

Gráfico Funcional Secuencial (SFC)

Introducción

Actualmente cuando al ingeniero o técnico en el área de automatización, de nuestro medio, se le encomienda una cotización o un diseño de una determinada aplicación, un gran porcentaje de ellos recurren al método de prueba y error, ocasionando (la mayoría de las veces) frustraciones y/o pérdidas económicas en horas-hombres empleadas en tal empresa. Es por esta razón que esta cátedra, brinda al futuro ingeniero electromecánico, un método racional de diseño, el denominado Gráfico Funcional Secuencial (SFC, Sequential Function Chart), lo que se traduce en un ahorro de: \$/horas-hombres en el proyecto, puesta a punto y modificaciones posteriores.

El SFC es un diagrama funcional que describe la evolución del proceso que se pretende automatizar, indicando las acciones que hay que realizar sobre el proceso y qué informaciones las provocan; partiendo de él se puede escribir el programa que ha de cargarse en el PLC. Es importante resaltar que el SFC no sólo es útil como herramienta de diseño, sino también en las fases de especificación y posteriormente en la fase de explotación y mantenimiento. Los diferentes fabricantes de autómatas programables han desarrollado lenguajes basados en el SFC, añadiéndose a este último prestaciones que facilitan su utilización.

Por ejemplo, Siemens, basándose en el SFC, ha desarrollado el lenguaje S7-Graph.

Una vez que se ha obtenido el SFC, conviene verificar su funcionamiento antes de implementarlo físicamente mediante algún proceso de simulación. Para ello la cátedra dispone de un software de simulación de distribución gratuita, como el que brinda Triangle Research International, Inc. 2003, el cual puede obtenerse del sitio <http://www.tri-plc.com>

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento del SFC, haciendo uso de las respectivas ecuaciones secuenciales, el diseñador puede elegir la tecnología (lógica cableada, dispositivos neumáticos, hidráulicas, compuertas electrónicas, software, etc.), en la implementación física del automatismo en cuestión (lo que se traduce en un ahorro de costos).

2. Conceptos básicos del SFC

Los conceptos en los cuales se basa el SFC son los siguientes:

- Etapas y macroetapas.
- Líneas de evolución.
- Condiciones de transiciones.
- Acciones asociadas a las etapas.
- Etapas que no llevan asociada ninguna acción.

2.1. Etapas y macroetapas.

Se considera un sistema secuencial, con múltiples entradas binarias, variantes en el tiempo (siendo una de ellas I_i) y múltiples salidas binarias, también variantes en el tiempo (siendo una de ellas S_k), según la Figura N° 1.

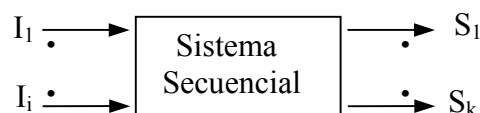


Figura N° 1

El estado de este sistema se puede describir relacionando las entradas y salidas del mismo, por medio de variables auxiliares binarias denominadas *etapas*. Si un proceso a automatizar no es complejo, a tal proceso se lo puede dividir en unas pocas operaciones relativamente simples, denominadas "**etapas**", tales como: poner en marcha un motor eléctrico, accionar una electroválvula, encender una lámpara, etc. Cada una de las etapas estará asociada a una variable de estado.

Sin embargo, si el proceso a automatizar es más complejo, a tal proceso se lo puede dividir en unas pocas operaciones relativamente complejas, tales como cilindrar, cortar, taladrar, roscar, cambiar herramienta, etc., denominadas "**macroetapas**". Cada una de las macroetapas estará asociada a una variable de estado. Estas macroetapas pueden ser subdivididas a su vez en operaciones más elementales (que serán etapas), a medida que se progresa en el nivel de detalle. Sí, por ejemplo, una operación de roscado (macroetapa) puede subdividirse en otras más elementales (etapas) como: impulsar pieza, bloquear pieza, aproximación de herramienta, etc.

En lo que resta de este apunte se hará referencia únicamente al caso de trabajar con etapas. Las etapas se representan con un cuadrado y una letra "E" con un número como subíndice en ambos casos, el número indica el orden que ocupa la etapa dentro del SFC (Figura N° 1a). Las etapas iniciales son aquellas en las que se posiciona el sistema al iniciarse el proceso (comienzo del SFC) por primera vez y se simbolizan por un cuadrado con doble línea con la letra "E" y el subíndice 0 (Figura N° 1b).

Se adoptará que el orden creciente de los números de las etapas estarán dados por el orden de ejecución.



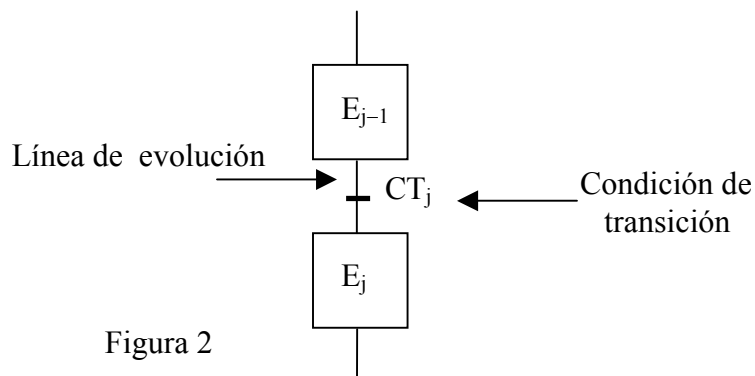
2.2. Líneas de evolución, son las líneas verticales que relacionan entre sí dos etapas consecutivas (Figura N° 2)

2.3. Condiciones de transiciones, simbolizan las condiciones lógicas necesarias (no son suficientes) para se active una (o varias) etapas y que se desactive una (o varias) etapas inmediatamente anteriores.

Gráficamente se simbolizan las condiciones de transiciones por un trazo perpendicular a las líneas de evolución.

En la Figura N° 2, se indican 2 etapas y una condición de transición CT_j entre ellas.

La condición de transición puede ser una o varias variables booleanas que intervienen en el proceso; por ejemplo una señal de un final de carrera, la activación de un motor, etc.



2.4. Acciones asociadas a las etapas

En una etapa puede existir o no (caso de etapa inicial) acciones asociadas a ella. Las acciones que llevan asociadas las etapas se representa con un rectángulo donde se indica el tipo de acción a realizar (Figura N° 3). Una etapa puede llevar asociadas varias acciones.



Figura N° 3

2.5. Etapas que no llevan asociada ninguna acción.

Por lo general, la etapa E₀ no lleva asociada ninguna acción; sólo se emplea para iniciar el ciclo una vez que ha sido activada. Puede existir otra etapa (como lo es la de espera) que no tienen acciones asociadas.

