

Introducción a la Automatización Industrial

Alberto Brunete, Pablo San Segundo y Rebeca Herrero

February 2025

Índice general

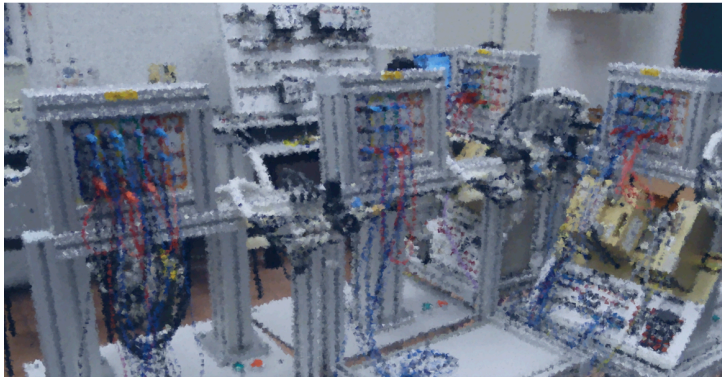
	5
Prefacio	7
Estructura del libro	8
Sobre los autores	8
Agradecimientos	8
1 Introducción a la Automática	9
1.1 Breve historia de la Automática	10
1.2 Concepto de sistema	18
1.3 Automatización industrial	20
1.4 Arquitectura de un sistema de producción	24
1.5 Sistemas de control	26
1.6 Mercado de PLCs	30
1.7 Autoevaluación	30
2 Sensores y Actuadores	33
2.1 Sensores industriales	33
2.2 Actuadores eléctricos	41
2.3 Actuadores neumáticos	56
2.4 Ejercicios	64
2.5 Autoevaluación	65
3 Fundamentos lógicos	67
3.1 Álgebra de Boole	67
3.2 Formas canónicas	71
3.3 Mapa de Karnaugh	72
3.4 Autoevaluación	76
4 Métodos de representación	77
4.1 Diagrama de escalera (KOP)	77
4.2 Esquema de contactos	80
4.3 Plano de funciones (FUP)	81
4.4 Lista de instrucciones (AWL)	81
4.5 Autoevaluación	83
5 Sistemas combinacionales	85
5.1 Ejercicios resueltos	85
6 Sistemas secuenciales	89
6.1 Introducción	89
6.2 Diagramas de estado	93
6.3 Tabla de transición de estados	95
6.4 Simplificación de estados	97
6.5 Resumen: pasos para implementar sistemas secuenciales	105
6.6 Ejemplos	105
6.7 Ejercicios resueltos	119

6.8 Autoevaluación	125
A Programación en STEP-7 AWL	127



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

ingeniería
de
diseño
industrial



Introducción a la Automatización Industrial

Alberto Brunete
Pablo San Segundo
Rebeca Herrero

ISBN: 978-84-09-22291-9



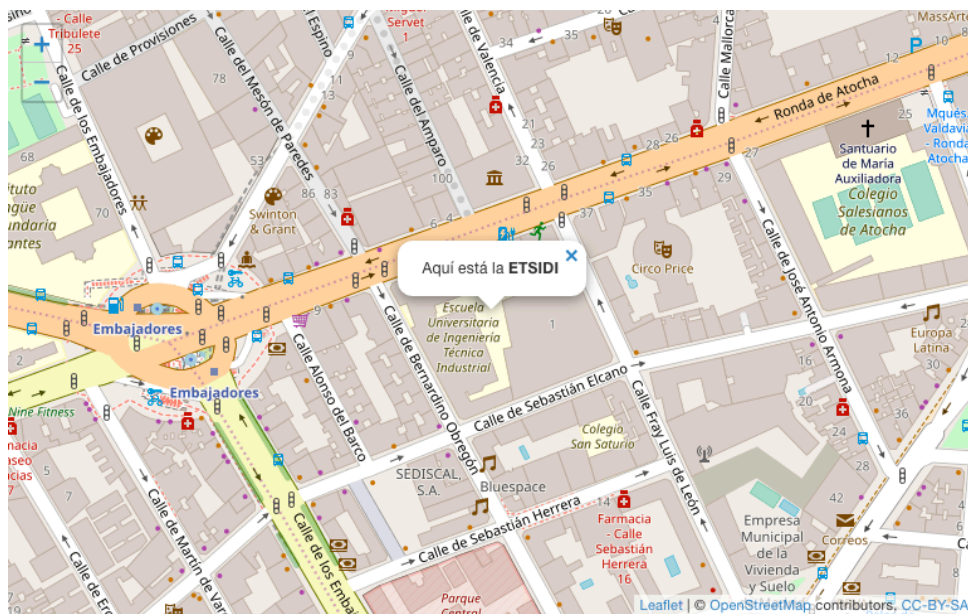
9 788409 222919

Introducción a la automatización industrial by Alberto Brunete, Pablo San Segundo and Rebeca Herrero is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional License

Prefacio

El propósito de este libro es introducir al lector en el mundo de la automática y de los sistemas secuenciales. Está pensado para un curso introductorio de un grado de ingeniería.

Este libro ha sido diseñado y escrito en la ETSIDI-UPM:



utilizando el paquete **Bookdown**. El paquete bookdown está construido sobre R Markdown (<http://rmarkdown.rstudio.com>), y hereda la simplicidad de la sintaxis de Markdown (se puede aprender lo básico en cinco minutos :-), así como la posibilidad de múltiples tipos de formatos de salida (PDF,HTML o Word), manteniendo un aspecto profesional. Puede encontrar más ejemplos en <https://bookdown.org>.



Introducción a la automática by Alberto Brunete, Pablo San Segundo and Rebeca Herrero is licensed under a Creative Commons Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional License

Estructura del libro

El capítulo 1 es un capítulo introductorio en el que se presentan los conceptos necesarios para situar al lector en el mundo de la Automática y la Automatización Industrial. El capítulo 2 expone los dispositivos básicos en cualquier sistema de automatización industrial: los sensores y los actuadores. El capítulo 3 presenta los conceptos de lógica y álgebra Booleana que se utilizarán en el resto del libro. El capítulo 4 describe los métodos que se usarán en el libro para representar las ecuaciones que gobiernan los sistemas. Finalmente, los capítulos 5 y 6 desarrollan el diseño e implementación de sistemas combinatoriales y secuenciales.

Sobre los autores

Alberto Brunete es Ingeniero de Telecomunicación y Doctor en Automática y Robótica por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Actualmente es profesor en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI-UPM) e investigador en el Centro de Automática y Robótica (CAR) de la UPM-CSIC. Sus actividades docentes están relacionadas con la Automática, los Sistemas embebidos (micros), el IoT y la Robótica. Sus principales actividades de investigación están relacionadas con la robótica y los entornos inteligentes. Ocasionalmente se le puede encontrar por Twitter (<https://twitter.com/abrunete>) y otras redes sociales. Más información: <http://www.albertobrunete.es>

Pablo San Segundo es Ingeniero Industrial y Doctor en el Área de Sistemas (especialidad en Inteligencia Artificial) por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Actualmente es profesor en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI-UPM) e investigador en el Centro de Automática y Robótica (CAR) de la UPM-CSIC. Lleva impartiendo docencia en Automatización y Programación desde hace más de 15 años. Sus principales actividades de investigación están relacionadas con la Inteligencia Artificial, estando especializado en la resolución de problemas complejos fuertemente combinatorios. Entre sus otros intereses, destaca su pasión por el ajedrez: excampeón de España, ha formado parte del equipo nacional durante más de una década.

Rebeca Herrero es Ingeniera de Telecomunicación y Doctora en Energía Solar Fotovoltaica por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es profesora en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial (ETSIDI-UPM) e investigadora en el grupo Integración de Sistemas e Instrumentos del Instituto de Energía Solar de la UPM. Su actividad investigadora se centra en el desarrollo de instrumentación y métodos de caracterización, en particular para sistemas de concentración (CPV) e integración fotovoltaica en vehículos (VIPV).

Agradecimientos

Se agradece especialmente el material proporcionado por el profesor de la UPM Dr. Carlos Platero Dueñas.

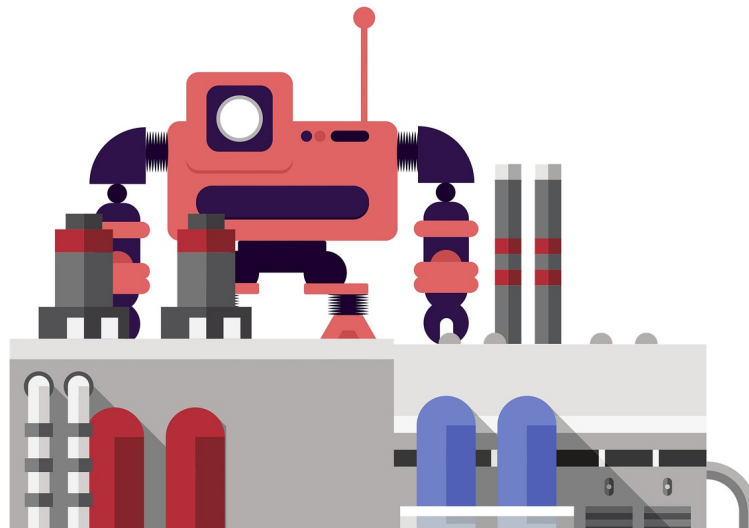
También se agradecen los comentarios y mejoras sugeridos por:

- Dr. Ernesto Gambao
- D. Alejandro Navarro
- Dña. Mar Fernández de Usera
- Dña. Celia Barranco
- Dr. Carlos Platero
- Dr. Rubén Núñez

Capítulo 1

Introducción a la Automática

La *Automática* es la ciencia que estudia la automatización y sus aplicaciones, en especial las técnicas desarrolladas con el fin de reducir y eliminar la intervención humana en la producción o en el funcionamiento de bienes y servicios. Su finalidad es la sustitución del operador humano por un operador artificial (dispositivo mecánico o electrónico) en la ejecución de una tarea física o mental previamente programada.



La ingeniería automática es un área multidisciplinar que se encarga de la concepción y desarrollo de autómatas y de otros procesos automáticos. La ingeniería automática se encarga de la automatización de procesos técnicos en numerosas áreas, entre las que se encuentran:

- Automovilismo
- Aeronáutica y astronáutica
- Robótica
- Ingeniería mecánica
- Mecatrónica
- Electrónica e industria eléctrica
- Automatización de edificios
- Medicina
- Smartcities

La *Automática* es una disciplina multidisciplinar que engloba la utilización y el conocimiento de la Mecánica, la Electrónica y los Sistemas Informáticos.

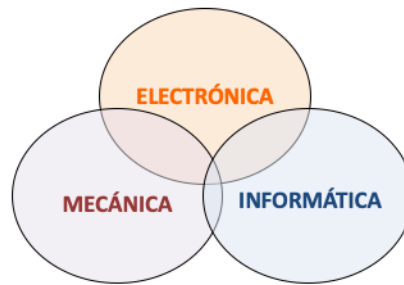


Figura 1.1: Disciplinas englobadas

1.1 Breve historia de la Automática

Desde el advenimiento de la civilización, el hombre ha intentado constantemente reemplazar el esfuerzo humano por máquinas y por sistemas de control.

Ya en la Edad de Piedra se diseñan los primeros dispositivos de la automatización, consistentes en trampas para cazar animales.

1.1.1 Época antigua

Las primeras evidencias de la actividad consciente del hombre en el campo del Control Automático se encuentran en los sistemas de regadíos en Babilonia, sobre el 2000 a.C. y conocidas a través de las leyes grabadas en el código de Hammurabi [6].

También en la Antigüedad Griega se encuentran vestigios del uso de sistemas de control realimentado.

En el siglo III a.C. **Ctesibio** (que vivía en Egipto) mejoró la clepsidra o reloj de agua (que ya existía en China) mediante un regulador de flotación (Fig. 1.2). Añadió una boya flotante con una estatuilla que al subir de nivel, iba marcando la hora que era. Además, el torno donde estaban señaladas las horas se iba girando según el día y época del año, ya que en verano, los días son más largos. Escribió el primer tratado científico acerca del aire comprimido, empleando para su elaboración bombas neumáticas e incluso cañones. Estas investigaciones, junto con los ensayos de elasticidad del aire (Pneumática), le han concedido la fama de ser “padre de la neumática”.

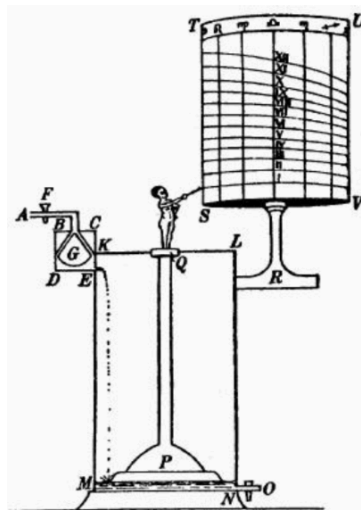


Figura 1.2: Reloj de agua de Ctesibio

En el año 378 a.C., **Platón** adaptó una clepsidra para convertirla en el primer despertador y que sus alumnos no llegasen tarde a sus charlas. Platón añadió a la clepsidra una segunda vasija situada en un nivel inferior sellada herméticamente y comunicadas mediante un tubo. En el interior de la primera colocó un sifón que, llegado el momento previsto, haría salir el agua con la suficiente fuerza que al llenar

la segunda el aire desplazado escaparía por un pequeño orificio situado en la parte superior y produciría el sonido, semejante al producido por el vapor de agua en las teteras¹.

Filón de Bizancio creó el primer molino de agua (Fig. 1.3 izquierda) sobre el I a.C. De hecho, ideó la bomba de agua para llevar el agua a un punto más alto usando la fuerza del propio agua. También inventó la ballesta o el lavamanos, un auténtico filón :-). También se le ocurrió diseñar una camarera automática (Fig. 1.3 derecha): cuando le ponías un vaso en la mano, te servía de la jarra de su otra mano vino y después agua a voluntad según como quisiéramos de fuerte el vino. ¿El primer humanoide de la historia?

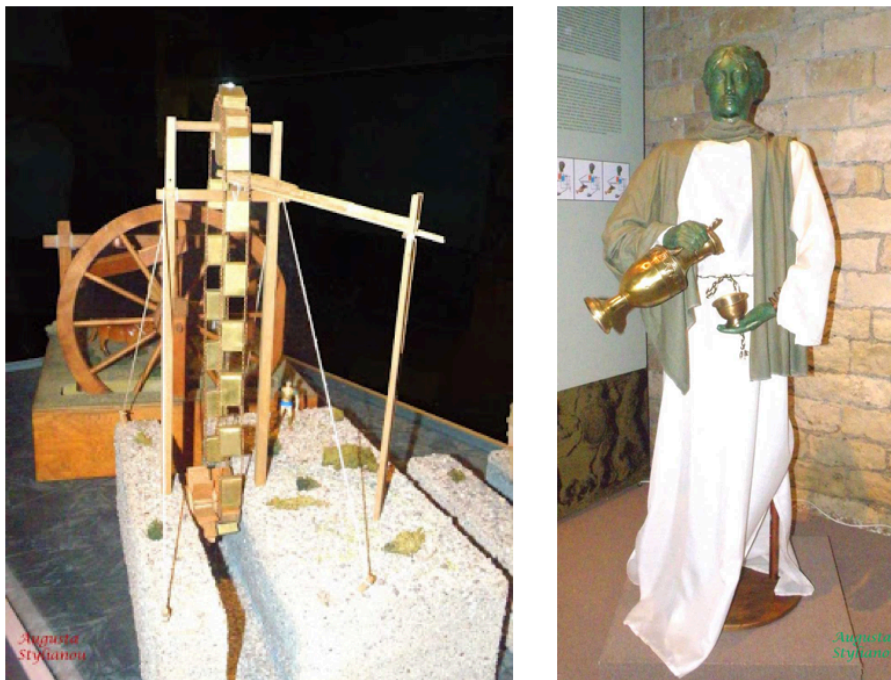


Figura 1.3: Molino de agua y camarera de Filón de Bizancio

Herón de Alejandría inventó la Aelópila (o Eolípila) en el siglo I d.C., primera turbina de vapor (Fig. 1.4). Una eolípila es una máquina constituida por una cámara de aire (generalmente una esfera o un cilindro), con tubos curvos por donde es expulsado el vapor. La fuerza resultante por esta expulsión hace que el mecanismo comience a girar, según la ley de acción-reacción. Normalmente, el agua es calentada en otra cámara, y unida a la anterior mediante tubos por donde pasa el vapor, aunque también puede ser calentada en la misma cámara desde donde se expulsa el vapor. Conseguía que las puertas de los templos se abrieran solas, porque, al encender un fuego, éste calentaba el aire de un depósito subterráneo que contenía agua, la cual, al aumentar la presión del aire, salía hacia un recipiente próximo que, al aumentar de peso, tiraba de unos engranajes que acababan moviendo las puertas (sifón). También inventó diversos dispositivos automáticos como un dispensador de vino o un odómetro (para medir la distancia recorrida por un objeto).

Y en este vídeo se puede descubrir su *máquina de las adivinaciones*:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=IAf-vjpttdw>

Arquímedes, aparte de su famoso teorema, también inventó el tornillo de Arquímedes, que permitía sacar agua hacia un lugar más elevado con una simple manivela (Fig. 1.5).

También del s. I a.C. data la máquina de **Antiquitera**², un asombroso artilugio para calcular órbitas planetarias.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YMWDiPEd1Qo>

¹Más información: <https://historiasdelahistoria.com/2015/10/27/sabias-que-el-despertador-lo-invento-el-filosofo-planton>

²Más información: <https://youtu.be/UpLcnAIPVRA>

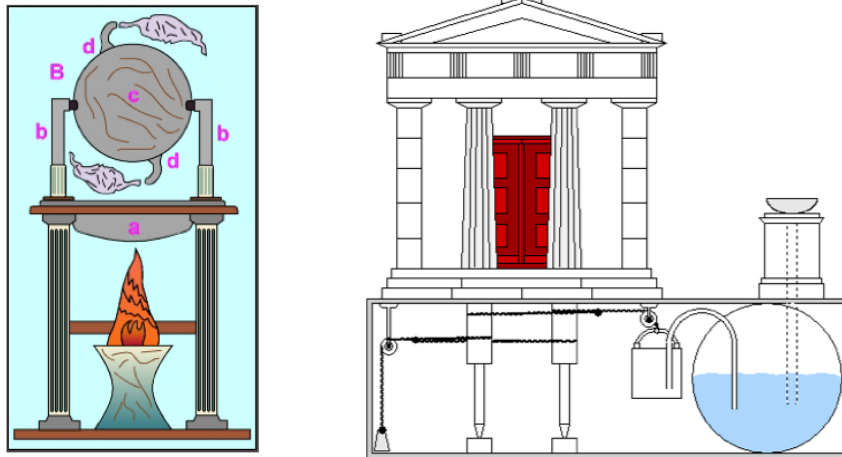


Figura 1.4: Aélopila de Herón de Alejandría (izquierda) y mecanismo para abrir puertas mediante un sifón (derecha)

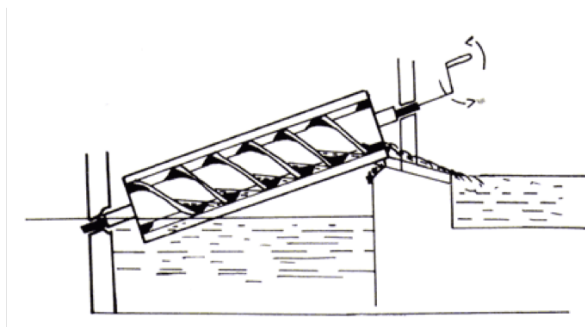


Figura 1.5: Tornillo de Arquímedes

1.1.2 Edad Media

La edad media, como en otras disciplinas, supuso un apagón ‘tecnológico’ en Europa. Cabe destacar que en 1352 se construye el **Gallo de Estrasburgo**, un autómeta que funciona hasta 1752, y que se conserva aún como parte de la catedral de esta ciudad (Fig. 1.6). Este es el autómeta más antiguo que se conserva en la actualidad: al dar las horas movía el pico y las alas.

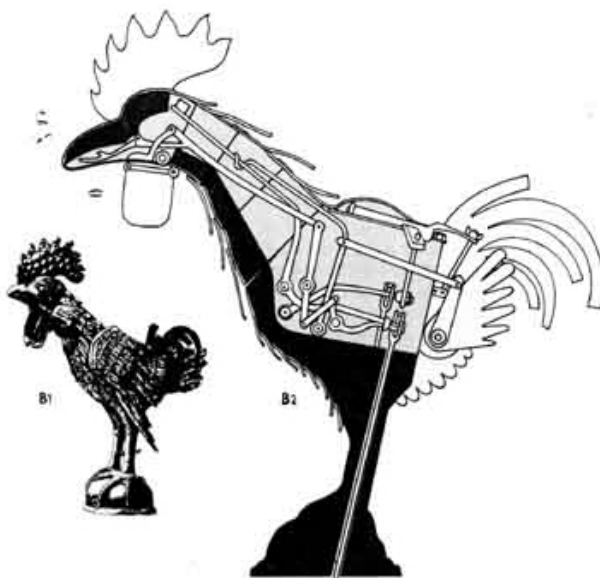


Figura 1.6: Gallo de Estrasburgo

El conocimiento de los sistemas de control en el periodo helénico fue preservado por la cultura islámica y redescubierto al final del Renacimiento. En la cultura islámicas surgieron figuras como los **hermanos Banu Musa**³: Mamad (matemático, filósofo y astrónomo), Ahmad (físico y matemático) y Al-Hasan (geómetra). Estos tres hermanos heredaron el saber de Filón y Herón y dieron forma a cantidad de artilugios. Los Banu Musa le dieron una vuelta de tuerca a la fuente de Herón y consiguieron fuentes que echaban el agua de distintas maneras e incluso que las alternaban automáticamente (Fig. 1.7). Simplemente delimitando por dónde salía el agua, conseguían un chorro vertical, en forma de lirio o escudo que variaban según diversos mecanismos.

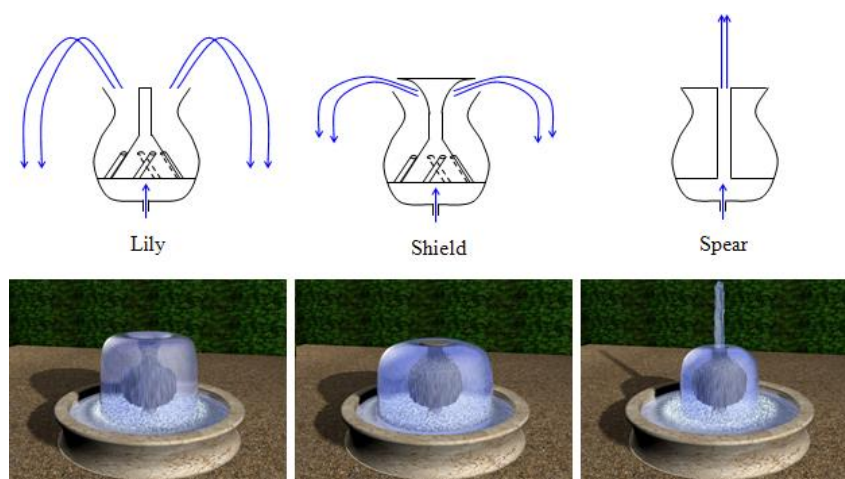


Figura 1.7: Fuentes ornamentales de los hermanos Banu Musa

La tradición atribuye al emperador Teófilo de Bizancio la construcción en el S. IX d.C. de un trono de autómetas que emulaba el Trono del Rey Salomón y que era capaz de subir y bajar del techo al suelo a la vez que unos pájaros cantaban (acordes con la raza que fueran).

³Tomada de: <http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/s-ix-dc-hermanos-banu-musa.html>

A finales del siglo XII nace en el mundo islámico el que sería uno de los mayores inventores de su cultura: **Ibn al-Razzaz al Jazari**⁴. Este hombre supo absorber todo lo que dejaron Filón, Herón y sus correligionarios los hermanos Banu Musa y se le atribuyen numerosos inventos. Uno de ellos es la fuente *Royaltarki*, conocida como fuente pavo real por tener una de esas espectaculares aves (Fig. 1.8). Era un lavamanos que, al tirar de un punto de la cola del pavo, sacaba agua por su pico y, a medida que el agua caía por el desagüe, una figurilla con forma de sirviente salía de su escondite y ofrecía cenizas vegetales (la pastilla de jabón de la época). Conforme más agua se usaba al aclararse, acaba apareciendo otra figurilla de detrás de unas puertas para ofrecerte esta vez una toalla para secarte.



