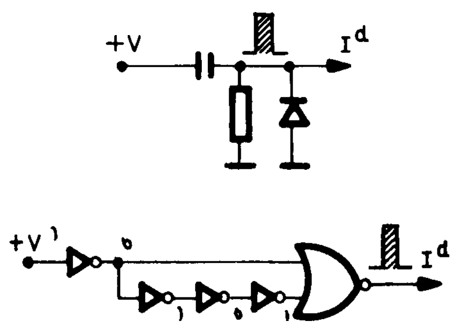
4.3.3. **Algunos ejemplos de síntesis**

En lo sucesivo, supondremos que los binodos “bi” que vamos a ir introduciendo en los diferentes grafos de secuencia se encuentran inicialmente en estado de reposo (situación S), salvo que se especifique lo contrario. Para que esto se cumpla, será preciso conectar a la entrada de “puesta a cero” de los binodos, la salida de un diferenciador del flanco de subida de la tensión de alimentación.

Una vez hecha esta aclaración, de carácter tecnológico, prescindiremos de la introducción sistemática de dicho diferenciador, para mayor claridad de los esquemas.

Diferenciadores





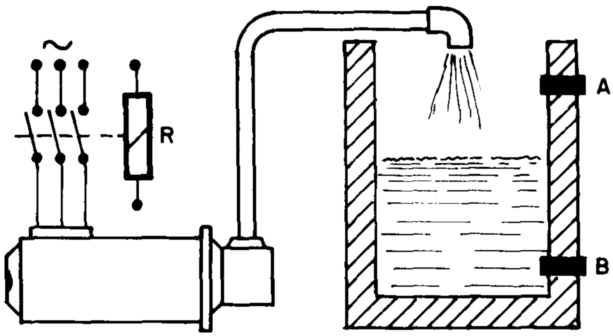
I^d = **IMPULSO DE TENSION**

A la salida del diferenciador, a efectos del grafo y de las ecuaciones, se la considerará como una variable de entrada "impulsional" más.

En el apartado 6.5. estudiaremos las características de dispositivos diferenciadores de diversos tipos.

Ejercicio 1

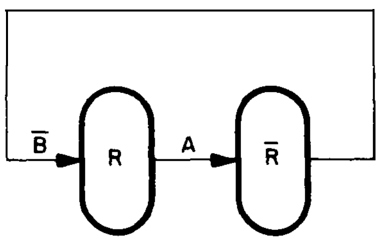
Un depósito de agua posee dos detectores de nivel, uno superior A y otro inferior B. La electrobomba que lo alimenta ha de ponerse en marcha cuando falte el nivel B y debe pararse cuando el agua alcance el nivel A, y seguir parada hasta que vuelva a faltar B.



Diseñemos un circuito lógico que realice el gobierno de la electrobomba.

Los captadores de información son los detectores de nivel A y B, cuya información después de tratada dará una salida, en este caso una tensión eléctrica que activará al contactor R de la electrobomba.

El grafo de secuencia deberá expresar el programa de trabajo impuesto al sistema. En este caso puede hacerse con un solo binodo "bi":



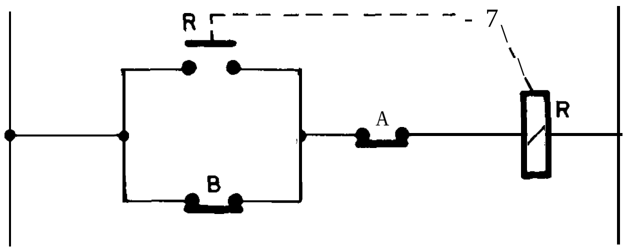
Aplicando a este grafo el teorema binodal, se tendrá la siguiente ecuación:

$$R = (R + \overline{B}) \cdot \overline{A}$$

Esta ecuación, expresión analítica del programa, puede materializarse en un circuito eléctrico realizado con contactos o con puertas lógicas.

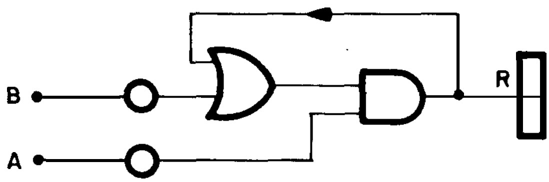
REALIZACION DEL CIRCUITO CON CONTACTOS

Dado que las variables afectadas con la barra de inversión representan contactos normalmente cerrados y las que no llevan la inversión representan contactos normalmente abiertos, el circuito resultante será el siguiente:



REALIZACION DEL CIRCUITO CON PUERTAS LOGICAS

En esta ocasión vamos a realizarlo con puertas "Y" y "0". (También podria realizarse con solo puertas NOR o NAND, previa transformación de la ecuación por el teorema de De Morgan):

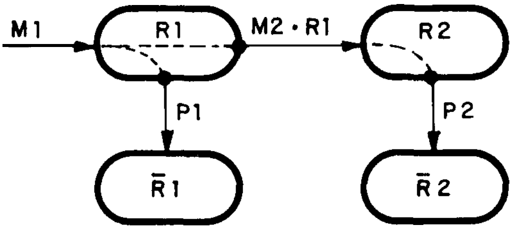


Ejercicio 2

Se desea gobernar dos relés Rl y R2, de tal forma que Rl pueda actuar con independencia de R2, .pero que R2 sólo pueda excitarse cuando Rl esté excitado, si bien, una vez excitado R2 puede seguir existiendo aunque desaparezca **Rl .**

La activación del relé RI se hará por un impulso eléctrico proporcionado por un pulsador Ml , y la activación de R2 por un pulsador M2. La desactivación de ambos relés se producirá por un impulso eléctrico en P1 y P2 respectivamente.

GRAFO DE SECUENCIA



Ecuaciones lógicas

$$R_1 = (R, + M_1) \cdot \overline{P}_1$$

$$R_2 = (R_2 + M_2 \cdot R_1) \cdot \overline{P}_2$$

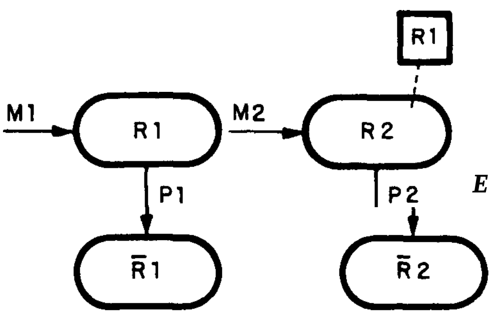
El enunciado del ejercicio nos indica que la situación R2 debe ser creada por la v.d.a. M2, pero condicionada a la existencia de **Rl ,** si bien, una vez creada dicha situación R2, debe persistir aunque desaparezca Rl . En estos casos decimos que R1 es un condicionante parcial, porque sólo condiciona la creación, pero no la persistencia, **de** R2.

Condicionantes generales

En algunos automatismos es necesario que el condicionante sea general: es decir, que condicione la creación y la persistencia. Para expresar en el grafo de secuencia esta exigencia se coloca el condicionante general (enmarcado en un pequeño cuadrado) al lado de la situación condicionada. y al hallar la ecuación lógica de la situación citada se pondrá este condicionante como factor general. El condicionante general tiene por si solo un efecto anulatorío ,pero no creador ;es una autorización.