3. Ejemplo sencillo de un SFC

Un ejemplo sencillo de un SFC completo para una secuencia de marcha-parada de un motor es el siguiente:

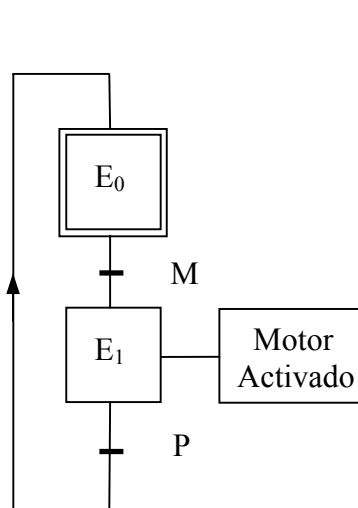


Figura N° 4 a

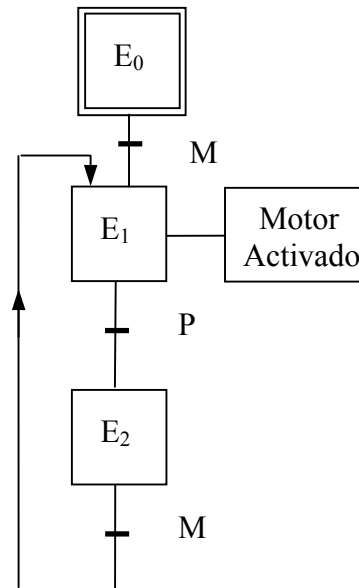


Figura N° 4 b

Según se muestra en la Figura N° 4a, inicialmente la etapa E₀ está activada. Como no hay ninguna acción asociada a ella el motor está detenido. Cuando la condición de transición M (pulsador de marcha) adquiere el valor 1, se activa la etapa E₁, se activa el motor y se desactiva E₀. Cuando la condición de transición P (pulsador de parada) adquiere el valor 1, se activa la etapa E₀, se desactiva E₁ y se detiene el motor. El funcionamiento indicado en la Figura N° 4b es similar al anterior, solo que la etapa E₀, se activa una vez.

4. Reglas de evolución del SFC

Partiendo de lo que ya hemos visto en apartados anteriores, podemos resumir una serie de reglas básicas que hay que tener en cuenta para aplicar SFC.

- 1) El proceso se descompone en etapas (o macroetapas), que serán activadas de forma secuencial.
- 2) Ninguna, una o varias acciones pueden ser asociadas a cada etapa. En el caso de asignarse alguna acción, estas acciones **sólo están activas cuando la etapa está activa**.
- 3) Una etapa E_i se hace activa cuando la precedente, E_{i-1} lo está y la condición de transición entre ambas etapas, CT_i , ha sido activada.
- 4) La activación de una condición de transición CT_i implica la activación de la etapa siguiente E_i y la desactivación de la precedente, E_{i-1} .
- 5) La etapa inicial E_0 tiene que ser activada antes de que se inicie el ciclo del SFC. Un ciclo está formado por todas las etapas posteriores a la etapa inicial.

5. Ecuaciones Lógicas

Después de obtener el SFC completo del automatismo a implementar, el próximo paso es el de escribir las ecuaciones lógicas que describirán su comportamiento.

Para ello se escribe por separado las ecuaciones lógicas que regirán la conducta de:

- Las etapas
- Las condiciones de transición
- Las acciones asociadas a las etapas.

5.1. Ecuaciones Lógicas de las etapas

Cada etapa lleva asociada una variable de estado. Según se trate de la etapa inicial o no, será la forma de la ecuación lógica que dirija su comportamiento.

5.1.1. Ecuación Lógica de la etapa no inicial

Una forma de que las ecuaciones lógicas de las etapas respete a 3) y 4) de las reglas de evolución del SFC es que :

- Cuando E_{i-1} y CT_i valgan 1 se active E_i .
- Cuando E_{i-1} y CT_i valgan 1 se desactive E_{i-1} .
- Cuando E_j y CT_{i+1} valgan 1, se debe desactivar E_j .

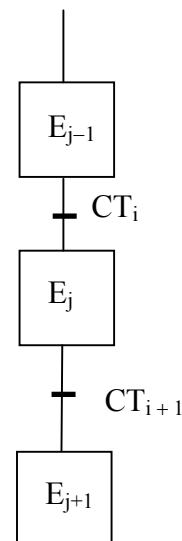
Es decir que se debe cumplir:

$$\text{Set } E_j = E_{j-1} \cdot CT_i ; \text{ Reset } E_j = E_j \cdot CT_{i+1} \quad (1)$$

O lo que es equivalente:

$$\text{Set } E_j = E_{j-1} \cdot CT_i ; \text{ Reset } E_j = E_{j+1} \quad (2)$$

SI LOS INSTANTES EN QUE SET E_j Y RESET E_j PASAN A VALER 1 ESTA MUY PRÓXIMOS SE CORRE EL RIESGO QUE E_j NO SE ACTIVE.



La Ec. (1), se puede implementar con compuertas lógicas, elementos discretos neumáticos o hidráulicos, según se indica en la Fig. 5

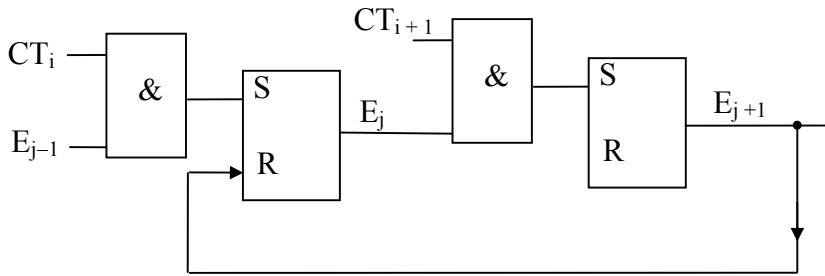


Figura 5. Implementación de la Ec.(1)

Tanto la Ec. (1) como la Ec. (2), se pueden implementar en un PLC mediante el lenguaje de programación grafcet. Así para los PLC's de Schneider, un esquema grafcet se indica en la Fig. 6a, mientras que el listado de instrucciones se indica en la Figura N° 6 b

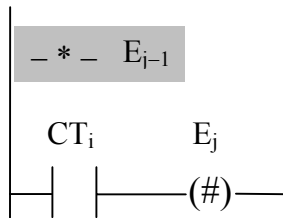


Figura 6a

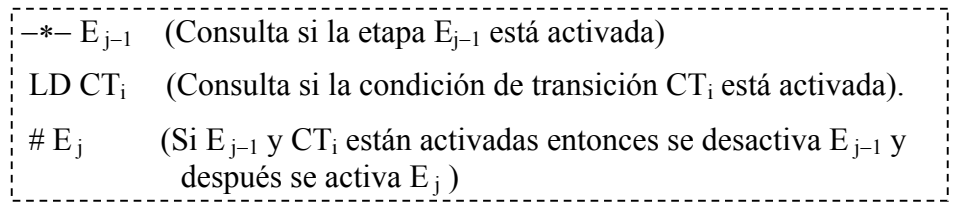


Figura N° 6 b

La Ec. (2), se puede implementar con dispositivos modulares neumáticos o hidráulicos, según se muestra en el esquema de la DIN/ISO 1219, en la Fig. 7.