Figura 1.8: Fuente Royaltarki de al Jazari

En Asia, los chinos tomaron las clepsidras griegas y las transformaron en verdaderos **relojes mecánicos** suprimiendo el flotador. El primer reloj conocido surge hacia el año 725, obra del matemático y astrónomo I-hsing. Este monje budista ideó una rueda hidráulica con unas copas en los extremos de las palas: a medida que el agua de una clepsidra iba cayendo en una taza, el peso de ésta hacía bajar una varilla que tiraba de un tope que mantenía la rueda quieta. Así, la gran rueda se movía 36 grados cada vez que se llenaba una taza y accionaba unos engranajes que movían una esfera celeste, alrededor de la cual figuraban la tierra y la luna, marcando la salida y la puesta del sol, las lunas nuevas y llenas.

Otros avances como el papel, la pólvora, la brújula o la imprenta, así como el desarrollo de las Universidades, sentaron las bases para el posterior desarrollo de la Automática.

1.1.3 Edad Moderna

En el Renacimiento tenemos la revolución científica y una gran aparición de científicos: Copérnico (heliocentrismo), Kepler (órbitas alrededor del sol), Galileo (telescopio, primera ley del movimiento, padre de la astronomía), Descartes (racionalismo, geometría analítica) o Newton (ley de la gravitación universal, mecánica clásica) son una pequeña muestra.

Durante los siglos XV y XVI algunos de los más relevantes representantes del renacimiento se interesan también por los ingenios descritos y desarrollados por los griegos. Es conocido el **León Mecánico** construido por **Leonardo Da Vinci** (1452-1519) para el rey Luis XII de Francia, que se abría el pecho con su garra y mostraba el escudo de armas del rey. En España es conocido el **Hombre de palo** construido por **Juanelo Turriano** en el siglo XVI para el emperador Carlos V. Este autómatas con forma de moje, andaba y movía la cabeza, ojos boca y brazos.

⁴Tomada de: <http://historiaautomatas.blogspot.com/2010/06/s-xii-al-jazari.html>

Durante los siglos XVII y XVIII se crearon ingenios mecánicos que tenían alguna de las características de los robots actuales. **Jacques de Vaucanson** (1709-1782) construyó un increíble **pato mecánico** que fue la admiración de toda Europa (Fig. 1.9). El pato alargaba su cuello para tomar el grano de la mano y luego lo tragaba y lo digería. Podía beber, chapotear y graznar, y también imitaba los gestos que hace un pato cuando traga con precipitación. Los alimentos los digería por disolución y se conducía por unos tubos hacia el ano, donde había un esfínter que permitía evacuarlos. Vaucanson también construyó varios muñecos animados, entre los que destaca un flautista capaz de tocar melodías.

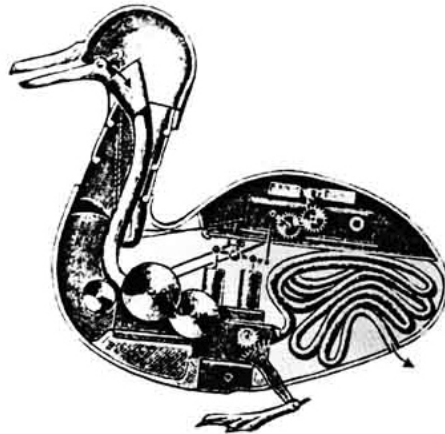


Figura 1.9: Pato de Vaucanson

Otro hito importante en la historia de la Automática es el **telar de Jacquard** (1801). Jacquard fue el primero en aplicar las tarjetas perforadas como soporte de un programa de trabajo, es decir, eligiendo un conjunto de tarjetas, se definía el tipo de tejido que se deseaba realizar (Fig. 1.10). Estas máquinas constituyeron los primeros precedentes históricos de las máquinas de control numérico.



Figura 1.10: Telar de Jacquard

A continuación podemos ver unos vídeos que nos muestran como funcionaba este maravilloso telar:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MQzpLLhN0fY>

También se pueden consultar los enlaces: <https://www.youtube.com/watch?v=OlJns3fPItE> y <https://www.youtube.com/watch?v=OlJns3fPItE>

[//www.youtube.com/watch?v=K6NgMNvK52A](https://www.youtube.com/watch?v=K6NgMNvK52A)

El primer sistema de control realimentado, reconocido oficialmente en la Europa Moderna, es el regulador de temperatura inventado por el alemán Cornelius Drebbel (1572-1663), desarrollado para calentar un incubador.

Otro sistema automático de control que goza de auténtico crédito es el sistema inventado por Meikleen en 1750, consistente en colocar unas aspas auxiliares de cola en el mismo eje de las aspas principales de los molinos con el objeto de optimizar el aprovechamiento de la energía eólica [6].

Si bien a lo largo del siglo XVIII se empiezan a despuntar los dispositivos de control automático, su zenit llega con el regulador centrífugo (Figura 1.11 de James Watt (1736-1819). A éste se le puede tomar como punto de partida para trazar el desarrollo del control automático como disciplina científica. Se trataba de un dispositivo que proporcionaba una acción de control proporcional en la regulación de la velocidad en las máquinas de vapor [6].

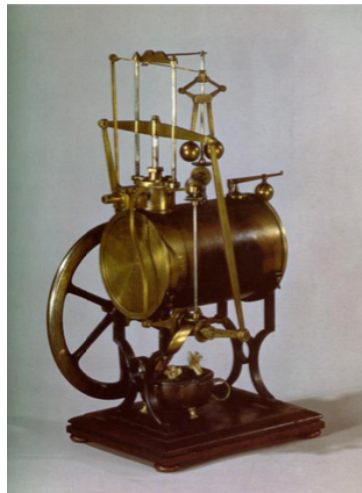


Figura 1.11: Regulador de Watt

Como anécdota final, podemos destacar el autómatas conocido como el “El Turco”. El Turco fue una famosa estructura que se cree que era un autómatas que jugaba al ajedrez. Fue construido y revelado por Wolfgang von Kempelen (1734-1803) en 1769. Tenía la forma de una cabina de madera de 1.20 m × 60 cm × 90 cm, con un maniquí vestido con túnica y turbante sentado sobre él. La cabina tenía puertas que una vez abiertas mostraban un mecanismo de relojería y cuando se hallaba activado era capaz de jugar una partida de ajedrez contra un jugador humano a un alto nivel. Tras asombrar a numerosas personalidades (entre ellas el mismo Napoleón), se descubrió que su funcionamiento estaba basado en una persona escondida en su interior que movía las piezas. Aún así, el mecanismo que permitía mover las piezas propias y conocer el estado de las piezas del oponente es destacable.

1.1.4 Edad Contemporánea

Desde el siglo XVIII la Automática ha sufrido una evolución exponencial y es imposible narrar aquí todos los inventos que han tenido lugar, por lo que sólo se mostrarán algunos de los más significativos.

En 1835, Charles Babbage presenta su máquina analítica (Fig. 1.12), que viene a ser la precursora del ordenador. En 1842, Ada Lovelace escribe el primer algoritmo para la máquina que, no obstante, nunca se construyó por los problemas de resistencia de los materiales de la época. La máquina analítica debía funcionar con un motor a vapor y habría tenido 30 m de largo por 10 de ancho. Para la entrada de datos y programas había pensado utilizar tarjetas perforadas. La salida debía producirse por una impresora, un equipo de dibujo y una campana. La máquina debía también perforar tarjetas que podrían ser leídas posteriormente.

En 1863, Henri Fourneaux inventó la pianola que es un piano que reproduce de forma automática, usando dispositivos neumáticos, las notas escritas en un rollo perforado sin necesidad de un pianista.

Leonardo Torres Quevedo (Cantabria, 1852-1936) fue un matemático, ingeniero de caminos e inventor

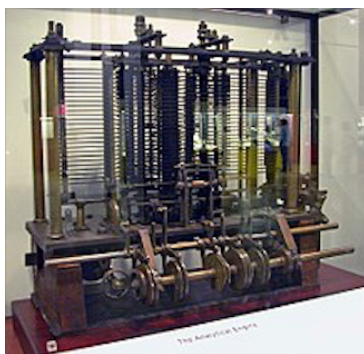


Figura 1.12: Máquina analítica de Babbage (reconstrucción)

español de finales del siglo XIX y principios del XX. Entre sus numerosos inventos podemos apreciar los que se muestran en la Figura 1.13.

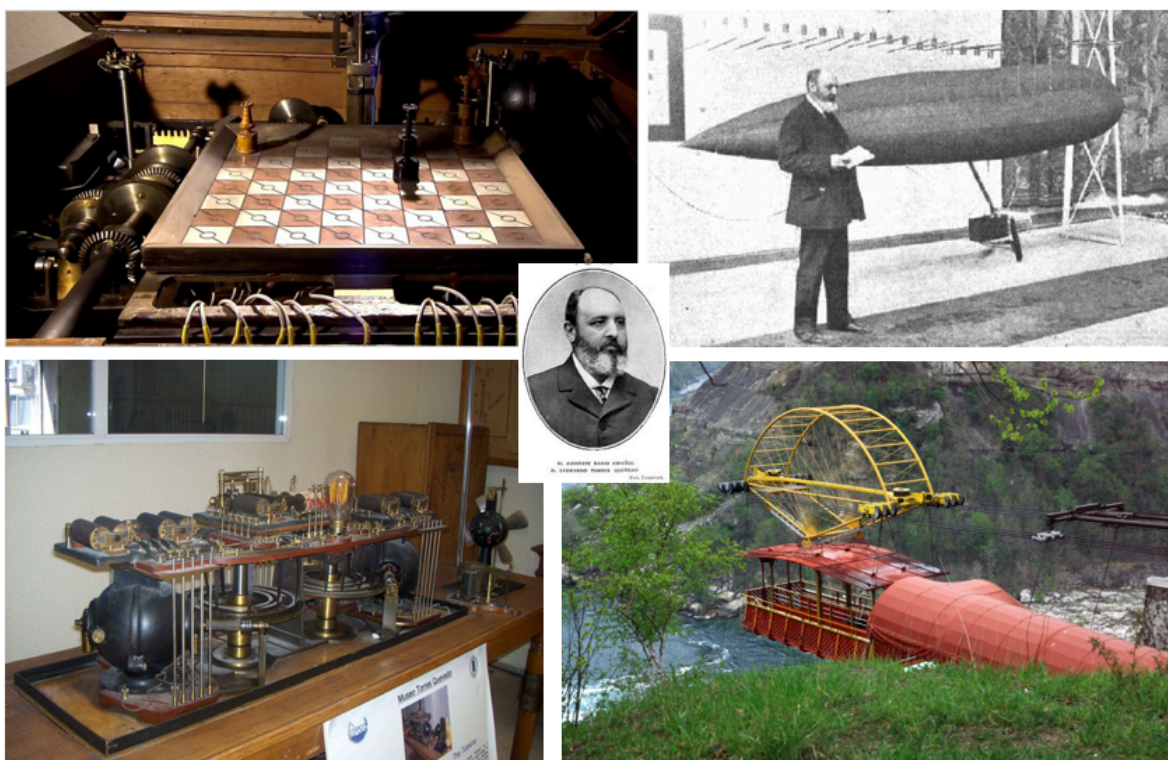


Figura 1.13: Inventos de Torres Quevedo: El ajedrecista, nuevo dirigible, Telekino y transbordador.

En 1887 construyó el primer transbordador (“transbordador de Portolín”) para salvar un desnivel de unos 40 metros: de unos 200 metros de longitud y tracción animal, una pareja de vacas, y una silla a modo de barquilla. También construyó el Spanish Aerocar en las cataratas del Niágara, Canadá, un funicular aéreo de 550m casi horizontal (la diferencia de cota entre los dos extremos es de un metro) que une dos puntos diferentes de la orilla canadiense en un recodo del río Niágara conocido como El Remolino (The Whirlpool).

En 1902, presentó un nuevo tipo de dirigible que solucionaba el grave problema de suspensión de la barquilla al incluir un armazón interior de cables flexibles que dotaban de rigidez al dirigible por efecto de la presión interior.

En 1903 presentó el Telekino, un autómatas que ejecutaba órdenes transmitidas mediante ondas hertzianas. Constituyó el primer aparato de radiodirección del mundo, y fue un pionero en el campo del mando a distancia, junto a Nikola Tesla. En 7 de noviembre de 1905, ante una gran multitud, demostró con éxito

el invento en el puerto de Bilbao al guiar un bote desde la orilla.

En 1914 presentó El Ajedrecista, considerado el primer videojuego de la historia. Utilizando electroimanes bajo el tablero de ajedrez, jugaba automáticamente un final de rey y torre contra el rey de un oponente humano. No jugaba de manera muy precisa y no siempre llegaba al mate en el número mínimo de movimientos, a causa del algoritmo simple que evaluaba las posiciones, pero lograba la victoria en todas las ocasiones.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=zkJol7ICrro>

En 1920, el escritor checoslovaco Karel Capek emplea, por primera vez, la palabra robot en una obra de teatro, para designar un androide que realizaba funciones propias de un ser humano.

En 1913, la Ford Motor Company introdujo una línea de ensamblaje de producción de automóviles que se considera uno de los tipos de automatización pioneros en la industria manufacturera. Antes de eso, un coche era construido por un equipo de trabajadores cualificados y no cualificados.

La productividad de las fábricas aumentó rápidamente debido a la electricidad (especialmente la alterna debida a Nikola Tesla) en la década de 1920 y en la década de 1930. La industria automotriz lideraba la carga en la automatización industrial. Fue durante esta época cuando la industria estaba aplicando controladores de retroalimentación, un temporizador eléctrico de alta precisión y relés de protección.

En 1944 el norteamericano Howard Aiken construye el **Mark I**, un ordenador de 8 toneladas de peso, más de 15 metros de largo y 2'40 metros de alto, con 800 kilómetros de cables en su interior. Invertía 0'3 segundos en las sumas y 12 segundos para las divisiones.

En 1946 aparece la versión definitiva del **ENIAC** (Electronic Numerical Integrator And Calculator), primer ordenador electrónico. Consumía 175.000 W de potencia (aproximadamente, lo que 220 braseros conectados simultáneamente).

En 1948 Walter Brattain y John Bardeen, de los Laboratorios Bell, en Estados Unidos, inventan el **transistor**. Es el gran avance que lleva al mundo actual.

En 1958, Jack Saint Clair Kilby inventa el **microchip**, que permite integrar varios transistores en un único montaje, con la consecuente evolución.

Los autómatas programables se introducen por primera vez en la industria en 1960 aproximadamente. Bedford Associates propuso un sistema de control denominado Controlador Digital Modular (Modicon, Modular Digital Controller) al fabricante de automóviles General Motors. Otras compañías propusieron a la vez esquemas basados en ordenador, uno de los cuales estaba basado en el PDP-8. El MODICON 084 resultó ser el primer PLC del mundo en ser producido comercialmente.

En 1968 se abrieron paso en la historia los PLC (Controlador Lógico Programable) con el Control Industrial Modular creado por Dick Morley. Así se dio paso a la automatización de procesos electromecánicos propios de las líneas de montaje. En cuanto a las máquinas, en 1978 AMK inventó la programación CNC (Control Numérico Computarizado) que permitiría su control remoto.

En 1971, la empresa Intel lanza el **primer microprocesador**, el 4004.

En 1975 un cliente encargó un sistema de control Beckhoff con una peculiaridad: que fuera equipado con un disco duro con la finalidad de recoger datos. La solución se hizo integrando un PC en el sistema y a partir de este momento se dieron cuenta de que el PC integrado podía servir para mucho más, lo que provocó una revolución en la automatización industrial.

En 1990 comienzan a montarse las fábricas totalmente automatizadas.

Test

1.2 Concepto de sistema

La teoría de la Automática estudia el comportamiento dinámico de los sistemas. Pero, ¿qué se entiende por **sistema**?. El concepto de sistema todavía hoy en día se sigue redefiniendo, no porque sea una realidad cambiante sino porque el término posee diferentes connotaciones según el contexto que se esté

considerando y es uno de los términos más utilizados con diferentes significados⁵. Aun así, se tiene una idea general e intuitiva de qué es un sistema. Basta con mirar alrededor para darse cuenta de que el mundo está formado por ellos: colecciones complejas de elementos altamente relacionados, en los que todo va más allá de la suma de las partes que lo componen [6].

Desde el punto de vista ingenieril, el concepto de sistema queda muy bien reflejado por las siguientes definiciones, dadas por Aracil:

“Sistema es una entidad formada por un conjunto de elementos o componentes básicos del sistema, y por las relaciones existentes entre ellos, así como con el entorno. Estas relaciones se expresan formalmente empleando lenguaje matemático”.

y Ljung:

“Sistema es un objeto en el que variables de distintos tipos interactúan y producen señales observables. Las señales observables que nos son de interés se suelen denominar salidas. El sistema está afectado también por estímulos externos. Las señales externas que pueden ser manipuladas por el observador se denominan entradas; las que no se pueden manipular se denominan perturbaciones y se dividen en aquellas que son directamente medibles y aquellas que son sólo observables por su influencia sobre la salida” (Figura 1.14).

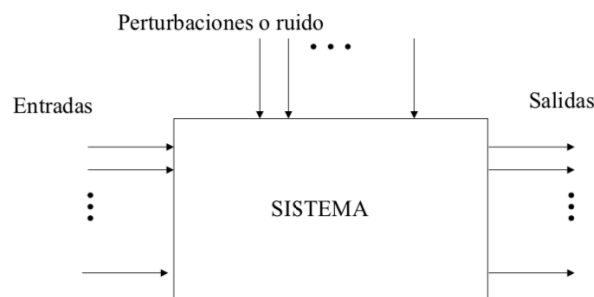


Figura 1.14: Flujo de la información en los sistemas

Atendiendo a esta última definición se pueden distinguir cuatro tipos bien diferenciados de variables:

- variables de entrada
- variables de salida
- variables de estado
- perturbaciones

Las variables de estado son el conjunto mínimo de variables del sistema, tal que, conocido su valor en un instante dado de tiempo, permite conocer la respuesta del sistema. Además, aquellas variables de estado que sean medibles serán señales de salida y aquellas que sean modificables desde el exterior serán señales de entrada. En definitiva, las variables del sistema cuyo valor se pueda determinar en el tiempo mediante operativa de instrumentación, se las llamará **señales**. Éstas no necesariamente deben de ser de naturaleza eléctrica, pueden ser temperaturas, velocidades, presiones, etc. Sin embargo, debido a que la tecnología humana actual se basa en el procesamiento eléctrico de señales, muchas de éstas emplean transductores para convertir las señales de cualquier naturaleza a otras de tipo eléctrico.

De un sistema interesa comprender su comportamiento y poder controlarlo y predecirlo. El hecho de comprender significa conocer y explicar. Este proceso de análisis y de síntesis (conocimiento y explicación) del sistema, normalmente desemboca en la construcción, testeo y validación de un modelo.

Una de las aproximaciones más efectivas es la construcción de un modelo matemático que describa las interacciones del sistema de forma cuantitativa⁶. Los modelos pueden integrarse en dos grupos: los axiomáticos y los empíricos. Los primeros basados en ecuaciones físico-matemáticas explican las interioridades

⁵El concepto de sistemas como una entidad dinámica que lo une a otros sistemas y al ambiente era un requisito previo para el desarrollo de la Teoría de Control Automático. Durante los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Adam Smith, en Economía, y el Origen de la Especies de Darwin, en Biología, tienen un gran impacto en el conocimiento humano. A inicios del XX, Whitehead, con su filosofía de “El mecanismo orgánico”, se inicia las teorías de los sistemas generales. Es en este contexto donde la teoría de Control evoluciona.

⁶Albert Einstein (1921) “¿Cómo puede ser que la matemática – un producto del pensamiento humano independiente de la experiencia- se adecúe tan admirablemente a los objetos de la realidad?”

dinámicas del sistema, mientras las segundas emplean relaciones de entrada y salida empleando el conocido concepto ingenieril de ‘caja negra’. En ambos casos, el objetivo es el mismo, obtener una expresión matemática, llamada **función de transferencia** del sistema, tal que explique cuantitativamente el comportamiento dinámico del sistema ante cualquier tipo de excitación temporal. La función de transferencia refleja la relación causa efecto en la disciplina de la Automática.

En el vocabulario técnico, el concepto de sistema es descendido y concretado con el de planta o el de proceso. Se entiende por planta a *un sistema físico, al cual se le desea controlar su dinámica, por ejemplo, la temperatura en una célula Peltier, la posición del eje de un motor o la evolución temporal de la tensión de salida de una fuente conmutada*. En cuanto a proceso se entenderá como *cualquier operación que se va a controlar*. Por ejemplo, la limpieza de la pasta de papel, el espesor del aluminio en el laminado, etc.

1.3 Automatización industrial

La automatización industrial se define como la aplicación de la automática a un proceso o a un dispositivo industrial. Aquello que se quiere automatizar recibe el nombre de **planta**.

La automatización se aplica tanto a los procesos de fabricación continua (industria química, petroquímica, cemento, etc.) como de piezas discretas (automóviles, electrodomésticos, muebles, etc.). Si bien en muchas ocasiones ambos tipos de procesos se dan de forma simultánea en la misma fábrica, es conveniente tratarlos por separado. En inglés se utilizan términos diferenciados para cada tipo de fabricación: la palabra “*process*” se utiliza para definir la fabricación *continua*, mientras que el término “*manufacturing*” se utiliza para definir la fabricación de piezas *discretas* [1].

Los objetivos de la automatización son:

- Incrementar la productividad y flexibilizar las herramientas
- Producir con calidad constante
- Dedicar a los humanos a las tareas creativas

El gran auge de la automatización industrial se debe a la aparición del autómatas programable (PLC), que sustituyó a los sistemas de control basados en lógica cableada y permitió incrementar la productividad y flexibilizar las herramientas y la programación.

1.3.1 Autómata programable o PLC

Un autómatas programable o controlador lógico programable, más conocido por sus siglas en inglés PLC (Programmable Logic Controller), es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos (i.e. electromecánicos, electroneumáticos, electrohidráulicos), tales como el control de la maquinaria de la fábrica en líneas de montaje u otros procesos de producción así como atracciones mecánicas. Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas.

Los PLCs vinieron a sustituir a las computadoras de propósito general porque presentaban los siguientes inconvenientes:

- Eran poco aptas para el entorno industrial
- Necesitaban personal especializado para programarlos y mantenerlos
- Tenían un elevado coste del equipo y de su mantenimiento

A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC:

- Está adaptado al entorno industrial: está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Por tanto, es más fácil mantenerlo.
- Es programable por el personal de operación
- Es fácilmente reutilizable

Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real, donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.

Para más información ver el siguiente vídeo:

Visita la siguiente URL: https://www.youtube.com/watch?v=PbAGl_mv5XI

1.3.2 Tipos de máquinas

En la automatización industrial se utilizan principalmente tres tipos de máquinas (ver Fig. 1.15): máquina herramienta, máquina transfer y robots (ver Fig. 1.15).

La **máquina herramienta** es un tipo de máquina que se utiliza para dar forma a piezas sólidas, principalmente metales. Su característica principal es su falta de movilidad, ya que suelen ser máquinas estacionarias.

Una **máquina transfer** es una máquina especialmente construida para fabricar una pieza determinada, con una alta velocidad de producción. Consta de varias estaciones de mecanizado sucesivas, en donde las piezas van siendo mecanizadas, de manera que los tiempos de mecanizado de cada estación se superponen (varias piezas en distintas etapas son mecanizadas simultáneamente): También hay una estación de carga y de descarga, cuya operación se llevan a cabo al mismo tiempo que las operaciones de mecanizado.

El **robot industrial** es un manipulador programable en tres o más ejes con varios propósitos, controlado automáticamente y re-programable. Permite utilizar varias herramientas de forma secuencial.



Máquinas herramientas



Robots



Máquinas transfer

Figura 1.15: Máquinas utilizadas en la automatización industrial

La mayoría de estas máquinas están gobernadas por un PLC.

1.3.3 Distribución en planta

La distribución en planta (*Lay-out* en inglés) es la ordenación de los equipos industriales y de espacios necesarios para que un sistema productivo alcance sus objetivos con la eficiencia adecuada.