Así, si en el problema anterior se hubiera exigido que la situación R2 estuviera condicionada en todo momento a la existencia de R1, hariamos el grafo de secuencia siguiente :

GRAFO DE SECUENCIA



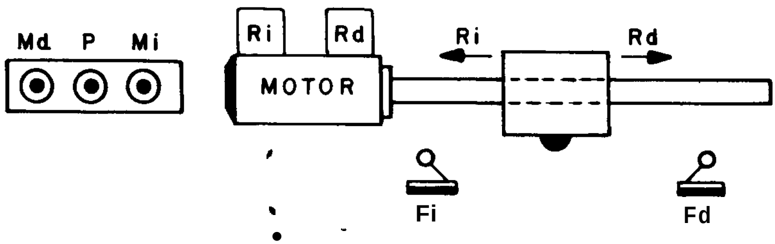
Ecuaciones lógicas

$$R_1 = (R_1 + M_1) \cdot \overline{P}_1$$

$$R_2 = (R_2 + M_2) \cdot \overline{P}_2 \cdot R_1$$

Ejercicio 3

Proyectar el circuito de gobierno para un móvil que se desliza sobre un husillo movido por un motor con doble sentido de giro. El motor es mandado por dos contactores Rd y Ri, que lo conexionan para que gire en sentido derecha o izquierda.

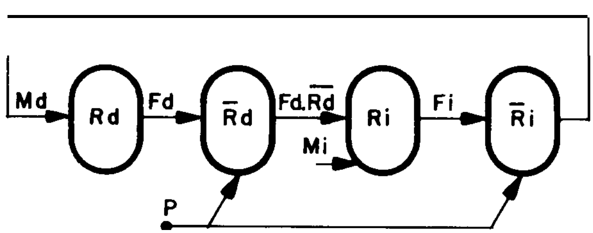


Programa de trabajo:

1. Al pulsar Md entrará el contactor Rd: entonces el móvil se desplaza hacia la derecha, y al llegar al final de carrera Fd se para, regresando seguidamente hasta Fi, donde permanecerá en reposo hasta nueva orden de Md.

2. Al pulsar un botón de emergencia P, se parará el móvil en cualquier posición en que se encuentre, y podrá reanudar la marcha hacia la derecha si se pulsa Md, o hacia la izquierda si se pulsa Mi. En cualquiera de los casos se parará al final de ciclo; es decir, al llegar el móvil al final de la carrera Fi.

GRAFO DE SECUENCIA

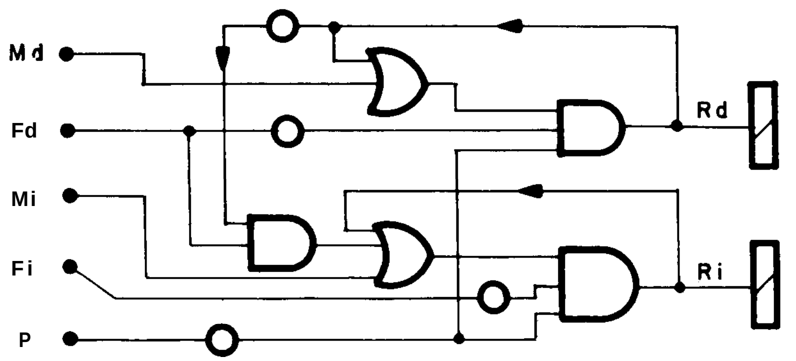


Ecuaciones lógicas

$$Rd = (Rd + Md) \cdot \overline{F}d \cdot \overline{P}$$

$$Ri = (Ri + Fd \cdot \overline{R}d + Mi) \cdot \overline{F}i \cdot \overline{P}$$

CIRCUITO REALIZADO CON PUERTAS LOGICAS



4.4. SINTESIS BINODAL DE AUTOMATISMOS SECUENCIALES EN LOS QUE UNA MISMA VARIABLE LES DA ORDENES DIFERENTES SEGUN EL INSTANTE EN QUE SE PRESENTE

Los problemas de síntesis resueltos anteriormente han tenido como finalidad introducir al lector en la forma de construir el grafo de secuencia y en la aplicación de los teoremas binodales. En los problemas citados cada v.d.a. (simple o booleana) daba al sistema la misma orden siempre, pero es muy frecuente necesitar en la industria automatismos en los que una misma variable de órdenes diferentes al sistema según el momento secuencial en que se encuentre éste. En estos casos es evidente que la v.d.a., por si sola, no es capaz de discriminar el momento secuencial considerado, por lo que necesitará la intersección con otras variables que condicionen el efecto de la primera en cada momento secuencial diferente en que actue; todo ello de acuerdo con las exigencias del programa de trabajo impuesto al autómata. Las citadas variables condicionantes pueden ser otras variables ***externas*** (captadores de información) o variables ***internas*** (situaciones binodales), pero en muchas ocasiones será necesaria la intervención de nuevas variables, que denominaremos ***variables auxiliares.***

Para abordar estos problemas es necesario tener en cuenta nuevos conceptos, los cuales se definen a continuación. Después de dichas definiciones se diseñan varios automatismos para aclarar los citados conceptos y ver sus aplicaciones prácticas.

Variables de acción (v.d.a.)

Anteriormente, en el apartado 4.2.1, ya nos hemos referido a la v.d.a., y podemos definirla como toda información, en expresión simple o booleana, exterior o interior al sistema que puede provocar una evolución de este.

4.4.1. Estados de acción

Denominamos estados de acción (e.d.a.) a cada una de las combinaciones binarias que se pueden presentar en las variables externas de entrada a un automatismo, provocando una transición de éste.

Estados de acción idénticos

Son aquellos (e.d.a.) cuyas variables constituyentes se encuentran en el mismo valor binario o nivel lógico.

ESTADOS DE ACCION IDENTICOS COMPATIBLES

Dos e.d.a. idénticos serán compatibles, y por tanto no necesitarán ser discriminados, en los siguientes casos:

a) Cuando crean siempre y únicamente las misma:; situaciones binodales

b) Cuando la situación binodal creada por uno de ellos es condicionante para la operatividad del otro; generalmente estos e.da. aparecen consecutivos en el grafo de secuencia.

c) Cuando las situaciones creadas por ellos no sean antagónicas, y además se cumpla que los intervalos de existencia de dichas situaciones sean mayores que los intervalos existentes entre los citados estados idénticos, incluido el e .d .a. límite del intervalo.

ESTADOS DE ACCION IDENTICOS INCOMPATIBLES

Decimos que dos e.d.a. idénticos son incompatibles cuando no cumplen ninguna de las condiciones a), b) y c), anteriormente expresadas. Estos estados necesitan, siempre, ser discriminados, pues de lo contrario se podrian producir saltos de secuencia, acciones antagónicas, ciclos parásitos, etc.

Ejemplo

El grafo de la Fig. 4.4. nos servirá de ayuda para aclarar las definiciones anteriores. Por el momento, partimos de un grafo ya realizado con el único fin de poder hacer un análisis de compatibilidad de e.d.a. idénticos; más adelante se darán detalles sobre la confección del grafo, a partir de un problema concreto. Los e.d.a. idénticos los enlazamos mediante líneas de trazos y, después del análisis de compatibilidad, se confirman con líneas continuas aquellos que resulten *incompatibles.*

Comparando el e.d.a. (1) con todos los siguientes, se ve que no hay ninguno idéntico a él.