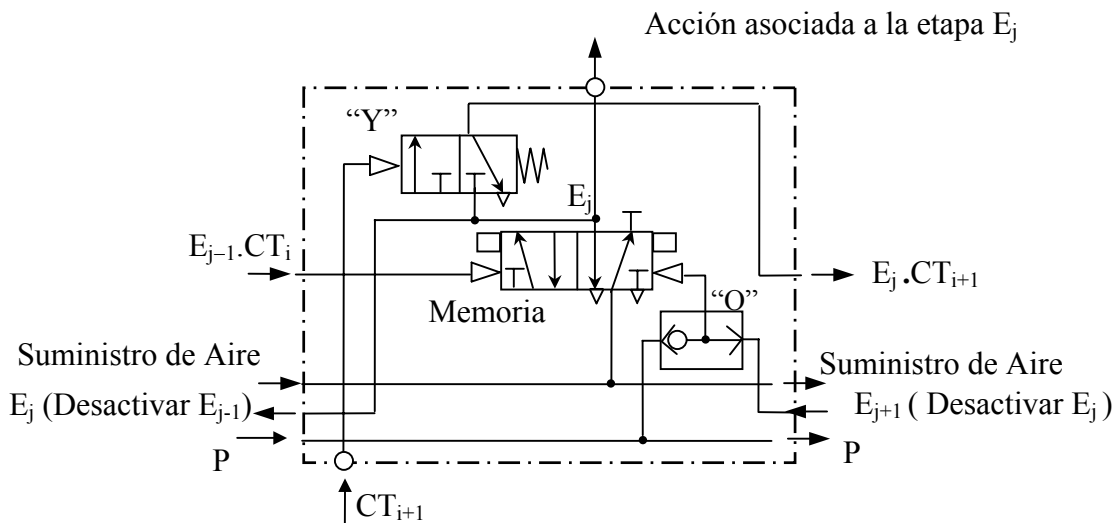


Figura 7

Así también, la Ec. (1), se puede verificar, usando un software de simulación , como el indicado en la Fig. 8.

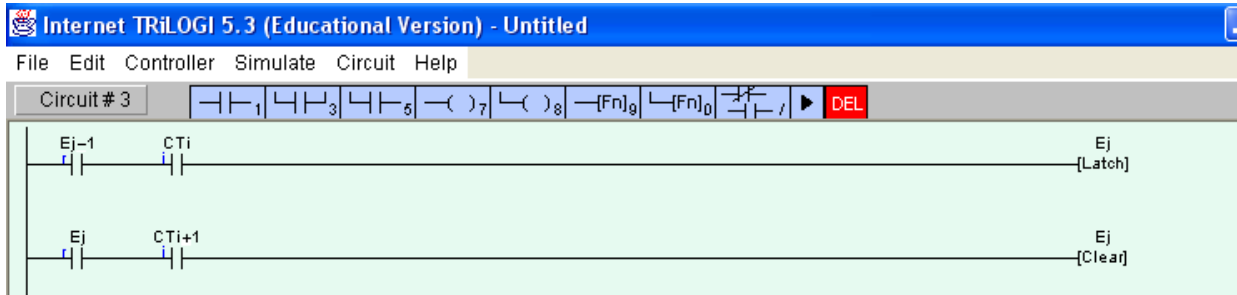


Figura 8.

Empleando el concepto de variables creadora y anulatoria en una ecuación secuencial, vista en Sistemas Secuenciales, recordemos a la ecuación (2)

$$Q(t) = [Q(t-\Delta t) + Vc(t)] \overline{Va}(t)$$

Si consideramos que :

$$Vc = E_{j-1} \cdot CT_i \quad \text{y} \quad Va = E_j \cdot CT_{i+1}$$

La Ec. (1) se puede expresar como

$$E_j = [E_j + E_{j-1} \cdot CT_i] \overline{E_j \cdot CT_{i+1}}$$

Aplicando el teorema de Demorgan la anterior quedará:

$$E_j = [E_j + E_{j-1} \cdot CT_i] [\overline{E_j} + \overline{CT_{i+1}}] \quad (3)$$

En la Fig. 9, se indica como es la implementación de la Ec. (3) empleado lógica cableada, electropneumática o electrohidráulica.

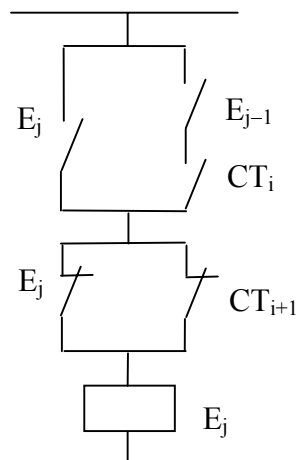


Figura 9

5.1.2. Ecuación Lógica de la etapa inicial

Consideremos la Figura N° 10 en la cual se inicia con la etapa E_0 y finaliza con la E_N . Para que comience a ejecutarse el SFC es necesario primero activar la etapa inicial E_0 .

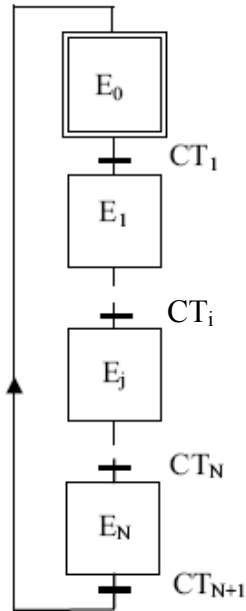


Figura 10

Para implementar la activación de E_0 con el **simulador** del PLC, todas las etapas posteriores a E_0 deben estar desactivadas según se indica en la Figura N° 10 a.

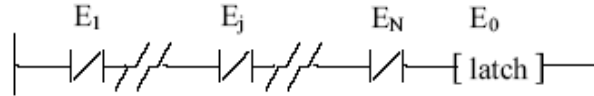


Figura N° 10 a Ladder para el simulador Trilogi

Para implementar la activación de E_0 con el PLC estando activada la etapa E_N deberá estar activada la condición de transición CT_{N+1} según se indica en la Figura N° 10 b

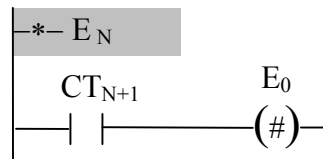


Figura N° 10 b Grafcet del PLC

Nota: En el Plc Nano la etapa inicial no puede ser 0

5.1.3. Estructuras básicas

Existen tres tipos de estructuras básicas en SFC, de las cuales se pueden derivar todas las demás. Tales estructuras básicas son:

- Secuencia lineal.
- Secuencias alternativas (bifurcación alternativa y unión alternativa).
- Secuencias simultáneas (bifurcación simultánea y unión simultánea).
- Salto condicional a otra etapa.

5.1.3.1 Secuencias lineales

La estructura más simple es la secuencia lineal, consistiendo en una sucesión de etapas unidas consecutivamente por las líneas de evolución y condiciones de transición. Tanto la forma de la estructura como las ecuaciones lógicas que la describen, se pueden apreciar en la Figura N° 11.

5.1.3.2. Secuencias alternativas

- **Bifurcación alternativa o divergencia "Or"**

Suele ocurrir que en un proceso se llegue a un punto posible en el que hay que efectuar una elección entre varias secuencias (camino alternativo o derivaciones) posibles en función de las variables que intervienen en el proceso.

Por ejemplo en una embotelladora, si el llenado es correcto se le coloca a la botella el tapón y se la almacena en una caja, si no, se la retira para su relleno. En la Figura N° 11 se muestra la estructura y en las Figuras N° 11a y 11b los esquemas ladder y grafcet que los rige. Partiendo de la etapa E₁ que está activada, se puede seguir una de las dos secuencias:

- Si se cumple la condición de transición A, se activará la etapa E₂.
- Si se cumple la condición de transición B, se activará la etapa E₃.
- Cualquiera de las condiciones de transición que se cumpla, desactivará a E_i.