La disposición en la fabricación puede ser:

- Distribución por posición fija
- Distribución basada en el proceso
- Distribución basada en el producto
- Distribución híbrida

Distribución basada en el producto

Se aplica cuando la producción es continua o repetitiva, es decir, cuando se fabrica una gran cantidad de productos de poca variedad. Los puestos de trabajo se sitúan uno junto a otro y siguen el orden de las operaciones que hay que llevar a cabo; el producto va pasando por estos puestos de trabajo a medida que se le van realizando las operaciones correspondientes. El caso más representativo de esta distribución es el de las cadenas de montaje (por ejemplo, de electrodomésticos u automóviles) o líneas de producción.

Es el sistema más eficiente para producir en serie, sin embargo un problema en una máquina puede detener todo el proceso posterior.

Distribución basada en procesos

Este tipo de distribución es el adecuado cuando la producción se realiza en lotes de tamaño variable y de una amplia gama de productos diferentes. Esta variabilidad obliga a disponer de una distribución bastante flexible. En este caso, los trabajadores y los equipos se agrupan por similitud de funciones, y los

productos van pasando sólo por aquellas áreas a las que necesitan en su proceso productivo. Un ejemplo de este tipo de distribución son hospitales, panaderías o fabricas sin cadenas de montaje.

Distribución híbrida: por células

A veces, las características del proceso productivo hacen conveniente la utilización de combinaciones entre estas formas básicas. La más común es la que mezcla las características de la distribución basada en el producto (para aprovechar su eficiencia) y la basada en el proceso (para buscar su flexibilidad), lo que da lugar a la denominada distribución por células de fabricación o trabajo. Este tipo de distribución se parece a una distribución por proceso, por el hecho de que cada célula se encuentra diseñada para desarrollar un conjunto de operaciones específicas, y a una distribución orientada al producto, porque se elaboran pocos artículos con características parecidas.

Distribución por posición fija

Corresponde a procesos productivos por proyecto. Cuando no es posible mover el producto, éste permanece inmóvil. En ese caso, el personal, los materiales, los equipos y las herramientas son los que se desplazan. La distribución en planta se encarga de colocarlos en torno al emplazamiento del proyecto (muchas veces, en círculos concéntricos) en función del nivel de uso, es decir, a mayor grado de utilización, mayor proximidad. Ejemplo: construcción de barco o avión.

Información obtenida de [2].

1.3.4 Grados de automatización

La automatización de la producción puede realizarse con un mayor o menor grado de flexibilidad. De forma que se habla de automatización rígida y automatización flexible. En general, el grado de flexibilidad de un sistema de producción está fuertemente ligado al volumen de la producción, y éste, a su vez, a la variedad de productos.

La automatización **rígida** es aquella en la que la secuencia de las operaciones está fijada por la configuración de los equipos utilizados. La automatización rígida suele ser rentable en la producción de grandes series de productos iguales (normalmente productos de gran demanda). Se suele asociar a una **distribución basada en el producto**.

La automatización rígida opera con series altas o muy altas de piezas con altos valores de productividad y relativa inflexibilidad a cambios en el proceso de producción.

La automatización **flexible**, también denominada programable, permite cambiar el producto fabricado mediante un cambio en las órdenes de control del sistema, pero con alteraciones mínimas o nulas en el sistema de fabricación en sí. Por tanto, los equipos se adaptan a la fabricación de productos diferentes modificando la secuencia de operaciones mediante el cambio de un programa. Se suele asociar a una **distribución basada en procesos**.

Normalmente la automatización flexible opera con series medias de productos en las que la fabricación es organizada por lotes de productos (batch production) que se procesan del mismo modo.

Información obtenida de [1].

1.3.5 La pirámide de la automatización

La pirámide de automatización es una representación pictórica de los diferentes niveles de automatización de una fábrica (Fig. 1.16). Es una gran manera de dar sentido a toda la complejidad de una fábrica. En la imagen se muestran los niveles frente a los dispositivos más característicos y los tiempos de respuesta aproximados que se manejan en cada nivel.

Nivel 1

Se trata del nivel más bajo en la jerarquía de la automatización. Incluye los actuadores, sensores y otros elementos hardware que forman una máquina. En este nivel se adquieren los datos del proceso mediante los sensores situados en él y se actúa mediante los actuadores. Estos sensores y actuadores que interactúan directamente con el proceso productivo suelen recibir el nombre de dispositivos de campo (field devices).

Nivel 2

Este nivel está formado por las máquinas individuales que intervienen en el proceso productivo. Por tanto, desde el punto de vista de control, en este nivel se sitúan los autómatas programables (PLCs), los sistemas de control numérico de las máquinas, los robots industriales, los computadores industriales, etc. Todos estos dispositivos se conocen de forma genérica como controladores de máquinas.

Nivel 3

El nivel 3 es donde se encuentran los sistemas de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA), así como las interfaces hombre-máquina (HMI). En esta capa, los datos de proceso se supervisan a través de interfaces de usuario, y se almacenan en bases de datos. El SCADA se utiliza típicamente para controlar múltiples máquinas en procesos complejos, incluyendo procesos que involucran múltiples sitios.

Una diferencia entre el nivel 2 y el 3 es que el SCADA se usa a menudo para refinar o restablecer valores en el nivel de control⁷.

Nivel 4

El cuarto nivel de la pirámide de automatización se llama nivel de operación o de planificación. En este nivel se monitoriza todo el proceso de fabricación en una planta o fábrica desde las materias primas hasta el producto acabado. Esto permite a la gerencia ver exactamente lo que está sucediendo y les permite tomar decisiones basadas en esa información. Pueden ajustar los pedidos de materias primas o los planes de envío basándose en datos reales recibidos de los sistemas. Este nivel suele utilizar un sistema de gestión informática conocido como MES (Manufacturing Execution System)⁸.

Nivel 5

La cima de la pirámide es lo que se llama el nivel de gestión. Este nivel utiliza el sistema de gestión integrado de las empresas que se conoce como ERP (Enterprise Resource Planning) o planificación de recursos empresariales. Aquí es donde la alta dirección de una empresa puede ver y controlar sus operaciones. El ERP suele ser un conjunto de aplicaciones informáticas que pueden ver todo lo que sucede dentro de una empresa. Utiliza toda la tecnología de los niveles anteriores más algunos programas más para lograr este nivel de integración. Esto permite a la empresa ser capaz de monitorizar todos los niveles del negocio desde la fabricación, las ventas, las compras, las finanzas y la nómina, entre muchos otros. Mientras que el MES supervisa y controla una sola planta, ERP proporciona supervisión, informes y control para corporaciones enteras.

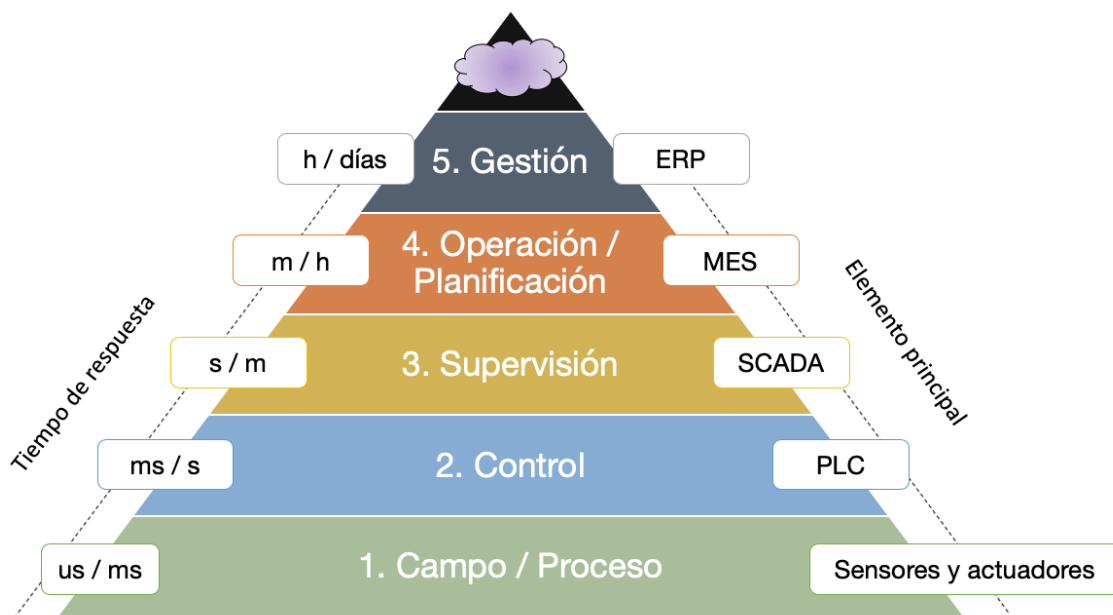


Figura 1.16: La pirámide de la automatización industrial

⁷<https://www.syspro.com/blog/erp-for-manufacturing/the-5-layers-of-the-automation-pyramid-and-manufacturing-operations-management/>

⁸<https://medium.com/world-of-iot/92-what-is-the-five-layer-automation-pyramid-d0ccc1b903c3>

Actualmente se podría señalar otro nivel por encima del nivel cinco: la **nube**. La nube es lo que forma la parte de transformación digital de la fábrica donde los datos de cualquiera de los niveles anteriores pueden ser directamente alimentados en un *pool* de datos u otras aplicaciones. Aquí es donde se alcanza el siguiente nivel de eficiencia y excelencia operativa, lo que se denomina **Industria 4.0**.

1.4 Arquitectura de un sistema de producción

Los sistemas de producción industrial son los distintos métodos que utiliza una compañía para transformar una materia prima hasta convertirla en una materia elaborada (producto final) que se va a comercializar.

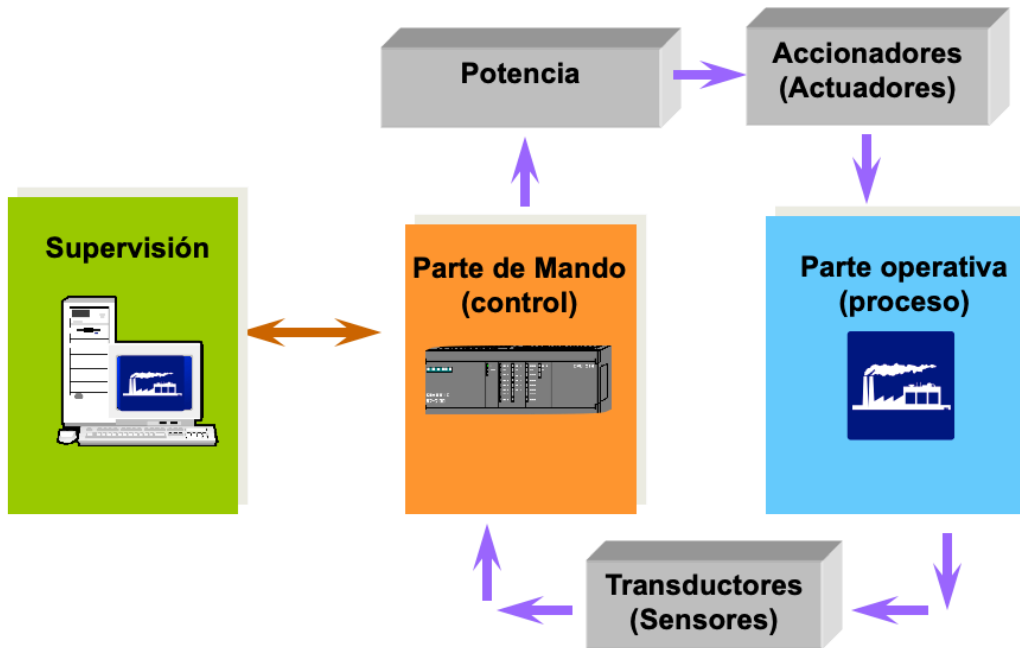


Figura 1.17: Sistema de producción industrial

Un sistema de producción genérico se compone de las siguientes partes (Fig. 1.17):

Parte de mando: esta parte es la encargada de realizar las órdenes que le son programadas por el operario, dejando más tiempo a los trabajadores para enfocarse en otras áreas de la producción. Debe ser capaz de comunicarse con todos los elementos del sistema. Actualmente esta parte suele consistir en un autómata programable, es decir, un sistema tecnológico que funciona sin la necesidad de que un humano lo controle directamente. Anteriormente se utilizaba tecnología cableada (i.e. relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos).

Parte operativa: es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los accionadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores.

Actuadores: son los elementos que permiten que el parte de mando actúe sobre la parte operativa. Por ejemplo: motores, cilindros neumáticos, relés eléctricos, electroválvulas.

Sensores: son los elementos que permiten al parte de mando conocer el estado de la parte operativa. Ejemplo: sensores de temperatura, posición, fuerza.

Sistema supervisor: este sistema permite monitorizar y controlar la instalación de forma remota a través de **interfaces**. Pueden ser paneles de pulsadores y luces, pero normalmente se trata de un sistema SCADA (Simultaneous Control and Data Acquisition) ejecutado en ordenadores centrales.

En la Fig. 1.18 se puede ver un demostrador neumático en el que se identifican la parte de mando o de control y de operación. En este caso la parte de mando se realiza mediante un módulo de relés, pero en general se utiliza un PLC.

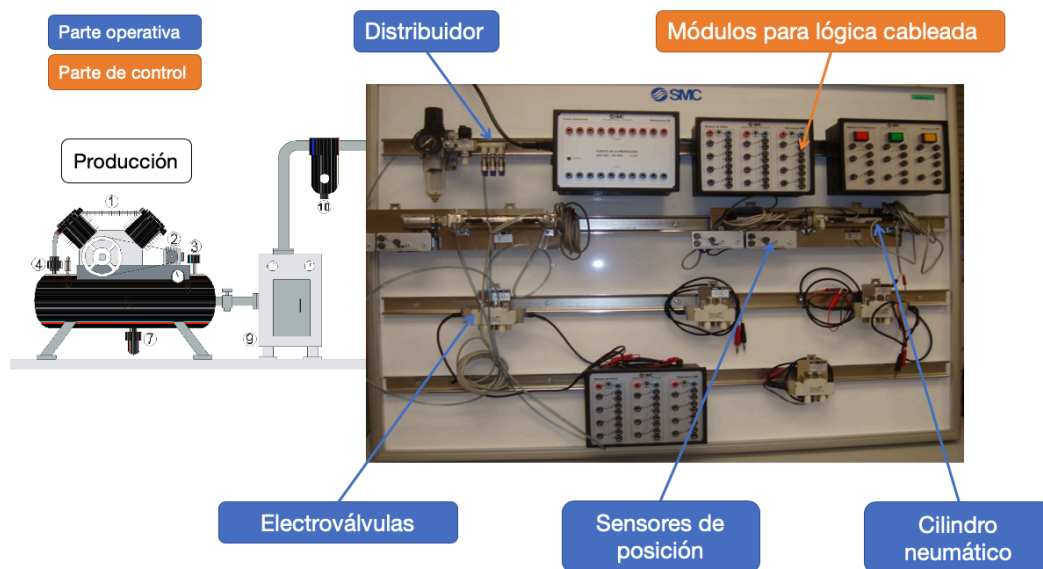


Figura 1.18: Ejemplo de sistema de producción industrial: demostrador neumático de laboratorio

1.4.1 Parte operativa

La parte operativa es la que actúa físicamente sobre la planta. Se compone de:

- Sensores, como por ejemplo:
 - Detectores de presencia
 - Detectores de posición
 - Cámaras
 - Sensores de temperatura
 - Caudalímetros
- Potencia, como por ejemplo:
 - Variadores de velocidad
 - Relés
 - Distribuidores neumáticos
 - Arrancadores de motor AC
 - Limitadores de presión
- Actuadores, como por ejemplo:
 - Cilindros y motores neumáticos
 - Cilindros y motores hidráulicos
 - Motores eléctricos
 - Bobinas

1.4.2 Parte de control

La parte de control o mando se puede implementar de dos formas, mediante:

- Tecnología cableada: el automatismo se realiza a base de uniones físicas (cableado)
 - Lógica neumática
 - Sistemas de relés, PLDs
- Tecnología programada: el automatismo se realiza mediante la confección de un programa
 - Autómatas (PLCs)
 - Microcontroladores
 - Computadores
 - Robots

En la tecnología cableada los sensores están directamente conectados a los actuadores mediante cables. Para pasar a la tecnología programada es necesario introducir un sistema de control programable y

conectar los sensores a sus entradas y los actuadores a sus salidas (tal y como se muestra en la Fig. 1.19). Es el sistema de control el que activa los actuadores en función de la información proporcionada por los sensores.

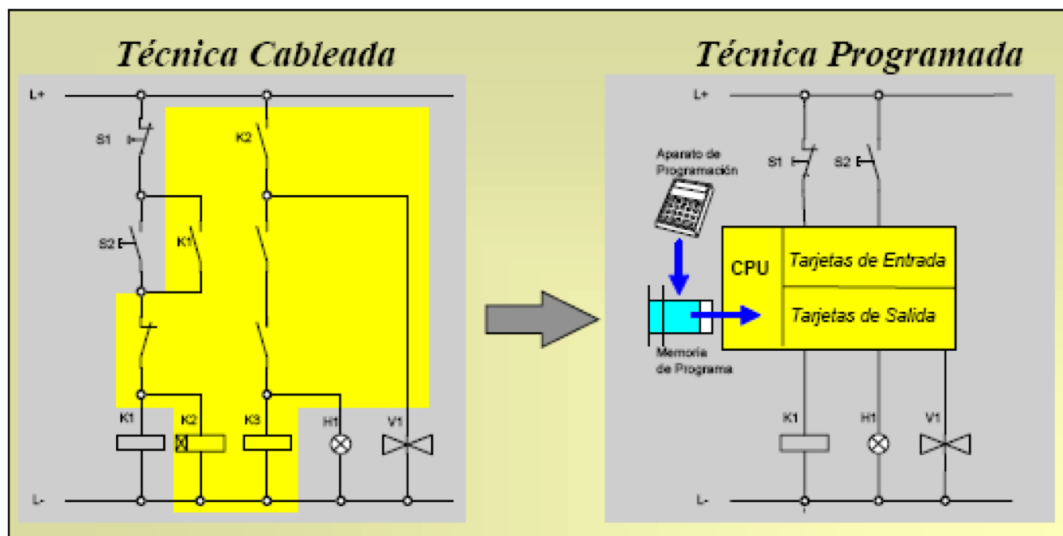


Figura 1.19: Transición de tecnología cableada a programable

1.4.3 Sistema supervisor

SCADA, acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) es un software para ordenadores que permite controlar y supervisar procesos industriales a distancia. Facilita la retroalimentación en tiempo real con los dispositivos de campo (sensores y actuadores), y controla el proceso automáticamente. Se provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

Mediante un SCADA se pueden monitorizar y controlar varios PLCs al mismo tiempo. En la Fig.1.20 se puede observar uno⁹.

1.5 Sistemas de control

Un sistema de control es aquel en el que las variables de salida se comportan según las órdenes dadas por las variables de entrada. En esta sección describiremos distintos tipos de sistemas de control.

1.5.1 Control en bucle abierto vs control en bucle cerrado

Un **sistema de control en bucle abierto** (Open loop control system) se caracteriza porque el sistema de control no recibe información acerca del valor que tiene la variable del producto o proceso que quiere controlar (Fig. 1.21). Un ejemplo sería una lavadora “automática” común, ya que ésta realiza los ciclos de lavado en función a una base de tiempo, sin medir el grado de limpieza de la ropa, que sería la salida a considerar. Otro ejemplo sería una tostadora: al hacer una tostada, se coloca el tiempo que suponemos suficiente para que el pan salga con el grado de tostado que queremos, mas la tostadora no puede decidir si ya esta suficientemente tostado o no.

Estos sistemas se caracterizan por:

- Ser sencillos y de fácil mantenimiento.
- Estar afectados por perturbaciones
- Dependier altamente de la calibración del sistema.

⁹<https://instrumentationtools.com/scada-system/>

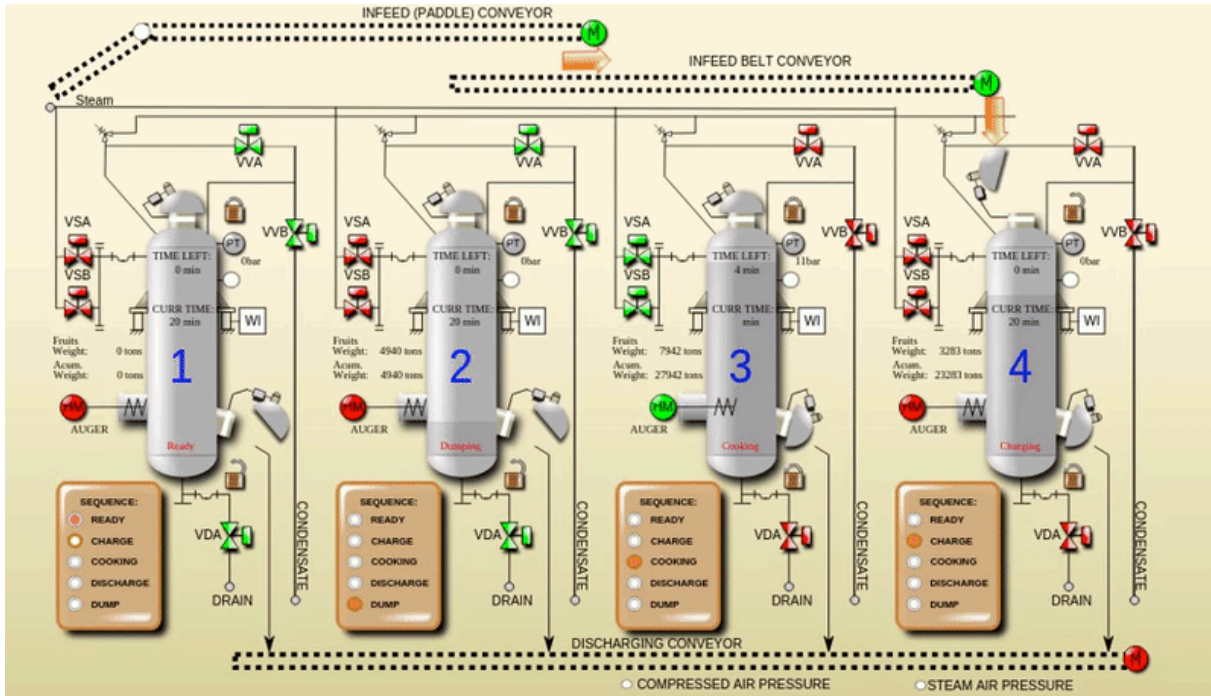


Figura 1.20: Ejemplo de SCADA

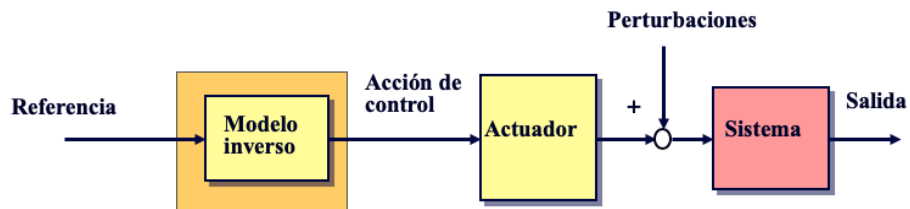


Figura 1.21: Sistema de control en bucle abierto

Los **sistemas de control en bucle cerrado** (Closed loop control systems) se caracterizan por recibir información en sus entradas sobre el valor de la variable que controlan (Fig. 1.22). Se dice por ello que son sistemas que están **realimentados** (Feedback control systems). Un ejemplo de sistema de control lógico en bucle cerrado es el control del nivel de agua de un depósito. La entrada de agua al depósito depende del nivel de agua en cada momento. Otro ejemplo de sistema de control en bucle cerrado es el de control de la velocidad de un motor de corriente continua. Para ello dicha velocidad se mide mediante un taquímetro cuya salida se conecta a la entrada del sistema de control.

