

8

Introducción a los automatismos

Un sistema automático busca la sustitución del operador humano tanto en sus tareas físicas como mentales. El concepto de regulación automática manejada hasta el presente capítulo, se ha centrado especialmente en tareas de control que pueden ser consideradas como muy unidas al proceso que se desean controlar. De esta forma, siempre se ha considerado que existe una consigna que de alguna forma es suministrada por el usuario, y que el sistema de control debe conseguir como respuesta del sistema. Sin embargo, en un sistema automático actual, éste es un lazo de control considerado como de nivel básico.

Las teorías y técnicas de regulación de procesos, tanto continuos como discretos, tienen como objetivo conseguir que las variables controladas se comporten según unas consignas de mando y unas características. Este objetivo no es el único ni el más complejo quedando aún muchos aspectos que tocar a la hora de automatizar.

Muchas de las operaciones que deben ser realizadas en un sistema automático, no necesitan de la precisión, el seguimiento, o el control dinámico hasta ahora supuesto en el estudio de los sistemas continuos. Es más, la mayoría de las acciones de control que se realizan quedan constituidas por sistemas que sólo admiten dos estados: o activos o inactivos. Tal es el caso de la activación de una cinta transportadora, del cierre de una pinza, el accionamiento de un alimentador discreto, o la lectura de determinados sensores de presencia, contacto, luz, etc. Por tanto, en muchos casos, ya no es tan importante cómo se hacen las operaciones automáticas, sino cuándo y cómo se coordinan las mismas. Este aspecto de la automatización, residente sobre sistemas con un número finito de estados, es lo que se denomina control todo-nada.

Mediante los siguientes capítulos, se pretende acercar al lector a un sistema automático más amplio en donde los conocimientos adquiridos tanto en la sección dedicada al control continuo como el discreto pasan a ser herramientas de un sistema de mayor envergadura denominado automatismo. Sin embargo, plantearse abarcar todo un

sistema automático en estas escasas páginas es irreal. Por ello se accederá a aspectos concretos de las tecnologías implicadas que permitan ilustrar estas pinceladas de introducción a la automatización. En este marco se pretende dar al lector unas ligeras nociones de algunas de las tecnologías implicadas de forma que puedan realizarse algunas implementaciones prácticas y completas de automatismos sencillos.

Se dedicará especial atención a un componente actualmente esencial en los sistemas automáticos: el PLC. Como se verá en más detalle, será la herramienta que permitirá la realización de los esquemas de control automático. Su orientación fuertemente industrial, su versatilidad, y su bajo coste lo han convertido en un elemento indispensable de los sistemas automáticos industriales. Finalmente se darán unas nociones de neumática por ser una tecnología muy presente en los sistemas industriales que permite además ser fácilmente implementada en el laboratorio. La utilización de la teoría de automatismos, junto con su implementación sobre el PLC, y el manejo de dispositivos neumáticos, permitirán el desarrollo de sistemas completos que los autores consideran fuertemente ilustrativos del control todo-nada.

8.1 Definición y concepto de automatismo.

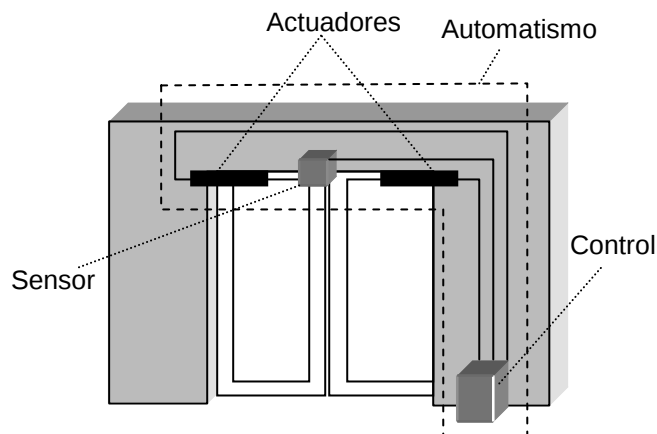
Un automatismo es un dispositivo capaz de reaccionar ante situaciones que se presentan en el funcionamiento de una máquina o proceso, ejerciendo sobre la misma acciones de control según las directrices con las que ha sido concebido.

De la misma definición de automatismo, se deduce que para que dicho sistema pueda ser llevado a cabo, es necesario que pueda recibir información inmediata del proceso, y que de alguna manera pueda actuar sobre el mismo. Por tanto, de forma genérica se puede establecer que un sistema automático se compondrá de tres elementos funcionalmente diferenciados: los sensores¹, que adquieren información del proceso; los actuadores, que permiten la acción sobre el mismo; y los equipos de control que se encargarán de regular las acciones de los actuadores en función de la información obtenida mediante los sensores.

En la figura se muestra el automatismo sencillo de apertura automática de unas puertas. El sistema dispone de un solo captador constituido por un sensor de presencia ultrasónico, de dos actuadores constituidos por los motores eléctricos de accionamiento lineal que nos permiten abrir y cerrar las puertas, y la unidad de control.

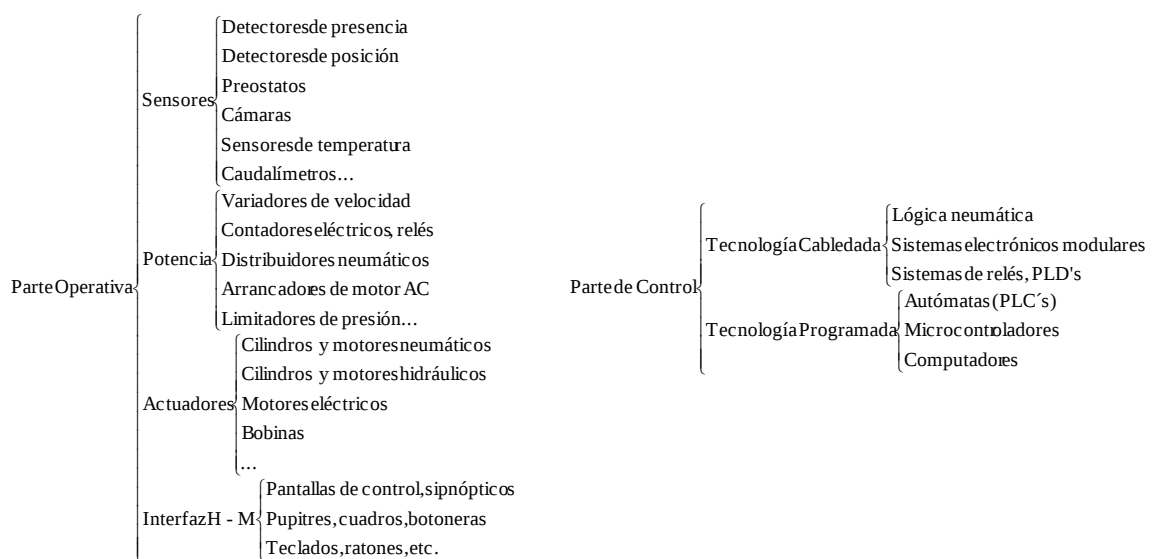
Según lo expuesto, se pueden establecer dos partes diferenciadas en un automatismo, la parte operativa y la parte de control.

¹ Existen diversos nombres utilizados en la literatura para hacer mención de los distintos dispositivos o efectos que nos permiten extraer información del entorno. Cada cual tiene su matiz particular, pero en muchos casos son utilizados indistintamente. Entre estas otras denominaciones pueden destacarse los términos *transductor* y *captador* además del utilizado *sensor*.



La parte operativa conecta la parte de control con el proceso o la máquina. La parte de control recibe consignas de mando junto con la información procedente de los sensores y elabora de acuerdo a las directrices establecidas las acciones de control para las máquinas y actuadores.

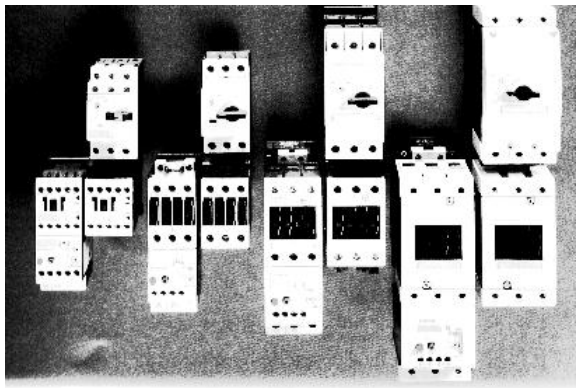
A continuación en el siguiente esquema se enumeran una serie de dispositivos y tecnologías que aparecen implicados en los sistemas de automatización más comunes.



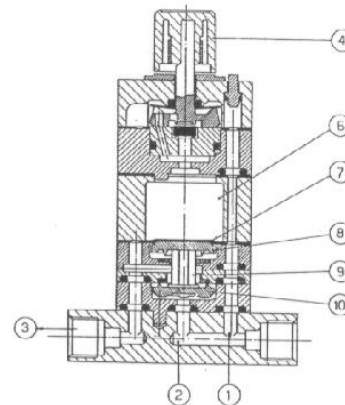
La parte operativa, depende fuertemente del proceso o máquina que se desea controlar. Así, para una máquina expendedora de bebidas, parece absurdo plantearse el uso de actuadores de tipo neumático dada la instalación adicional necesaria para poder hacer uso de esta tecnología.

No ocurre así con la parte de control. La utilización de una u otra opción dependerá en gran medida de los criterios de diseño del sistema, especialmente para el caso de automatismos de poca complejidad.

La tecnología cableada se realiza en base a uniones físicas de los módulos que componen la parte de control. Cada uno de estos elementos es capaz de realizar ciertas operaciones lógicas básicas o de memoria de forma que mediante la correcta combinación de los dispositivos se pueden lograr automatismos combinacionales o secuenciales. En las ilustraciones siguientes se muestran dispositivos representativos de esta tecnología. En primer lugar aparecen un conjunto de relés industriales de distintos tamaños y funcionalidad. Otra posible tecnología cada vez más relegada al campo de la actuación, es el uso de sistemas neumáticos. En la figura aparece el esquema de un temporizador neumático. Por último, a caballo entre la tecnología programada y cableada, se muestra un ejemplo de electrónica modular actual como es el caso del sistema LOGO de SIEMENS.



Algunos relés industriales.



Esquema de un temporizador neumático.

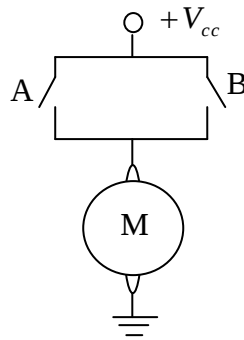


Sistema electrónico modular
LOGO de SIEMENS.

En cambio, en la tecnología programada, el control se realiza mediante la confección de un programa residente en la memoria de un sistema basado en microprocesador.

Actualmente, el uso de la tecnología cableada sólo puede estar justificado en la implementación de sistemas muy simples.