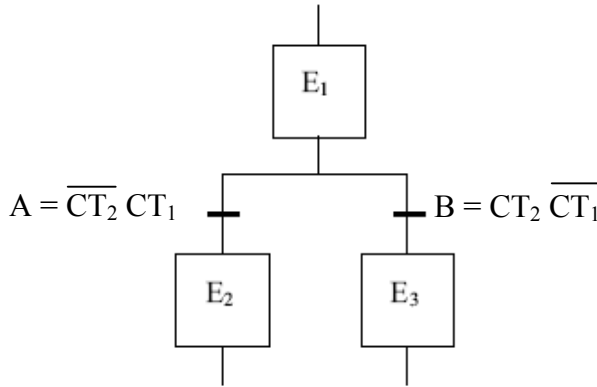


Figura 11 Configuración correcta

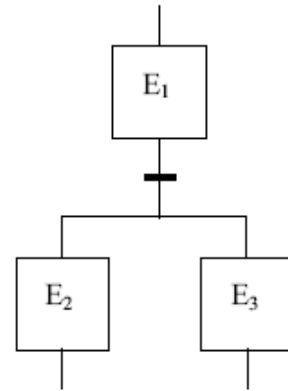


Figura 12 Configuración errónea

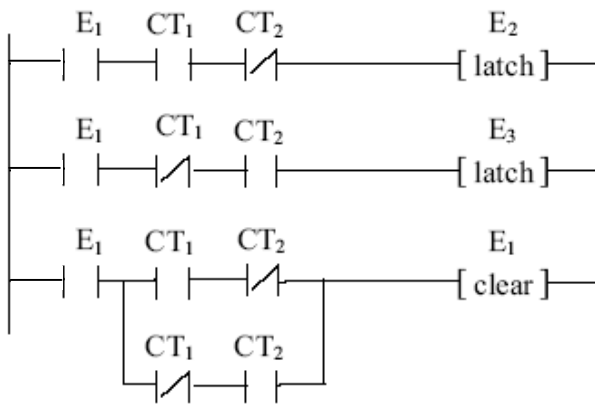


Figura N° 11a. Ladder para el simulador Trilogi

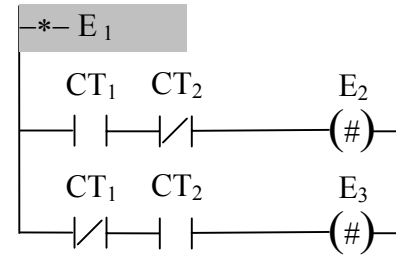


Figura N° 11b Grafcet del PLC

Nota 1: Este software no permite colocar como “ factor común ” al pulsador NA, E₁ asociados a 2 latches (o 2 clears) distintos.

Nota 2: Tampoco permite colocar dos o mas latch o clear correspondiente a una misma etapa.

Nota 3: Para el correcto funcionamiento de este simulador, se debe colocar al principio del programa todas las instrucciones latch; después colocar todas las clear y por ultimo colocar aquellas instrucciones asociadas a las acciones (bobinas de : salidas, contadores, temporizadores, etc).

• **Unión alternativa o convergencia “Or”**

En la unión alternativa o convergencia “Or”, se deben unir de nuevo las diferentes secuencias provenientes de una bifurcación (alternativa o simultánea) anterior. El final de las dos secuencias, se produce cuando se cumple, una de las dos condiciones de transición anteriores a la etapa de unión. En la Figura N° 13 se muestra la estructura y en las Figuras N° 13a y 13b los esquemas ladder y grafcet que los rige. Partiendo de una etapa activa (la E₅ o la E₆), se producirá que:

- Cualquiera de las condiciones de transiciones que se cumpla, se activará E₇.
- Si se cumple la condición CT₁ (o la CT₂), se desactivará E₅ (o la E₆).

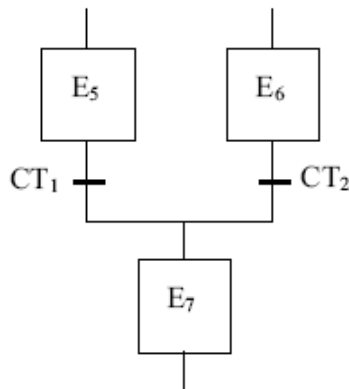


Figura 13 Configuración correcta

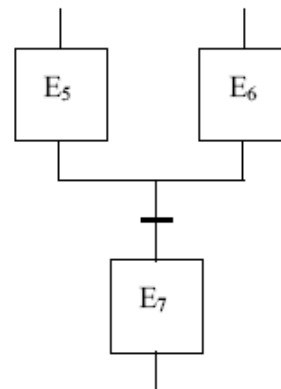


Figura 14 Configuración errónea

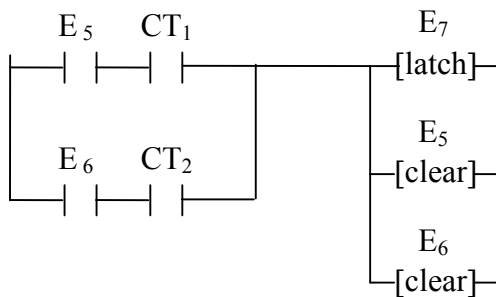


Figura N° 13a Ladder del simulador Trilogi

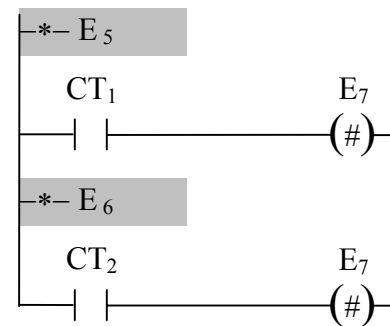


Figura N° 13b Grafcet del PLC

5.1.3.3. Secuencias simultaneas

• **Bifurcación simultanea o divergencia "And"**

Puede darse el caso que sea necesario la activación simultanea de mas de una secuencia a la vez, cuyas etapas no tengan ninguna interrelación. Para poder representar este funcionamiento simultaneo, se utiliza un par de trazos horizontales paralelos que indican el principio y el final de estas secuencias (Figura N° 15). El comienzo de las dos secuencias simultáneas se produce cuando se cumple la condición de transición CT. En las Figuras N° 15a y 15b se indican los esquemas ladder y grafcet que rigen el comportamiento de la bifurcación.