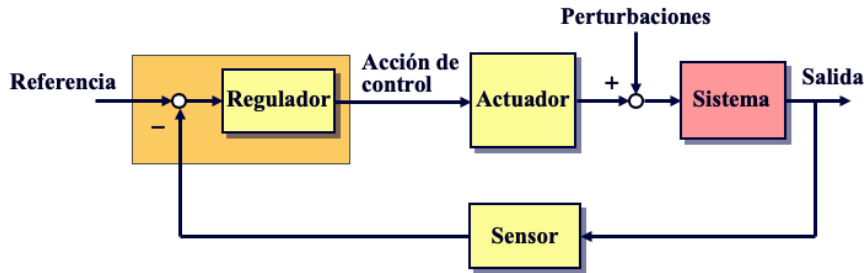


Figura 1.22: Sistema de control en bucle cerrado

Los sistemas que realizan el control en bucle cerrado son los verdaderos sistemas de control automático que hacen que un producto o proceso tome decisiones sin necesidad de la intervención de un ser humano y por ello suelen recibir el nombre de **sistemas de regulación automática** o simplemente **reguladores**.

Sus características son:

- Ser complejos y amplios en cantidad de parámetros.
- Ser más estables frente a perturbaciones y variaciones internas.

1.5.2 Control secuencial vs control continuo

Las variables generadas por un producto o proceso industrial pueden ser de dos tipos principales [4]:

- Señales **todo-nada** o **binarias** (*on-off signals*): sólo pueden tener dos valores diferentes en régimen permanente a lo largo del tiempo y por lo cual se las denomina **digitales**. Por ejemplo: botón pulsado / no pulsado, válvula abierta / cerrada, presencia de objeto / no presencia.
- Señales **analógicas** (*analog signals*) que pueden tener cualquier valor dentro de unos determinados márgenes y que llevan la información en su amplitud. Un ejemplo de variable analógica es la velocidad un de un motor. Ejemplo: temperatura, humedad, luminosidad.

Los sistemas que trabajan con señales **todo-nada** se denominan **sistemas de control lógico** o **controladores lógicos** (*logic controllers*) o **sistemas de control secuencial** (*sequential control systems*).

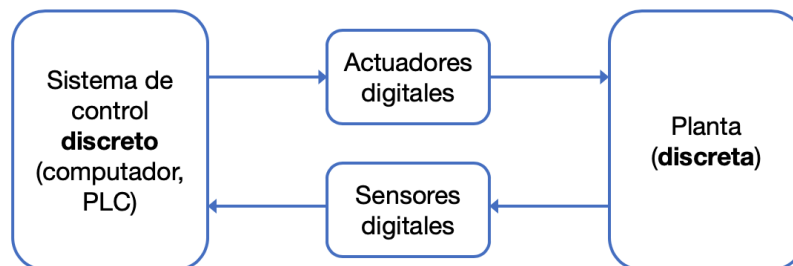


Figura 1.23: Sistema de control secuencial

En la Fig. 1.23 se puede observar un controlador discreto (computador o PLC) que controla una planta **discreta** mediante actuadores y sensores digitales.

Los sistemas que trabajan con señales **analógicas** reciben el nombre de **sistemas de control de procesos continuos** o simplemente **sistemas de control de procesos** (*process control systems*). Los sistemas de control de procesos, según el tipo de señales internas, se pueden clasificar a su vez en analógicos o digitales:

- Los sistemas analógicos de control suelen estar formados por electrónica analógica. Presentan la característica de no ser programables, es decir, que para cambiar la función que realizan hay que modificar los elementos que forman parte de ellos o el cableado entre los mismos.
- Los sistemas digitales de control suelen utilizar un **microcontrolador** como elemento central. Al control de procesos mediante un computador se le dio el nombre de **control digital directo**, conocido como **DDC** (*Direct Digital Control*). Estos sistemas utilizan convertidores analógico digital (CAD) para digitalizar las señales obtenidas de la planta, y convertidores digital analógico para convertir las salidas del sistema de control a señales continuas en la planta.

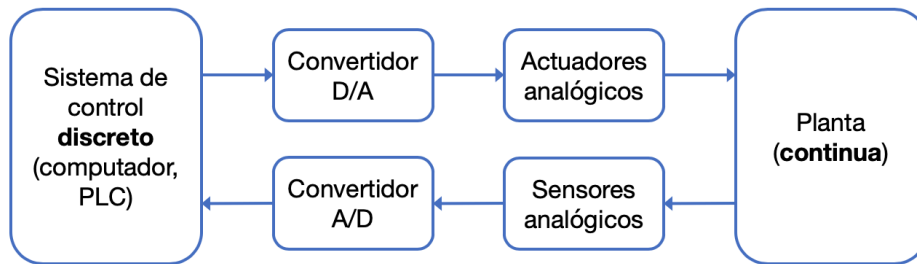


Figura 1.24: Sistema de control digital directo

En la Fig. 1.24 se puede observar un controlador discreto (computador o PLC) que controla una planta **continua**. Para ello, las salidas digitales del controlador se convierten a continuas a través de un CDA, y a las entradas del controlador llegan las señales analógicas de la planta a través de un CDA.

La diferencia entre un control secuencial y un control continuo se puede ver en la Fig. 1.25.

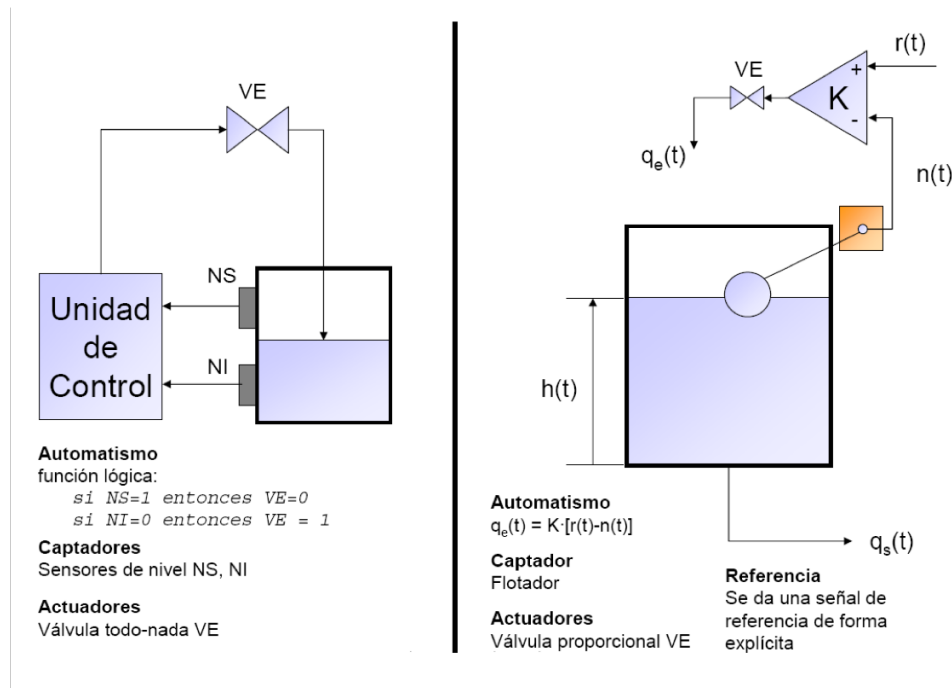


Figura 1.25: Sistema de control de un depósito de agua

En la parte izquierda tenemos un control secuencial que utiliza señales discretas de salida (abrir/cerrar válvula) y de entrada: NS (depósito lleno, sí/no) y NI (depósito vacío, sí/no). En la parte derecha tenemos

un controlador continuo que utiliza señales continuas de salida (valor de apertura de la válvula, por ejemplo 0-100%) y de entrada (nivel de agua, por ejemplo de 0.0 a 10.0).

Actualmente la práctica totalidad de los procesos industriales son **híbridos** (*hybrid systems*) y reciben y generan tanto señales analógicas como todo-nada (digitales). Debido a ello, actualmente los procesos industriales se controlan mediante sistemas digitales que constituyen al mismo tiempo un controlador lógico y un controlador de procesos continuos también denominado regulador.

1.6 Mercado de PLCs

El mercado de los PLCs es un mercado en expansión, tal y como muestra la Fig. 1.26. Las perspectivas de crecimiento hasta 2023 son elevadas.

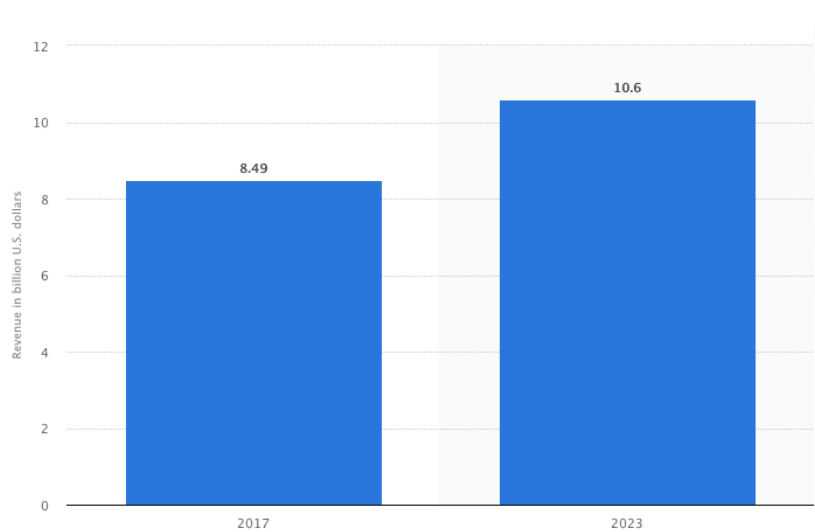


Figura 1.26: Predicción del tamaño del mercado global de controladores lógicos programables (PLC) en 2017 y 2023 (Datos: Statista)

A fecha de 2017, este mercado está gobernado por Siemens, tal y como muestra la Fig. 1.27, seguido de Rockwell, Mitsubishi y Schneider. Otros fabricantes a destacar son: Omron, GE, Keyence, ABB, Bosch Rexroth, Hitachi, B&R Automation o Panasonic.

1.7 Autoevaluación

Responde a las siguientes cuestiones y presiona el botón de “Ver Resultados” para ver tu puntuación:

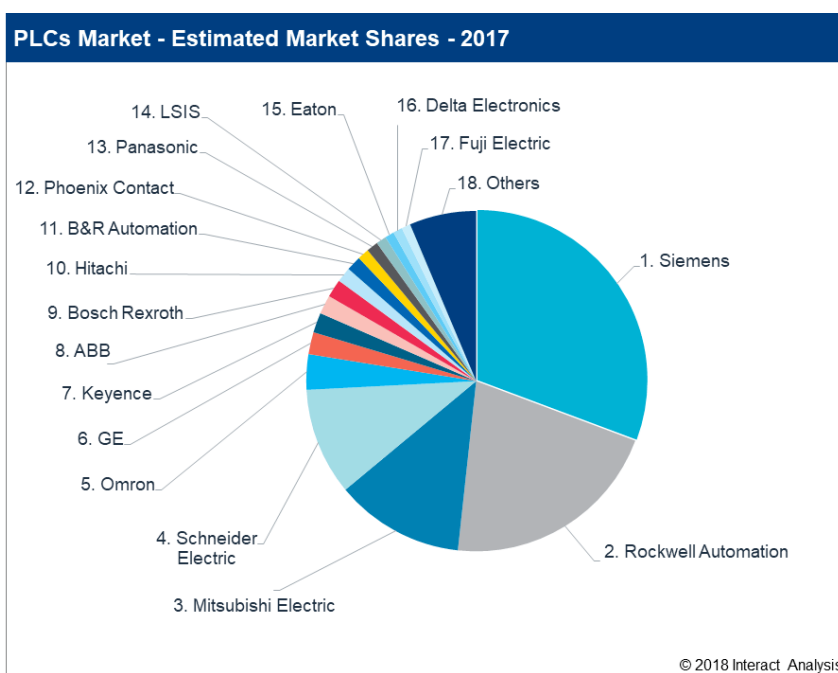


Figura 1.27: Principales fabricantes de PLCs

Capítulo 2

Sensores y Actuadores

Los sensores y actuadores son una parte imprescindible de cualquier sistema industrial de control automatizado. De hecho, representan el nivel de campo de la pirámide de la automatización. Los sensores son los sentidos del sistema de control: le proporcionan información sobre lo que está ocurriendo. Los actuadores son las manos del sistema de control: le permiten modificar lo que ocurre en la planta.

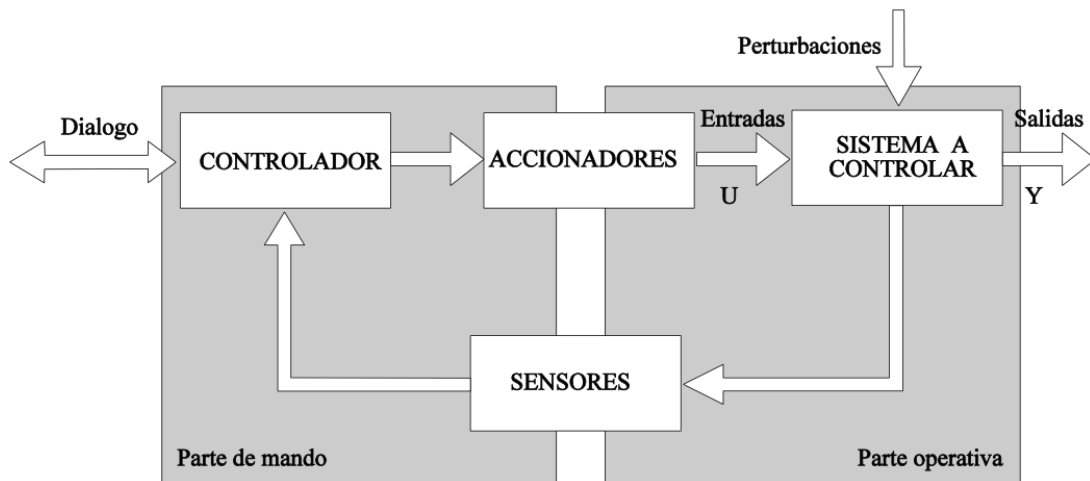


Figura 2.1: Diagrama de bloques de un sistema de control

Para realizar las tareas de control de un proceso industrial, los **sensores** nos permiten conocer el valor de las variables físicas adecuadas que participan en el proceso y convertirlas en señales eléctricas. En base a estas señales, el programa de control debe marcar las directrices de actuación sobre las máquinas y elementos que intervienen en el proceso. Para llevar a cabo las acciones oportunas, los **actuadores** se encargan de convertir las señales eléctricas de control en otro tipo de señales o en señales eléctricas de mayor potencia.

Los actuadores (también llamados accionadores) constituyen la interfaz entre las señales de control del dispositivo de control (por ejemplo, del autómatas) y el mismo proceso industrial. Podemos distinguir tres tipos de actuadores según la fuente de energía con la que trabajan: eléctricos, neumáticos (aire) e hidráulicos (aceite).

2.1 Sensores industriales

Para poder controlar automáticamente un proceso de fabricación es necesario disponer de información sobre el estado del proceso. Esto se puede hacer midiendo diferentes magnitudes físicas que intervienen en el mismo. Pese a poder recibir diferentes nombres (detector, transductor, sonda), el sensor es el nombre más utilizado en control de autómatas para referirse al dispositivo que mide una magnitud física. En

general estas magnitudes físicas no tienen por qué ser eléctricas, por lo que se utilizan transductores para convertir a señales eléctricas (Fig. 2.2).

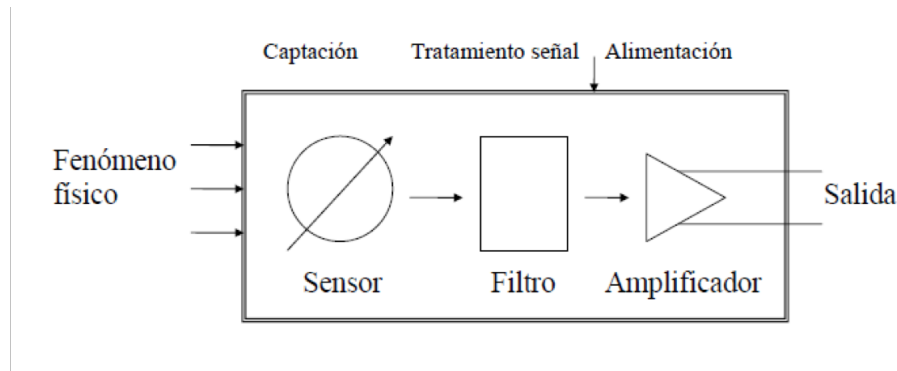


Figura 2.2: Transductor

Un transductor convierte una señal no eléctrica en eléctrica, en la cual alguno de sus parámetros (nivel de tensión, corriente, frecuencia) contiene información sobre la magnitud medida. Puesto que es necesario acoplar la salida de este dispositivo transductor al sistema de control, puede ser necesario efectuar filtrado y amplificación de la señal eléctrica en el llamado circuito acondicionador o de acondicionamiento.

2.1.1 Características de los sensores

A continuación, se presentan algunas características que definen el comportamiento de los sensores. En las siguientes definiciones, se utiliza la variable X para referirse al objeto físico que se quiere medir (por ejemplo, la temperatura a la que se encuentra una habitación), y la variable Y para referirse a la medida realizada por el sensor (la temperatura medida por el sensor térmico utilizado).

Según el régimen de funcionamiento del sensor distinguimos dos conjuntos de características: estáticas (cuando se tiene un régimen permanente en la variable a medir o ésta varía de forma lenta) y dinámicas (relativas a un régimen transitorio de la variable a medir).

Características Estáticas:

- **Campo de medida:** rango de valores del objeto físico (X) que puede medir el sensor.
- **Sensibilidad:** ratio dY/dX
- **Resolución:** mínimo cambio de X detectable en Y
- **Umbral:** mínimo valor de X con salida no nula en Y
- **Precisión:** error de medida máximo esperado (si el sensor es preciso, el error relativo entre varias medidas es pequeño)
- **Exactitud:** diferencia entre el valor real X y el valor medido Y (si el sensor es exacto, la medida de Y estará en un entorno cercano al valor real de X)
- **Repetitibilidad:** máxima desviación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces la misma entrada con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales.
- **Linealidad:** Proporcionalidad entre X e Y
- **Histéresis:** Diferentes valores de Y para un mismo X en función de la evolución de X (ascendente o descendente)

Es frecuente confundir precisión y exactitud. En la Fig. 2.3 se puede apreciar la diferencia.

Características dinámicas:

- **Velocidad de respuesta** (tiempo de subida / de retardo): capacidad para que la señal de salida siga a la señal de entrada sin retraso.
- **Respuesta en frecuencia:** capacidad del sensor para seguir las variaciones de la señal de entrada a medida que aumenta la frecuencia.

2.1.2 Clasificación de los sensores

Los sensores se pueden clasificar de acuerdo con un conjunto de características diferentes y no excluyentes:

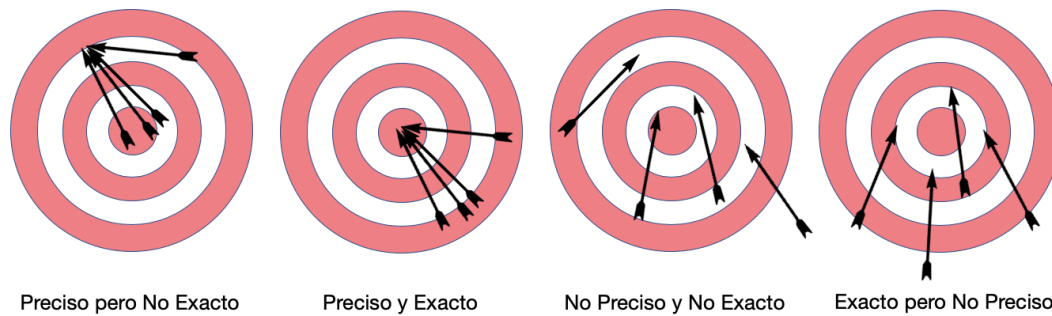


Figura 2.3: Precisión VS Exactitud

- **Según principio físico de funcionamiento:** final de carrera, termoresistivos, capacitivos, inductivos, etc.
- **Según principio de funcionamiento:** activo/pasivo. En los sensores activos, la magnitud física a medir proporciona la energía suficiente para generar la señal de salida (ej. Termoeléctrico, fotoeléctrico, magnetoeléctrico, piezoeléctrico). Los sensores pasivos necesitan una fuente de alimentación externa (ej. Resistivos-Termoresistivo, Capacitivos, Inductivos...).
- **Según señal eléctrica generada:** analógica/digital. Un sensor analógico puede tomar cualquier valor dentro de unos determinados márgenes. En el caso de las señales analógicas es imprescindible el uso de circuitos de acondicionamiento. Los sensores digitales toman un número finito de valores.
- **Según variable física medida:** presencia/proximidad, presión, temperatura, humedad, velocidad, caudal, etc.
- **Según rango de valores que proporciona:** de medida/todo-nada. Los sensores de medida proporcionan a la salida todos los valores posibles correspondientes a cada valor de la entrada (ej. Sensor analógico termoresistivo). Los sensores todo/nada, utilizados en sistemas discretos, detectan si la magnitud está por encima de determinado valor. Su salida solo puede tomar 2 valores diferentes. Son ejemplos de este tipo de sensores los que indican si se ha producido presencia/ausencia de un objeto en las proximidades del sensor.

2.1.3 Tipos de sensores

2.1.3.1 Interruptores de acción mecánica

Existen ciertos interruptores que se accionan mediante contacto físico y fuerza suficiente sobre cierta parte del mismo (normalmente una palanca). Su uso está muy extendido debido a su coste reducido, sin embargo, también limitado a ciertas aplicaciones debido a ciertas desventajas:

- Una vida operativa más corta por el desgaste del rozamiento del sensor.
- Un problema de rebote de la señal en conmutación.

Algunas de las aplicaciones de estos sensores son la de desconectar límites de carrera, controlar avance de elementos en máquinas herramienta, robots, etc. En particular, el sensor final de carrera se asocia en la industria a un sensor de contacto que detecta el final del desplazamiento de un objeto móvil en un proceso industrial. Estos sensores suelen ser muy robustos y suelen estar diseñados para trabajar en ambientes agresivos. Se pueden apreciar diversos tipos en la Fig. 2.4.

2.1.3.2 Sensores de proximidad sin contacto

La detección (sin contacto) de la presencia de un objeto depende de diversos factores como, por ejemplo, el material del objeto a detectar o la distancia a la que debe ser colocado para ser detectado. De acuerdo con el principio físico en el que se basa su funcionamiento pueden ser optoelectrónicos (accionados por luz), inductivos (de acción magnética), capacitivos (de acción capacitiva) y ultrasónicos (de acción ultrasónica).

Pueden tener salida todo/nada normalmente abierta (NO) o normalmente cerrada (NC) y estar implementados con relés o transistores.

Sensores inductivos de proximidad

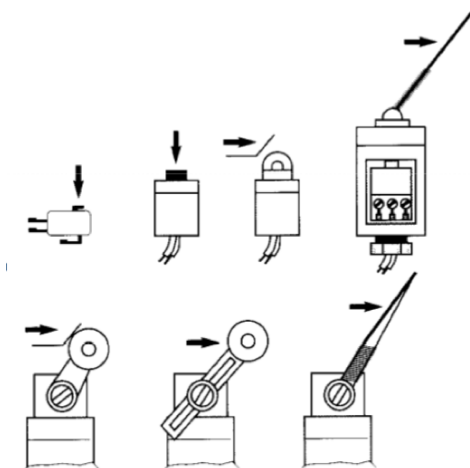


Figura 2.4: Interruptor de acción mecánica

El sensor inductivo detecta la presencia de cualquier objeto de **material conductor** sin necesidad de contacto físico, y su funcionamiento se basa en la influencia sobre algunos metales y semiconductores del campo magnético generado por la bobina del sensor.

Además de la bobina, el sensor de proximidad inductivo se compone de un circuito oscilador LC del que forma parte, un rectificador (que proporciona tensión continua a partir de alterna), un comparador (que proporciona dos tensiones distintas en función de la presencia/ausencia del objeto, por ejemplo, un disparador Schmitt) y una etapa de salida (por ejemplo, tipo relé), tal y como se muestra en la Fig. 2.5.