En el siguiente diagrama se expone un ejemplo sencillo de cómo se puede realizar una función lógica mediante la utilización de interruptores. Para este caso, el motor se moverá en caso de que se pulse uno u otro interruptor. La lectura lógica de este sistema sería: *Si A es pulsado o B es pulsado, entonces mueve el motor.*



Los inconvenientes más destacados de esta tecnología frente a la programada son:

- Ocupa mucho espacio
- Es poco flexible frente a modificaciones o ampliaciones.
- Es muy difícil de mantener (seguimiento de errores, y reparación).
- No es factible en sistemas de control complejos.

Sin embargo, los sistemas basados en microprocesador para pequeños automatismos pueden resultar excesivamente costosos y necesitan siempre de un personal más especializado. Inicialmente estos sistemas también planteaban el problema de que no se encontraban suficientemente adaptados para los entornos industriales. Actualmente existen dispositivos de distinto nivel de complejidad adaptados perfectamente a este entorno, desde los autómatas más sencillos, hasta potentes ordenadores industriales.

Tanto por su importancia histórica como por su presencia actual en prácticamente todos los sistemas industriales actuales, debe destacarse como elemento de control el autómatas programable o PLC. Este dispositivo nació por la necesidad de disponer de un elemento de control que fuera programable y por tanto reutilizable y configurable, pero específico para el entorno industrial. Su fácil instalación, manejo y mantenimiento lo han convertido en elemento destacable de los sistemas automáticos. Es por ello que se dedicará especial atención a estos dispositivos tras ver primero unos fundamentos o conceptos básicos que permitan el diseño de automatismos.

8.2 Conceptos básicos

Anteriormente se ha mencionado que el diseño de automatismos puede también ser identificado con el diseño de sistemas de control todo o nada para la mayoría de las aplicaciones. Esto es debido a que la mayoría de las señales tanto de lectura como de actuación, siguen un patrón binario. Debido a ello es necesario para el diseño de estos sistemas conocer el álgebra binaria, así como los sistemas desarrollables a partir de las distintas operaciones lógicas y sus métodos de representación.

8.2.1 Álgebra binaria

Se repasan a continuación las principales funciones del álgebra de Boole o binaria, su nomenclatura y las principales propiedades. La forma de presentarlas es mediante tablas de verdad las cuales muestran el resultado de una operación lógica en función de las distintas combinaciones posibles de los operandos binarios.

FUNCIONES LÓGICAS			
	<i>Símbolo</i>	<i>Contactos</i>	<i>Lógica</i>
Básicas	+	paralelo	OR
	·	serie	AND
		negación	NOT
Comp.	$\oplus$		XOR

La tabla de verdad correspondiente es la siguiente:

A	B	A+B	A·B	A⊕B
0	0	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	0

El álgebra de Boole, establece una serie de propiedades y leyes que permiten simplificar en muchos casos las expresiones resultantes del seguimiento de procedimientos de diseño. Las más importantes son las siguientes:

- Propiedad conmutativa:
 $A + B = B + A$
 $A \cdot B = B \cdot A$
- Elemento neutro:
 $0 + A = A$
 $1 \cdot B = B$
- Propiedad distributiva:
 $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$
 $A + B \cdot C = (A + B) \cdot (A + C)$
- Elemento simétrico:
 $A + \bar{A} = 1$
 $B \cdot \bar{B} = 0$
- Propiedad asociativa:
 $A + (B + C) = (A + B) + C$
 $A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot B) \cdot C$
- Ley de Absorción

$$A \cdot (A + B) = A + (A \cdot B) = A$$

- Leyes de Morgan:

$$\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

$$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$$

$$A + \bar{A} \cdot B = A + B$$

$$A \cdot B + A \cdot C + B \cdot \bar{C} = A \cdot C + B \cdot \bar{C}$$

8.2.2 Sistemas combinacionales

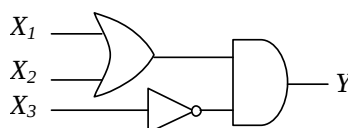
Los sistemas o bloques lógico podemos dividirlos en dos grandes categorías: combinacionales o secuenciales.

Un sistema combinacional es aquel cuyas salidas dependen únicamente del estado de sus entradas, con total independencia de cuál sea el estado inicial de partida. Esta definición lleva implícito que la función de transferencia del sistema son simplemente funciones lógicas que relacionan las salidas con las entradas mediante la combinación de los operadores lógicos básicos. El nombre combinacional se deriva precisamente del hecho de que a las variables de salida dependen exclusivamente de la combinación de las variables de entrada que se aplique.

Siendo las variables Y las que representan las salidas, y las variables X las entradas, un sencillo ejemplo sería el siguiente:

$$Y = (X_1 + X_2) \cdot \bar{X}_3$$

Que podría ser implementado mediante el siguiente circuito digital:



8.2.3 Sistemas secuenciales

Los sistemas secuenciales por el contrario, es aquel cuyas salidas dependen de las variables de entrada y del propio estado del sistema. Si tenemos en cuenta que cualquier estado puede ser tomado como estado inicial, se desprende que el sistema ha de ser capaz de memorizar todos y cada uno de los estados posibles. Dichos estados se memorizan mediante variables internas denominadas variables de estado. La denominación de sistema secuencial se debe precisamente a que el valor de las salidas depende de los estados de las entradas y de la secuencia anterior de estados en dichas entradas.

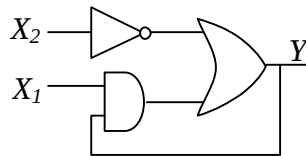
Desde el punto de vista del modelo matemático, la función o funciones de transferencia de un sistema secuencial siguen siendo funciones lógicas, pero contienen variables internas que guardan memoria del estado del sistema. Estas variables internas son

las que marcan la diferencia entre un sistema combinacional y un sistema secuencial. Por tanto, desde el punto de vista tecnológico para poder construir sistemas secuenciales debe disponerse en ella de una célula básica de memoria capaz de ejecutar la función de almacenamiento. A esta célula básica se le suele llamar también biestable y suele estar formada por dispositivos lógicos combinacionales interconectados de forma que exista un enclavamiento interno entre ellos.

Un circuito sistema secuencial simple sería el que realizase la siguiente función:

$$Y_{k+1} = (X_1 \cdot Y_k) + \bar{X}_2$$

Una realización de dicha función mediante un circuito digital asíncrono simple sería la siguiente:



Por tanto, respecto de un bloque que represente un automatismo lógico genérico, se pueden definir los distintos tipos de variables que están involucradas:

- Las entradas de un bloque son las variables independientes, es decir, su estado varía de acuerdo a unas condiciones u órdenes externas, no controladas por el propio bloque.
- Las variables internas son aquellas que elabora el sistema a partir de las entradas eventualmente de otras variables internas. Dentro de las variables internas podemos distinguir dos tipos: las dependientes sólo de las entradas o combinacionales y las de estado.
- Finalmente las variables de salida son en el caso más general, variables dependientes de las entradas y de las variables de estado.

Los sistemas reales son combinación de sistemas secuenciales y combinacionales en la gran mayoría de los casos. En consecuencia, los sistemas como tales suelen ser híbridos conteniendo parte combinacional y parte secuencial.

8.2.4 Métodos de Representación

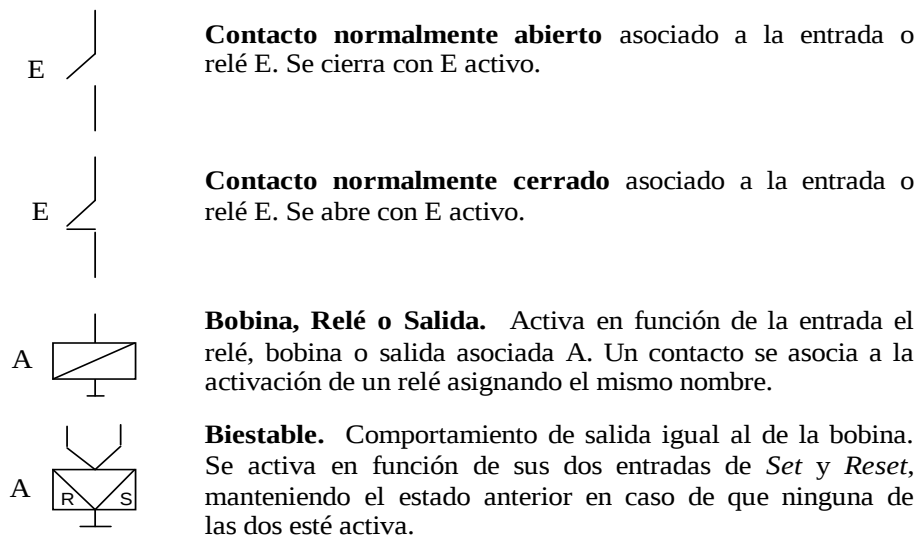
Existen diversas formas de representar un automatismo además de la ya utilizada por medio de sus funciones de transferencia (combinación de funciones lógicas). No todos los métodos son capaces de representar todas las funcionalidades necesarias, pero al menos

deberán de ser capaces de representar las funciones lógicas que relacionan las señales de entrada con las salidas.

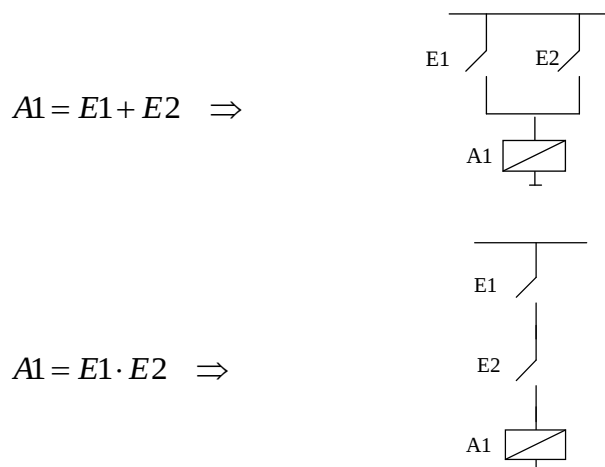
Esquema de contactos

Este método corresponde con el esquema de conexiones eléctricas que hay que realizar para construir el automatismo mediante el uso de contactores, relés y otros componentes electromecánicos. Por tanto es traducible directamente a un automatismo realizado mediante lo que anteriormente se ha definido como tecnología cableada.

Se compone de una serie de símbolos básicos que corresponden con sistemas reales que interconectados entre sí permiten la realización de las distintas funciones lógicas. Alguno de los símbolos básicos más importantes son los siguientes:



Las siguientes ecuaciones lógicas, se representarían con los esquemas de contactos adyacentes.