Comparando el e.d.a. (2) con todos los siguientes, vemos que es idéntico al (3), pero compatible (caso b). También es idéntico al (6), pero compatible (caso c). También es idéntico al (7) e incompatible, porque, si bien las situaciones creadas no son antagónicas, el dominio de la situación D es menor que el intervalo entre los e.d.a. (7) y (2) (caso c).

El e.d.a. (3) es idéntico e incompatible con el (6) y con el (7), (caso c).

El (4) y el (5) son idénticos compatibles (caso b). Asi mismo son compatibles el (6) y el (7) (caso b).

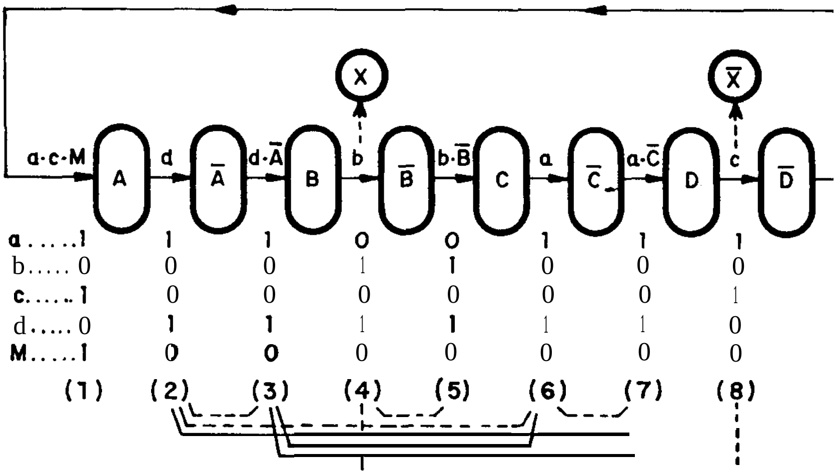


Fig. 4.4

4.4.2. Variables auxiliares

La discriminación de e.d.a. .incompatibles se puede realizar, algunas veces, por condicionamiento a variables internas (situaciones binodales), pero normalmente es necesario introducir nuevas variables condicionadoras, llamadas variables ***auxiliares (X,*** $\overline{X}$ de la Fig. 4.4). Estas variables se introducen en el grafo de secuencia y se mantienen memorizadas durante un cierto intervalo del ciclo secuencial (en el subapartado 4.4.4. volveremos sobre este particular).

4.4.3. Variables directivas

Llamamos variable directiva a aquella variable que, en el preciso momento de aparecer, provoca la terminación de una fase del ciclo y crea un nuevo e.d.a., el cual determinará la fase siguiente; estas variables pueden ser simples o booleanas.

"Las variables directivas han de tomarse siempre para la obtención de las ecuaciones lógicas porque son las que determman el momento de creación de las situaciones binodales. Las restantes variables, que junto con la directiva constituyen un e.d.a., son solamente *condicionantes* del efecto de dicha variable directiva y unicamente serán necesarias, algunas de ellas, en aquellos casos en los que la variable directiva exista (aunque no sea como directiva) varias veces en un mismo ciclo y necesite ser discriminado su efecto en los distintos momentos de la secuencia.

– Todos los conceptos que se están exponiendo se irán comprendiendo con mayor amplitud a medida que se vayan resolviendo, a lo largo de este libro, una serie de problemas de diseño de automatismos.

4.4.4. Discriminación de estados de acción incompatibles

La discriminación de e.d.a. incompatibles se consigue introduciendo en el grafo de secuencia las variables auxiliares. Una variable auxiliar será creada por alguna de las variables directivas o situaciones binodales existentes en uno de los dos intervalos de ciclo que separan los e.d.a. incompatibles, y será borrada (creada su complementaria) por alguna variable directiva o situación binodal existente en el otro intervalo que separa a los citados e.d.a.

Las variables auxiliares, al igual que toda variable lógica, tienen caracter binario $(X, \bar{X})$; por tanto, una sola variable auxiliar puede discriminar dos o más e.d.a. incompatibles; bastará para ello que unos e.d.a. queden en el intervalo del dominio de X, y los correspondientes incompatibles en el intervalo del dominio de $\bar{X}$; de esta forma X será el condicionante de la operatividad de unos e.d.a. y la $\bar{X}$ será el condicionante de la operatividad de los correspondientes e.d.a. incompatibles con los primeros.

El número de variables auxiliares necesarias para discriminar todos los e.d.a. incompatibles y la determinación de los puntos del grafo en que aquellas deben ser introducidas se obtiene facilmente trazando el número mínimo de líneas verticales que, pasando por alguna v.d.a., intercepten la totalidad de los enlaces de los e.d.a. incompatibles. Así, en la Fig. 4.4 bastará la línea vertical X para interceptar todos los enlaces de un intervalo, y la línea $\bar{X}$ para interceptar los del intervalo de vuelta.

DOMINIO DE UNA VARIABLE

Se denomina dominio de una variable (fundamental o auxiliar, simple o booleana) a los intervalos de ciclo durante los cuales permanece activada.

DOMINIO DE UNA SITUACION BINODAL

Es el intervalo de ciclo comprendido entre la citada situación y su situación antagónica.

– Tanto el dominio de una variable como el dominio de una situación binodal pueden ser intermitentes, pues es frecuente en muchos automatismos el que una misma variable o situación binodal exista en dos o más intervalos distintos del ciclo; es decir, que se cree y se borre más de una vez dentro de un mismo ciclo.

A continuación (Ejercicio 1) se diseíia un automatismo concreto, con el objeto de aclarar los conceptos expuestos, así como de orientar al lector en la forma de realizar el grafo de secuencia y en la obtención de las ecuaciones lógicas.

Ejercicio 1

Se desea sintetizar un autómata secuencial para el gobierno del desplazamiento de dos móviles, según el programa siguiente :

Mediante una orden impulsional en el botón de puesta en marcha M se debe activar el contactor Rl , Fig. 4.5, lo que provoca que el móvil (1) se desplace hacia la derecha; al llegar este al captador F2 se debe desactivar Rl y a continuación activarse R3, lo que hace desplazar al móvil (2) hacia la derecha; al llegar éste al captador F4 se debe desactivar R3 y activarse seguidamente R4, por lo cual el móvil (2) se desplazará hacia la izquierda hasta llegar de nuevo a F3, donde debe pararse y seguidamente activarse R2, que hace regresar al móvil (1) hasta Fl (estado inicial), donde permanecerá hasta una nueva pulsación en M, que ordenará la iniciación de un nuevo ciclo.

Aclaraciones: Los dos motores son de doble sentido de giro, siendo sus contactores correspondientes los que les conexionan para esta doble posibilidad de funcionamiento. La Fig. 4.5 da una idea de los elementos que intervienen, sin entrar en detalles mecánicos que indudablemente puede imaginarse el lector.