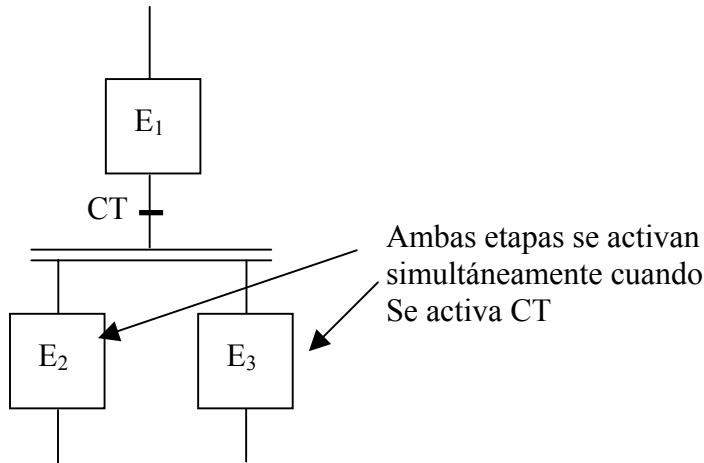


Figura 15 Configuración correcta

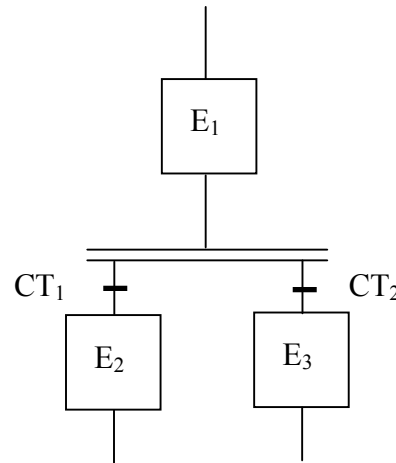


Figura 16 Configuración errónea

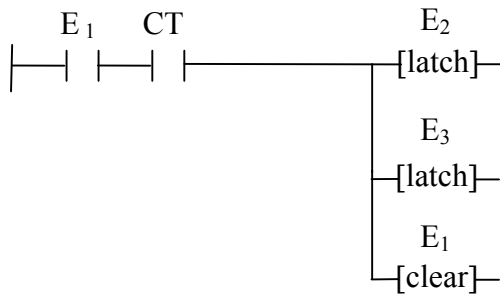


Figura N° 15a Ladder del simulador Trilogi

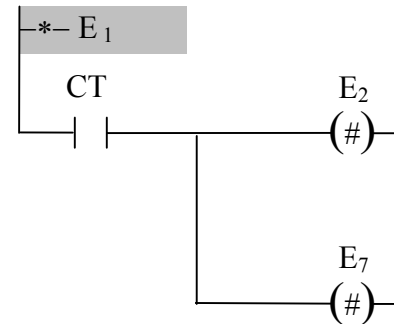


Figura N° 15b Graficet del PLC

• **Unión simultánea o convergencia "And"**

En la unión simultánea o convergencia "And" se deben unir de nuevo las diferentes secuencias provenientes de una bifurcación (alternativa o simultánea) anterior. El final de las dos secuencias simultáneas se produce cuando las dos etapas E5 y E6 están activas y se cumple la condición de transición CT (Figura N° 17). Los esquemas ladder y graphicet que rigen el comportamiento de esta estructura se indican en las Figuras N° 17a y 17b.

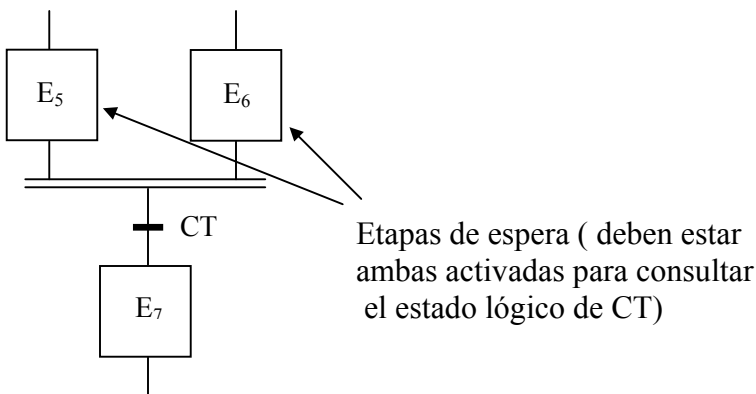


Figura 17. Configuración correcta

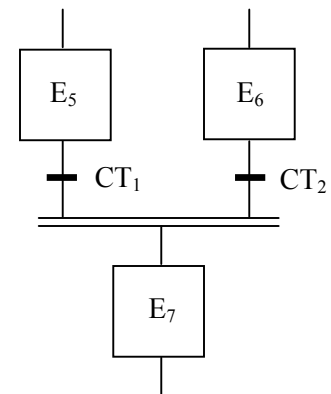


Figura 18. Configuración errónea

En el caso de un primer diseño de tener una configuración errónea como la indicada en la Figura N° 18, para corregirla lo que se hace es colocar después de cada condición de transición (CT_i y CT₂) una etapa de espera.

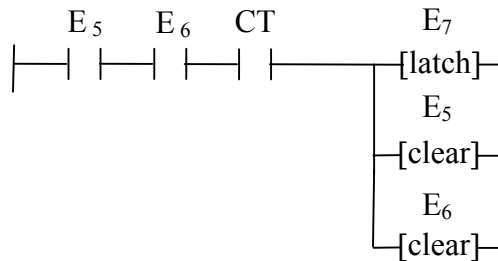


Figura N° 17a Ladder del simulador Trilogi

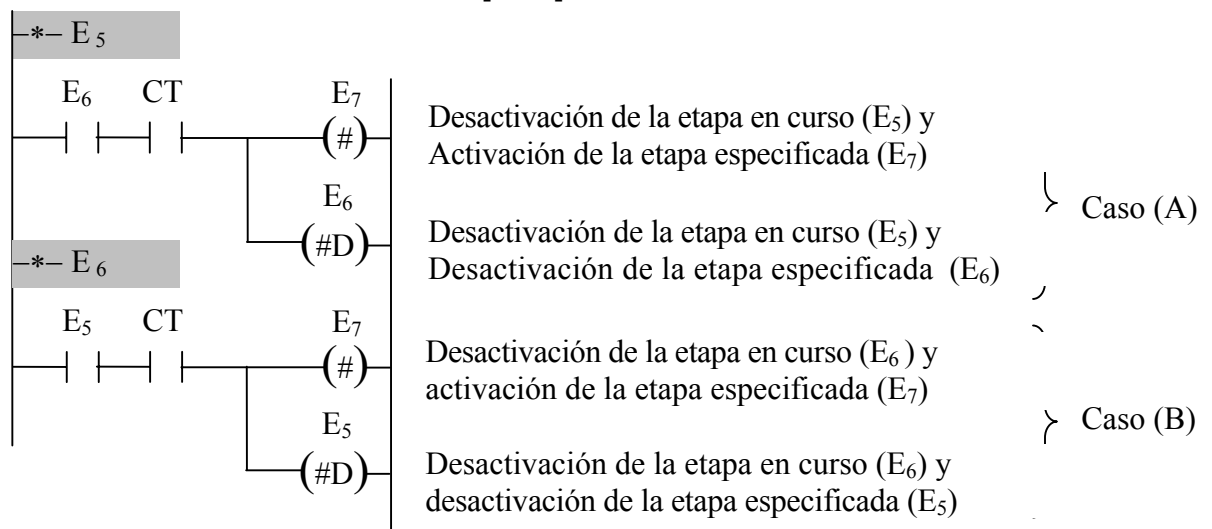


Figura N° 17 b Grafcet del PLC

Según la Figura N 17 b, para el caso (A), se cumple que primero se activa la etapa E₅ y después la E₆ ; mientras que para el caso (B), sucede lo contrario. Es decir que en ambos casos se espera a que ambas etapas estén activas, y cuando se cumpla la condición de transición CT, se activara la etapa E₇, desactivándose las etapas E₅ y E₆.

5.1.3.4. Salto condición a otra etapa

El salto condicional a otra etapa permite pasar de una etapa a otra sin activar las etapas intermedias. El salto condicional se puede hacer tanto en sentido ascendente como descendente. El sentido del salto viene indicado por las flechas (Figuras N° 19 y 20). En las Figuras N° 19a y 19b, se indican los ladder y grafcet correspondientes a la Figura N° 19 (salto ascendente), mientras que en las Figuras N° 20a y 20b, se indican los ladder y grafcet correspondientes a la Figura N° 20 (salto descendente).