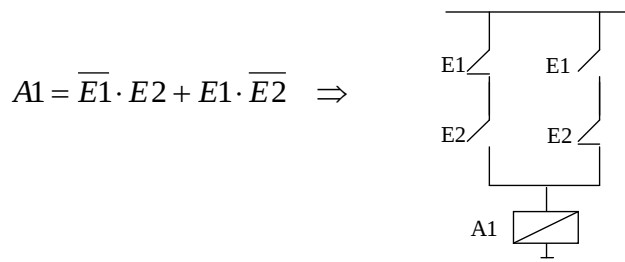
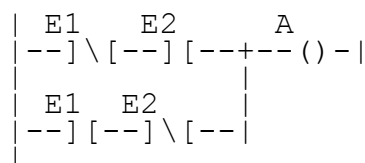


Diagrama de escalera o plano de contactos (KOP)

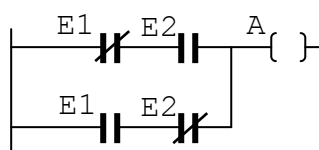
Sigue la norma DIN 19239, y es esencialmente equivalente al esquema de contactos, pero realizado mediante símbolos fácilmente plasmables mediante una máquina de escribir. A diferencia del esquema de contactos, la orientación de las conexiones en este caso es horizontal. Los símbolos equivalentes a los descritos para el plano de contactos son los siguientes:

$\begin{matrix} E \\ - \end{matrix}] [-$	Contacto normalmente abierto.
$\begin{matrix} E \\ - \end{matrix}] \setminus [-$	Contacto normalmente cerrado.
$\begin{matrix} A \\ - \end{matrix} () -$	Bobina, relé, salida.
$\begin{matrix} A \\ - \end{matrix} (s) -$	Activación del biestable (<i>Set</i>).
$\begin{matrix} A \\ - \end{matrix} (r) -$	Desactivación del biestable (<i>Reset</i>).

Como ejemplo ilustrativo el modelo KUP del automatismo definido por la ecuación lógica $A1 = \overline{E1} \cdot E2 + E1 \cdot \overline{E2}$ es el siguiente:



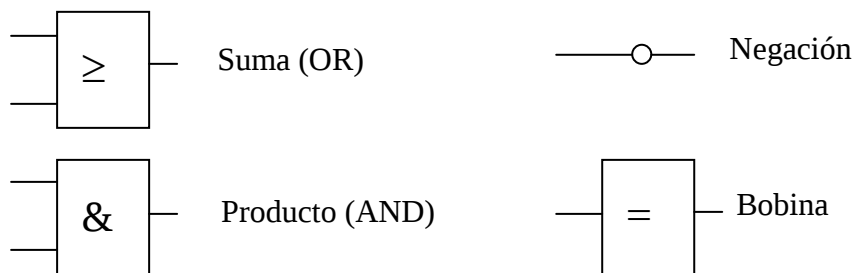
Con la evolución de los sistemas de impresión, y en particular del uso del ordenador como herramienta principal de generación de documentación, el uso de tipografías de máquina de escribir ha quedado sustituido en muchos casos por representaciones gráficas análogas pero más estéticas. El anterior automatismo quedaría de la forma siguiente según esta representación actualizada:



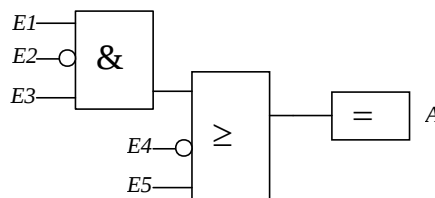
Plano de funciones (FUP)

Es un método gráfico de representación establecido en la normas DIN 40700, DIN 40719 y DIN 19239 en el que las funciones lógicas básicas se representan mediante símbolos que representan circuitos lógicos electrónicos. La tendencia a unificar los modos de representación gráfica ha provocado que en muchos casos, para símbolos de elementos más sofisticados que los utilizados hasta ahora (e.g.: temporizadores específicos) se utilice la misma representación en FUP y en KOP.

Los símbolos para las operaciones combinacionales más básicas son las siguientes:



La representación de la ecuación lógica $A1 = E1 \cdot \overline{E2} \cdot E3 + \overline{E4} + E5$ es la siguiente:



Lista de instrucciones

Cómo se ha mencionado en la introducción, la mayoría de los automatismos industriales se realizan mediante un programa en la memoria de un PLC o autómatas. Este mismo programa que define funcionalmente con exactitud y de forma exhaustiva el automatismo puede ser considerado un modelo del mismo. Sin embargo, y aunque muchas de las instrucciones son comunes a los distintos autómatas, los lenguajes utilizados por cada casa son específicos. En el capítulo siguiente se verá con cierto detalle el lenguaje STEP 5 utilizado por los autómatas de Siemens de la serie 5.

8.3 Síntesis de sistemas combinacionales

Tanto para los sistemas combinacionales como secuenciales se va a realizar un breve recordatorio de los métodos utilizados para el diseño de ambos sistemas.

Por su propia definición en un sistema combinacional las salidas en todo instante sólo dependen de la entrada. Por tanto para realizar la síntesis de estos sistemas, bastará con **generar una tabla de verdad** con todas las combinaciones de entradas posibles –que no tienen por que coincidir con todas las codificables- e indicar las salidas deseadas.

Para ver el proceso de síntesis, se va a realizar un sistema combinacional de un sistema de tres botones y una bombilla que se desea que se encienda cuando hay al menos más de un botón pulsado. Cada botón ($B1$, $B2$, $B3$) por tanto constituye una entrada puesto que es independiente del automatismo. La bombilla es la única salida L . La tabla de verdad correspondiente a la función que se desea realizar es la siguiente:

B1	B2	B3	L
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

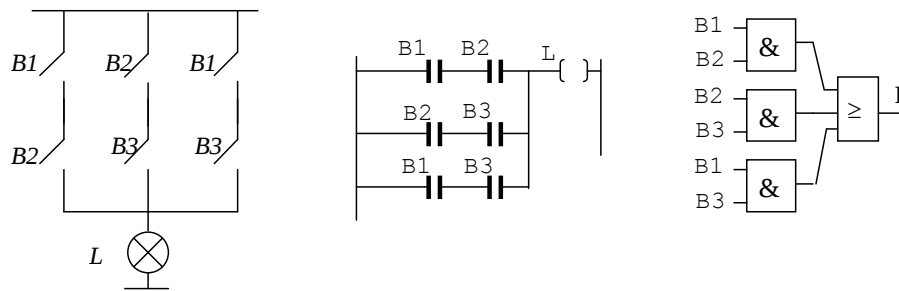
Directamente es posible codificar L como función de productos de sumas canónicas: $L = \overline{B1} \cdot B2 \cdot B3 + B1 \cdot \overline{B2} \cdot B3 + B1 \cdot B2 \cdot \overline{B3} + B1 \cdot B2 \cdot B3$, lo cual es directamente traducible en un diagrama de contactos algo extenso, aunque poco eficiente. Por ello es conveniente proceder a la minimización de la función lógica correspondiente mediante el uso de los **mapas de Karnaugh** para cada una de las salidas:

$B1 \backslash B2 \ B3$	00	01	11	10
0	0	0	1	0
1	0	1	1	1

Se obtienen tres agrupaciones que permiten la reducción a la suma de tres productos de dos variables lógicas:

$$L = B1 \cdot B2 + B2 \cdot B3 + B1 \cdot B3$$

Dicha función reflejada mediante los distintos sistemas de representación será finalmente:



8.4 Diseño de sistemas secuenciales

Existen diversas clasificaciones en función de la tecnología utilizada para implementar el sistema secuencial que se desea realizar. Los circuitos secuenciales en electrónica digital se diferencian en dos tipos síncronos o asíncronos, en función de si los cambios de las variables de estado y de las salidas queda regulado por una señal de sincronismo denominada reloj. Este mismo concepto puede ser aplicado a la síntesis genérica de sistemas secuenciales. Así, el diseño de un automatismo implementado por una autómatas, por su modo de funcionamiento es equivalente al diseño de un sistema secuencial síncrono. Sin embargo, si este mismo automatismo se realiza mediante relés, contactores y cableado, se debe considerar que es la síntesis de un sistema asíncrono en donde los cambios en los distintos componentes depende exclusivamente del propio estado y de la entrada sin que haya una señal de sincronismo común a todos los elementos.

Además en función del tipo de los elementos que se deseen utilizar para la construcción del mismo, o del modo de programación del autómatas, realizaremos el diseño mediante los denominados autómatas de *Moore* o de *Mealy*. Dado que el propósito de este epígrafe es sólo refrescar las ideas esenciales del diseño de máquinas de estado o autómatas, se considerará el caso más genérico: autómatas de *Mealy* asíncronos. Un autómatas asíncrono es directamente convertible a otro de tipo síncrono, y la representación de *Mealy* es más genérica que la de *Moore* (en ambos casos también son un poco más complejos en consecuencia).

Los pasos genéricos que hay que seguir en el diseño de un sistema secuencial son los siguientes:

- Identificación de entradas y salidas
- Realización del diagrama de estados (*Mealy*).
- Comprobación/Reducción del diagrama.
- Determinación del número de biestables o unidades de memoria binarias.
Asignación de estados. Comprobación de transiciones asíncronas.

- e. Realización de las tablas de verdad: Tablas del estado siguiente en función del estado y las entradas actuales, y tablas de salida en función de las entradas y el estado actual.
- f. Minimización de las funciones lógicas mediante los mapas de *Karnough*.
- g. Realización de la representación del autómeta.

El siguiente ejercicio se utilizará como ilustración de los distintos pasos que hay que realizar en la síntesis del automatismo.

Se desea construir un pulsador con memoria para accionar otros dispositivos. Dicho pulsador tendrá dos salidas A y B que responderá a sus dos posibles estados: encendido A o encendido B. Siempre uno de las dos salidas estará activa. Mediante la pulsación del botón se cambiará de una a otra. Es importante destacar que los cambios en la salida se producirán al ser pulsado el botón y no mientras este esté pulsado (se detecta el flanco de subida).

a. Identificación de entradas y salidas:

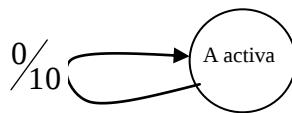
Para el ejemplo, el número de entradas es uno, y es el botón P . Consideraremos como uno lógico cuando está pulsado, y cero cuando no. El número de salidas es dos A y B, aunque se observa que ambas son complementarias.

b. Realización del diagrama de estados (Mealy):

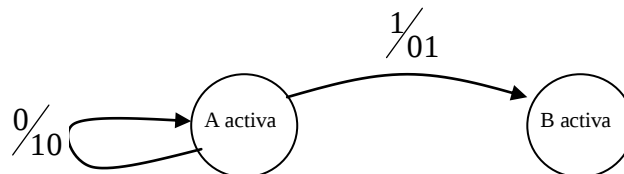
Mediante la máquina de *Mealy* representamos un autómeta en el que las salidas dependen del estado en el que se encuentre el sistema y el valor de las entradas. Esto viene reflejado de la siguiente forma: Los estados se enmarcan en círculos, mientras que las transiciones entre estados y las condiciones de permanencia en los mismos estados se indica mediante flechas. A cada una de estas transiciones se le asigna una condición (dada por las variables de entrada) y la salida generada. Una transición estará activa si el estado del automatismo es el de su partida, y se cumple la condición de la transición. Para cada transición activa se debe asociar un determinado vector de valores de las variables de salida.

La representación de las distintas variables debe indicarse al comienzo de la máquina de estados para poder entender de esta forma el valor al que hacen referencia. Para el ejercicio propuesto, se considerará la siguiente notación para las transiciones: $P/A B$ donde P es el valor lógico del pulsador que activa la transición, y A y B los valores lógicos de las salidas cuando dicha transición está activa.