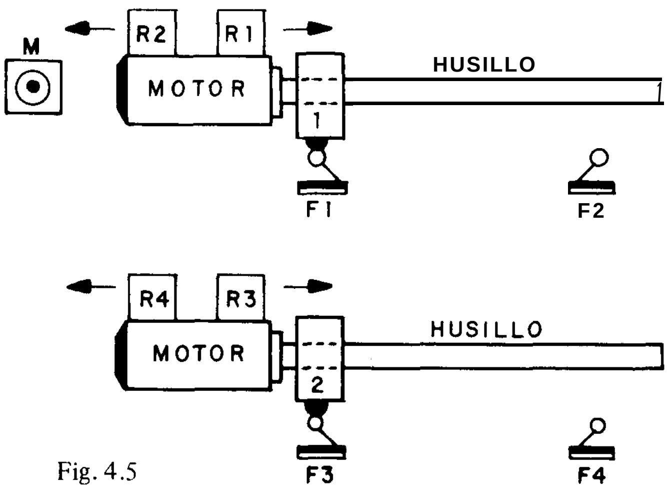


Fig. 4.5

El grafo de secuencia debe ser una expresión gráfica fiel del programa del automatismo propuesto, y es tan intuitivo que casi no necesita explicación; no obstante, haremos algunas aclaraciones respecto a la construcción de dicho grafo, la formación de los estados de acción, la introducción de variables auxiliares y la obtención de las ecuaciones lógicas.

4.4.5. Realización del grafo de secuencia

Según se expresa en la Fig. 4.6, el proceso para la realización del grafo de secuencia es el siguiente:

a) Se van dibujando las situaciones binodales en el orden en el que se deben ir creando, según la secuencia impuesta por el programa del automatismo propuesto.

b) Se escriben los estados de acción (e.d a.). En primer lugar se anota el e.d.a. de comienzo de ciclo; es decir, los niveles lógicos (1 o 0) de los captadores de información en el momento de comienzo de ciclo;en este ejemplo será -1 1 0 1 0 (decimos que un captador está en nivel lógico "1" cuando está accionado por su actuador, y en nivel "0" en el caso contrario). A partir del e.d.a. de comienzo de ciclo se van obteniendo los siguientes, simplemente cambiando el nivel lógico de las variables que han conmutado; así, el e.d.a. (2) es 0 0 1 1 0 porque han desaparecido las informaciones Fl y M y ha aparecido la F2. El e.d.a. (3) es O 0 1 1 0 , es decir, el mismo que el (2) porque no ha habido cambio de información, si bien ha aparecido el condicionante Rl que no se tiene en cuenta de momento, porque no es una variable de entrada sino un condicionante, aunque ya veremos como si se considera cuando obtengamos las ecuaciones lógicas. Siguiendo el mismo razonamiento deducimos que el e.d.a. (4) será 0 0 1 0 1 porque ha desaparecido la información F3 y ha aparecido la F4, y así sucesivamente se van obteniendo todos los e.d.a. que van a regir el comportamiento del autómata.

El paso siguiente es identificar las e.d.a. incompatibles, para introducir en cl grafo las variables auxiliares discriminatorias necesarias.

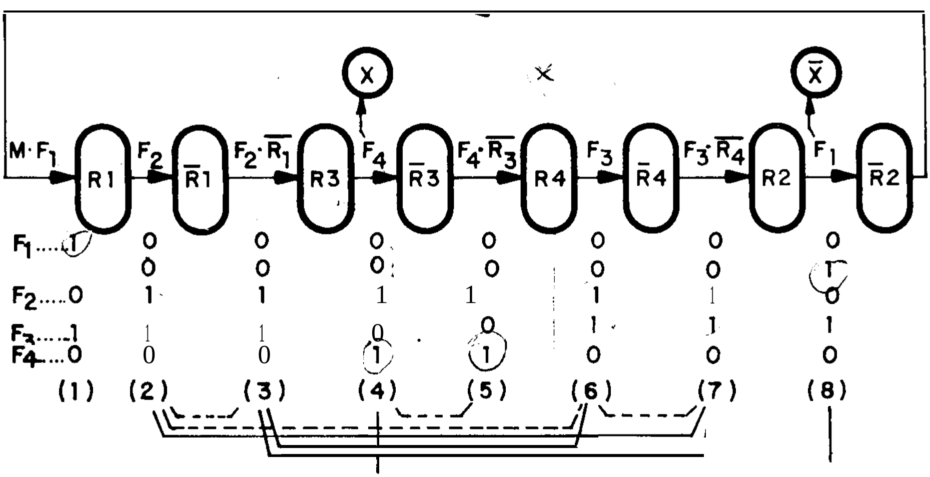


Fig. 4.6

$R_3 = (R_3 + F_2 \bar{R}_1 \cdot \bar{X}) \cdot \bar{F}_4$

IDENTIFICACION DE (e.d.a.) INCOMPATIBLES

– Comparando el e.d.a. (1) con todos los siguientes vemos que no es idéntico a ninguno.

Comparando el e.d.a. (2) con todos los siguientes se deduce que es compatible con-el (3); véase el apartado 4.4.1 (caso b). También es compatible con el (6) (caso c). Sin embargo, con el (7) es ***incompatible.***

Comparando el e.d.a. (3) con todos los siguientes se verifica que es ***incompatible*** con el (6) y con el (7).

- Los restantes e.d.a. no tienen ninguna incompatibilidad.

INTRODUCCION DE VARIABLES AUXILIARES

Si en el ciclo existen e.d.a. ***incompatibles*** (en el autómata que estamos tratando son incompatibles el 2 con el 7 y el 3 con el 6 y 7) es necesario discriminar sus acciones, lo cual se consigue condicionando los e.d.a. incompatibles a variables auxiliares distintas; estas variables deben colocarse en los intervalos que separan a los citados e.d.a. incompatibles.

– Tal como se explicó en el subapartado 4.4.4., el número de variables auxiliares y el lugar del grafo en que deben **ser** introducidas se determina prácticamente trazando el número mínimo de líneas verticales que pasando por alguna v.d.a., intercepten la totalidad de los enlaces de los e.d.a. incompatibles. Así, en el grafo presente bastará la línea vertical X que pasa por la v.d.a. F_4 para interceptar todos los enlaces de un intervalo, y la línea X que pasa por la v.da. F_1 para interceptar el intervalo de vuelta.

Obsérvese en el grafo como,los e.d.a. (2) y (3) quedan bajo el'dominio de $\bar{X}$, en tanto que sus incompatibles están bajo el dominio de X. Por tanto, si condicionamos la operatividad de dos e.d.a. idénticos ***incompatibles*** a la existencia o dominio de dos variables distintas (en este caso X y $\bar{X}$) desaparece la incompatibilidad, pues, evidentemente, al incorporarse a dos e.d.a. idénticos una variable distinta se obtienen dos nuevos estados diferentes entre sí.

Una vez introducidas las variables auxiliares, el paso siguiente y último es la obtención de las ecuaciones lógicas, de las cuales ya sabemos que se obtiene directamente el esquema del circuito.

4.4.6. **Obtención de las ecuaciones lógicas**

Se aplican los teoremas binodales, teniendo en cuenta las siguientes reglas:

a) "Si el dominio de una variable directiva es menor que el de la situación por ella activada, o lo que es lo mismo, si en el dominio de la variable directiva no aparece la situación antagónica de la situación activada por la citada variable, es suficiente para el gobierno de la situación la propia variable directiva; es decir, no hace falta tomar, al hallar la ecuación de la situación, ninguna variable más, ni auxiliar ni de entrada." Esto es evidente, ya que al desaparecer la variable directiva antes de presentarse la situación antagónica, desaparece la causa que podría impedir la creación, prevista en el grafo, de esta situación antagónica.

b) "Si el dominio de la variable directiva es mayor que el de la situación activada por ella, es necesario tomar una o más de las variables restantes (auxiliares, binodales o de entrada) cuya intersección o producto booleano con la directiva nos proporcione un dominio menor que el de la situación activada". En este caso, la intersección citada constituirá la variable booleana definitiva; es decir, necesaria y suficiente para el gobierno de la situación, sin que existan ya problemas de antagonismo ni saltos de secuencia.