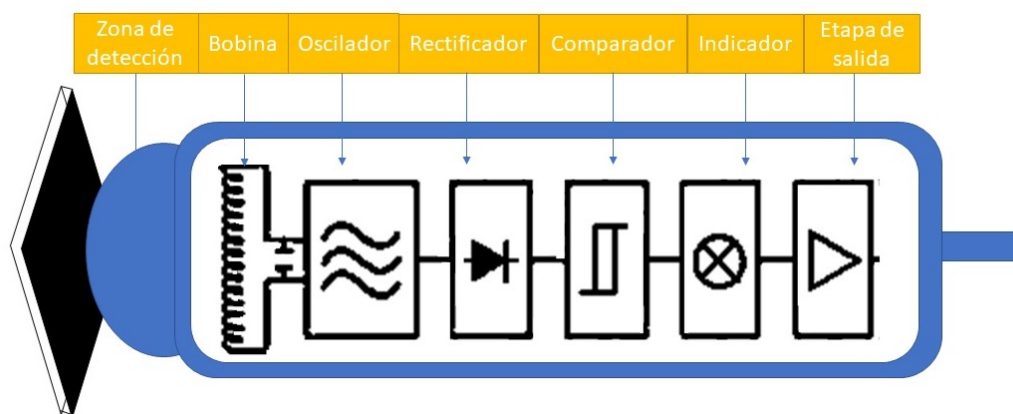


Figura 2.5: Sensor inductivo: estructura

Cuando se hace pasar una corriente por una bobina, se genera un flujo magnético ϕ que depende de la inductancia de la bobina, la cual a su vez depende de las características físicas (longitud, número de espiras, sección) y la permeabilidad del núcleo. La permeabilidad mide la capacidad de conducción del campo magnético de un material, y es igual al producto de permeabilidad en el vacío y permeabilidad relativa. Si a la bobina se le acerca un material ferromagnético (cuya permeabilidad relativa es muy superior a 1), las líneas de fuerza del flujo magnético variable cortan al material y hace que se induzcan corrientes de Foucault. Dichas corrientes crean un campo magnético que se opone al de la bobina, y esto tiene un efecto de reducir la inductancia cambiando levemente la frecuencia de oscilación y reduciendo la amplitud de las oscilaciones.

El circuito oscilador está pensado para tener máxima amplitud de oscilación sin presencia de objeto. Si hay presencia de objeto, se produce una disminución de amplitud de oscilación por transferencia de energía debido a la corriente de Foucault. Si se detecta una disminución de amplitud por debajo de un nivel de operación, la salida se activa (ver Fig. 2.6).

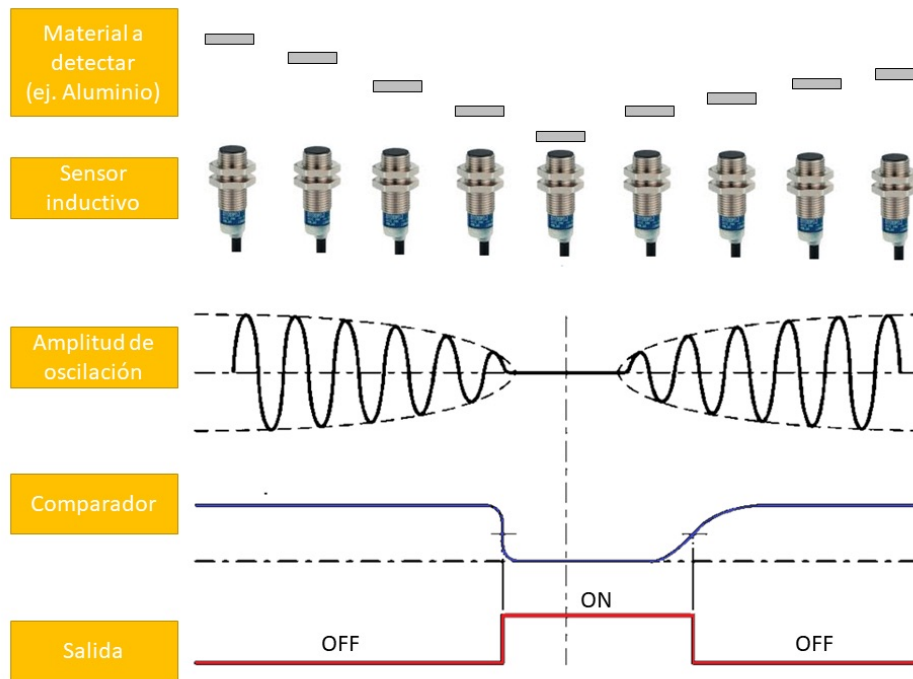


Figura 2.6: Sensor inductivo: funcionamiento

El fabricante especifica la distancia teórica máxima a la que el sensor detecta el objeto patrón (cuadrado de acero de tamaño específico dependiente de las propiedades del sensor). En general, la distancia de detección de este tipo de sensores es pequeña (1-50mm). La distancia a la cual el objeto es detectable depende de la permeabilidad del material, a menor permeabilidad menor distancia. Estos sensores funcionan peor si el material es paramagnético (permeabilidad magnética relativa superior a la unidad), e incluso puede que no se produzca la detección si el material es diamagnético (permeabilidad relativa inferior a la unidad).

Visita la siguiente URL: https://www.youtube.com/watch?v=fv_Ngs7j-gY

Resumiendo, este tipo de sensores se pueden utilizar cuando se requiere detectar sin contacto la presencia de objetos metálicos ubicados en máquinas herramienta, robots o líneas de producción. El sensor se activa como un interruptor al detectar objeto, y genera una señal eléctrica (libre de rebote a diferencia de los interruptores mecánicos) que puede utilizarse en el proceso, por ejemplo, para la conmutación de electroválvulas.

El aspecto físico de este sensor se muestra en la Fig. 2.7. También se muestra un sensor capacitivo (que se verá en la siguiente sección) puesto que son muy parecidos¹.



Figura 2.7: Ejemplo de sensor inductivo (izquierda) y capacitivo (derecha).

¹Figuras tomadas de: <https://www.se.com/es/es/product/XS112B3PCL2/> y <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-proximidad-capacitivos/7449944/>

Sensores capacitivos de proximidad

Estos sensores se basan en la interacción producida entre el objeto a detectar y el campo electrostático que genera el propio sensor. El funcionamiento es similar al caso inductivo, pero ahora el sensor es un condensador.

La capacidad de un condensador depende de la distancia entre electrodos, su área y la permitividad dieléctrica que representa la capacidad del material de polarizarse ante la presencia de un campo eléctrico. La permitividad dieléctrica es igual al producto de la permitividad del vacío y de la permitividad relativa del material dieléctrico que separa las placas del condensador.

Cuando un objeto se aproxima al sensor y entra al campo electrostático de los electrodos, la capacidad del condensador se incrementa. La variación de la capacidad se detecta mediante un circuito oscilador del que forma parte. Debido a un aumento de capacidad, la amplificación del oscilador se incrementa haciendo al oscilador entrar en oscilación. Cuando la amplitud de oscilación supera un cierto nivel ante la presencia de un objeto, el estado del sensor cambia. Si el objeto se aleja, la amplitud del oscilador disminuye hasta conmutar al estado original (sin oscilación). El sensor también se compone de un circuito rectificador, un comparador y una etapa de salida (igual que el sensor inductivo), tal y como se muestra en la Fig. 2.8. Existe otra configuración en la que el propio objeto a detectar es el electrodo principal.

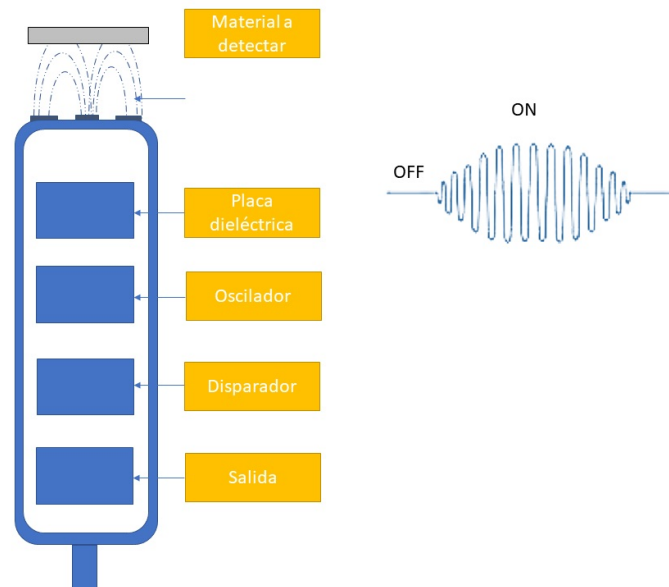


Figura 2.8: Sensor capacitivo: funcionamiento

Este tipo de sensores detectan tanto materiales metálicos como no metálicos, como el papel, vidrio o tela. Los materiales cuyos valores de constante dieléctrica sean más altos serán más fáciles de detectar que aquellos con valores más bajos. Por ejemplo, el agua, que tiene una constante de 80, será fácilmente detectable, mientras que el sensor no será sensible al aire que tiene una constante de 1. En este sentido, los materiales con altas constantes dieléctricas pueden ser detectados a través de las paredes de envases cuya constante dieléctrica sea menor. Por lo tanto, se pueden utilizar para el control de llenado de recipientes o control de fluidos a través de barreras. También son utilizados para muchos dispositivos con pantalla táctil, como teléfonos móviles, ya que el sensor percibe la pequeña diferencia de potencial entre membranas de los dedos eléctricamente polarizados de una persona.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=b3tW4nWUjCo>

Como desventajas, es importante destacar que los sensores capacitivos tienen una distancia de detección corta (en torno a 1-30mm) que varía según el material que deba detectar, y al mismo tiempo son extremadamente sensibles a los factores ambientales.

Sensores optoelectrónicos de proximidad

Son sensores que detectan la presencia de un objeto mediante fenómenos relacionados con la luz. También se conoce a estos sensores como fotocélulas, sensores ópticos o detectores fotoeléctricos.

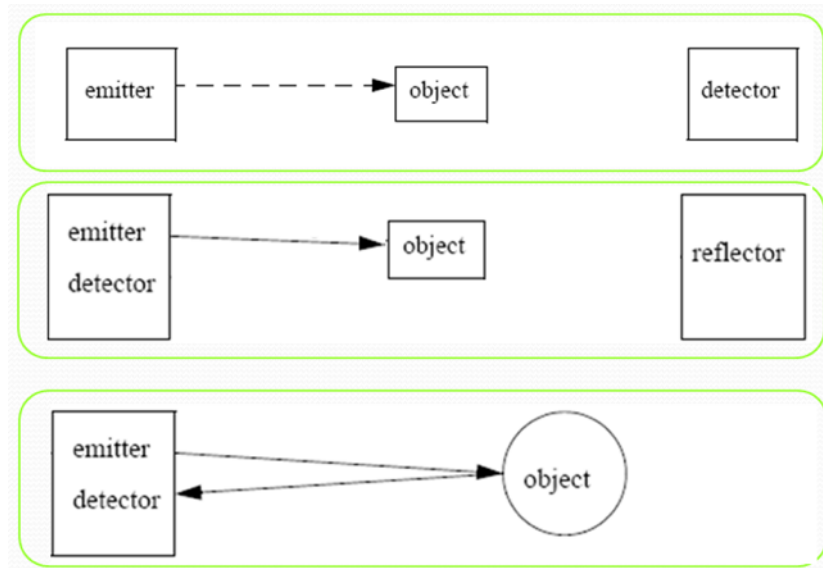


Figura 2.9: Sensor óptico: tipos

En cada sensor existe un **emisor** que genera un haz de luz (en el espectro visible o infrarrojo) y un **receptor** que puede recibir o no el haz de luz emitido o recibirlo modificado, según la presencia del objeto. Estos sensores se pueden clasificar, atendiendo al método de detección utilizado y la disposición de los elementos emisor y receptor, como (ver Fig. 2.9):

- Fotocélulas de **barrera de luz**: el emisor y receptor están separados y enfrentados, y el objeto bloquea el haz de luz generado por el emisor.
- Fotocélulas de **reflexión**: el emisor y receptor comparten carcasa, y el haz de luz generado por el emisor se refleja hasta llegar al receptor. El haz de luz se puede reflejar en un espejo o en el propio objeto. Cuando existe reflexión en el espejo, el receptor identifica la presencia de un objeto si no se recibe el haz generado por el emisor y reflejado por el espejo. Dependiendo de la configuración del sensor, se puede utilizar para detectar objetos con diferente grado de transparencia. Para que se dé la reflexión en el objeto, este debe contar con unas características mínimas de reflectividad. Según la luz se refleja en el espejo en múltiples direcciones o en una única dirección, hablamos de sensores de reflexión difusa o definida.

El emisor normalmente manda una señal de luz modulada, es decir, la fuente de luz recibe impulsos de corriente que generan impulsos de luz. De esta manera se puede aplicar mayor potencia instantánea a la fuente de luz, y se facilita la amplificación de la señal alterna en el receptor, por lo que se logra un sensor de mayor alcance. Además, el emisor incluye una lente para conseguir luz colimada a su salida.

La fuente de luz suele ser un diodo de infrarrojos (de arseniuro de galio, GaAs) o luz visible mediante LEDs (Light Emitting Diode) de color rojo o verde.

El receptor suele incluir una lente a su entrada para concentrar el haz de luz emitido en un elemento fotosensible (como el fotodiodo, el fototransistor o el fotodarlington), el cual ve modificado alguno de sus parámetros característicos con la incidencia de la luz. Además, puede filtrar y amplificar la señal (en base a la frecuencia de pulsos generados en el emisor) para evitar la luz que no procede del emisor.

Estos sensores pueden tener la activación cuando hay luz o cuando no la reciben. El circuito del receptor activa o desactiva la salida según si la señal recibida supera un determinado umbral. Dada una distancia de trabajo y unas condiciones ideales, el margen con el cual la señal supera un cierto umbral se conoce como exceso de ganancia. Cuando el ambiente no es ideal, por ejemplo, ante la presencia de cierta suciedad, será más difícil detectar la señal, por lo tanto, el exceso de ganancia nos da una idea de la capacidad del sensor de superar pérdidas de señal.

Una posible aplicación de estos sensores sería el conteo de botellas, detección de taladros, control de altura en una línea de producción o implementar una barrera óptica.

Sensores ultrasónicos de proximidad

Estos sensores basan su funcionamiento en las señales sonoras de frecuencia superior al valor audible por el ser humano, 20KHz, los ultrasonidos (normalmente se limita a un rango de frecuencias de 20KHz-250KHz).

Constan de un elemento emisor y otro elemento receptor de ultrasonidos utilizando como medio de transmisión normalmente el aire (Fig. 2.10). La manera de realizar estos elementos es utilizando el efecto piezoeléctrico en materiales: la presión sobre el material hace que se produzca un movimiento de cargas por lo que aparece una diferencia de potencial entre las caras del material (el receptor se basa en la deformación producida por señales de presión del aire). Este efecto es reversible, por lo que si se aplica una diferencia de potencial aparece una deformación del material (el emisor produce señales de presión de aire de la misma frecuencia que la señal de voltaje aplicada).

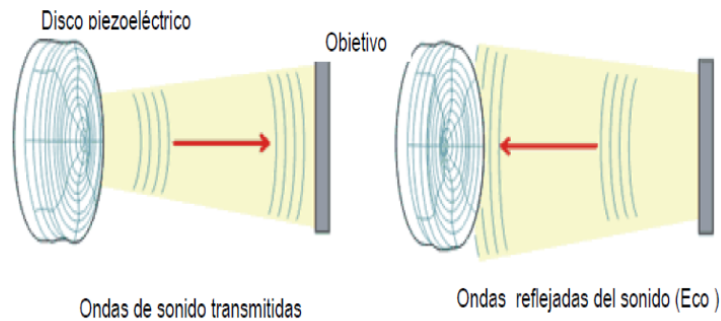


Figura 2.10: Sensor de ultrasonidos: tipos

Un tipo de sensores ultrasónicos son los sensores detectores de eco, que no solo detectan la presencia de un objeto si no que miden la distancia al mismo. Para ello el receptor y el emisor están situados en la misma carcasa. El emisor transmite un tren de impulsos que es reflejado en el objeto y el eco es detectado por el receptor. Un circuito electrónico mide el tiempo que se tarda en recibir el eco, y conocida la velocidad del sonido en el aire (aproximadamente 340m/s) se determina la distancia al objeto.

Mediante estos sensores se pueden detectar líquidos, sólidos o materiales de distintas forma y colores que tengan unas mínimas características de reflexión de los ultrasonidos.

Las limitaciones de este tipo de sensores son su carácter paraxial (la trayectoria de las ondas debe ser perpendicular al sensor) y su dependencia con el medio ambiente (ya que tendrá cierta influencia en la velocidad del sonido).

Algunos ejemplos de aplicaciones de los ultrasonidos son la medida de nivel en recipientes, la medición de alturas, el control anticolidión, la medición de fisuras en materiales, etc.

Interruptor de lengüeta (*Reed Swicht*)

Un interruptor de lengüeta o reed switch (Fig. 2.11²) es un interruptor eléctrico activado por un campo magnético generado por un imán permanente o una bobina. Está formado por un par de contactos ferrosos encerrados al vacío dentro un tubo de vidrio, de manera que cuando los contactos están normalmente abiertos se cierran en la presencia de un campo magnético; cuando están normalmente cerrados se abren en presencia de un campo magnético.

Un uso muy extendido se puede encontrar en los sensores de las puertas y ventanas de las alarmas antirrobo, el imán va unido a la puerta y el interruptor de lengüeta al marco.

2.1.3.3 Sensores de posición

La posición y el avance de objetos en los procesos de fabricación son datos que normalmente se desean conocer para controlar el proceso. Según el margen de distancias de trabajo (puede variar desde centésimas de milímetros hasta decenas de metros) se utilizan sensores basados en diferentes principios físicos.

Codificadores de posición optoelectrónicos: *Encoders*

²Figura tomada de: <http://www.magnetismswitch.com/proximity-switch/glass-sensor-tube-magnetic-reed-switch.html>



Figura 2.11: Sensor de lengüeta o reed

Estos sensores están basados en la detección de señales de luz que atraviesan un disco que posee n pistas concéntricas, cada una con zonas opacas y transparentes alternas asignadas a los números 0 y 1 respectivamente. A cada pista le corresponde un emisor de luz y un receptor sensible a la luz, de manera que, si dividimos el disco en 2^n sectores, cada uno se puede codificar con un bit por pista cuyo valor depende de la medida del receptor. La señal recibida pasa a un circuito cuya salida se encuentra a un nivel de tensión correspondiente a un nivel lógico si recibe luz, y al contrario si no hay señal luminosa.

Los codificadores de posición pueden ser absolutos (cuando miden la posición respecto a una referencia) o incrementales (cuando miden un incremento de la posición). El principal inconveniente de estos últimos es que pierden datos si se desconecta la alimentación.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=cn83jR2mchw>

Potenciómetro

Este sensor consiste en una resistencia (de geometría lineal o angular) cuyo valor varía en función del movimiento de un contacto, por lo tanto, al aplicarle corriente, la tensión de salida también variará. El principal inconveniente es el desgaste por rozamiento del contacto y la resistencia.

2.1.4 Criterios de selección

Algunas de las variables a tener en cuenta a la hora de elegir el sensor adecuado para una aplicación determinada son:

- Magnitud a medir
- Tipo de información: discreto/continuo
- Uso de la medida (resolución, precisión, fidelidad...)
- Acople con otros dispositivos
- Condiciones ambientales (criterios de seguridad)
- Precio

Test

2.2 Actuadores eléctricos

2.2.1 Relé

Se trata de un dispositivo electromagnético que consiste en un interruptor automático controlado por un circuito eléctrico, en el que, por medio de una bobina y un electroimán, se actúa sobre uno o varios contactos (Fig. 2.12). Cuando la señal de mando excita al electroimán, se hace pasar corriente por la bobina, se produce un campo magnético que interacciona con uno o varios contactos provocando el cierre o apertura de los mismos, lo que permite abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. Esto permite controlar un circuito de salida de mayor potencia (circuito de fuerza) que el circuito estimulador (circuito de control) que solo necesita una pequeña fuente de tensión para activar el relé.

Los relés tienen asociados varios contactos que pueden ser normalmente abiertos (NO) si al pasar corriente por la bobina se cierra el contacto, o normalmente cerrados (NC) si al pasar corriente por la bobina se

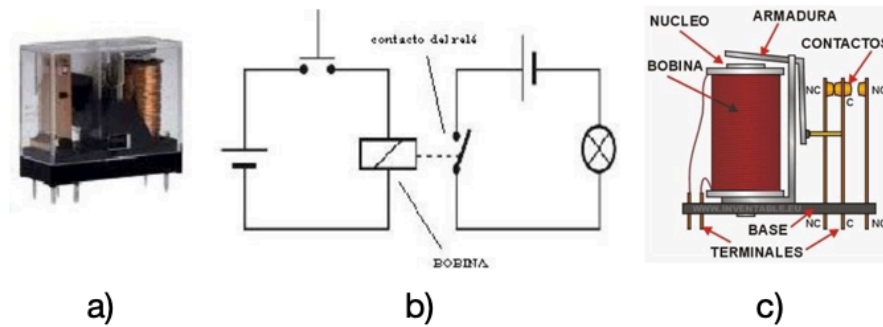


Figura 2.12: Relé: (a) imagen real (b) símbolo (c) partes

abre el contacto. Su funcionamiento se muestra en la Fig. 2.13.

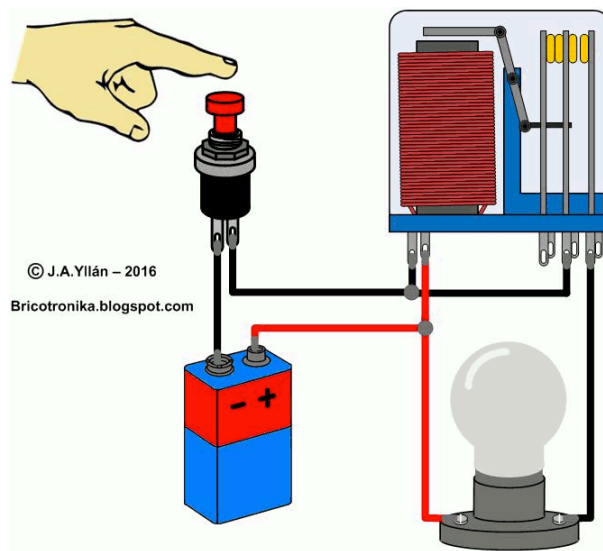


Figura 2.13: Relé: funcionamiento

Un tipo de relés cada vez más usados, son los relés de estado sólido, cuyo funcionamiento es idéntico al de los relés tradicionales, con la diferencia que en su interior lleva un circuito electrónico basado en semiconductores (un transistor o un tiristor) para abrir y cerrar los contactos de salida en lugar de una bobina.

2.2.2 Contactores

Este dispositivo electromecánico tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente controlándolo a distancia. Constructivamente son similares a los relés, aunque difieren en su aplicación, ya que los contactores se utilizan como interruptores electromagnéticos en la conexión y desconexión de circuitos de elevada tensión y potencia, y los relés manejan corrientes de poco valor.

Los contactores se usan en combinación con los relés, de manera que un relé puede activar y desactivar varios contactores, encargándose cada contactor de abrir y cerrar un circuito eléctrico. Por ejemplo, para alimentar un motor trifásico.

2.2.3 Relé magnetotérmico

Es un dispositivo utilizado para interrumpir la corriente eléctrica de un circuito cuando se sobrepase cierto valor umbral en la misma. Su funcionamiento se basa en el efecto térmico (por efecto Joule, parte de la energía cinética de los electrones que circulan por un conductor se transforma en calor debido a

los choques que sufren con los átomos del conductor, elevando la temperatura del mismo) y magnético producidos por la circulación de corriente en un circuito.

El dispositivo consta de dos partes, un electroimán y una lámina bimetálica, conectadas en serie y por las que circula la corriente que va hacia la carga. En una situación en la que el consumo del circuito va aumentando al conectar por ejemplo muchos aparatos, el relé magnetotérmico protege de sobrecarga mediante el efecto térmico. La lámina metálica se calienta y abre un conector que interrumpe el paso de corriente. En este caso, se protege al circuito de cierta corriente peligrosa que puede no superar el valor umbral establecido. El dispositivo también ofrece cierta protección frente a cortocircuito, que ocasiona un aumento rápido y elevado de corriente. Al circular una corriente por el electroimán superior a cierto nivel umbral, se abre el contacto y se interrumpe el paso de corriente. Además de la desconexión automática, es posible conectar y desconectar de manera manual.

Este dispositivo es común verlo en el cuadro eléctrico de cualquier hogar junto a un conjunto de diferenciales. Se muestra una imagen³ en la Fig. 2.14.