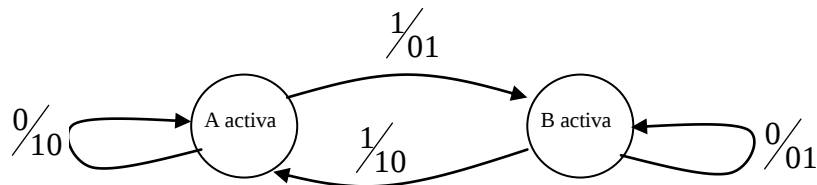
Para el ejemplo, inicialmente consideramos como posible estado de partida uno en el que A está activo. Mientras que no se pulse P , seguirá activa la salida A, y B no. Representamos este primer estado con esa condición de permanencia:



Al pulsar el botón se desea que la salida *A* se desactive y que se active *B*. Puesto que al soltar el botón las salidas establecidas deben permanecer como se han indicado, es necesario cambiar a otro estado, al cual de momento vamos a denominar como *B activa*.

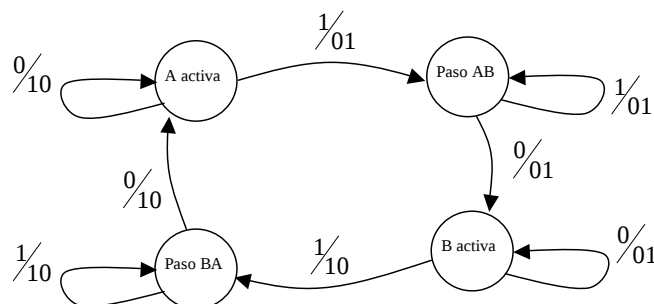


La condición de permanencia en éste será análoga a la del estado *A activa*, manteniéndose en el mismo mientras que no se apriete de nuevo el botón. La transición hacia *A activa* se producirá en caso de que sea pulsado, introduciendo los nuevos estados de salida:



Sin embargo, este diagrama de estados no es correcto. Considérese que partiendo del estado *A activa* pulso el botón y lo mantengo continuamente pulsado. Entonces, pasará al estado *B activa* mediante la transición con la condición $P=1$. Sin embargo, al seguir P pulsado, volverá a saltar de estado a través de la transición que partiendo de *B activa* tiene como condición $P=1$. Por tanto siempre que pulse el botón, el sistema permutará de estado tan rápido como lo permita la tecnología sobre la que esté realizado, y se congelará en aquel que coincida con el momento de soltar el mismo. Evidentemente es incorrecto, y es un aspecto que hay que cuidar especialmente en el dibujo del diagrama de estados: habitualmente no debe haber transiciones de entrada con la misma condición que transiciones de salida salvo que se trate de un estado intermedio utilizado para evitar problemas de sincronismo como se observará más adelante con un ejemplo específico.

El diagrama de estados correcto para el automatismo se resuelve introduciendo unos estados de transición que detecten que el botón ha sido soltado:



c. *Comprobación/Reducción del diagrama*

Para comprobar la integridad del diagrama de estados hay que comprobar los siguientes aspectos:

- *Comprobación de transiciones:* el conjunto de transiciones salientes de cada estado debe codificar a totalidad de combinaciones posibles de las entradas. Si no usan símbolos genéricos, entonces el número de transiciones saliente coincidirá con el número de combinaciones posibles que se pueden dar a la entrada.
- *Comprobación de estados:* No existen estados de los que sólo salen flechas, excepto aquellos que se producen al arrancar o reiniciar el sistema automático. No pueden existir estados finales a los que sólo lleguen flechas (el automatismo se quedaría eternamente estancado).
- *Reducción del diagrama:* Se simplifica el diagrama si existen estados equivalentes. Dos estados son equivalentes si producen la misma salida, y si las transiciones que parten del estado son iguales. No importan por tanto las condiciones de entrada (es decir las transiciones entrantes).

d. *Determinación del número de memorias, asignación de estados y comprobación de transiciones asíncronas.*

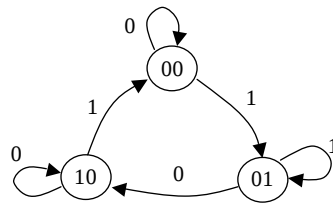
Como mínimo serán necesarios tantos elementos de memoria como bits necesarios para codificar el número total de estados en codificación binaria natural. Es decir, siendo N el número de estados y n el número de elementos de memoria considerado, se debe cumplir que $2^n \geq N$. En general, como criterio se tomará el mínimo número de biestables (lo cual no quiere decir que sea la solución óptima). Por tanto, para el ejemplo, necesitaremos como mínimo dos elementos biestables. Una vez seleccionado el número de elementos que codificarán el estado interno del autómatas, se procederá a la asignación de estos estados.

Dependiendo de cómo se realice la asignación de estados la máquina quedará más compleja o más sencilla (no es algo fácil). La asignación inicialmente se hace a ojo, intentando en el caso de las máquinas asíncronas que la codificación binaria de estados contiguos sea adyacente (casillas contiguas del mapa de *Karnaugh*). La asignación para el ejemplo, siendo M_0 y M_1 los elementos biestables, es la siguiente:

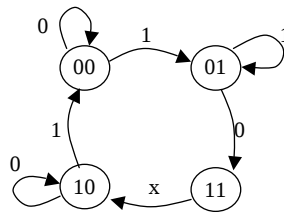
Estado	M_1	M_0
<i>A activa</i>	0	0
<i>Paso AB</i>	0	1
<i>B Activa</i>	1	1
<i>Paso BA</i>	1	0

¿Porqué es necesario que los estados estén codificados de forma adyacente entre estados contiguos de un sistema asíncrono?. Es posible que surjan problemas por el hecho de que no todos los componentes son igual de rápidos. Así para el caso del diagrama de

estados del siguiente ejemplo, se observa que la transición desde 01 a 10 requiere cambiar los dos bits de estado.



Si el paso de 01 se produce más lentamente en el segundo biestable que en el primero, es posible que se detecte durante un breve lapso de tiempo un estado falso dado por 00. Al ser la condición de la transición cero, este estado que parecía de paso pasa a convertirse en el estado de destino. Cuando utilizamos una realización del automatismo asíncrona (uso de relés o lógica neumática), es conveniente intentar conseguir que el cambio de las variables de estado entre dos estado contiguos, se produzca sólo en un elemento. Si es necesario introducimos estados de paso intermedios que consigan este propósito. El ejemplo indicado se resolvería de la siguiente forma:



e. Realización de las tablas de verdad:

Estado	M_t^1	M_t^0	P	$M_{t+\Delta t}^1$	$M_{t+\Delta t}^0$	A	B
A activa	0	0	0	0	0	1	0
	0	0	1	0	1	0	1
Paso AB	0	1	0	1	1	0	1
	0	1	1	0	1	0	1
B activa	1	1	0	1	1	0	1
	1	1	1	1	0	1	0
Paso BA	1	0	0	0	0	1	0
	1	0	1	1	0	1	0

- *Tabla de las variables de estado:* Al ser una máquina de Mealy las variables de estado $M_{t+\Delta t}^i$ siguiente al de un instante considerado, será función del estado actual dado por las variables de estado M_t en ese instante y de las entradas E :
- *Tabla de salidas:* Las salidas serán función del estado actual y de las entradas de igual forma a como ocurre con las variables de estado del instante siguiente.

Por tanto se puede utilizar una misma tabla para representar las tablas de verdad tanto de las salidas como de variables de estado.

- h. *Minimización de las funciones lógicas mediante los mapas de Karnough.* Se obtienen las expresiones de las funciones lógicas como si de un sistema combinacional se tratase, para cada una de las variables de estado, y para cada una de las salidas. Para el caso del ejemplo, puesto que B es la negación de A, sólo es necesario representar el mapa para A:

$P \backslash M^1 M^0$	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	1	1	0	0

$M^0_{t+\Delta t}$

$P \backslash M^1 M^0$	00	01	11	10
0	0	1	1	0
1	0	0	1	1

$M^1_{t+\Delta t}$

$P \backslash M^1 M^0$	00	01	11	10
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1

A

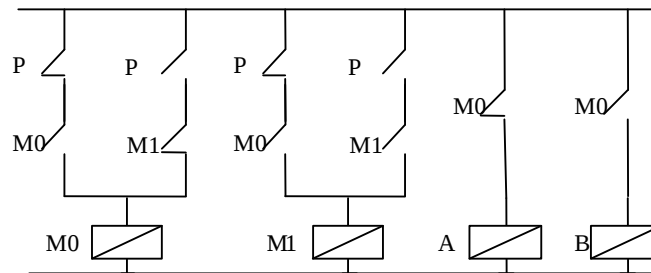
Por tanto las ecuaciones lógicas resultantes serán:

$$M^0_{t+\Delta t} = \bar{P} \cdot M^0_t + P \cdot \bar{M}^1_t$$

$$M^1_{t+\Delta t} = \bar{P} \cdot M^0_t + P \cdot M^1_t$$

$$A = \bar{M}^0_t \Rightarrow B = M^0_t$$

- i. *Representación del automatismo:* Utilizando por ejemplo el método de representación del esquema de contactos, tendremos finalmente el automatismo:



Por último, antes de dar por finalizado este pequeño retraso, se va a ver el caso en el que los dispositivos de memoria o incluso las salidas estén realizados por medio de biestables con señales de *set* y *reset*. En este caso se procede de igual forma, pero tras realizar la tabla de verdad, se procede a ver sólo los casos en los que varían las distintas variables, tal y como se muestra en la tabla de verdad posterior realizada para el mismo ejemplo.

Los mapas de Karnough –si son necesarios– se realizarán sobre las señales de *set* y *reset* puesto que son las que se necesita obtener. La mayoría de las veces es innecesario debido a que si los estados son contiguos las variaciones no suelen ser muchas.

Estado	M_t^1	M_t^0	P	$M_{t+\Delta t}^1$	S/R	$M_{t+\Delta t}^0$	S/R	A	B
<i>A activa</i>	0	0	0	0	-	0	-	1	0
	0	0	1	0	-	1	S	0	1
<i>Paso AB</i>	0	1	0	1	S	1	-	0	1
	0	1	1	0	-	1	-	0	1
<i>B activa</i>	1	1	0	1	-	1	-	0	1
	1	1	1	1	-	0	R	1	0
<i>Paso BA</i>	1	0	0	0	R	0	-	1	0
	1	0	1	1	-	0	-	1	0

Por tanto obtendremos que las expresiones lógicas de *Set* y *Reset*, para M^1 y M^2 son:

$$M^1 : \begin{cases} set = \overline{M^1} \cdot M^0 \cdot \overline{P} \\ reset = M^1 \cdot \overline{M^0} \cdot \overline{P} \end{cases} \quad M^0 : \begin{cases} set = \overline{M^1} \cdot \overline{M^0} \cdot P \\ reset = M^1 \cdot M^0 \cdot P \end{cases}$$

8.5 El autómatas programable

Una vez enunciadas las herramientas básicas para el análisis y diseño de automatismos sencillos, se va a abordar el aspecto de la implementación. Como se vió al comienzo del capítulo, el sistema más habitual utilizado para la realización física del sistema automático es el autómatas programable. Este epígrafe busca dar al lector una serie de nociones básicas sobre el autómatas que permitan entender esta máquina industrial tan importante.