De acuerdo con las reglas anteriores vamos a obtener las ecuaciones lógicas de los binodos integrantes del grafo de secuencia de la Fig. 4.6.

Ecuación del binodo auxiliar (X, $\bar{X}$)

Los dominios de las directivas F_4 y F_1 son menores que los de las situaciones X y $\bar{X}$ por ellas creadas; por tanto, según la regla ***a),*** no hace falta ninguna variable más para obtener la ecuación. Si aplicamos el primer enunciado del teorema binodal se tiene:

$$X = (X + F_4) \cdot \bar{F}_1$$

Ecuación del binodo (RI, $\bar{R}1$)

La variable directiva de la situación R1 es la booleana $M \cdot F_1$, cuyo dominio es menor que el de la situación activada R1. La variable directiva de la situación $\bar{R}1$ es F_2 cuyo dominio es menor que el de $\bar{R}1$; por tanto, según la regla *a*), la ecuación lógica será la siguiente:

$$R1 = (R1 + M \cdot F_1) \cdot \bar{F}_2$$

Ecuación del binodo (R2, $\bar{R}2$)

La variable directiva de la situación R2 es $F_3 \cdot \bar{R}4$, cuyo dominio es ***mayor*** que el de R2; por tanto, $F_3 \cdot \bar{R}4$ no es suficiente para el gobierno de R2, porque dentro de su dominio aparecerá la situación antagónica $\bar{R}2$, dando lugar a una indeterminación. Por esta razón es necesario reducir el dominio de $F_3 \cdot$ R4, lo que se consigue interceptándole con el dominio de la auxiliar X, resultando $F_3 \cdot \bar{R}4$. X; esta intersección ya tiene un dominio menor que R2. Así pues, la citada intersección $F_3 \cdot \bar{R}4$. X será la v.d.a. definitiva creadora de la situación R2.

La variable directiva de la situación $\bar{R}2$ es F_1, cuyo dominio es menor que el de $\bar{R}2$; por tanto, es suficiente F_1 como v.d.a. definitiva:

$$R2 = (R2 + F_3 \cdot \bar{R}4 \cdot X) \cdot \bar{F}_1$$

Cuando la variable directiva crea a su vez una variable auxiliar ($\bar{X}$), puede utilizarse ésta en lugar de la directiva, siempre que la intersección resultante siga siendo de menor dominio que la situación. Este caso se da en el problema presente y su utilización puede reportar alguna simplificación, como ocurre aquí:

$$R2 = (R2 + F_3 \cdot \bar{R}4 \cdot X) \cdot X$$
$$= (R2 + F_3 \cdot \bar{R}4) \cdot X$$

Aplicando las mismas reglas a los restantes binodos se obtienen las siguientes ecuaciones:

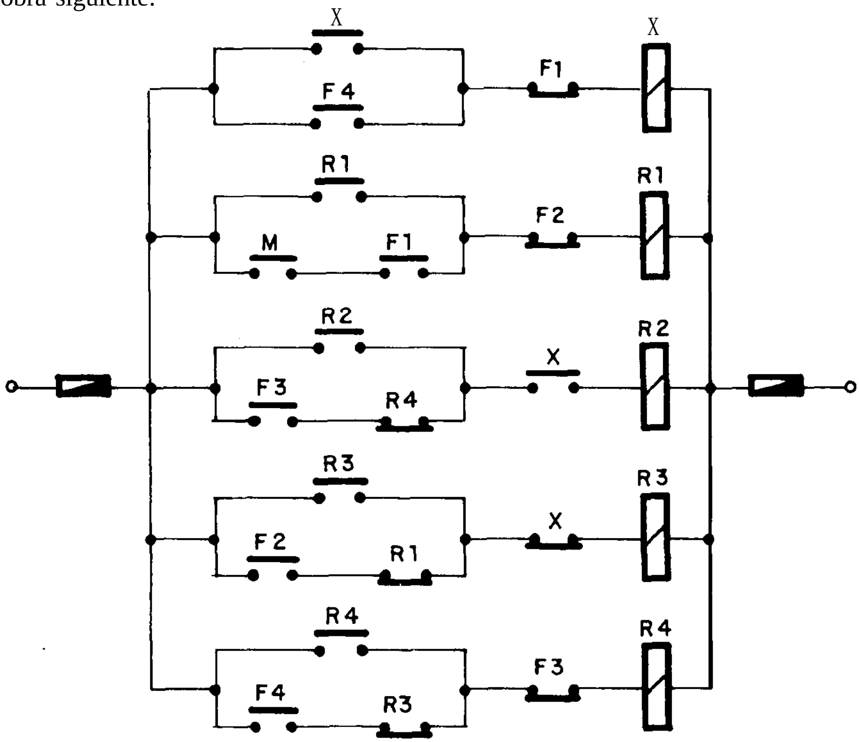
$$R3 = (R3 + F_2 \cdot \bar{R}_1 \cdot \cancel{\bar{X}}) \cdot \bar{X}$$
$$= (R3 + F_2 \cdot \bar{R}1) \cdot \bar{X}$$

Nota: Todos los factores parciales de los términos de una función "0" pueden suprimirse si también figuran en la misma ecuación como factores generales.

Para comprobarlo basta efectuar el producto, simplificar y sacar nuevamente factores comunes.

$$R4 = (R4 + F_4 \cdot \bar{R}3) \cdot \bar{F}_3$$

Pasando a esquema eléctrico las ecuaciones obtenidas, resulta el circuito de maniobra siguiente:

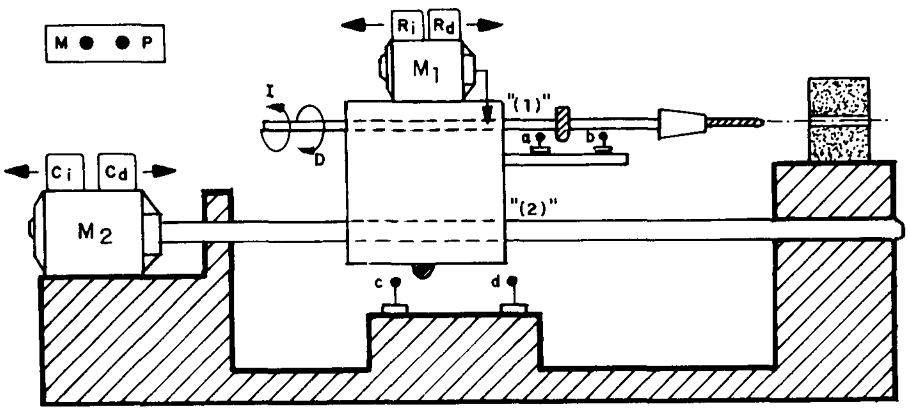


Ejercicio 2 Máquina taladradora automática

Datos:

a) Un motor M2 acciona un husillo "2" que desplaza al carro porta-herramientas. Cuando el motor, por orden del contactor Cd, gira a derechas el carro avanza, y cuando gira a izquierdas por orden de Ci, el carro retrocede.

b) Un motor Ml , montado sobre el carro, acciona al husillo "1" y ademas de hacerle girar le hace avanzar o retroceder según el sentido de giro de Ml , el cual está gobernado por los contactores Ri y Rd.