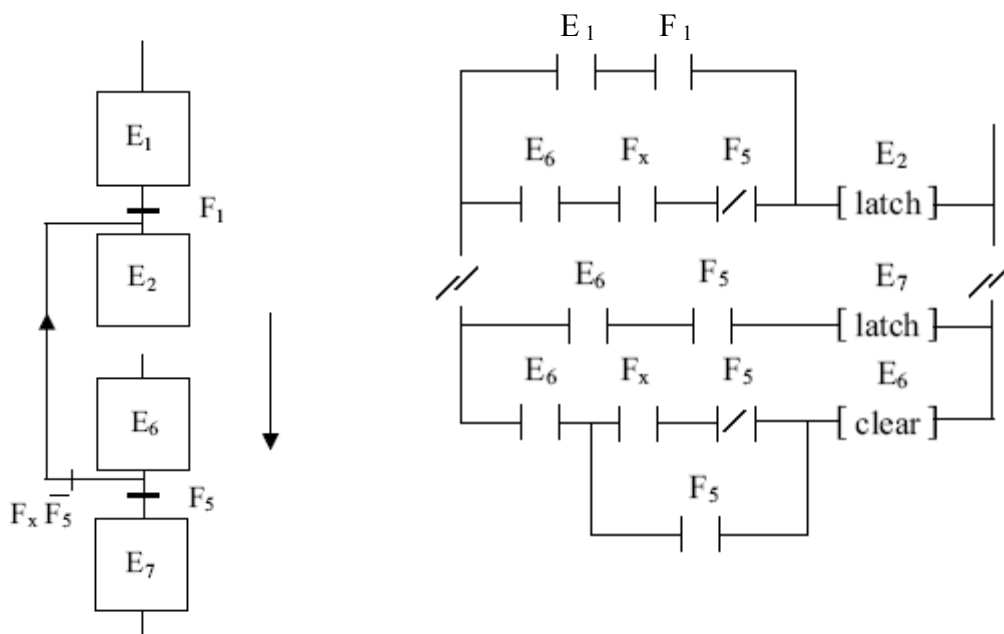


Figura 19 Salto ascendente

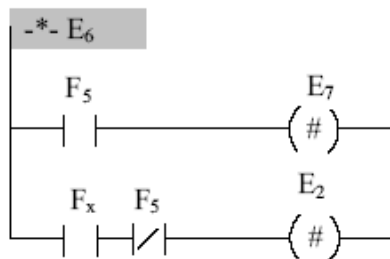


Figura 19b Grafset del PLC

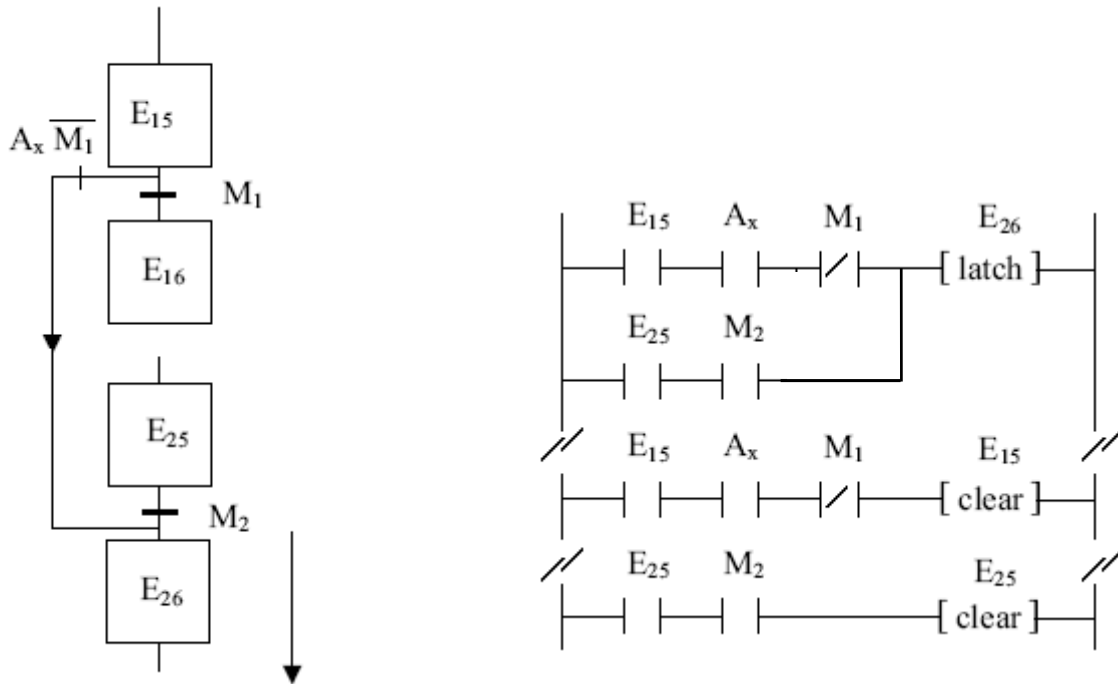


Figura N° 20a Ladder del simulador Trilogi

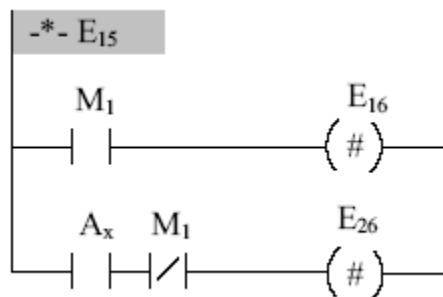


Figura N° 20b Grafcet del PLC

5.2. Ecuaciones Lógicas de las condiciones de transiciones

La condición de transición puede ser una o varias variables booleanas que intervienen en el proceso; por ejemplo una señal de un final de carrera, la activación de un motor, etc. A continuación se indican algunos ejemplos de condiciones de transiciones.

➤ Condición activa: $CT = F_1$.

La activación de la etapa E_i se produce cuando la etapa E_{i-1} está activada y el final de carrera F_1 está accionado.

➤ Condición inactiva: $CT = \overline{F_1}$.

La activación de la etapa E_i se produce cuando la etapa E_{i-1} está activada y el final de carrera F_1 no está accionado.

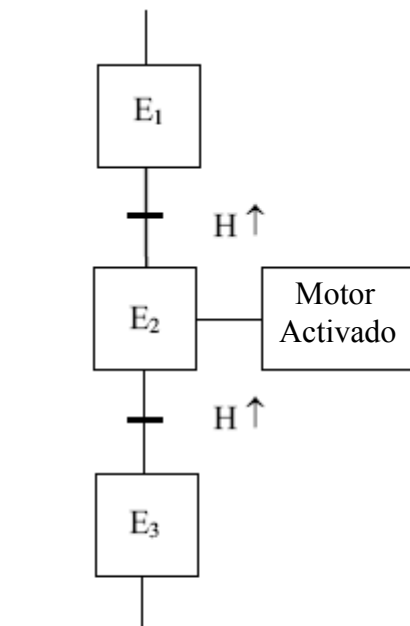
➤ Condición por tiempo: $CT = T_1 / E_{i-n} / 10 \text{ seg.}$

La activación de la etapa E_j se produce cuando la etapa E_{j-1} está activada y cuando el temporizador T_1 (activado en la etapa E_{j-n}) alcanzó los 10 segundos.

- Condición de varias variables: $CT = F_1 \overline{F_2} F_3$
 La activación de la etapa E_j se produce cuando la etapa E_{j-1} está activada y el final de carrera F_1 y el F_3 están accionados y el F_2 no está accionado.
- Condición incondicional: $CT = 1$.
 La activación de la etapa E_j se produce al activarse la etapa E_{j-1} .
- Condición flanco ascendente: $CT = H \uparrow$
 La activación de la etapa E_j se produce cuando la etapa E_{j-1} está activada y la señal H pasa de 0 a 1.