8.5.1 Características de los autómatas.

La demanda en la industria de un sistema económico, robusto, flexible, fácilmente modificable y con mayor facilidad para tratar con tensiones y corrientes fuertes que la que tenía el ordenador, hizo que se desarrollasen los autómatas programables industriales, abreviadamente API en la literatura castellana o PLC en la literatura anglosajona.

Una primera definición de lo que es un PLC puede ser la que propone la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) de Estados Unidos: «Aparato electrónico digital que usa una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones que implementan funciones lógicas, secuenciales, temporizadores, contadores y aritméticas, para controlar a través de módulos de Entradas/Salidas digitales y analógicas, diferentes tipos de máquinas o procesos.»

Los primeros autómatas pretendían, básicamente, sustituir a los sistemas convencionales con relés o circuitos lógicos, con las ventajas evidentes que suponía tener un hardware estándar. Por ello nacieron con unas prestaciones muy similares a las que ofrecían dichas tecnologías convencionales y sus lenguajes de programación eran muy próximos a los esquemáticos empleados en las mismas.

Los autómatas actuales han mejorado sus prestaciones respecto a los primeros en muchos aspectos, pero fundamentalmente a base de incorporar un juego de instrucciones más potente, mejorar la velocidad de respuesta y dotar al autómata de capacidad de comunicación. Los juegos de instrucciones incluyen actualmente, aparte de las operaciones lógicas con bits, contadores y temporizadores, otra serie de operaciones lógicas con palabras, operaciones aritméticas, tratamiento de señales analógicas, funciones de comunicación y una serie de funciones de control no disponibles en la tecnología clásica de relés.

En definitiva, se puede decir que los grandes autómatas actuales se acercan cada vez más a las prestaciones de un pequeño ordenador, siendo algunos programables en lenguajes típicamente informáticos como puede ser el C. Sin embargo, la principal virtud del autómata sigue siendo su robustez y facilidad de interconexión al proceso y la tendencia actual no es precisamente la de acercarlo más a las prestaciones de los ordenadores en cuanto a su capacidad de cálculo, sino dotarlo de funciones específicas de control y de canales de comunicación para que puedan conectarse entre sí o a otros sistemas programables, como puede ser un ordenador personal. El resultado de esta integración permite formar una red de autómatas conectados a uno o varios ordenadores capaz de ofrecer las prestaciones y ventajas de ambos, integrando en un solo sistema híbrido las funciones de un sistema CIM (producción asistida por ordenador).

Sin embargo, el uso de los autómatas está cada vez menos ligado exclusivamente al mundo de la industria. Su integración en la vida cotidiana es mucho mayor de lo que podría parecer a simple vista. Pueden encontrarse autómatas en sitios tan comunes como una escalera mecánica, un ascensor, las puertas automáticas, alarmas domóticas, sistemas de iluminación y de riego en casas particulares, etc.

Para entender lo que es un autómata faltaría por introducir un aspecto importante de su concepción: *la modularidad*. Mediante este término se expresa que este hardware está fragmentado en partes interconectables que permiten configurar un sistema a la medida de las necesidades. De esta forma, encontramos autómatas compactos que incluyen una unidad de control y un mínimo de entradas y salidas y luego tienen previstas una serie de unidades de expansión que les permiten llegar a un número mucho mayor de entradas/salidas, o de funcionalidades. Así, a un autómata básico podemos agregarle la capacidad de controlar un proceso continuo por medio de un módulo que implemente varios reguladores, la capacidad de acceder a un determinado sistema de comunicación (ethernet, profibus, etc.), y otras muchas aplicaciones, sencillamente agregando un nuevo módulo al sistema original.

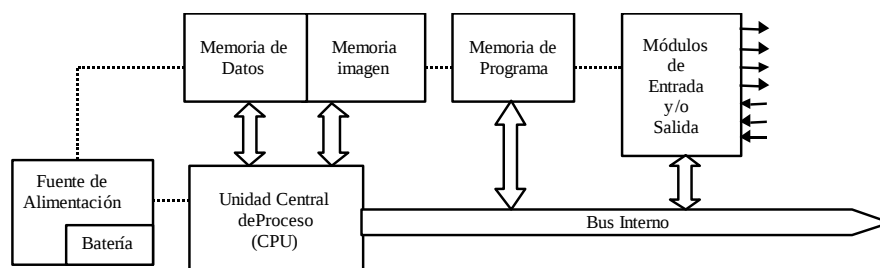
Antes de finalizar esta introducción es interesante mencionar de qué forma trabajan los autómatas integrados en sistemas de gran complejidad. La tendencia actual en estos

casos es utilizar los autómatas en red o como periféricos de un ordenador central, de forma que se combinan la facilidad de cálculo del ordenador y la facilidad de interfaces estándar que a través de la modularidad ofrece el autómata. El sistema de control resultante de esta combinación ofrece como resumen las siguientes prestaciones:

- Sistema programable con una gran potencia de cálculo.
- Gran cantidad de software estándar para manipulación de los datos y gestión de la producción.
- Interfaces estándar de ordenador para estaciones gráficas que permiten monitorizar el proceso de forma amigable.
- Control descentralizado con inteligencia distribuida, con posibilidad de mantener el proceso en funcionamiento aun cuando se produzcan fallos en el control central.
- Sistemas de comunicación estándar para redes de área local o extensa.
- Facilidad de interfaz con la planta.
- Mantenimiento fácil por secciones.
- Gran disponibilidad de herramientas de test y mantenimiento.
- Posibilidad de visualizar el proceso en tiempo real.
- Flexibilidad para realizar cambios.

8.5.2 Arquitectura del Autómata

Un autómata programable se compone esencialmente de los siguientes elementos:



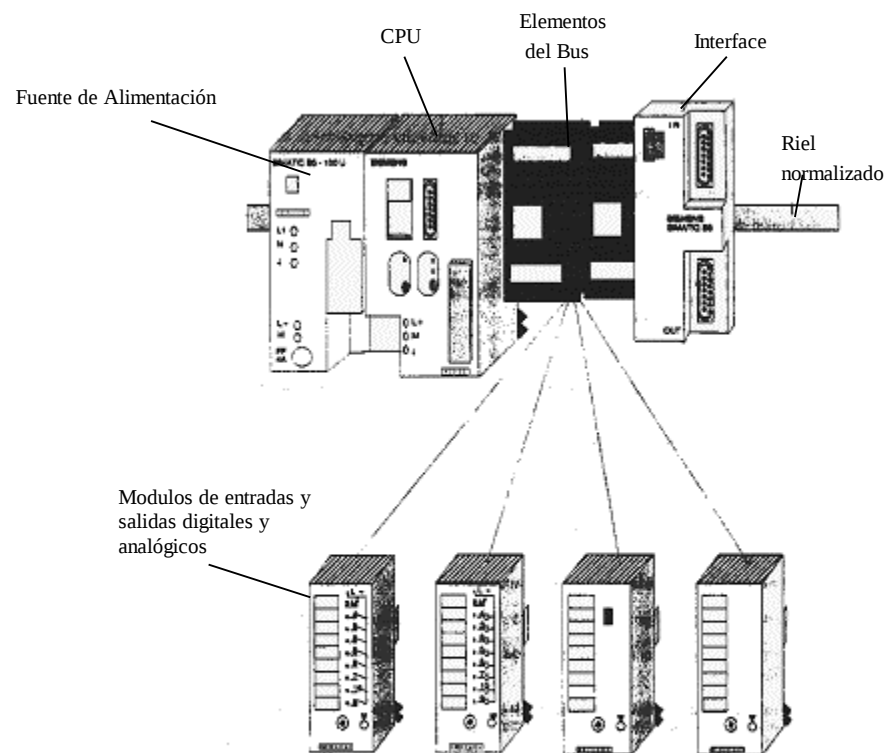
- *Unidad central de proceso (CPU):* Su función es similar a la de otro sistema informático. Recoge de la memoria la secuencia de instrucciones que debe ir ejecutando. La ejecución de instrucciones es en serie.
- *Fuente de alimentación:* Se tiene adaptación en general a cualquiera de las tensiones frecuentes en la industria, continua o alterna. Frecuentemente incluyen baterías para la alimentación de la memoria y gestión de emergencias por corte en la alimentación del autómata.
- *Memoria:* contiene todo los datos e instrucciones necesarios para la ejecución de la tarea de control. A diferencia del esquema de mapeado seguido en los ordenadores, en los autómatas podemos diferenciar de zonas de memoria distintas. La *memoria interna* , o memoria de trabajo, la

cual se encarga de almacenar los datos intermedios de cálculos, variables internas, y lo que es más específico de la arquitectura del autómatas: una memoria imagen de los últimos datos leídos en las entradas así como de las órdenes enviadas a las salidas. La *memoria de programa* que contiene el conjunto de instrucciones programadas que se deben ejecutar así como datos constantes definidos por el usuario. De esta forma, las modificaciones sobre el sistema de control sólo necesitarán regrabar esta memoria. Normalmente es externa y enchufable a la CPU. Durante el desarrollo se suele trabajar con RAM permanente por medio de una batería. Terminado el desarrollo se suele pasar a una memoria no volátil EPROM o EEPROM.

- *Módulos de entrada y salida:* Los módulos de entrada y salida establecen la comunicación entre la unidad central y el proceso, filtrando, adaptando y codificando de forma comprensible para dicha unidad las señales procedentes de los elementos de entrada, y decodificando y amplificando las señales generadas durante la ejecución del programa antes de enviarlas a los elementos de salida. Existe una cantidad enorme de módulos de entrada/salida como consecuencia de la diversidad de señales que tienen lugar en un proceso. Estas interfaces pueden clasificarse de diferentes formas, según se muestra a continuación:
 - Por el tipo de señales:
 - Digitales
 - Analógicas (4-20 mA)
 - Por la tensión de alimentación:
 - De corriente continua (estáticas de 24/110 V_{cc}).
 - De corriente continua a colector abierto (PNP o NPN).
 - De corriente alterna (60/110/220 V_{ca}).
 - Salidas por relé (libres de tensión).
 - Por el aislamiento:
 - Con separación galvánica (optoacopladores).
 - Con acoplamiento directo.
 - Por la forma de comunicación con la unidad central
 - Comunicación serie.
 - Comunicación paralelo.
 - Por la ubicación:
 - Locales.
 - Remotos.

Además del manejo de señales eléctricas del proceso, se dispone de una serie de módulos externos conectables mediante un bus de expansión que realizan tareas más específicas de entrada y salida. Entre éstos se pueden mencionar los intérpretes de encoders, reguladores contiguos, controladores específicos de temperatura, posición, motores paso a paso, etc.

- *Módulos de comunicación:* Siendo módulos de entrada y salida, por su interés particular suelen ser considerados como un elemento diferenciado. Implementan conexiones punto a punto (RS-232,422) o de red local (Profibus, Modbus, Ethernet, etc.).
- *Unidad de programación:* Al conjunto de elementos básicos mostrados en el diagrama, es necesario añadir el dispositivo que permite al usuario interaccionar con el autómat. En muchos casos, esta interacción se realiza por medio de alguno de los sistemas de comunicación anteriormente mencionados, pero casi todos los autómatas suelen disponer de una pequeña paleta que es un periférico directamente conectable, y que permite la programación de la unidad.