Programa de trabajo

1. Al pulsar M se activa el contactor Cd si están accionados los finales de carrera a y c. Si el motor arranca y abre el final de carrera c, sigue activado Cd; pero si no arranca, se debe desactivar Cd al soltar M (así se evitan daños al motor).

2. Al pisar el carro el final de carrera d se desactiva Cd y entra Rd.

3. Cuando se accione el final de carrera *b se* desactiva Rd y seguidamente entra Ri.

4. Al accionarse el final de carrera a se desactiva Ri y entra Ci.

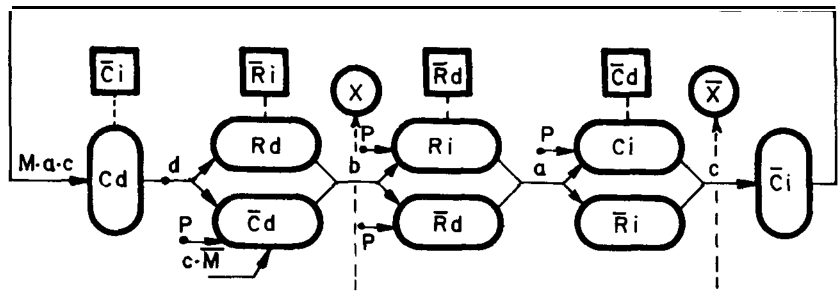
5. Al accionarse el final de carrera c se desactiva Ci, quedando la maquina en reposo hasta nueva orden de M.

6. Como los motores son de doble sentido de giro, deben enclavarse para evitar toda posibilidad de activación simultánea de los contactores correspondientes.

7. Con un pulsador de emergencia P se podrá parar la máquina en cualquier instante del avance, debiendo regresar a la posición de comienzo de ciclo.

A estos efectos, el impulso P deberá borrar a los contactores Cd y Rd, y activar a los Ri y Ci. De esta forma la máquina regresará al punto de partida.

El programa enunciado nos conduce al grafo de secuencia siguiente:



M......	1	0	0	0	0
a......	1	1	0	1	1
b..... .	0	0	1	0	0
c.....,	1	0	0	0	1
d......	0	1	1	1	0

Los dos e .d.a. idénticos incompatibles, que en el grafo de secuencia hemos enlazado con línea continua, se discriminan mediante el binodo auxiliar (X, $\bar{X}$).

Las ecuaciones lógicas resultantes serán las siguientes:

$$Cd = (Cd + M \cdot a \cdot c) \cdot \bar{d} \cdot \overline{c \cdot \bar{M}} \cdot \bar{C}i\, \bar{P}$$

$$Rd = (Rd + d \cdot \bar{X}) \cdot \bar{b} \cdot \bar{P} \cdot \bar{R}i$$

$$Ri = (Ri + b + P) \cdot \bar{a} \cdot \bar{R}d$$

$$Ci = (Ci + a \cdot X + P) \cdot \bar{c} \cdot \bar{C}d$$

$$X = (X + b) \cdot \bar{c}$$

Se propone como ejercicio, transformar las ecuaciones obtenidas en funciones NOR y NAND y realizar los esquemas correspondientes, así como el esquema eléctrico con contactos.

4.4.7. Estados inoperantes o transitorios

Cuando en un sistema secuencial una o más variables tienen caracter aleatorio, es decir si el instante de aparición de dichas variables no está totalmente determi-.

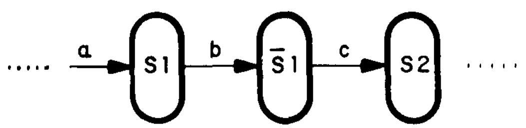
nado, pueden aparecer, en los intervalos existentes entre e.d.a. operativos, unos estados transitorios que aunque deben ser *inoperantes* porque no se les ha asignado efecto alguno sobre el autómata, pueden ser idénticos e incompatibles con otros e.d.a. operativos. La existencia de un estado transitorio en un instante dado de la secuencia haria actuar al e.d.a. operativo idéntico correspondiente a otro momento secuencial distinto, produciendo un salto de secuencia no deseado. En estos casos es necesario discriminar el e.d.a. operativo respecto al transitorio idéntico, bien mediante una variable auxiliar o bien a través de su condicionamiento a situaciones binodales si ello fuera posible.

Los estados transitorios se escriben debajo de la situación binodal correspondiente al momento secuencial en el que aparecen.

– *Los estados transitorios, por ser inoperantes. son siempre compatibles entre si. También son compatibles con los dos e.d.a. operativos adyacentes,* puesto que la identidad de un transitorio con el e.d.a. operatívo adyacente anterior no haría más que confirmar el efecto de éste, y si la identidad es con el e.d.a. operativo adyacente posterior significaría que ya se había llegado a él, es decir, no sería realmente un transitorio.

Para detectar si en el intervalo entre dos e.d.a. operativos consecutivos puede aparecer algun estado transitorio, se observa si en dicho intervalo puede cambiar de nivel alguna variable: para ello hay que tener en cuenta, ademas_ del enunciado y exigencias del programa de automata en proyecto, el comportamiento de las variables. Al escribir en el grafo de secuencia los estados transitorios se asignará el signo de indeterminación * a las variables que tengan este caracter. A las variables que no cambien de nivel se les asignará el nivel lógico que mantienen en el intervalo, que evidentemente es el que figura en el e.d.a. de entrada a dicho intervalo.

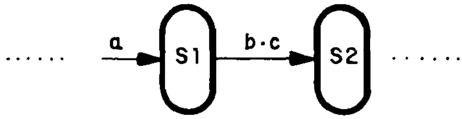
Supongamos que en el grafo parcial de la figura siguiente la variable de entrada "a" es aleatoria. Se observa que la aparición del transitorio (2') podría hacer actuar al e.d.a. operativo (l), que puede ser idéntico, en un momento no deseado;por tanto, es necesario discriminar el e.d.a. operativo (1) respecto al transitorio (2').



*	a .. 1	*	*	*	*	*
	b .. O	0	1	*	0	0
	c .. 0	0	0	0	1	1
	(1)	(1')	(2)	(2')	(3)	(3')

También *aparecen transitorios cuando la variable directiva de alguna situación binodal contiene más de una variable exterior independiente,* dado que no es posible físicamente que dos o más variables independientes lleguen al mismo tiempo; la diferencia podrá ser despreciable y no provocar problemas, pero lo más probable, en la práctica, es que la duración del transitorio sea superior al tiempo de respuesta de los elementos del sistema.

El grafo parcial de la figura siguiente posee dos transitorios de este tipo:



a....	1	1	1	1
b....	0	0	1	1
c.....	o	1	0	1
	(1)	(1')	(1'')	(2)

El e.d.a. (2) se forma a la llegada de b y c, pero como estas variables no pueden llegar al mismo tiempo aparecerá alguno de los transitorios (1') ó (1"). según que sea c o *b* la que llegue antes.