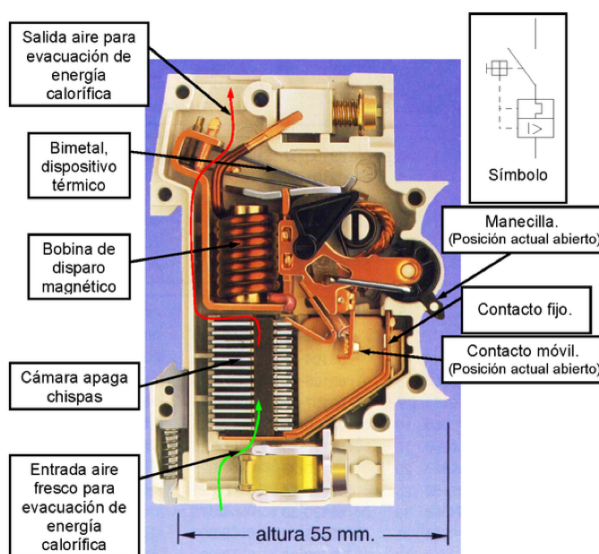


Figura 2.14: Relé magnetotérmico: partes

2.2.4 Interruptor diferencial

Es un dispositivo electromecánico de protección que actúa conjuntamente con la puesta a tierra de enchufes y masas metálicas de todo aparato eléctrico, para evitar daños a las personas si existe contacto con partes activas de la instalación o con elementos sometidos a cierto potencial.

La base del funcionamiento consiste en medir la intensidad de corriente que entra en un circuito y la que sale del mismo. Si la medición es distinta, significa que la intensidad de está perdiendo por algún sitio por derivación o defecto a tierra. El interruptor diferencial se desconectará el circuito en cuanto exista un defecto a tierra mayor que su sensibilidad. Para medir estas corrientes, el dispositivo dispone de dos bobinas al inicio y final de la instalación que generan un campo magnético opuesto que actúa accionando ciertos contactos para interrumpir la corriente.

2.2.5 Motores eléctricos

Los motores convierten energía eléctrica en mecánica para realizar un trabajo (se altera el estado de movimiento de un cuerpo) por medio de acción de campos magnéticos variables.

Las características generales de un motor son:

- **Rendimiento (η):** es el cociente entre la potencia útil que generan y la potencia absorbida, mide la capacidad que tiene el motor para convertir la energía eléctrica en energía mecánica.

³Figura tomada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Interruptor_magnetot%C3%A9rmico#/media/Archivo:SeccionMagnetotermico.png

- **Velocidad nominal (n)**: el número de revoluciones por minuto (rpm o RPM) a las que gira el motor.
- **Potencia (P)**: es el trabajo (fuerza aplicada a lo largo de una distancia) que el motor es capaz de realizar en la unidad de tiempo a una determinada velocidad de giro. Se mide normalmente en caballos de vapor (CV), siendo 1 CV igual a 736 vatios.
- **Par motor (M)**: es el momento de fuerza (producto vectorial del vector de posición del punto de aplicación de la fuerza y el vector fuerza que actúa sobre el eje del motor) y determina su giro. Se mide Newton-metro ($N \cdot m$).

El motor tiene dos partes diferenciadas:

- El **estator** o parte fija donde residen los polos magnéticos
- El **rotor** o parte móvil que gira dentro de un campo magnético

El motor incluye dos devanados:

- El **inductor** que crea el campo magnético
- El **inducido** que gira como consecuencia del campo magnético inductor (por inducción magnética, se origina una fuerza electromotriz en un cuerpo expuesto a un campo magnético variable, o bien en un cuerpo móvil respecto a un campo magnético estático no uniforme, de manera que la corriente debida a la f.e.m. inducida tiende a mantener el flujo).

De forma muy resumida, el principio de funcionamiento de los motores se basa en la Ley de Lorentz: cuando un conductor, por el que pasa una corriente eléctrica, se encuentra inmerso en un campo magnético, éste experimenta una fuerza, gobernada por la Ley de Lorentz, que es perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente, y su magnitud esta dada por:

$$F = B \cdot L \cdot I \cdot \text{sen}(\phi)$$

Siendo:

- F: Fuerza (newtons)
- I: Intensidad que recorre el conductor (amperios)
- L: Longitud del conductor (metros)
- B: Intensidad de campo magnético (teslas)
- ϕ : Ángulo que forma I con B (radianes)

Por lo tanto, se trata de conseguir un campo magnético o intensidad variable que haga que el rotor vaya girando. En los motores de corriente alterna esto se consigue directamente puesto que la corriente alterna directamente genera un campo magnético variable. En los motores de corriente continua esto se debe conseguir generando ese campo magnético variable a partir de corrientes continuas.

Veamos a continuación los tipos más utilizados.

2.2.5.1 Motor de corriente continua (con escobillas)

El motor de corriente continua, denominado también motor de corriente directa, motor CC o motor DC (por las iniciales en inglés direct current), es una máquina que convierte energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético⁴.

Un motor de corriente continua se compone, principalmente, de dos partes:

- El **estátor** da soporte mecánico al aparato y contiene los polos de la máquina, que pueden ser o bien devanados de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro o imanes permanentes. Produce un campo magnético constante.
- El **rotor** es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través de las delgas, que están en contacto alternante con escobillas fijas. Produce una corriente eléctrica fija, pero al girar las escobillas hacen que el sentido de la corriente vaya cambiando, lo que hace que el rotor vaya girando.

Su funcionamiento se muestra en la Fig. 2.15.

⁴Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_corriente_continua

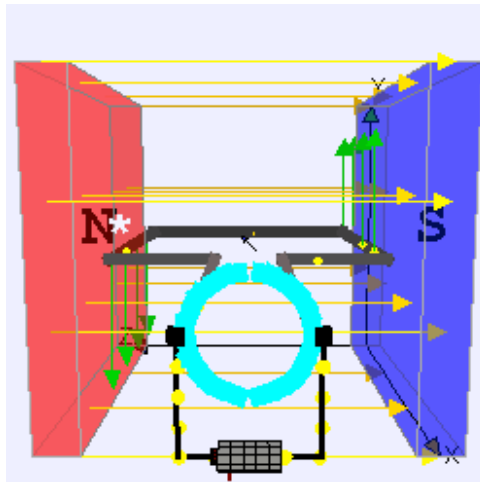


Figura 2.15: Funcionamiento de un motor de CC

El principal inconveniente de estas máquinas es el mantenimiento costoso y laborioso, debido principalmente al desgaste que sufren las escobillas al entrar en contacto con las delgas.

Algunas aplicaciones especiales de estos motores son: los motores lineales, cuando ejercen tracción sobre un riel, servomotores y motores paso a paso. Además, existen motores de CC sin escobillas (brushless en inglés) utilizados en el aeromodelismo por su bajo par motor y su gran velocidad.

Es posible controlar la velocidad y el par de estos motores utilizando técnicas de control de motores de corriente continua. Normalmente la velocidad se controla con la tensión. Y el sentido de giro mediante un circuito que se denomina “puente en H”, mostrado en la Fig. 2.16.

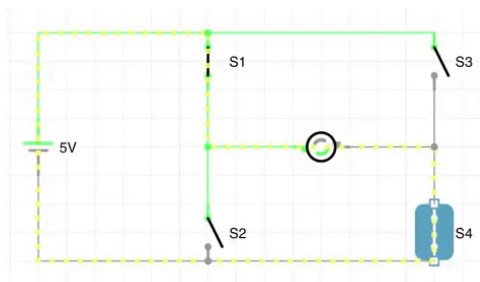


Figura 2.16: Control de un motor DC mediante un puente en H

Se puede apreciar como controlando los interruptores S1, S2, S3 y S4 se modifica el sentido de giro. Al activar S1 y S4 gira en un sentido y al activar S2 y S3 gira en el otro. Los interruptores pueden ser relés o transistores.

Más información en el siguiente video.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/embed/QXbmm8f5tus>

2.2.5.2 Motor de corriente continua sin escobillas

Un motor eléctrico sin escobillas o motor **brushless (BLDC)** es un motor eléctrico que no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor.

A diferencia del motor de corriente continua con escobillas, éste no tiene escobillas. El motor cuenta con tres enrollados de cable de cobre con conexión estrella, y dependiendo de cada tipo de motor, determinado número de polos. Comúnmente los polos de las bobinas se encuentran en el estator y a su alrededor un número de pequeños imanes acorde a las bobinas. Al activarse cada una de las bobinas o, mejor dicho, cada par de bobinas, se hace girar al rotor para generar movimiento mecánico. La activación de las bobinas debe hacerse en orden secuencial por una electrónica específica. Su funcionamiento se muestra en la Fig. 2.17.

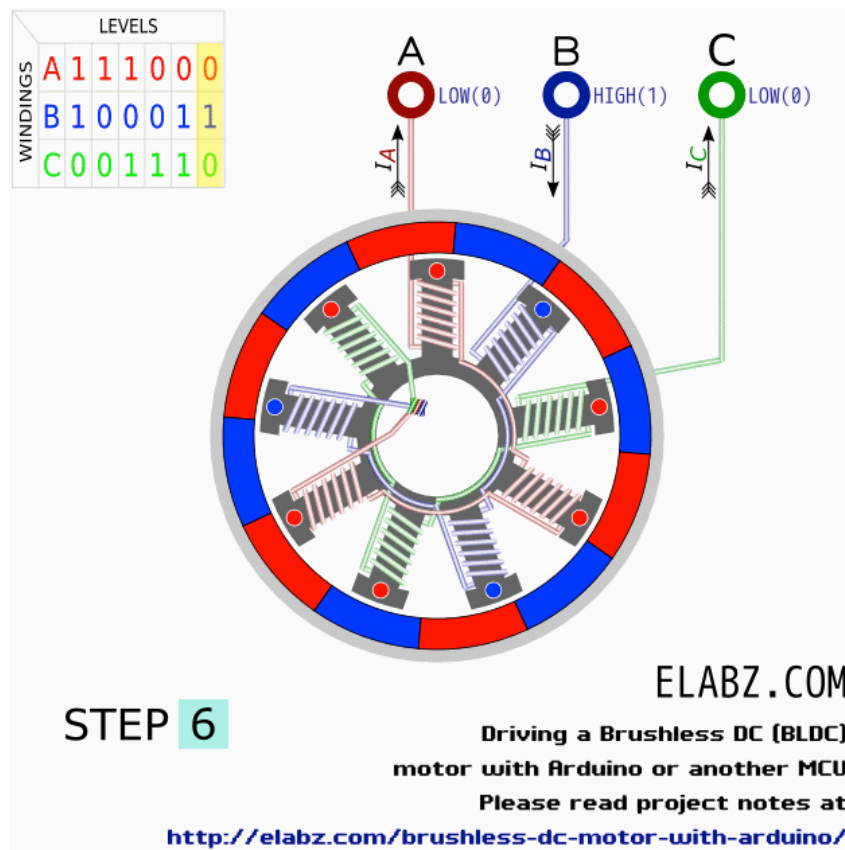


Figura 2.17: Funcionamiento de un motor brushless

Es ligeramente complicado controlar la velocidad de giro de este tipo de motor ya que es imposible hacer los cambios de conexiones entre las terminales de los embobinados a mano, es por ello que se utiliza un ESC (Controlador Electrónico de Velocidad, por sus siglas en inglés) para poder variar las velocidades de giro por medio de Modulación por ancho de pulsos ya sea suministrado por un microcontrolador o por un transmisor de control remoto.

Ejemplos de este tipo de motores son: lectores de CD-ROM, ventiladores de ordenador, drones, etc.

Los motores Brushless tienen muchas ventajas frente a los motores DC con escobillas y frente a los motores de inducción. Algunas de estas son:

- Mayor relación velocidad-par motor.
- Mayor respuesta dinámica.
- Mayor eficiencia.
- Mayor vida útil.
- Menos ruido.
- Mayor rango de velocidad.

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se pueden emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido.

Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). El principal impedimento en la implementación de este tipo de motor es el coste del mismo ya que tiende a ser más elevado que cualquier otro motor; el otro es el control del mismo, ya que como se mencionó, es imposible controlarlo manualmente por lo que necesita la ayuda electrónica para funcionar.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/embed/bCEi0nu0Dac>

El control de estos motores se realiza mediante un controlador específico. En la Fig. 2.18 se muestran dos: un ESC (Electronic speed control) de radiocontrol y un chip.

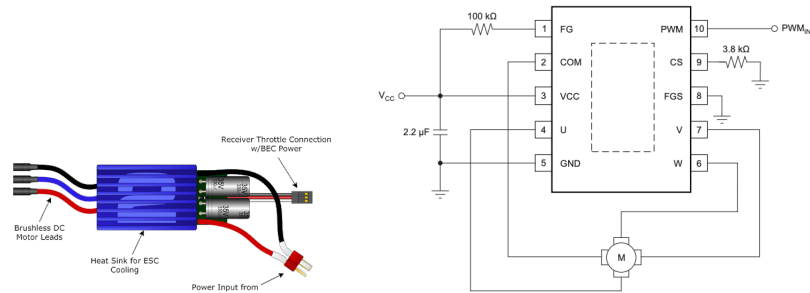


Figura 2.18: Controladores de BLDC: (izquierda) RC ESC (derecha) 3-phase sensorless motor driver

Además de alimentación y masa, tienen una entrada PWM⁵ (Throttle en el caso del ESC) para indicar la velocidad del motor y tres salidas para cada una de las fases del motor.

2.2.5.3 Motor paso a paso

El motor paso a paso (Stepper) es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control. Este motor presenta las ventajas de tener precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. Entre sus principales aplicaciones destacan las CNC, impresoras 3D, etc.

Su funcionamiento es parecido al de los motores de corriente continua sin escobillas, pero los paso a paso permiten un mayor control de posición. Los *brushless* se utilizan cuando el motor tiene que girar continuamente, y los *stepper* cuando el movimiento es discreto (a pasos).

El principio de funcionamiento está basado en un estator construido por varios bobinados (organizados en fases) en un material ferromagnético y un rotor que puede girar libremente en el estator. Estos diferentes bobinados son alimentados uno a continuación del otro y causan un determinado desplazamiento angular que se denomina “paso angular” y es la principal característica del motor.

Existen tres tipos de motores paso a paso:

- De reluctancia variable
- De imán permanente
- Híbrido

Todos tienen bobinas conectadas al estator, 2 o 3, normalmente, y se diferencian en el rotor. Los de imán permanente tienen un imán en el rotor. Los de reluctancia variable no tienen un imán en el rotor, pero el rotor está formado por un material ferromagnético que hace que se alinee con el campo creado por el estator. Los híbridos son una combinación de los otros dos.

Motores de reluctancia variable

Su funcionamiento se basa en la reluctancia variable, mediante un rotor dentado en hierro dulce, que tiende a alinearse con los polos bobinados del estator. Se pueden seguir pasos muy pequeños. El rotor es de material magnético, pero no es un imán permanente, y presenta una forma dentada, con salientes. El estator consiste en una serie de piezas polares conectadas a 3 fases. En todo momento, el rotor “buscará” alinearse de forma tal que minimice la reluctancia rotor-estator, circunstancia que se da cuando el espacio entre los polos del estator se encuentra ocupado por material del rotor, es decir, orientando los salientes o dientes hacia los polos energizados del estator (Fig. 2.19). Este tipo de motor puede diseñarse para funcionar con pasos más pequeños que los pasos de un motor paso a paso de imán permanente. Por otra parte, su rotor es de baja inercia, con lo que se mejora su respuesta dinámica, aunque tiene la desventaja de tener menor par motor que un motor eléctrico de imán permanente de similar tamaño⁶.

Para su control se necesitan 4 cables, uno para cada extremo de cada bobina y uno común al otro extremo de las tres bobinas.

Motores de imán permanente

⁵Más información sobre las señales PWM: https://es.wikipedia.org/wiki/Modulaci%C3%B3n_por_ancho_de_pulsos

⁶https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_de_reluctancia_variable

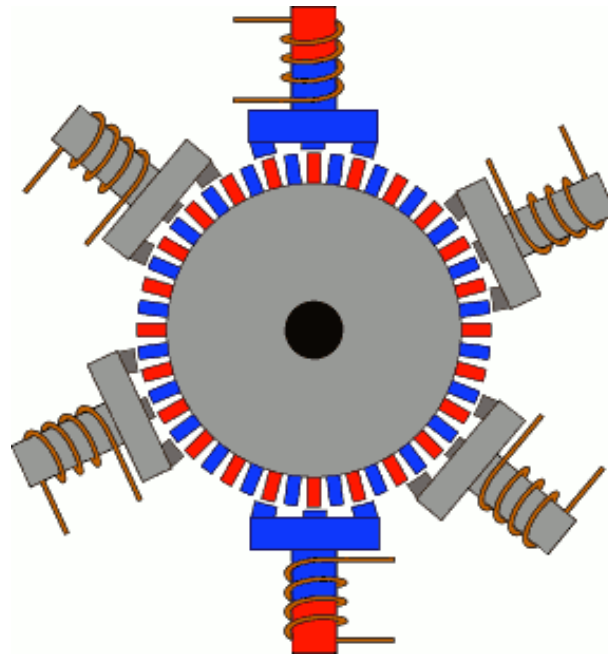
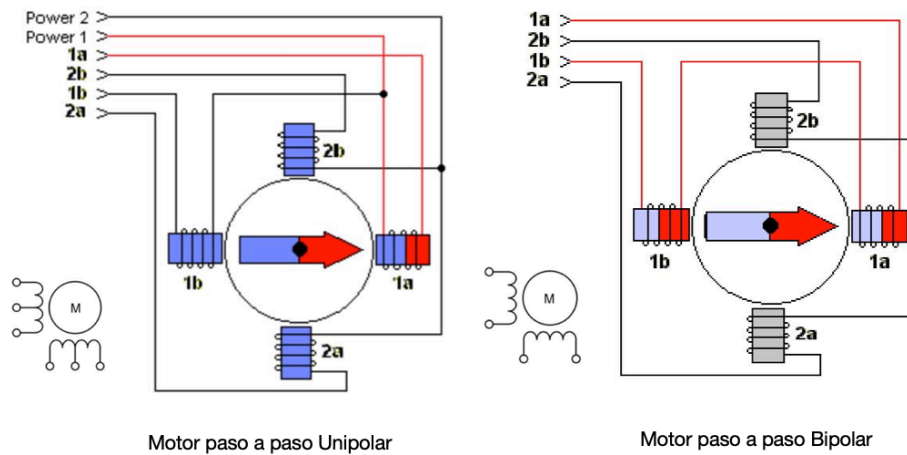


Figura 2.19: Motor paso a paso de reluctancia variable

Hay dos tipos principales, tal y como muestra la Fig. 2.20:

- Motores paso a paso unipolares: cada bobina solo tiene una polaridad, que puede estar activa o no. Las bobinas cuentan con un punto de conexión central además de los dos extremos. Estos motores suelen tener 5 o 6 cables (dependiendo de si las conexiones centrales están unidas o no).
- Motores paso a paso bipolares: cada bobina puede tener dos polaridades (N-S o S-N). Las bobinas sólo cuentan con conexiones en los dos extremos. Estos motores suelen tener 4 cables (2 por bobina).



Motor paso a paso Unipolar

Motor paso a paso Bipolar

Figura 2.20: Motor paso a paso de imán permanente: unipolar y bipolar

Imagen obtenida de ⁷.

Para el motor unipolar existen 3 secuencias de manejo⁸ (suponiendo que el punto común, en la imagen Power 1 y Power 2 están puestos a V+, ON significa poner a V- y OFF desconectar), las cuales se pueden apreciar en la Fig. 2.21:

- Secuencia normal: el motor siempre avanza un paso por vez debido a que siempre existen 2 bobinas

⁷<http://fabacademy.org/archives/2014/students/begle.moritz/week13.html>

⁸Obtenido de: <https://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

activadas. Con esta secuencia se obtiene un alto par de paso y retención.

Paso	1A	1B	2A	2B
1	ON	ON	OFF	OFF
2	OFF	ON	ON	OFF
3	OFF	OFF	ON	ON
4	ON	OFF	OFF	ON

- Secuencia Wave drive (paso completo): se activa solo una bobina por vez, lo que ocasiona que el eje del motor gire hacia la bobina activa. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave, pero el par de paso y retención es menor.

Paso	1A	1B	2A	2B
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	OFF	ON	OFF	OFF
3	OFF	OFF	ON	OFF
4	OFF	OFF	OFF	ON

- Secuencia medio paso: se activan las bobinas de tal manera que se combinan las secuencias anteriores. El resultado que se obtiene es un paso más corto (la mitad del paso de las secuencias anteriores). Primero se activan 2 bobinas y posteriormente solo 1 y así sucesivamente.

Paso	1A	1B	2A	2B
1	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	ON	OFF	OFF
3	OFF	ON	OFF	OFF
4	OFF	ON	ON	OFF
5	OFF	OFF	ON	OFF
6	OFF	OFF	ON	ON
7	OFF	OFF	OFF	ON
8	ON	OFF	OFF	ON

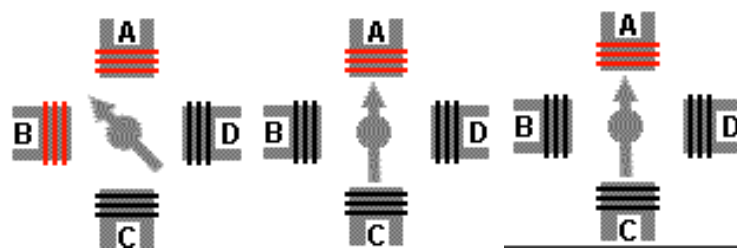


Figura 2.21: Motor paso a paso de imán permanente unipolar: (izquierda) Secuencia normal (centro) Secuencia paso completo (derecha) Secuencia medio paso

Los motores bipolares requieren de la inversión de la corriente que circula por sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de polaridad provoca el movimiento de el eje en un paso. El sentido de giro esta determinado por la secuencia seguida (Fig. 2.22).

Paso	A+	A-	B+	B-
1	V+	V-	V+	V-
2	V+	V-	V-	V+
3	V-	V+	V-	V+
4	V-	V+	V+	V-

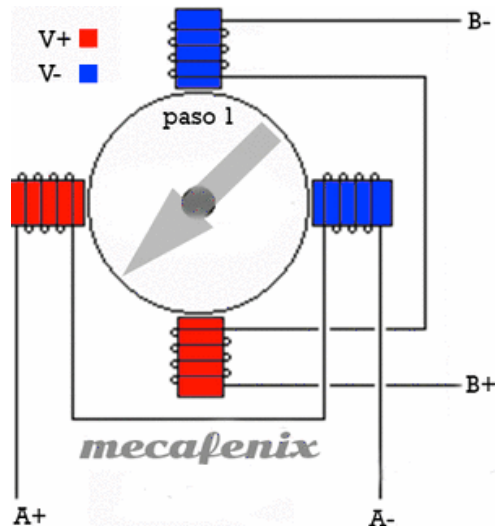


Figura 2.22: Motor paso a paso de imán permanente bipolar: secuencia de movimiento

El control de los motores paso a paso se realiza mediante un controlador, al igual que en los motores DC sin escobillas. Un ejemplo de controlador se muestra en la Fig.2.23⁹. En este caso para el control no se utiliza una señal PWM, si no una entrada digital ('STEP' en la figura): cada flanco de subida provoca el movimiento de un paso del motor. La DIR nos permite elegir el sentido de giro. Las salidas que controlan las fases del motor son las señales 1A, 1B, 2A y 2B.