Por ejemplo en la Figura N° 21, se muestra la activación inmediatamente después de un primer flanco ascendente en la variable H , permaneciendo activada hasta que se desactive inmediatamente después por un segundo flanco ascendente en H . El instante de existencia del primer flanco ascendente se producirá después de la activación de E_1 , mientras que el instante de existencia del segundo flanco ascendente se producirá después de la activación de E_2 .

En el caso que no se disponga de un bit que detecte un flanco ascendente, se utiliza para tal tarea, una etapa intermedia anterior al instante de la existencia del flanco (etapas E_{20} y E_{30}) (Figura N° 22). Por lo visto anteriormente, se deduce que el motor deberá estar en funcionamiento cuando estén activas las etapas E_2 y E_{30} .



Esquema simplificado
 Figura 21

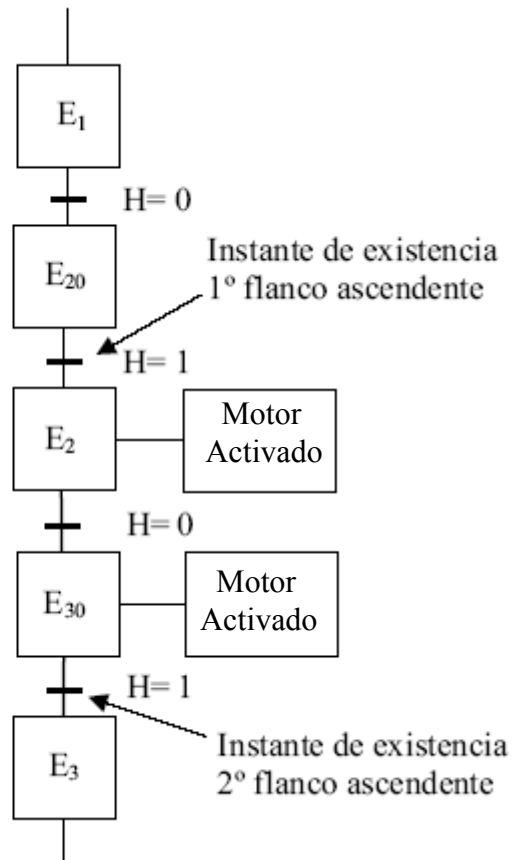


Figura 22

El ladder del simulador Trilogi que rige el comportamiento de este ejemplo se muestra en la Figura N° 22 a.

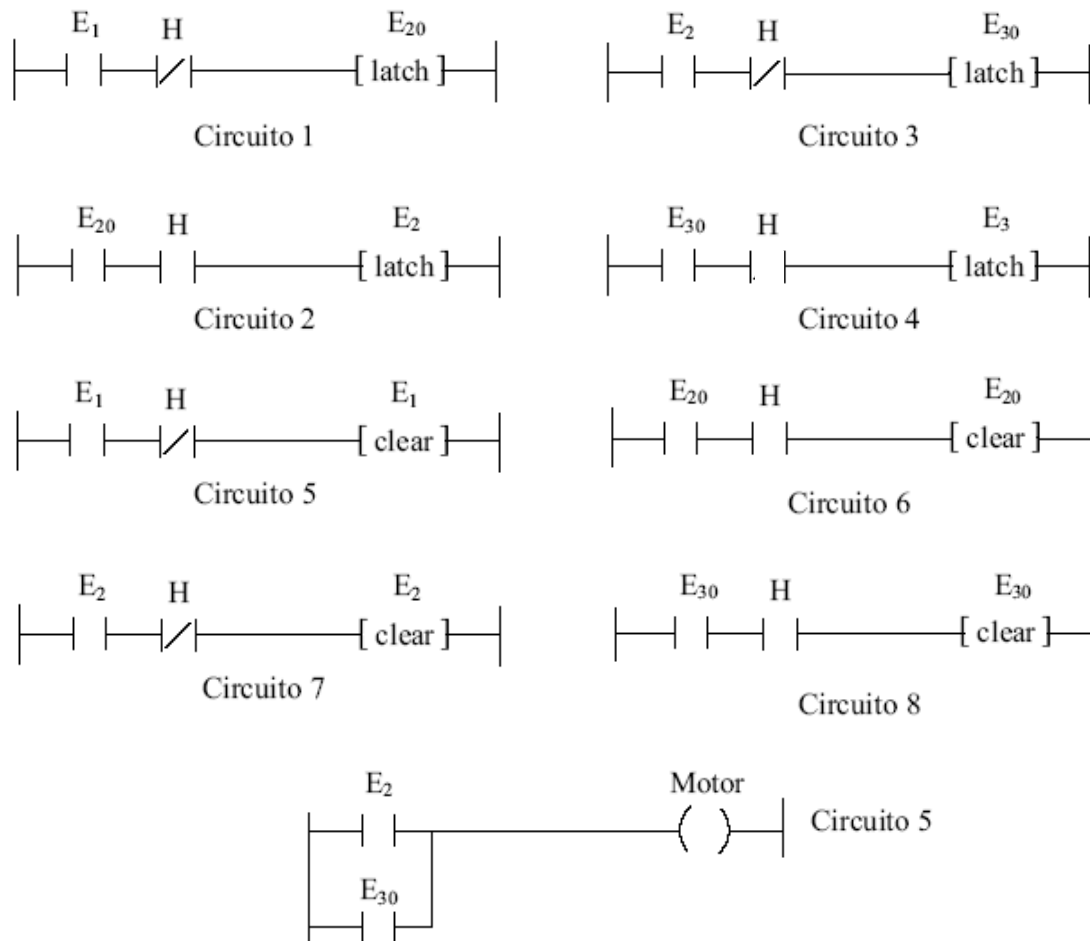
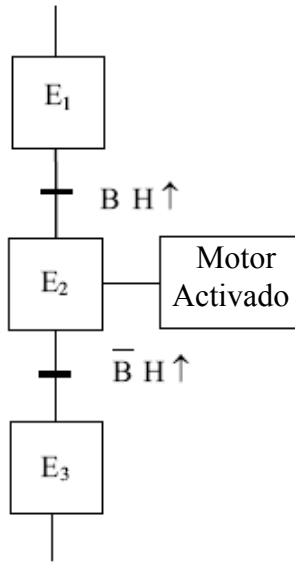


Figura 22a Ladder del simulador Trilogi

➤ **Flanco condicionado ascendente**

Es similar al anterior (Figuras N° 23 y 24), solo para el primer flanco ascendente en H, es condición imprescindible que B=1, sino el motor no comenzará a funcionar. Mientras que para el segundo flanco ascendente en H, es condición imprescindible que B=0, sino el motor no se detendrá.