En la figura se muestra el autómata de SIEMENS de la serie 5, modelo 100-U, donde se pueden identificar externamente casi todos los componentes mencionados.

8.5.3 Funcionamiento básico de un autómata

Los autómatas programables inicialmente fueron concebidos para sustituir los circuitos de relés en el control de los sistemas secuenciales. Su modo de funcionamiento ha de ser por tanto análogo. Sin embargo, el modo de funcionamiento de los sistemas de relés por su propia construcción es parcialmente en paralelo, de forma que todos los relés de entrada asociados directamente a variables del proceso, se actualizan de forma simultánea.

Al estar el PLC basado en un sistema de procesamiento en serie, si se accediera directamente a las entradas de los módulos, el tiempo de recogida de las muestras sería distinto para una consulta realizada al principio del programa y otra realizada al final debido a los tiempos de cómputo necesarios para realizar las operaciones intermedias.

Para asegurar que durante la consulta de las entradas en un mismo ciclo de programa no se ven modificados los valores de las entradas, se utilizan modos de procesamiento síncronos que sólo consideran las entradas y actualizan las salidas en instantes concretos del tiempo. Este funcionamiento es reproducido por casi todos los autómatas programables industriales.

Una vez cargado un programa en la memoria del autómatas, se indica al mismo que entre en el modo de ejecución. A partir de ese momento, y hasta que el autómatas sea parado externamente, el sistema funcionará de la siguiente forma:

1. Lectura de todas las entradas del sistema y almacenamiento de sus valores en la memoria imagen, también conocida por el término de memoria tampón. Para el caso concreto de los autómatas de la casa SIEMENS, esta memoria se denomina PAE (imagen del proceso de entrada).
2. Ejecución del programa completo. Durante dicha ejecución, los resultados de las combinaciones lógicas y demás operaciones son almacenados en memoria. Los resultados aplicados a variables de salida, no se transfieren de manera inmediata las salidas, sino que se almacenan en otra memoria tampón. (PAA en SIEMENS o imagen del proceso de salidas).
3. Se actualizan los valores de las salidas de forma simultánea a partir de los valores contenido en la memoria tampón.
4. Se realizan una serie de operaciones genéricas de seguridad y comunicaciones. (Autodiagnóstico, perro guardián, integridad de memoria,...).
5. Repetición del proceso desde 1.

Existe por tanto un tiempo de respuesta del autómatas que transcurre desde que se produce un cambio en sus entradas hasta que las consecuencias del mismo aparecen reflejadas en las salidas. Este tiempo de ciclo dependerá de la complejidad del programa por lo que suele medirse en milisegundos por *Kbyte* de programa .

Además de este funcionamiento cíclico, normalmente antes de comenzar con él se efectúan una serie de operaciones de arranque o puesta en marcha como son:

- Comprobación del estado correcto de memoria, comunicaciones, etc.
- Comprobación de la integridad del programa de usuario (ausencia de módulos, checksum, inconsistencia).

- Comprobación de los módulos de Entrada y Salida.
- Puesta a cero de todas las salidas.

Del mismo modo, cuando se da la orden de parada se realizan las siguientes acciones:

- Finalización del ciclo del autómat.
- Opcionalmente puesta a cero de las salidas.

8.6 Nociones de neumática

Con la idea de poder realizar el diseño de un automatismo completo, aunque de forma sencilla y sin acceder en profundidad a todos los problemas que se presentan a la hora de abordar un diseño real, se pretende dar unas ligeras nociones de una tecnología presenta habitualmente en el diseño de sistemas automáticos: la neumática.

8.6.1 Introducción

El principal motivo por el que la tecnología neumática se encuentre tan difundida en los sistemas industriales, reside en la facilidad y bajo precio que requiere la instalación de múltiples actuadores de relativa potencia, una vez establecida la línea de alimentación del aire comprimido. Las características más importantes que tiene esta tecnología a la hora de realizar los sistemas de actuación son las siguientes:

- Permite transportar fácilmente potencia mecánica.
- No necesita de circuitos de retorno, puesto que la salida puede expulsarse al aire directamente
- Admite al almacenamiento de energía mecánica
- Es limpio y no contamina
- No es muy sensible a la temperatura y es antideflagrante.
- La fuerza que es capaz de desarrollar es limitada
- El hecho de que el fluido sea comprensible limita la calidad de los movimientos realizables.

El fundamento físico de esta tecnología reside en la diferencia de presión entre el aire presente en la atmósfera y el que aparece confinado en el circuito neumático. Esta diferencia de presión, se traduce en una fuerza superficial que puede ser aprovechada mediante un conveniente diseño mecánico para generar diversos movimientos.

En un sistema de actuación uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista del diseño, es la potencia que es capaz de desarrollar. La potencia depende directamente de la fuerza, la cual es proporcional a la diferencia de presión entre el aire del circuito y el atmosférico. Se define por este motivo como presión relativa a la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica de forma que:

$$P_{absoluta} = P_{relativa} + P_{atmosférica} \quad (8.1)$$

La presión relativa, o también denominada efectiva, es la que permite ejercer un movimiento sobre el émbolo de un cilindro. La presión que miden los manómetros es la relativa. En el sistema internacional, la unidad de presión es el Pascal (1 N/m^2). Sin embargo al ser un valor muy pequeño, se utiliza el bar (10^5 N/m^2). El bar es muy parecido a la atmósfera (kp/cm^2), aunque no exactamente igual:

$$1 \text{ atm} = \frac{1 \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2}{1 \text{ cm}^2} = \frac{9,8 \text{ N}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 9,8 \cdot 10^4 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cong 10^5 \text{ Pascales} = 1 \text{ bar}$$

En ocasiones, siguiendo el sistema anglosajón, la unidad utilizada es el *psi* (libras por pulgada cuadrada) cuya relación con el bar es $1 \text{ bar} = 14.08 \text{ psi}$.

La velocidad que podrá desarrollar un émbolo no dependerá directamente de la presión sino del caudal de fluido a presión que el sistema es capaz de suministrar. La unidad de caudal volumétrico es el m^3/s , aunque a veces se emplea el l/min .

Por tanto la potencia desarrollada por un émbolo de área efectiva A , sobre el que se aplica una presión efectiva P con un caudal Q será:

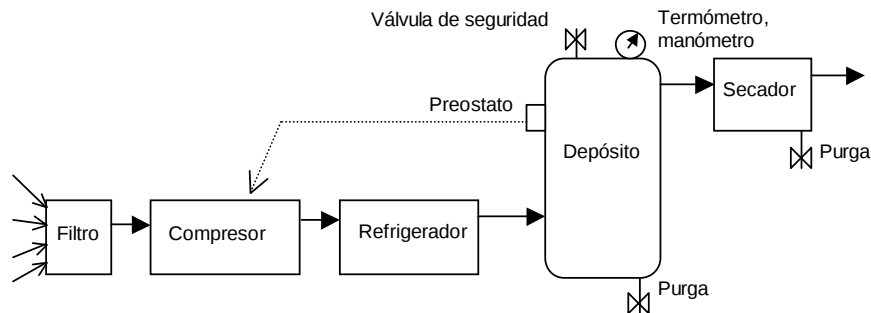
$$W = F \cdot v = (P \cdot A) \cdot \frac{Q}{A} = P \cdot Q \quad (8.2)$$

La potencia desarrollable por un sistema neumático es directamente proporcional al caudal y la presión del aire aplicado. La unidad de potencia es el watio.

8.6.2 Producción de aire comprimido

La utilización del aire como elemento transmisor de energía para generar movimiento, se hace a base de elevar la presión (típicamente 6 bares) y distribuirlo hasta los elementos actuadores donde su expansión y correspondiente disminución de presión genera movimiento. Además para evitar que las partículas sólidas y de vapor de agua, que acompañan al aire atmosférico, dañen el conjunto de los elementos que componen la instalación, es preciso someter al aire a ciertos tratamientos de filtrado, secado y lubricación.

Un esquema típico de una unidad de generación de aire comprimido es el siguiente:



El aire aspirado y comprimido por el compresor es el atmosférico, y por tanto contiene impurezas y un cierto porcentaje de vapor de agua. Ambos elementos son perjudiciales para la instalación neumática. Las partículas de polvo y suciedad pueden obturar las estrechas secciones de algunos dispositivos o dañar los materiales con los que se construyen las juntas de estanqueidad de las partes móviles. La humedad origina la oxidación de las partes metálicas y provoca una merma en la lubricación.

Por estos motivos, la admisión de aire por el compresor se realiza a través de un *filtro* de aire que elimina las partículas de polvo. Para eliminar la humedad del aire se emplean diferentes métodos: enfriamiento, absorción y adsorción. El procedimiento de *enfriamiento* es el primero en aplicarse y el más común. La cantidad de agua contenida en el aire disminuye con la presión y la temperatura. Por tanto, al enfriar (aunque sea a la temperatura ambiental debido al incremento de presión) se condensará parte de del agua contenida.

Los *secadores* por adsorción separan el vapor de agua mediante un filtrado físico compuesto por un gel de óxido de silicio que absorbe la humedad. La absorción se basa en una reacción química que elimina el vapor de agua. En estos casos, es necesaria la sustitución del óxido o el reactivo periódicamente.

Salvo para el caso de instalaciones muy simples, el aire a presión generado por el compresor, no pasa directamente al sistema de distribución, sino que se acumula en un *depósito*. Su finalidad es análoga a la realizada por los condensadores de alta capacidad que se utilizan en la etapa final de las fuentes de alimentación. Este depósito tiene como funciones más importantes las siguientes:

- Elimina el rizado en la presión del aire, originado por el carácter pulsante de algunos compresores (compresores de émbolo).
- Evita que el compresor trabaje de forma discontinua, por su capacidad de acumular energía. Para ello se utiliza un *preostato* tarado a un valor máximo y mínimo, que marcará respectivamente el apagado y encendido del compresor.
- Permite el enfriamiento del aire, y como consecuencia su condensación a la base del depósito en donde se sitúa una *llave de purga*.
- Permite controlar la calidad del aire mediante la serie de sensores que normalmente están situados en el depósito: *manómetro*, *termómetro*. Además para evitar

peligrosos valores de la presión, el depósito cuenta con una *válvula de seguridad limitadora de presión*.

Una vez generado el aire comprimido, es necesario distribuirlo por las distintas áreas de la planta. Esta conducción se realiza a través de una red de tuberías que pueden ser de plástico, cobre o acero.

Las metálicas se unen mediante soldaduras o manguitos roscados. Las virutas procedentes de la soldadura, así como su posible oxidación son inconvenientes que aconsejan el uso de las conducciones de plástico a pesar de su precio superior. Como normas básicas de la instalación se evitará la instalación de tuberías empotradas, y en el caso de realizar líneas horizontales, se dará al menos una pendiente de un 1-2% para facilitar la eliminación del agua. Las derivaciones se realizarán siempre hacia arriba y las terminaciones para realizar la conexión en horizontal para evitar que el agua pase a los elementos posteriores.