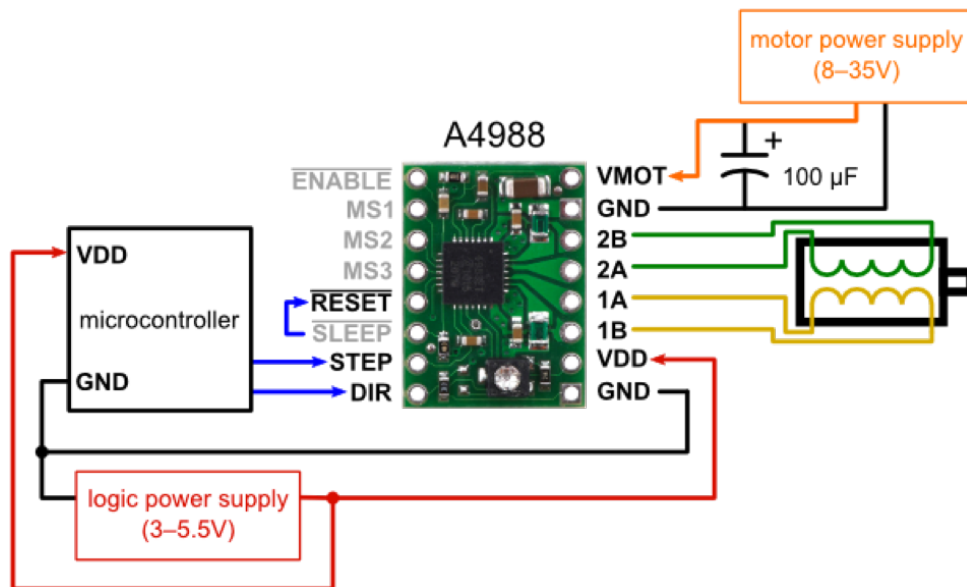


Figura 2.23: Controlados de motor paso a paso bipolar

En el siguiente video se describen con detalle los motores paso a paso:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/embed/Qc8zcst2b1U>

2.2.5.4 Motor Brushless vs Stepper

Las diferencias técnicas entre un **motor sin escobillas (BLDC)** y un **motor paso a paso (Stepper)** se pueden analizar en varios aspectos clave:

En cuanto a construcción y principio de funcionamiento:

⁹Referencia: <https://www.pololu.com/product/1182>

Característica	Motor Brushless (BLDC)	Motor Paso a Paso (Stepper)
Rotor	Imán permanente	Imán permanente o reluctancia variable
Estator	Bobinas en 3 fases (o más)	Bobinas organizadas en múltiples fases (habitualmente 2 o 5)
Conmutación	Electrónica (controlador externo)	Secuencial, por el controlador (driver)
Movimiento	Continuo y suave	Discreto, por pasos fijos

En cuanto a control y alimentación:

Característica	Motor Brushless (BLDC)	Motor Paso a Paso (Stepper)
Controlador necesario	Controlador de velocidad/tensión con sensores o sensorless	Controlador de pulsos (step y direction)
Control de posición	Necesita encoders o sensores Hall	Control intrínseco (sin sensores)
Modo de operación	Control por modulación de ancho de pulso (PWM)	Control por pulsos discretos
Tensión típica de alimentación	12V - 48V (o más en motores industriales)	5V - 24V (dependiendo del tamaño)
Corriente	Variable según carga y velocidad	Fija incluso en reposo (salvo que se use control de corriente)

En cuanto a características de rendimiento:

Característica	Motor Brushless (BLDC)	Motor Paso a Paso (Stepper)
Eficiencia	Alta (poca disipación de calor)	Baja (consume energía incluso en reposo)
Par a altas velocidades	Alto y constante	Disminuye considerablemente
Par a bajas velocidades	Medio-alto (depende del control)	Alto (buen par en reposo)
Velocidad máxima	Alta (>10,000 RPM)	Baja (<1,500 RPM)
Resolución de movimiento	Controlado por encoder/sensores	Depende de los pasos por vuelta (ej. 200 pasos = 1.8° por paso)

En cuanto aplicaciones típicas:

Aplicación	Motor Brushless (BLDC)	Motor Paso a Paso (Stepper)
Drones y ventiladores	Sí (alta eficiencia y velocidad)	No (no adecuado para alta velocidad)
Robótica y automatización	Sí (cuando se necesita control de par y velocidad)	Sí (cuando se necesita control preciso de posición)
Impresoras 3D y CNC	No (difícil de controlar sin sensores)	Sí (movimiento por pasos y precisión sin retroalimentación)
Automoción (autos eléctricos, bicicletas, etc.)	Sí (bajo mantenimiento, alta eficiencia)	No (no adecuado para altas velocidades y eficiencia)

Resumen técnico:

1. **Movimiento:**

- BLDC → Movimiento suave y continuo.
- Stepper → Movimiento en pasos discretos.

2. **Control:**

- BLDC → Necesita sensores o un encoder para control preciso de posición.
- Stepper → No necesita sensores, ya que el movimiento es por pasos fijos.

3. **Velocidad y Par:**

- BLDC → Mejor a altas velocidades, mantiene par.
- Stepper → Pierde par a altas velocidades, pero es fuerte a bajas velocidades.

4. **Eficiencia:**

- BLDC → Alta (consume solo lo necesario según carga).
- Stepper → Baja (consume energía incluso cuando está detenido).

¿Cuál necesitas?

- Si buscas **velocidad y eficiencia**, usa un **BLDC**.
- Si buscas **precisión de posición sin sensores**, usa un **Stepper**.

2.2.5.5 Motor de corriente alterna asíncrono (inducción)

El motor asíncrono, motor asincrónico o motor de inducción es un motor eléctrico de corriente alterna, en el cual su rotor gira a una velocidad diferente a la del campo magnético del estator.

El motor asíncrono trifásico está formado por un **rotor**, que puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o bobinado, y un **estator**, en el que se encuentran las bobinas inductoras. Estas bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio. Ver Fig. 2.24¹⁰

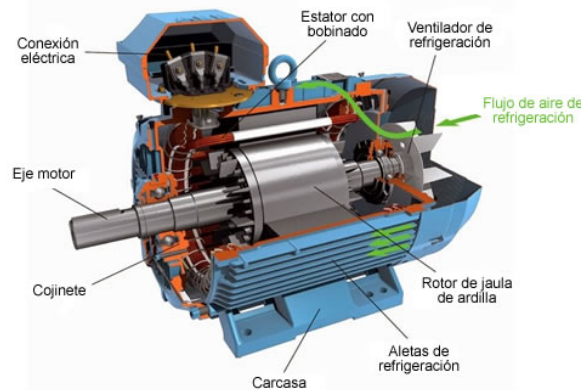


Figura 2.24: Motor de inducción

El motor asincrónico funciona según el principio de inducción mutua de Faraday. Al aplicar corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras, se produce un campo magnético rotatorio, cuya frecuencia será igual a la de la corriente alterna con la que se alimenta al motor. Este campo, al girar alrededor del rotor en estado de reposo, inducirá unas tensiones eléctricas que generará unas corrientes en el mismo. Estas corrientes producirán, a su vez, un campo magnético que seguirá el movimiento del campo estatórico, produciendo un par motor que hace que el rotor gire (principio de inducción mutua). No obstante, como la inducción en el rotor sólo se produce si hay una diferencia en las velocidades relativas del campo estatórico y el rotórico, la velocidad del rotor nunca alcanza a la del campo rotante. De lo contrario, si ambas velocidades fuesen iguales, no habría inducción y el rotor no produciría par. A esta diferencia de velocidad se la denomina “deslizamiento”

¹⁰Tomada de: http://www.aficionadosalamecanica.com/coche-electrico_control.htm

Los motores de inducción de CA se encuentran entre los más sencillos de controlar. Esto se debe a que solo requieren una conexión de 3 cables para funcionar en su modo más básico (sistema relé contactores para abrir o cerrar las tres fases a la vez). Se puede lograr un control más eficiente utilizando algoritmos avanzados, como Field Oriented Control (FOC).

Se puede encontrar información sobre este tipo de motor en el siguiente vídeo:

Visita la siguiente URL: https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o

2.2.5.6 Motor de corriente alterna síncrono

Los motores síncronos son un tipo de motor de corriente alterna en el que la rotación del eje está sincronizada con la frecuencia de la corriente de alimentación; el período de rotación es exactamente igual a un número entero de ciclos de CA. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectado y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como “velocidad de sincronismo”. Este tipo de motor contiene electroimanes en el estátor del motor que crean un campo magnético que rota en el tiempo a esta velocidad de sincronismo.

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p}$$

donde:

- f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)
- P: Número de pares de polos que tiene la máquina
- p: Número de polos que tiene la máquina
- n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto)

Se puede encontrar información sobre este tipo de motor en el siguiente vídeo:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Vk2jDXxZIhs>

2.2.5.7 Motor asíncrono (inducción) vs síncrono

Los **motores síncronos** y **motores asíncronos (o de inducción)** son dos tipos de motores eléctricos de corriente alterna (AC) con diferencias clave en su funcionamiento y aplicaciones.

Diferencias Fundamentales

Característica	Motor Síncrono	Motor Asíncrono (Inducción)
Funcionamiento	El rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator.	El rotor gira a una velocidad ligeramente menor que el campo magnético del estator (deslizamiento).
Fuente de energía	Puede ser alimentado por corriente alterna (AC) y necesitar un sistema de excitación.	Funciona solo con corriente alterna (AC).
Deslizamiento	No tiene (velocidad = velocidad de sincronismo).	Tiene deslizamiento (velocidad menor que la de sincronismo).
Tipo de rotor	Rotor con imanes permanentes o devanados alimentados por corriente continua.	Rotor de jaula de ardilla o rotor bobinado.
Arranque	Requiere un sistema de arranque externo (inversor, variador de frecuencia o motor auxiliar).	Puede arrancar directamente al conectarse a la red eléctrica.
Eficiencia	Alta (menores pérdidas por deslizamiento).	Menor que un síncrono debido a pérdidas por deslizamiento.

Principio de Funcionamiento

Motor Síncrono

- El campo magnético del estator gira a la misma velocidad que el rotor.
- No hay diferencia de velocidad (deslizamiento = 0%).
- Puede usar **imanes permanentes** (PMSM) o **excitación eléctrica** (síncrono con rotor bobinado).
- Requiere un sistema de arranque porque no puede arrancar solo desde cero.

Motor Asíncrono (Inducción)

- El campo magnético del estator gira más rápido que el rotor.
- El rotor obtiene corriente inducida debido a la diferencia de velocidad (deslizamiento $\neq 0\%$).
- No necesita un sistema de excitación, funciona solo con AC.
- Puede arrancar sin controladores externos.

Características de Rendimiento

Característica	Motor Síncrono	Motor Asíncrono (Inducción)
Velocidad	Constante, independiente de la carga.	Varía con la carga (por el deslizamiento).
Par de arranque	Bajo (necesita un sistema externo para arrancar).	Alto (arranque directo de la red).
Eficiencia	Alta, sin pérdidas por deslizamiento.	Menor debido a pérdidas en el rotor.
Mantenimiento	Bajo si es con imanes permanentes, alto si usa rotor bobinado.	Muy bajo en motores de jaula de ardilla.

Aplicaciones Típicas

Aplicación	Motor Síncrono	Motor Asíncrono (Inducción)
Trenes, metro, vehículos eléctricos	Sí (alta eficiencia y control preciso).	No (el deslizamiento afecta el control de velocidad).
Industria (bombas, ventiladores, compresores)	Sí (cuando se busca eficiencia).	Sí (cuando se busca facilidad de uso y bajo costo).
Electrodomésticos (neveras, lavadoras, ventiladores)	No (demasiado complejo y costoso).	Sí (económico y fácil de usar).
Aeronáutica y generación eólica	Sí (precisión y estabilidad de velocidad).	No (necesitan control preciso de velocidad).

¿Cuál elegiría?

- Si necesitas **velocidad constante y alta eficiencia** → **Motor síncrono**.
- Si buscas **facilidad de uso y bajo costo** → **Motor asíncrono (inducción)**.

Ejemplo.- Un tren de alta velocidad usa motores síncronos para mantener una velocidad constante sin perder eficiencia. En cambio, una bomba industrial puede usar un motor asíncrono porque es más barato y robusto.

2.2.5.8 Servomotores

Un servomotor es un tipo de **motor eléctrico diseñado para proporcionar control preciso de posición, velocidad y par**. Se usa en aplicaciones que requieren alta precisión y respuesta dinámica, como robótica, automatización industrial y CNC. Utiliza retroalimentación de posición para controlar su movimiento y posición final. La entrada a su control es una señal (ya sea analógica o digital) que representa la posición ordenada para el eje de salida.

El motor está emparejado con algún tipo de codificador de posición para proporcionar retroalimentación de posición y velocidad. En el caso más simple, solo se mide la posición. La posición medida de la salida se compara con la posición del comando, la entrada externa al controlador. Si la posición de salida difiere de

la requerida, se genera una señal de error que luego hace que el motor gire en cualquier dirección, según sea necesario para llevar el eje de salida a la posición adecuada. A medida que se acercan las posiciones, la señal de error se reduce a cero y el motor se detiene.

Características Principales

Característica	Servomotor
Tipo de motor	Puede ser de corriente continua (DC) o alterna (AC), y puede ser brushless o con escobillas .
Control	Se controla mediante una señal de realimentación (feedback) para ajustar la posición o velocidad.
Sensores	Usa encoders, resolvers o potenciómetros para conocer su posición en tiempo real.
Precisión	Muy alta, permite movimientos controlados con exactitud.
Eficiencia	Alta, ya que el controlador ajusta la energía según la necesidad.
Par	Se mantiene constante en un rango amplio de velocidades.
Sistema de control	Usa un PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para regular el movimiento.

Partes de un Servomotor

1. **Motor:** Puede ser **DC** o **AC**, con escobillas o sin escobillas (BLDC).
2. **Sistema de retroalimentación:** Usa **encoder óptico, resolver o potenciómetro** para medir la posición.
3. **Controlador:** Regula la corriente y ajusta la velocidad y posición.
4. **Reductor (Opcional):** Algunos servomotores incluyen una caja de engranajes para mejorar el par

Tipos de Servomotores

Tipo	Descripción	Aplicaciones
Servomotor DC	Usa un motor DC con escobillas y un potenciómetro para feedback.	Modelismo, robótica educativa.
Servomotor AC	Usa un motor AC (brushless) con encoder. Más eficiente y potente.	Industria, robótica avanzada.
Servomotor paso a paso (híbrido)	Un motor paso a paso con retroalimentación.	Impresoras 3D, CNC.

Diferencias con Otros Motores

Característica	Servomotor	Motor Paso a Paso	Motor Brushless (BLDC)
Control	Bucle cerrado (con sensores)	Bucle abierto (sin sensores)	Bucle abierto o cerrado
Precisión	Alta (corrige errores)	Media (puede perder pasos)	Alta (con encoder)
Par	Alto y constante	Alto a bajas velocidades	Alto y eficiente
Velocidad	Amplio rango	Baja	Muy alta

Aplicaciones del Servomotor

Robótica: Brazo robótico, manipuladores.

CNC: Máquinas de fresado y corte láser.

Automatización industrial: Cintas transportadoras precisas.

Vehículos eléctricos: Dirección asistida, sistemas de frenos ABS.

Drones y cámaras: Gimbals de estabilización.

Resumen

- Un servomotor es un motor con control preciso de posición y velocidad, que usa un sensor para corregir errores.
- Es ideal para aplicaciones que requieren movimientos exactos y repetibles.

Se puede encontrar información sobre este tipo de motor en el siguiente vídeo:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ORl1yhwm1Q>

2.3 Actuadores neumáticos

El principal motivo por el que la tecnología neumática está tan extendida en los sistemas industriales es por la facilidad y bajo precio que requiere la instalación una vez existe la línea de alimentación de aire comprimido. Las características más importantes de la tecnología son:

- Permite transportar y almacenar fácilmente la potencia mecánica.
- No necesita circuito de retorno ya que la salida puede expulsarse al aire directamente
- Es limpio y no contamina
- No es muy sensible a la temperatura y es antideflagrante
- La fuerza que es capaz de desarrollar es limitada (depende de la presión y el caudal entre otras cosas)
- El hecho de que el fluido sea comprensible limita la calidad de los movimientos realizables

2.3.1 Conceptos físicos básicos

El fluido de trabajo es básicamente aire (Nitrógeno, Oxígeno y otros gases) comprimido (presión superior a presión atmosférica) por la reducción de volumen del aire mediante un compresor. Cuando el aire se comprime almacena energía. Cuando se libera el aire comprimido, se utiliza para realizar trabajo en el recipiente a ocupar.

La relación entre volumen y presión viene dada por la ley de los gases perfectos: $pV = nRT$, siendo:

- p: presión absoluta
- V: volumen
- n: número de moles
- R: constante universal de los gases ideales
- T: temperatura absoluta

De aquí se obtiene que, a temperatura constante, el producto PV también lo es.

Presión es la fuerza que se ejerce por unidad de superficie, y se distingue:

- La presión absoluta es la presión de un punto con referencia al vacío o cero perfecto.
- La presión atmosférica (100KPa a nivel del mar) es la presión ejercida por el aire que rodea la tierra. Se mide con barómetro.
- La presión relativa es la diferencia entre absoluta y atmosférica. Se mide con manómetro. Esta presión se utiliza en hidráulica y neumática.

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 (atm), 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 neumática se basa en la diferencia de presiones del aire de la atmósfera y el aire comprimido en el circuito. Esta diferencia de presión, se traduce en una fuerza superficial que puede ser aprovechada mediante un conveniente diseño mecánico para generar movimiento.

Uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de diseño del circuito neumático 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 aire del circuito y el atmosférico:

$$P = F \cdot v = p \cdot Q$$

$$F \cdot v = F \cdot \frac{d}{t} = \frac{W}{t}$$

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A \cdot d}{t} = A \cdot v$$

siendo:

- P: potencia
- p: presión
- F: fuerza
- Q: caudal de aire
- v: velocidad
- W: trabajo
- A: sección
- V: volumen
- t: tiempo

La velocidad que podrá desarrollar un émbolo no depende directamente de la presión, sino del caudal de fluido a presión que el sistema es capaz de suministrar. La potencia desarrollada por un émbolo de área efectiva A, sobre el que se le aplica una presión efectiva P con un caudal Q será:

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

2.3.2 Sistema de producción y distribución de aire comprimido

El aire atmosférico se comprime hasta elevar la presión, típicamente 6 bares, y se distribuye hasta los elementos actuadores donde se expande (disminuye su presión) y genera movimiento. El compresor absorbe aire del ambiente y reduce su volumen mediante:

- Compresores volumétricos (reduce volumen de aire)
- Compresor tubo compresor (transforma velocidad en presión)

Para evitar que las partículas sólidas y de vapor de agua que acompañan al aire atmosférico dañen 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 se muestra en la Fig. 2.25.

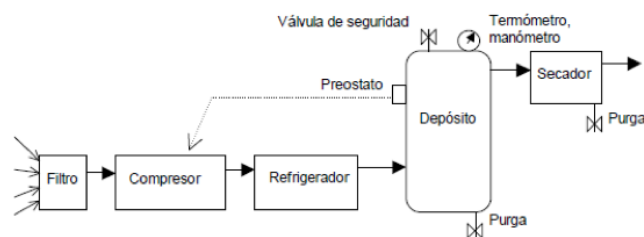


Figura 2.25: Sistema de producción neumático

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. 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.

La humedad origina la oxidación de las partes metálicas y provoca una merma en la lubricación. 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 presostato 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 virtudes 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.

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 lubricación en las piezas móviles presenta ciertas ventajas como reducción del desgaste, disminución de las pérdidas por rozamiento, protección contra la corrosión...

La Fig. 2.26 muestra una unidad de mantenimiento típica:

La unidad de mantenimiento sirve para mantener constante la presión de trabajo ya que compensa automáticamente el volumen de aire requerido. También sirve como válvula de seguridad.

La unidad de mantenimiento provee de aire comprimido a los dispositivos de la parte operativa de la instalación neumática, entre los que se encuentran:

- Preactuadores o preaccionadores: válvulas neumáticas, controlan el paso de fluido a los elementos de trabajo.

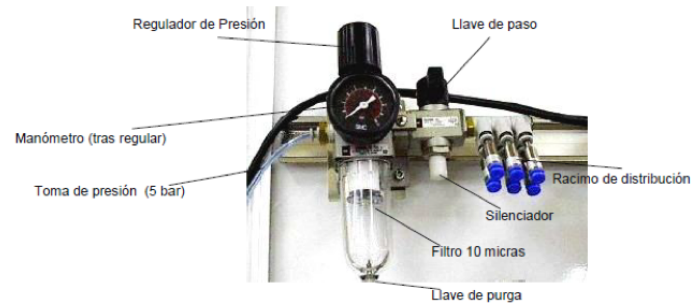


Figura 2.26: Unidad de mantenimiento neumática

- Actuadores o accionadores: 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.

Además, existen ciertos elementos auxiliares, como silenciadores, reguladores de caudal, antirretornos, etc.

Esta sección ha sido cedida parcialmente por [6].

2.3.3 Cilindros neumáticos

Los actuadores más frecuentes son los siguientes, tal y como muestra la Fig. 2.27:

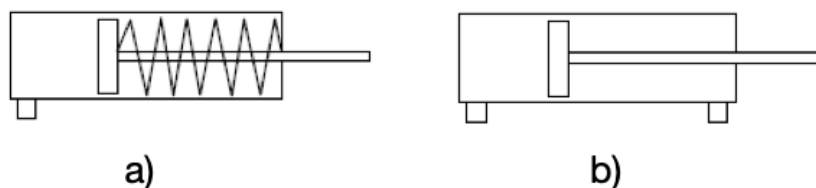


Figura 2.27: Cilindros neumáticos: (a) Simple Efecto (b) Doble Efecto

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 Fig. 2.27 (a) muestra la representación de estos cilindros con una sola toma por la que se produce tanto la admisión como el escape.

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/embed/G8dL-VPVhjs>

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 se muestra en la Fig. 2.27 (b), en donde se aprecia la toma de aire tanto a un lado del émbolo como al otro. La Fig. 2.28 muestra una animación del cilindro de doble efecto.

2.3.4 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.

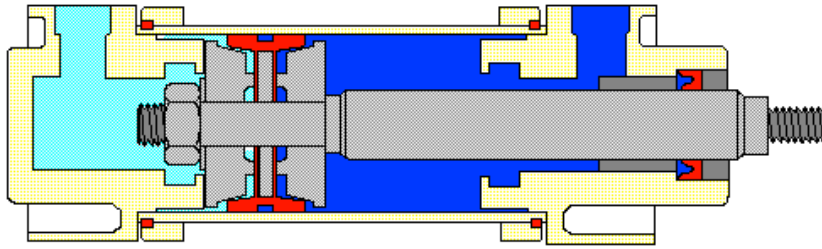


Figura 2.28: Cilindro neumático de doble efecto

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. En la Fig. 2.29 se muestra una animación de la válvula 5/2.

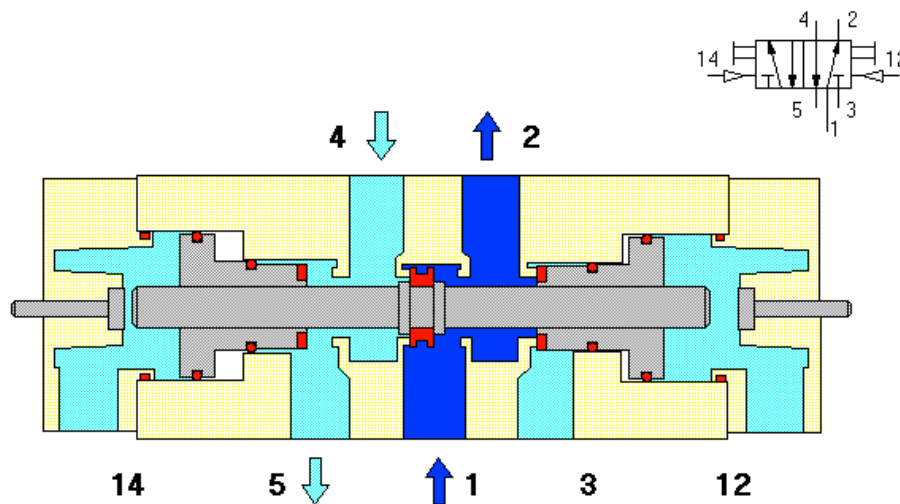


Figura 2.29: Válvula 5/2

Se puede apreciar el funcionamiento en el siguiente video (min 1:38):

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/embed/hmz1h5fk2bI>

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.
- Las vías conectadas son las correspondientes al estado de reposo y el paso entre posiciones viene dado por diferentes elementos de mando, cuya naturaleza puede ser mecánica, eléctrica, magnética o neumática

- En los extremos de las válvulas se representa el tipo de mando asociado al movimiento de los cuadros (posiciones), tal y como muestra la figura 2.30.