Esquema simplificado
 Figura 23

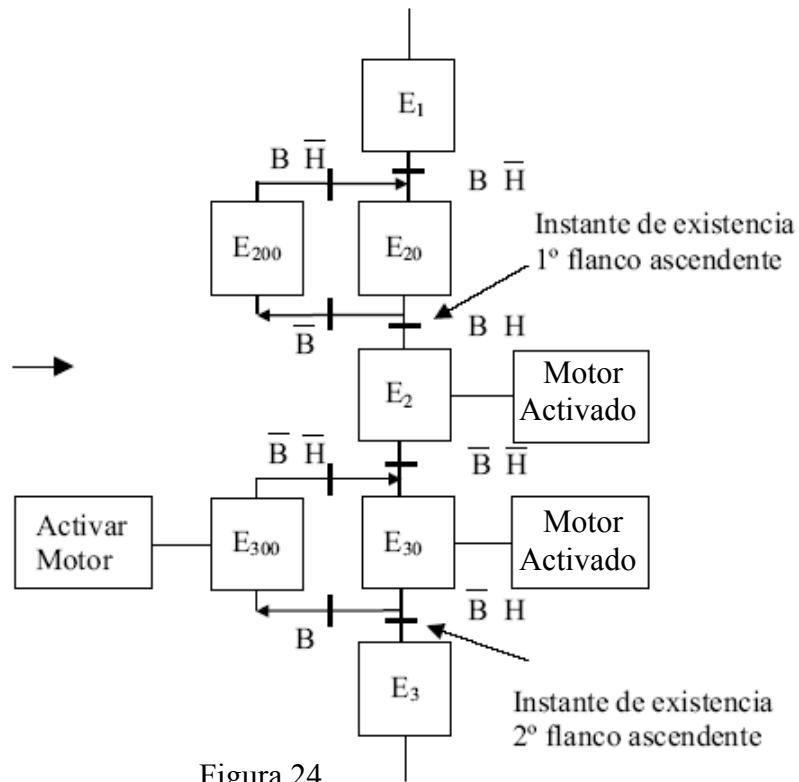


Figura 24

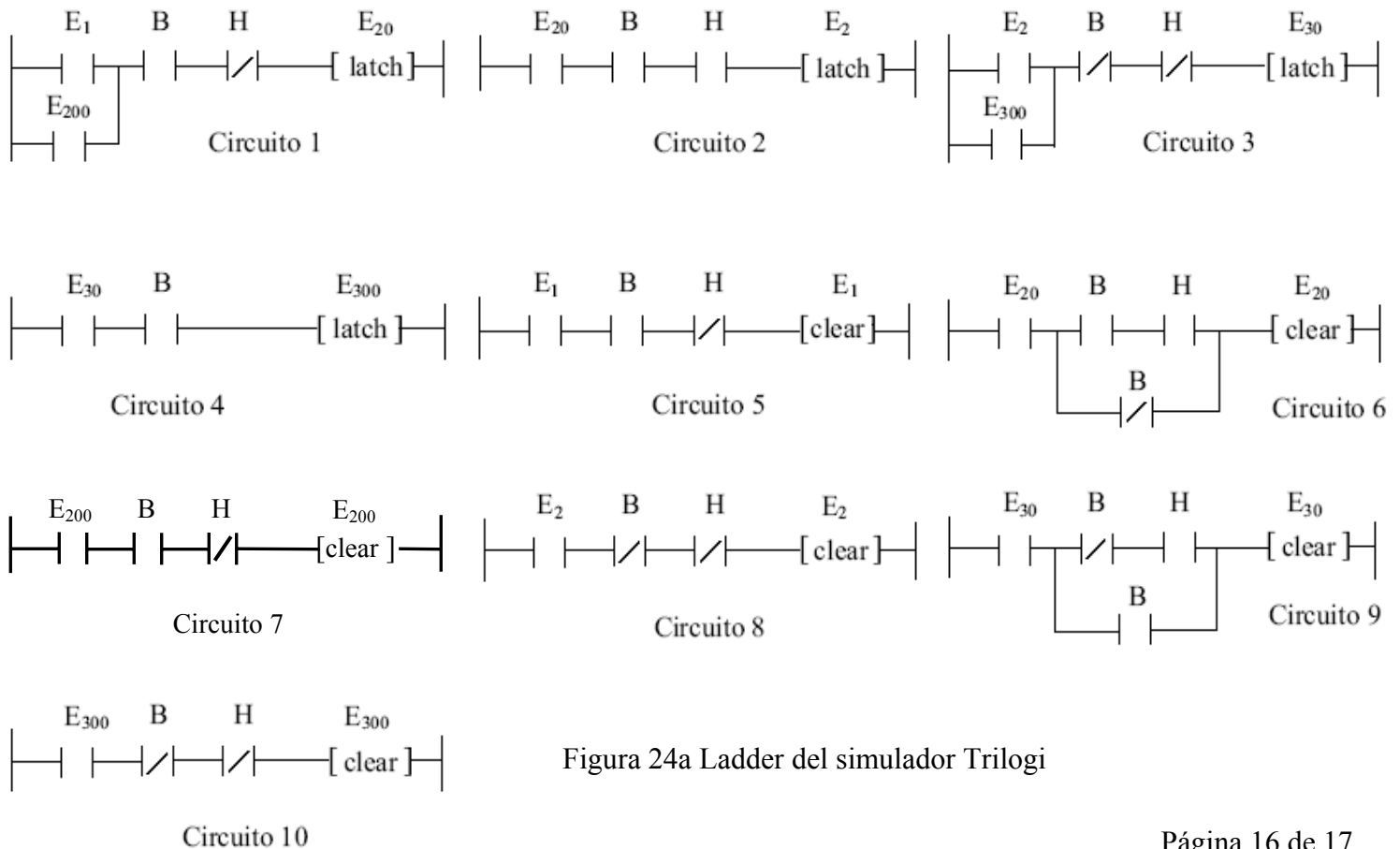


Figura 24a Ladder del simulador Trilogi

- Condición flanco descendente: $CT = A_1 \downarrow$

La activación de la etapa E_j se produce cuando la etapa E_{j-1} está activada y la señal A_1 pasa de 1 a 0.

- Etc.

5.3. Ecuaciones Lógicas de las acciones

Una vez que la etapa está activa, las acciones asociadas pueden activarse de varias formas. Hay varias posibilidades que analizamos a continuación:

- Acciones activadas mientras esté activada la etapa presente; por ejemplo la bomba N° 1 está activada mientras E_9 está activa (Figura N° 25).

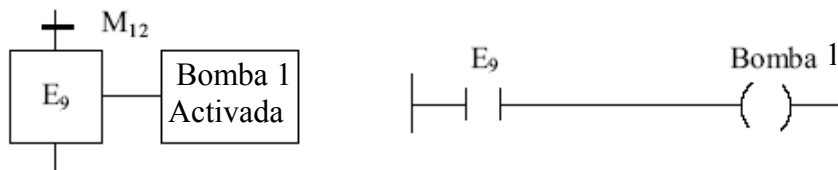


Figura 25

- Acciones condicionadas por una variable. El motor 2 se activará si E_9 está activada y han transcurrido 10 segundos desde que se activó el temporizador T_0 a partir de la activación de la etapa E_0 (Figura N° 26).

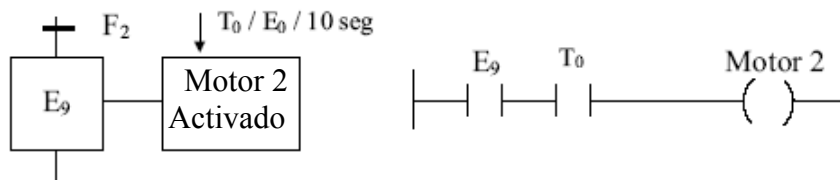


Figura 26

Las ecuaciones de activación de las acciones **SIEMPRE DEBEN SER COMBINACIONALES** con el fin simplificar el diseño del automatismo y evitar problemas entre la activación y desactivación de las mismas.