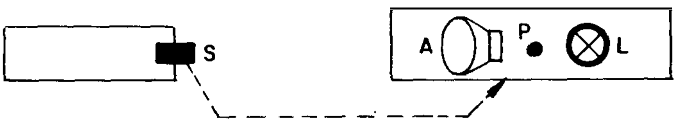
Ejercicio. Sis tema de alarma

Un sensor vigila la temperatura de una máquina. Cuando, por causa de una avería, la temperatura llega a un cierto valor preestablecido, el sensor envía una señal S. Tanto si la avería es momentánea como si es persistente, se debe poner en funcionamiento un avisador acústico A y encenderse una lámpara roja L.

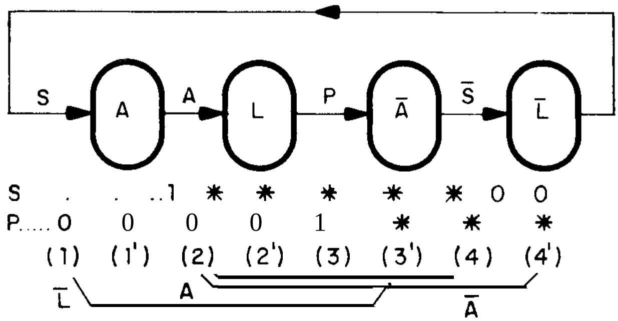
Recibida la señal de alarma, el operario debe accionar un pulsador P, y pueden ocurrir dos casos:

a) Si la avería sólo fue momentánea, el impulso P hace que se apague la lámpara y también que deje de funcionar el avisador acústico.

b) Si la avería persiste, el impulso P desconecta el avisador acústico A, pero la lámpara L seguirá encendida hasta que desaparezca la avería, en cuyo momento se apaga.



En este automatismo la v.d.a. "S" es aleatoria; por tanto, habrá que tener en cuenta los estados transitorios:



Aunque el e.d.a. (1) es incompatible con cl transitorio (3'), no es necesario introducir variables auxiliares porque (1) está bajo el dominio de $\bar{L}$, mientras que (3') lo está en el dominio de L; por tanto, la situación binodal $\bar{L}$ será el condicionante discriminatorio del e.d.a. (1) respecto al transitorio (3'). El e.d.a. (2) es incompatible con el (4) y el (4'), pero están bajo el dominio de situaciones distintas (A y $\bar{A}$), que servirán para discriminarlos. Por tanto, las ecuaciones lógicas serán:

$$A = (A + S \cdot \bar{L}) \cdot \bar{P} \qquad L = (L + A) \cdot \bar{S} \cdot \bar{A} = L \cdot S + A$$

Se propone como ejercicio, al lector, la realización de los esquemas eléctricos y con puertas lógicas.

4.5. MANIOBRAS DE EMERGENCIA Y REARME EN LOS AUTOMATISMOS INDUSTRIALES. INFLUENCIA EN EL DISEÑO

En general, la maniobra de emergencia consiste en una orden impulsional, del dominio del operario, que queda registrada en una memoria auxiliar de emergencia, la cual será anulada por otra señal impulsional, llamada de rearme, que también es del dominio del operario que vigila el funcionamiento del sistema.

Los efectos que se desean conseguir con la maniobra de emergencia depende de las características de cada sistema en particular. Normalmente se trata de inhibir o activar ciertos órganos del sistema. A estos efectos, se utiliza la información proporcionada por la memoria auxiliar de emergencia como condicíonante de la acción de otras variables, o bién como variable directiva según los casos.

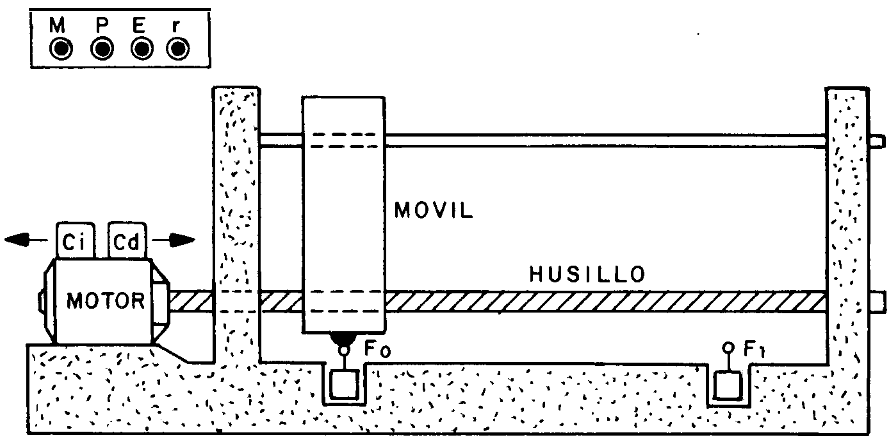
Si después de una parada de emergencia se desea que el ciclo continúe en la misma fase en la que se interrumpió, es necesario que la orden de parada no altere el estado situacional de los binodos; por tanto, el mando de parada sólo deberá inhibir la comunicación entre la situación binodal actuadora y el receptor correspondiente; para ello, el receptor recibirá la señal de la situación binodal correspondiente a través de un "monodo", cuya v.d.a. será la intersección de la situación binodal con la inversa de la información de emergencia.

Ejercicio 1

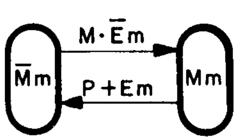
Un móvil que se desliza por un husillo movido por un motor de doble sentido de giro (para lo cual llevará un contactor Cd que le conexiona para que gire a derechas y otro Ci para giro a izquierdas) debe realizar un movimiento de vaivén continuado desde el momento en que el sistema reciba la orden impulsional de puesta en marcha M (ver figura).

Un impulso de parada sobre el actuador manual de parada P debe detener el motor, pero no en el acto, sino al final del movimiento de vaivén ya iniciado.

Un impulso procedente del mando de emergencia E debe producir el retroceso inmediado del móvil a la posición de origen, y el sistema no podrá ponerse en marcha de nuevo con el mando M, si previamente no se ha accionado el pulsador de rearme “r”.



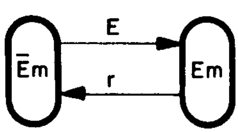
La orden de marcha M se memoriza en un binodo, y se borrará por la orden de parada P o por la de la situación de emergencia Em (memorización de E).



$$Mm = (Mm + M \cdot \overline{Em}) \cdot \overline{P + Em} =$$

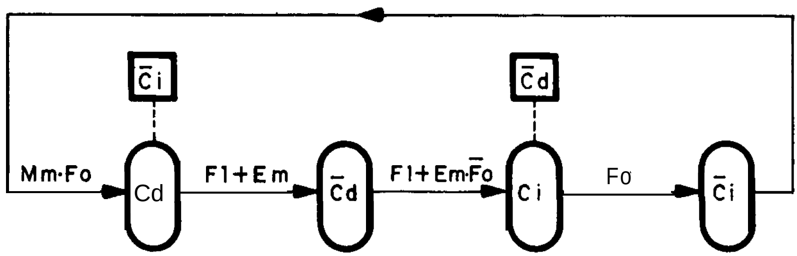
$$= \boxed{(Mm + M \cdot \cancel{\overline{Em}}) \cdot \overline{P} \cdot \overline{Em}}$$

La orden de emergencia E se memoriza en un binodo, y se anulará por la orden de rearme “r”.