Esquemáticamente una toma de presión se representa por medio del siguiente símbolo:



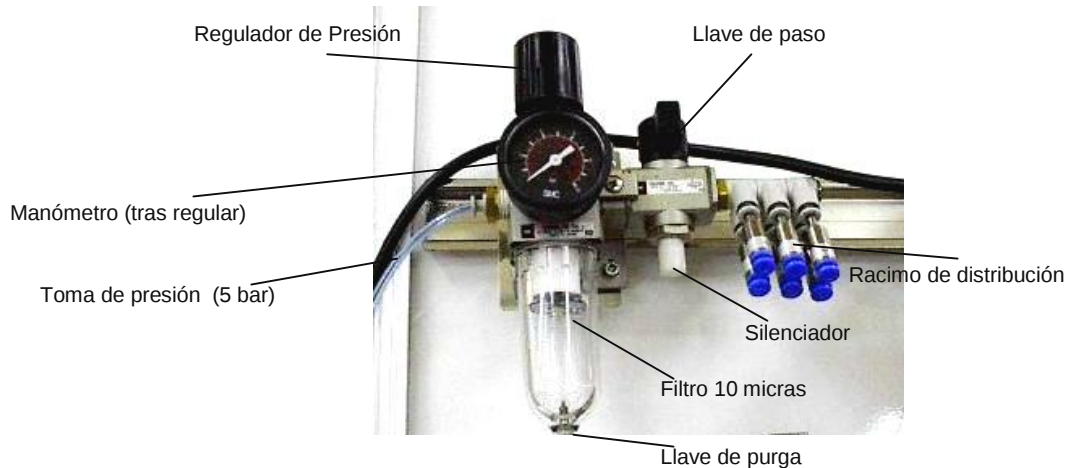
Mientras que una toma de escape, que no es necesario que esté conducida, se representa por un triángulo invertido:



Justo antes de que el aire acceda a cada área de la instalación se intercala una unidad de mantenimiento que incluye una serie de dispositivos de manera compacta, y cuya misión es mejorar la calidad del aire acondicionándolo a las necesidades del área. Las funciones que suele incluir esta unidad son las siguientes:

- Filtrado de partículas procedentes de la propia red de distribución. Los tamaños típicos de las partículas que hay que filtrar son del orden de diez micras .
- Regulación de la presión mediante la reducción a un valor fijo. Por tanto, la presión de la red será algo superior a la necesaria para los dispositivos.
- En algunos casos se incluye un elemento lubricador del aire, pero en la actualidad es cada vez más habitual el uso de elementos que no necesitan la lubricación o que son autolubricados.

La siguiente fotografía muestra una unidad de mantenimiento típica:

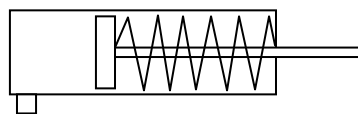


Obtenido el aire comprimido, y acondicionado para su uso, se expondrán a continuación los distintos elementos que realizan la distribución controlada del aire (válvulas), así como los actuadores, todos ellos presentes al final de la instalación.

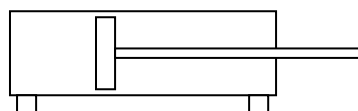
8.6.3 Actuadores neumáticos

Son los encargados de transformar la energía almacenada en el aire comprimido en movimiento. Este movimiento puede ser lineal o rotativo, diferenciándose entonces entre cilindros y motores. Los actuadores más frecuentes son los siguientes:

Cilindro de simple efecto: en el cilindro de simple efecto, el avance del émbolo se consigue por la presión del aire sobre el émbolo, mientras que el retroceso se realiza por la acción de un resorte. Es importante considerar que este tipo de cilindros sólo desarrollarán esfuerzo en un sentido, puesto que el resorte apenas ejerce la fuerza necesaria para lograr el retorno del émbolo. La figura muestra de forma de representación de estos cilindros con una sola toma por la que se produce tanto la admisión como el escape.

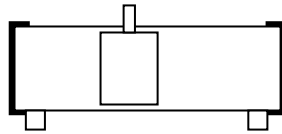


Cilindro de doble efecto: tanto el avance como el retroceso del émbolo se consigue por efecto de la acción del aire sobre el mismo, y por tanto puede desarrollar fuerza en ambas direcciones. Su representación esquemática es la siguiente, en donde se muestran las tomas de aire tanto a un lado del émbolo como al otro:

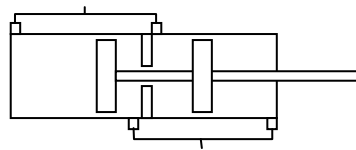


Cilindros sin vástago: Cuando se precisan carreras de émbolo muy largas, el cilindro normal presenta una serie de problemas derivados de los riesgos de flexión, y del espacio necesario para su uso. Estos inconvenientes se resuelven mediante el uso de un

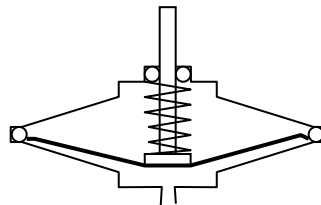
cilindro sin vástago. El émbolo desplaza un carro exterior a través de una unión que se desplaza a lo largo de una junta estanca. Esta es su representación esquemática:



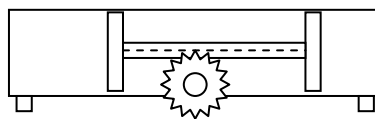
Cilindros tándem: La finalidad de los mismo es lograr máyores fuerzas en un mismo espacio. Para ello se dispone internamente de dos cilindros puestos en serie, por lo que el área sobre la que actúa la presión se duplica y con ello la fuerza ejercida. Esquemáticamente se puede observar su funcionamiento:



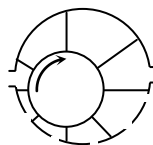
Cilindros de membrana: constituyen un caso especial de cilindros de simple efecto. El émbolo está constituido por una membrana de caucho o metal, y su carrera es normalmente muy corta (5 cm.). Sin embargo, la posibilidad de tener superficies amplias le permite desarrollar grandes esfuerzos. Su representación es la siguiente:



Cilindros rotativos: Internamente incluyen un sistema de transmisión que convierte el desplazamiento lineal del émbolo en el giro de un eje de salida. Básicamente consiste en una cremallera situada entre dos émbolos sobre la que engrana el eje de salida:



Motores neumáticos: Se utilizan cuando es necesario lograr giros continuos. Las ventajas de estos motores son su buena relación potencia peso, así como su reducido peso y ausencia de problemas de sobrecalentamiento ante sobrecargas. La mayoría de los motores neumáticos son de paletas, aunque también existen aquellos que basan su funcionamiento en el uso de pistones o en una turbina. En la figura se representa un motor de paletas:



8.6.4 Válvulas de distribución

Las válvulas de distribución o válvulas de vías, tienen por misión dirigir el aire hacia diferentes conductos en función de una o varias señales de mando. Estas señales de mando pueden ser mecánicas, eléctricas, neumáticas, etc. Salvo excepciones para casos de control muy fino, estas válvulas son todo o nada, y no funcionan de forma proporcional.

Una válvula de distribución queda especificada por el número de vías y posiciones. El número de vías es el número de conductos que pueden ser conectados a la válvula. Las diferentes conexiones que pueden establecerse entre los conductos es lo que se denomina posición. Para identificar una válvula se indica el número de vías y el número de posiciones separados por una barra. De esta forma una válvula 5/2 indica que es de cinco vías y dos posiciones.

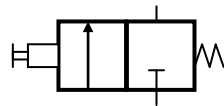
La representación de las válvulas tanto en un diagrama esquemático como en el mismo dispositivo físico sigue el siguiente convenio:

- Las posiciones se representan por cuadros contiguos.
- El número de cuadros corresponde al número de posiciones.
- En el interior del cuadro se indican las conexiones que se establecen en esa posición mediante flechas (conexión) o trazos transversales que indican bloqueo.
- Las vías se representan en un solo cuadro y externo al mismo mediante trazos perpendiculares.
- En el funcionamiento de la válvula, se supone que las vías permanecen quietas mientras los cuadros se desplazan estableciendo conexiones o cierres en las mismas.
- En los extremos de las válvulas se representa el tipo de mando asociado al movimiento de los cuadros siguiendo los siguientes símbolos:

Manual		
Mecánico		
Neumático		
Eléctrico		

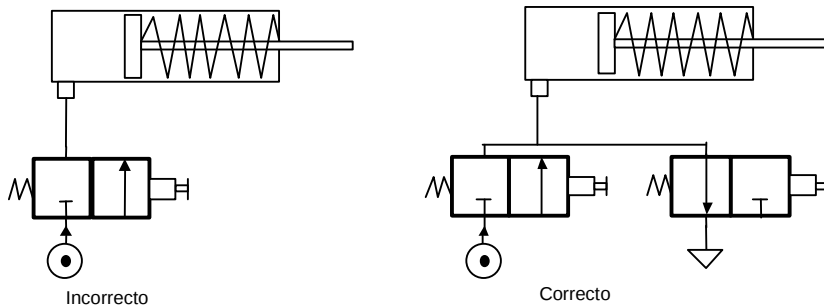
Para entender el modo de representación, a la vez que se realiza una exposición de las válvulas más frecuentes, se verán las representaciones de distintos circuitos de actuación neumáticos en cada caso:

Válvula 2/2: Se utiliza para abrir o cerrar el paso de aire a una zona del circuito. Si se desea controlar un simple efecto harían falta dos de estas válvulas funcionando de forma complementaria. El esquema de una de estas válvulas, monoestable (para solo hay una posición estable ante ausencia de entradas de mando) y con accionamiento manual es el siguiente:

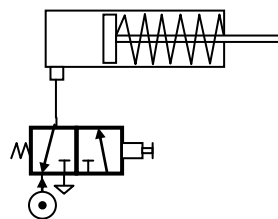


Cuando se activa el mando (situado a la izquierda), imagínese el lector que todos los cuadros se desplazan a la derecha una posición quedando la situación de las vías fija. En este caso, se tendrá comunicación entre la vía de arriba y la de abajo, por lo que se permite el paso de aire. Mientras que el mando no este activado, el resorte de la derecha, “empuja” los cuadros hacia la izquierda, obligando a que la posición sea la indicada por defecto, que es la de cierre de la vía inferior (y como consecuencia la superior).

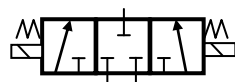
El control de un cilindro de simple efecto se muestra mediante las siguientes dos figuras. La primera representa un esquema incorrecto, puesto que no permite salir a los gases para que se produzca el retorno del émbolo. La segunda es la configuración correcta desde el punto de vista funcional, puesto que estas válvulas no son las adecuadas para el control de cilindros de simple efecto:



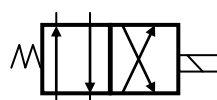
Válvula 3/2: Se utiliza precisamente para el mando de cilindros de simple efecto, tal y como muestra la figura:



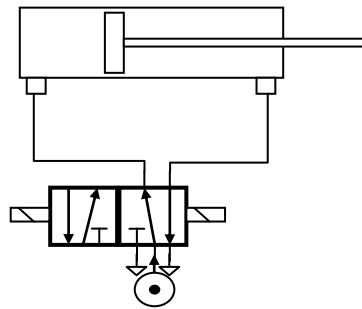
Válvula 3/3: Al ser de tres posiciones y dos mandos, lo habitual es que una de las posiciones (la central) sea estable, y las otras dos dependan de las señales de control. Es análoga a la 3/2, pero con una posición intermedia que bloquea todas las vías.