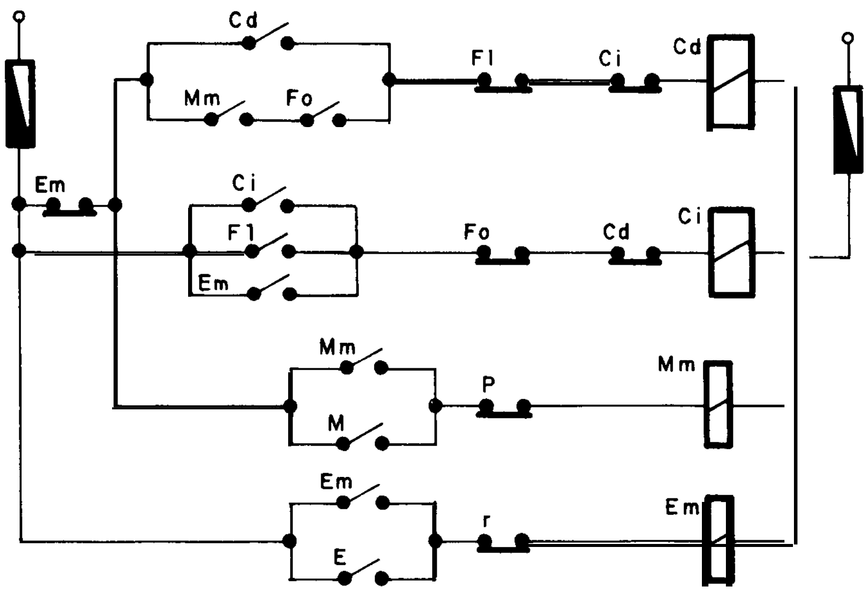
$$\boxed{Em = (Em + E) \cdot \overline{r}}$$

El grafo de secuencia, las ecuaciones lógicas, y el circuito correspondiente serán los siguientes:



$$Cd = (Cd + Mm \cdot Fo) \cdot \overline{F1 + Em} \cdot \bar{Ci} = (Cd + Mm \cdot Fo) \cdot \bar{F1} \cdot \bar{Em} \cdot \bar{Ci}$$

$$Ci = (Ci + F1 + Em \cdot \bar{Fo}) \cdot \bar{Fo} \cdot \bar{Cd}$$



Ejercicio 2

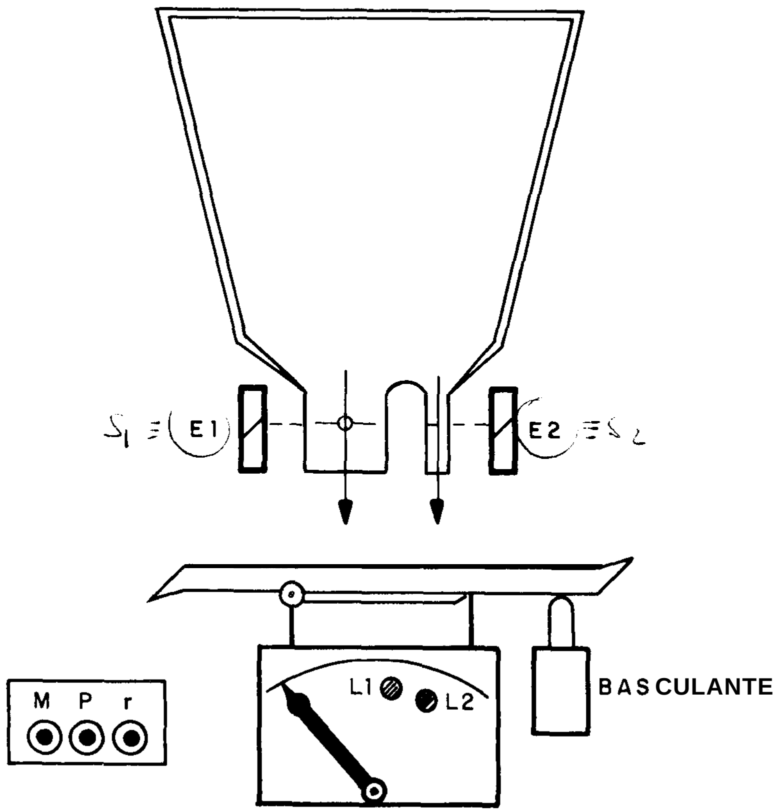
Una pesadora recibe producto de una tolva a través de dos conductos, uno de suministro abundante y otro de afinado. Las compuertas de los conductos son accionadas por los electroimanes El y E2, los cuales están gobernados por las fotorresistencias Ll y L2 que darán el valor “1” lógico cuando la aguja de la pesadora pase por delante de cada una de ellas.

Se dispone de un pulsador de puesta en marcha M, otro de parada de emergencia P, y otro de rearme “r”.

Programa: Una pulsación en M debe provocar la apertura de las dos compuertas (activación de El y E2). Cuando la aguja de la pesadora llegue a Ll debe desactivarse El, cerrando la compuerta correspondiente. Cuando la aguja llegue a L2 deberá desactivarse E2 cerrándose la compuerta de afinado. Vaciado el contenido de la pesadora, por medio de un basculante, ésta vuelve a la posición de reposo, sin que el paso de la aguja por delante de L1 deba provocar efecto alguno. Pulsando de nuevo M se inicia un nuevo ciclo.

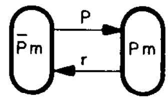
Al accionar un pulsador de emergencia P se deberán cerrar las dos compuertas en cualquier momento del ciclo. Para reanudar éste bastará pulsar el rearme “r”. El ciclo deberá continuar en la fase en la que se interrumpió.

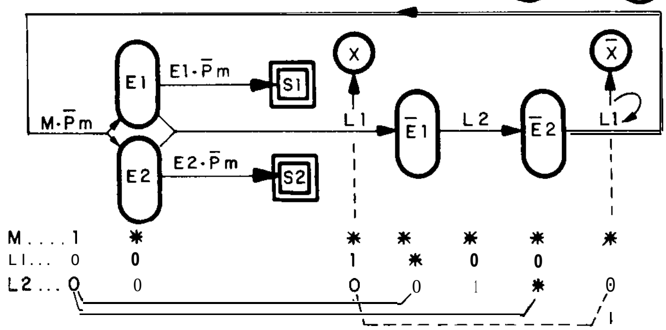
Si durante el ciclo se pulsase M no deberá alterarse aquél.



Si se desea que el ciclo siga en la misma fase en la que se interrumpió después de una parada de emergencia, ésta no deberá alterar el estado situacional de los binodos, lo que se puede resolver introduciendo "monodos", como ya indicamos al comienzo del apartado.

El grafo de secuencia correspondiente, así como las ecuaciones lógicas y circuito resultante SC exponen a continuación:





$$Pm = (Pm + P) \cdot \bar{r}$$

$$X = (X + L1 \cdot E2) \cdot L1 \cdot \bar{E2}$$

$$E1 = (E1 + M \cdot \bar{P}m \cdot \bar{X}) \cdot \overline{L1} \qquad S1 = E1 \cdot \bar{P}m$$

$$\updownarrow$$

$$E2 = (E2 + M \cdot \bar{P}m \cdot \bar{X}) \cdot \bar{L2} \qquad S2 = E2\ \bar{P}m$$