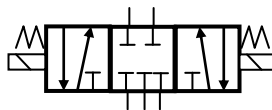
Válvula 4/2: Permiten el control de un cilindro de doble efecto. Su construcción es más compleja que la 5/2 que cumple la misma función, por lo que es menos frecuente:



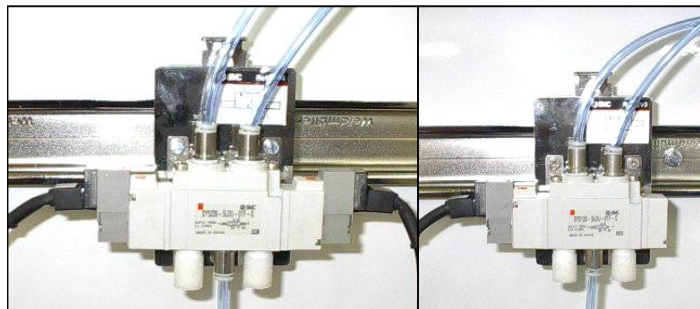
Válvula 5/2: Es de las válvulas más frecuentes puesto que su aplicación habitual es el control de cilindros de doble efecto. La válvula representada para el control del cilindro es biestable puesto que no existe ningún resorte o elemento que empuje la válvula hacia una posición determinada. Por eso, al adoptar una posición, esta posición se mantiene hasta que una señal de mando no indique lo contrario. Al activar el mando de la izquierda, se empujarán las posiciones hacia la derecha, y será por tanto el cuadro izquierdo el activo. Al activar la derecha será la posición derecha la activa. Si activásemos ambas señales simultáneamente, la válvula adoptará una de las dos posiciones que es definida como preferente:



Válvula 5/3: Similar a la válvula 5/2, pero con una posición intermedia de reposo en la que todas las vías son bloqueadas:



La siguiente fotografía muestra una válvula biestable 5/2 de mando eléctrico comercial a la izquierda, y otra monoestable del mismo tipo a la derecha. Nótese que las tomas correspondiente al escape, tienen sendos silenciadores, para evitar el ruido que este provoca, ya que carecen de un tubo de retorno:



8.6.5 Válvulas de bloqueo

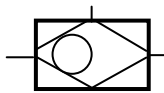
Su misión es cortar el paso de caudal de aire. Básicamente existen tres tipos:

Válvula antirretorno: Permite el paso del aire en un solo sentido. Suele ser usada combinada con otros elementos para generar dispositivos de regulación más complejos. Su representación esquemática es la siguiente:



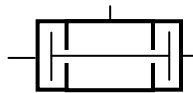
En este caso, el sentido permitido de flujo es de izquierda a derecha.

Válvula selectora: Tienen dos entradas y una salida de modo que en cada instante se conecta sólo una de las entradas con la salida. La entrada conectada será la que tenga más presión. Su representación esquemática es la que se muestra a continuación, en donde las entradas se sitúan a ambos lados de la válvula mientras que la salida aparece representada en la parte superior.



Su principal utilidad es la de tener varias tomas de alimentación en un circuito de forma que siempre se selecciona la que parece estar más descargada.

Válvula de simultaneidad: Equivalen a la función lógica AND, y son muy habituales en circuitos de seguridad, en los que se establece que un determinado accionamiento (por ejemplo una máquina de corte) sólo debe activarse si se pulsan dos mandos (uno para cada mano) de forma simultánea. Sólo aparecerá presión a la salida, si existe una presión análoga en sus dos entradas.

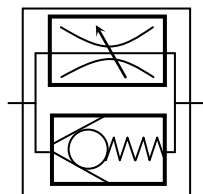


8.6.6 Válvulas reguladoras de caudal

Utilizan un estrangulador ajustable para disminuir la sección de paso del aire y así el caudal. Esta regulación es bidireccional, de forma que no importa el sentido en que circule el aire. El mando que lo ajusta es a menudo un tornillo de taraje, aunque existen también mandos manuales. Su representación esquemática es la siguiente:

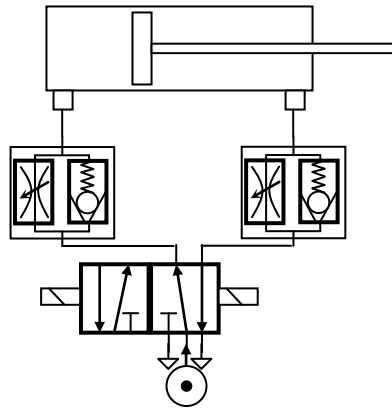


Si se desea regular en un sólo sentido se utiliza un regulador como el anterior montado en paralelo con una válvula antirretorno de modo que el caudal sólo se regula en el sentido inverso al admitido por el antirretorno, mientras que en el directo circula libremente.



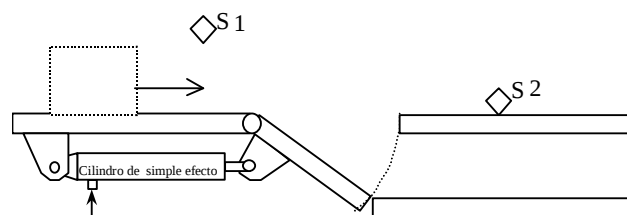
Una aplicación típica de la válvula reguladora de caudal unidireccional, es la regulación del avance de un cilindro mediante el ajuste del caudal del escape. Podría regularse también el caudal de admisión, pero los resultados son mucho peores.

El siguiente ejemplo muestra la regulación del avance de un cilindro de doble efecto por regulación del escape, activado mediante una válvula 5/2:



Problema

La presente figura, representa una bifurcación en el plano vertical en una cinta transportadora de un sistema automático. Para conseguir el movimiento del segmento del carril de la bifurcación, se ha dispuesto de un cilindro neumático de simple efecto, controlado por una válvula monoestable pilotada eléctricamente.



El sensor S1 es un sensor infrarrojo, dispuesto de tal forma que cuando las cajas entrantes superan una determinada altura, el sensor responderá con 24 V, mientras que estará fijando una señal de 0V en cualquier otro caso (cajas más pequeñas o ninguna).

El sensor capacitivo de presencia S2, detecta, en el carril superior, que la caja ya ha salido completamente de la bifurcación, de tal modo que siempre se activa (24 V) ante

la presencia de la caja, y está situado respecto del final del carril móvil a una distancia tal que asegura que se cumple lo expuesto.

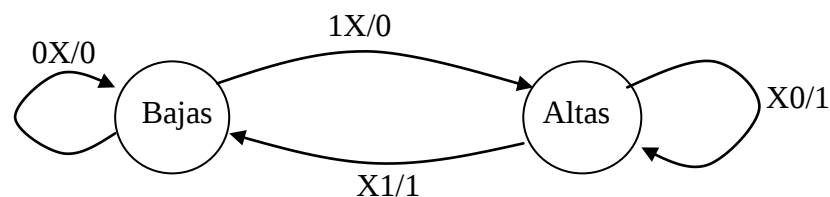
El automatismo funciona de la siguiente manera:

La posición de reposo es la indicada en la figura. Siempre que se detecte una caja en S1 (es decir, una caja alta), se desviará al carril superior, y por tanto deberá permanecer en esta posición hasta detectar que la caja ha salido.

Las cajas discurren por la cinta con bastante espacio entre ellas, no dándose nunca la situación de que dos cajas puedan estar a la vez en la bifurcación.

1. Dibujar el esquema neumático del sistema, indicando el tipo de válvula.
 2. Realizar el diagrama de estados del automatismo según la representación de Mealy. No considerar para el diagrama de estados ninguna situación de error.
 3. Deducir las ecuaciones lógicas que rigen el sistema (de la salida y de los estados si los hay).
 4. Dibujar el circuito eléctrico que mediante relés y contactores consigue el automatismo propuesto.
-

1. Dibujar el esquema neumático del sistema, indicando el tipo de válvula. Bastará con una válvula 3/2 monoestable de mando eléctrico.
2. Realizar el diagrama de estados del automatismo según la representación de Mealy. No considerar para el diagrama de estados ninguna situación de error. Seguiremos la representación S1 S2/A+, en donde S1 es el sensor de cajas altas, S2 el sensor que indica que las cajas han salido y A+ es la señal que acciona el cilindro de la plataforma. Un diagrama de estados válido es el siguiente:



Por tanto, bastará con una sola variable binaria de estado para codificar los estados del sistema. Este biestable lo denominaremos Q, y tomará valor 0 para el estado de *cajas bajas* y uno para *cajas altas*. Para que la lógica salga más simplificada, se ha hecho depender la salida directamente del estado activo, por ello las transiciones de llegada siguen manteniendo el estado de la salida que tenían de su estado de partida.

3. Deducir las ecuaciones lógicas que rigen el sistema (de la salida y de los estados si los hay). Realizamos la tabla de verdad y los mapas de Karnaugh para Q, y A.

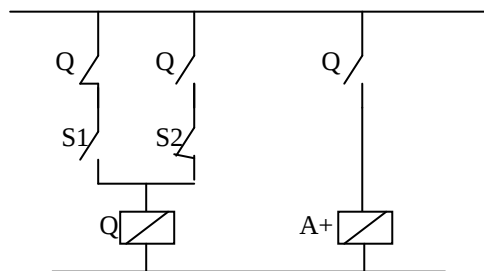
Q_k	S1	S2	Q_{k+1}	A+
0	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	1	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1

La tabla de Karnaugh para Q_{k+1} , será:

$Q \backslash S1S2$	00	01	11	10
0	0	0	1	1
1	1	0	0	1

Por lo que $Q_{k+1} = \overline{Q_k} \cdot S1 + Q_k \cdot \overline{S2}$ y A+ coincide con Q.

4. Dibujar el circuito eléctrico que mediante relés y contactores consigue el automatismo propuesto.



Derecho de Autor © 2005 Carlos Platero Dueñas y Miguel Hernando Gutiérrez.

Permiso para copiar, distribuir y/o modificar este documento bajo los términos de la Licencia de Documentación Libre GNU, Versión 1.1 o cualquier otra versión posterior publicada por la Free Software Foundation; sin secciones invariantes, sin texto de la Cubierta Frontal, así como el texto de la Cubierta Posterior. Una copia de la licencia es incluida en la sección titulada "Licencia de Documentación Libre GNU".

La Licencia de documentación libre GNU (GNU Free Documentation License) es una licencia con [**copyleft**](http://www.gnu.org/copyleft/) para [**contenidos abiertos**](http://www.gnu.org/copyleft/). Todos los contenidos de estos apuntes están cubiertos por esta licencia. La version 1.1 se encuentra en <http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>. La traducción (no oficial) al castellano de la versión 1.1 se encuentra en <http://www.es.gnu.org/Licencias/fdles.html>