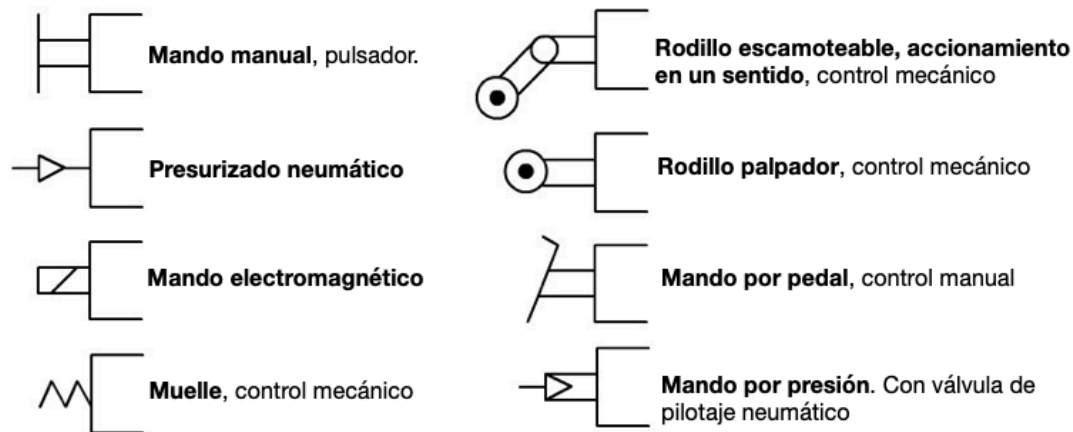


Figura 2.30: Válvulas: Elementos de mando

En la Fig. 2.31 se muestran las representaciones de diferentes tipos de electroválvulas atendiendo a su número de vías y posiciones:

- Válvula 2/2: Se utiliza para abrir o cerrar el paso de aire a una zona del circuito. Si se desea controlar un cilindro de simple efecto harían falta dos de estas válvulas funcionando de forma complementaria.
- Válvula 3/2: Se utiliza para el mando de cilindros de simple efecto.
- Válvula 5/2: Es de las válvulas más frecuentes puesto que su aplicación habitual es el control de cilindros de doble efecto.
- 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.
- Válvulas 4/3¹¹ y 5/3: Similar a las válvulas 4/2 y 5/2, pero con una posición intermedia de reposo en la que todas las vías son bloqueadas.

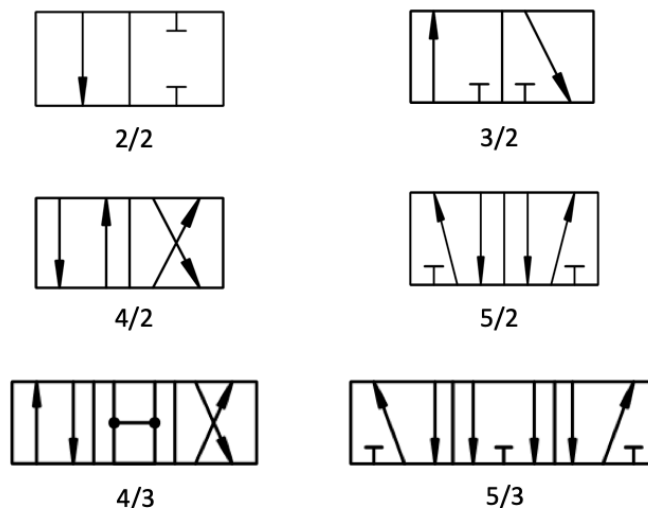


Figura 2.31: Tipo de válvulas atendiendo al número de vías y posiciones (leyenda: vías/posiciones)

Las válvulas mostradas en el Fig.2.31 pueden ser accionadas de la forma mostrada en la Fig. 2.30. De esta manera podemos tener válvulas 3/2 accionadas de forma electromagnética o mediante muelles.

¹¹Más información: <https://www.youtube.com/watch?v=08nqcMJt2h4>

Las válvulas también pueden actuar como sensores. Por ejemplo, una válvula, accionada mediante rodillo, puede actuar como sensor de fin de carrera. Por ejemplo, al expandirse o contraerse un cilindro, presionaría sobre el rodillo, activando la válvula.

En la Fig. 2.32 se muestran algunos ejemplos de válvulas reales.

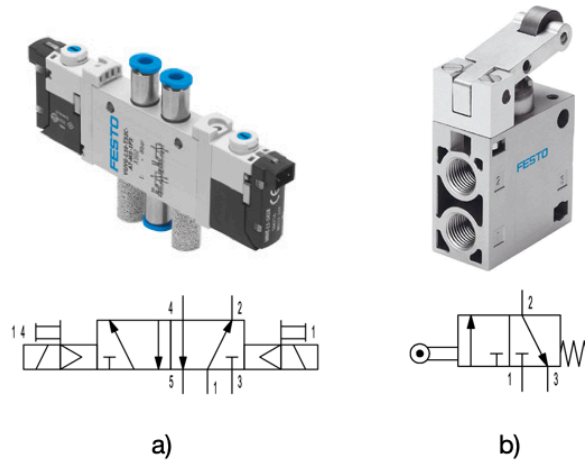


Figura 2.32: Ejemplo de válvulas reales: (a) Electroválvula biestable de 5/2 vías, accionamiento en ambos lados con bobina (b) Válvula de 3/2 vías, accionamiento por rodillo, reposición por muelle

Las distintas vías de las válvulas siguen distintas nomenclaturas, entre las que se encuentran la DIN 24300 y la CETOP (Comité Europeo de fluidos). Los símbolos para “Fuente de presión” y “Escape de aire” se muestran en la Fig. 2.33.

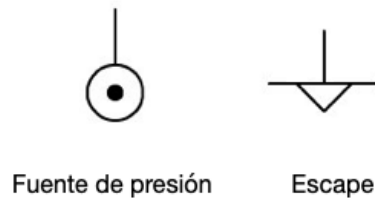


Figura 2.33: Símbolos: Fuente de presión y Escape de aire

2.3.4.1 Sistemas monoestables y biestables

Atendiendo a sus posiciones, las válvulas pueden ser monoestables o biestables¹²:

- Válvulas **monoestables**. Son aquellas que tienen una posición de reposo estable, que es en la que permanecerá la válvula de forma indefinida si no actúa sobre ella el dispositivo de mando. El regreso a la posición de reposo suele realizarse con un muelle; así en el caso de válvula monoestable de dos posiciones, la posición estable será la correspondiente al muelle, que por convenio suele situarse a la derecha. En el caso de tres posiciones la posición estable es la central.
- Válvulas **biestables**. Son aquellas que no tienen una única posición de reposo estable. Es decir, que, aunque se anule la señal que provocó la posición en la que se encuentra, la válvula seguirá en esa misma posición hasta que se active la señal correspondiente a una nueva posición. El dispositivo de mando y la forma en que se activa cada posición en la válvula se representa simbólicamente añadiendo en la parte lateral del cuadrado el símbolo del accionamiento correspondiente (ver Fig. 2.30).

¹²Tomado de: <http://jgvaldemora.org/blog/tecnologia/wp-content/uploads/2011/03/apuntes-de-circuitos-neum%C3%A1ticos-completo-9-10.pdf>

En la Fig. 2.34 se muestra un ejemplo de sistemas monoestables y biestables.

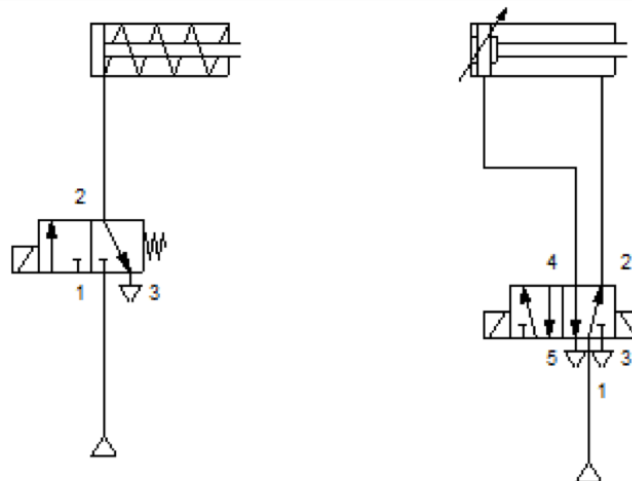


Figura 2.34: (Izquierda) Sistema monoestable: válvula de 3/2 vías, accionamiento por bobina, reposición por muelle (Derecha) Sistema biestable: válvula de 5/2 vías, accionamiento por bobina.

2.3.5 Control de sistemas neumáticos

Se puede controlar el ciclo expansión/compresión de un **cilindro de simple efecto** con una válvula 3/2, como se aprecia en la Fig. 2.35¹³

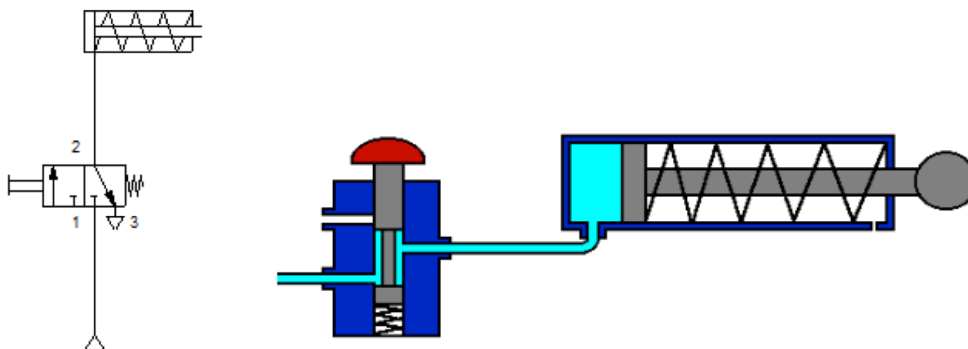


Figura 2.35: Cilindro neumático de doble efecto y válvula 3/2

Se puede controlar el ciclo expansión/compresión de un **cilindro de doble efecto** con una válvula 5/2 o 4/2, como muestra la Fig. 2.36.

Se pueden realizar **funciones lógicas** combinando válvulas y usando válvulas especiales como la de simultaneidad y la selectora. A modo de ejemplo, en la Fig. 2.37 se implementa una función AND con válvulas 3/2.

2.3.6 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 el siguiente vídeo se muestra un ejemplo de motores neumáticos:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=54u3H69tcgM>

¹³Fuente: <http://palseas.freecluster.eu/Elementos.neumaticos.htm>

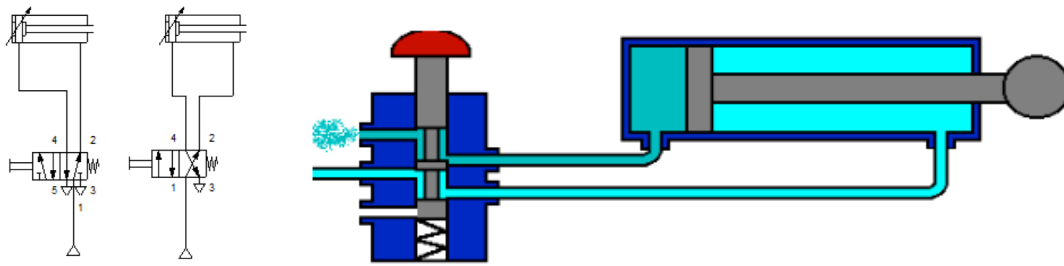


Figura 2.36: Cilindro neumático de doble efecto y válvulas 4/2 y 5/2

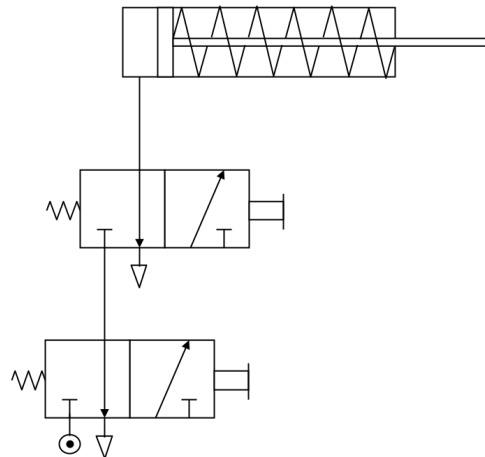


Figura 2.37: Implementación de la función lógica AND mediante válvulas neumáticas 3/2 monostables de accionamiento manual

2.4 Ejercicios

EJERCICIO 1

Dado el circuito neumático de la Fig. 2.38, calcular el ciclo de trabajo desde que se pulsa 'P'. Es decir, indicar la secuencia de acciones que tienen lugar en las válvulas y cilindros implicados.

Solucion

AL pulsar 'P' se produce el siguiente proceso: expansión de A, expansión de B, compresión de A y compresión de B. En más detalle:

- En reposo están activos los sensores A0 y B0. A0 mantiene la válvula V4 en la posición izquierda.
- La pulsación de 'P' provocará un cambio en la válvula V1, lo que a su vez modificará la válvula V5 y consecuentemente la expansión del cilindro A.
- Esto desactivará el sensor A0, liberando la válvula V4 pero sin modificar V6
- Cuando se haya expandido A se activará el sensor A1, lo que modificará la válvula V3 y a su vez V6, expandiéndose ahora el cilindro B.
- Nos quedaremos en esta posición hasta que soltemos 'P'.
- La expansión de B activará el sensor B1, lo que modificará la válvula V2, luego V5 y provocará la compresión del cilindro A.
- La compresión de A implica la desactivación de A1 y por tanto la válvula V3, pero sin modificar V6.
- Cuando se haya comprimido A se activará el sensor A0, lo que modificará la válvula V4, luego V6 y el cilindro B se comprimirá.
- Esto provocará que se desactive B1 y pasaremos al estado inicial.

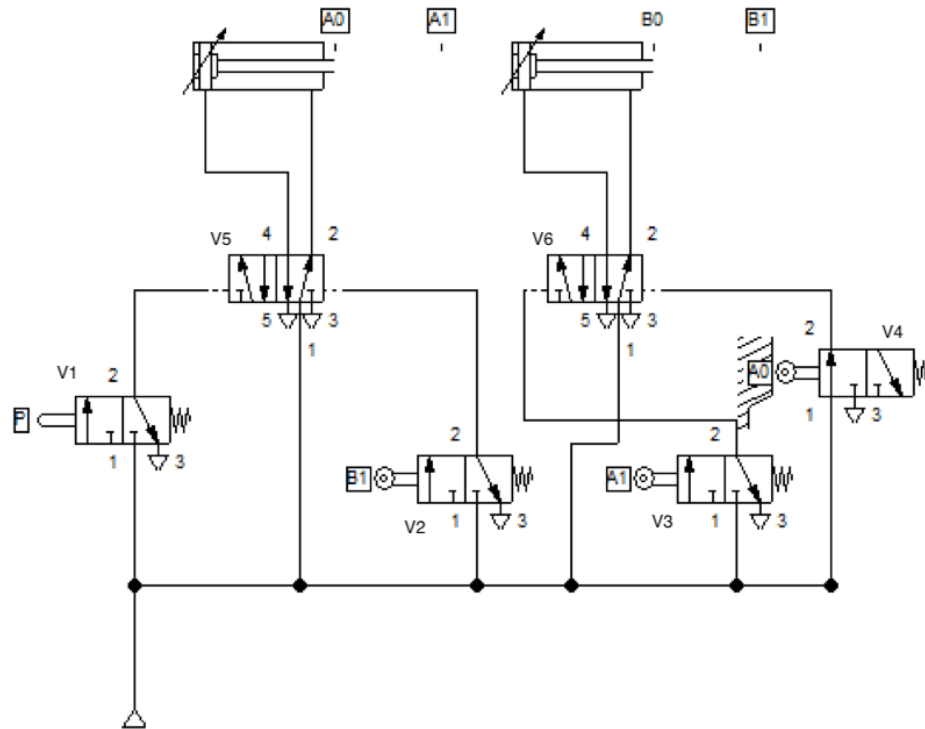


Figura 2.38: Ejercicio 1

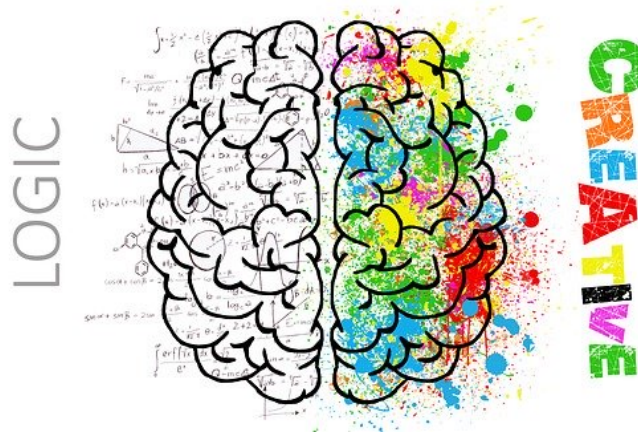
2.5 Autoevaluación

Responde a las siguientes cuestiones y presiona el botón de “Ver Resultados” para ver tu puntuación:

Capítulo 3

Fundamentos lógicos

En este capítulo se describen los fundamentos lógicos que se utilizarán a lo largo del libro. Están basados en el álgebra de Boole. Se introducirán los conceptos que se utilizarán posteriormente en los sistemas combinacionales y secuenciales.



3.1 Álgebra de Boole

Se denomina así en honor a George Boole (1815-1864), matemático inglés autodidacta, que fue el primero en definirla como parte de un sistema lógico, inicialmente en un pequeño folleto: *The Mathematical Analysis of Logic*, publicado en 1847, en respuesta a una controversia en curso entre Augustus De Morgan y Sir William Hamilton. El álgebra de Boole fue un intento de utilizar las técnicas algebraicas para tratar expresiones de la lógica proposicional. Más tarde como un libro más importante: *The Laws of Thought*, publicado en 1854.

En la actualidad, el álgebra de Boole se aplica de forma generalizada en el ámbito del diseño electrónico. Claude Shannon fue el primero en aplicarla en el diseño de circuitos de conmutación eléctrica biestables, en 1948. Esta lógica se puede aplicar a dos campos:

1. Al análisis, porque es una forma concreta de describir como funcionan los circuitos.
2. Al diseño, ya que teniendo una función lógica aplicamos dicho álgebra para poder desarrollar una implementación de la función.

El uso del álgebra de Boole en la Automática se debe a que buena parte de los automatismos responden a la lógica binaria. Las variables binarias de entrada son leídas y producen variaciones en las señales binarias de salidas.

3.1.1 Definiciones

El álgebra de Boole está formada por un conjunto de variables booleanas, $x \in \{0, 1\}$. Es decir variables que sólo pueden tomar dos valores: 0 ó 1, verdadero o falso, abierto o cerrado, encendido o apagado, etc.

Un **literal** l es una variable o su negada. Existen dos tipos: literales con signo positivo cuando representan el valor '1' de la variable ($l = x$), y con signo negativo cuando representa el valor '0' ($l = \bar{x}$).

Una **cláusula** (o término C) está formada por un conjunto de literales enlazados mediante conectivas lógicas.

Una **fórmula lógica** ϕ está formada por conjuntos de cláusulas enlazadas mediante conectivas lógicas. Matemáticamente, toda fórmula lógica ϕ de n variables puede verse también como una función multivariable, esto es $\phi : \{0, 1\}^n \rightarrow \{0, 1\}$. En este texto emplearemos indistintamente los términos de función y fórmula.

Una **interpretación** de una fórmula lógica ϕ es el valor lógico de la fórmula cuando se le asignan valores de verdad (TRUE / FALSE) a sus variables. En consecuencia, existirán tantas interpretaciones como combinaciones de asignaciones posibles.

Se dice que una fórmula lógica es **satisfacible** cuando existe al menos una interpretación que la hace verdadera.

Una **tabla de verdad**, o tabla de valores de verdades, es una tabla que muestra el valor de verdad de una cláusula o fórmula lógica, para cada combinación de verdad que se pueda asignar a sus literales¹.

3.1.2 Operaciones básicas

El álgebra de Boole está definido por 3 operaciones básicas: complemento, suma (OR) y producto (AND).

El **complemento** es el negado: $y = \bar{a}$. Viene dado por la tabla de verdad 3.1.

Tabla 3.1: NOT

a	y
0	1
1	0

La operación suma u **OR** se representa $y = a + b$ y viene dada por la tabla de verdad 3.2.

Tabla 3.2: OR

a	b	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

La operación producto u **AND** se representa $y = a \cdot b$ y viene dada por la tabla de verdad 3.3.

Tabla 3.3: AND

a	b	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

¹Fue desarrollada por Charles Sanders Peirce por los años 1880, pero el formato más popular es el que introdujo Ludwig Wittgenstein en su Tractatus logico-philosophicus, publicado en 1921 (Wikipedia).

3.1.3 Propiedades

Axiomas básicos

1: La ley asociativa:

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{B} : (a + b) + c = a + (b + c)$$

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{B} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$

2: Existencia del elemento neutro:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a + 0 = a$$

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a \cdot 1 = a$$

3: La ley conmutativa:

$$\forall a, b \in \mathfrak{B} : a + b = b + a$$

$$\forall a, b \in \mathfrak{B} : a \cdot b = b \cdot a$$

4: Ley distributiva:

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{B} : a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$$

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{B} : a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$$

5: Existencia del elemento complementario:

$$\forall a \in \mathfrak{B}; \exists \bar{a} \in \mathfrak{B} : a + \bar{a} = 1$$

$$\forall a \in \mathfrak{B}; \exists \bar{a} \in \mathfrak{B} : a \cdot \bar{a} = 0$$

AND

Ley de idempotencia para el producto:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a \cdot a = a$$

Ley de absorción para el producto:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a \cdot 0 = 0$$

Ley de identidad para el producto:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a \cdot 1 = a$$

OR

Ley de idempotencia para la suma:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a + a = a$$

Ley de absorción para la suma:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a + 1 = 1$$

Ley de identidad para la suma:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : a + 0 = a$$

NOT

Ley de involución:

$$\forall a \in \mathfrak{B} : \overline{\overline{a}} = a$$

Leyes de De Morgan

$$\forall a, b \in \mathfrak{B} : \overline{a + b} = \overline{a} \cdot \overline{b}$$

$$\forall a, b \in \mathfrak{B} : \overline{a \cdot b} = \overline{a} + \overline{b}$$

3.1.4 Conectivas derivadas

NOR

Es la negada de la función “OR”:

$$y = \overline{a + b}$$

Tabla 3.4: Tabla NOR

a	b	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

NAND

Es la negada de la función “AND”:

$$y = \overline{a \cdot b}$$

Tabla 3.5: Tabla NAND

a	b	y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

XOR

Es la función OR excluyente: *o uno u otro, pero no los dos*. Se puede utilizar para detectar señales que son distintas.

$$y = a \oplus b = a \cdot \overline{b} + \overline{a} \cdot b$$

Tabla 3.6: Tabla XOR

a	b	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Ejercicio.- Demostrar la función XOR a partir de la tabla de verdad

XNOR

Es la negada de la función “XOR”. Se puede utilizar para detectar señales que son iguales:

$$y = \overline{a \oplus b} = a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{b}$$

Tabla 3.7: Tabla XNOR

a	b	y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Ejercicio.- Demostrar la función XNOR a partir de la de XOR

3.2 Formas canónicas

Toda función lógica se puede expresar como combinación de dos tipos de términos conocidos como **canónicos**: los minitérminos (o minterms) y los maxitérminos (o maxterms).

Un **minitérmino o minterm** es una cláusula formada por n literales (positivos o negativos) conectados únicamente por la conjunción lógica (AND). Ejemplos de minterms para n=3 son $a \cdot b \cdot c$, $a \cdot \bar{b} \cdot c$ y $a \cdot b \cdot \bar{c}$. Se puede observar que cada minterm tiene una interpretación verdadera para una única combinación de valores de las variables. Por ejemplo, el minterm $a \cdot \bar{b} \cdot c$ es verdadero solo cuando a y c son ciertos (valor ‘1’) y b es falso (valor ‘0’).

Un **maxitérmino o maxterm** es una cláusula formada por n literales (positivos o negativos) conectados únicamente por la disyunción lógica (OR). Por ejemplo, los siguientes términos son maxterms: $a + b + c$, $a + \bar{b} + c$ y $a + b + \bar{c}$. Los maxterms y los minterms se pueden considerar complementarios, pues se puede pasar de uno a otro aplicando el operador complemento.

Se dice que **una función lógica está en forma canónica** cuando contiene un mismo tipo de términos canónicos unidos por una conectiva que depende de dicho tipo. Así, si la función lógica viene expresada como una disyunción lógica (OR) de minterms se dice que está en la **forma normal disyuntiva** (de aquí en adelante **DNF**, acrónimo de *disjunctive normal form*). Por contra, si la función lógica se expresa como una conjunción lógica (AND) de maxterms se dice que está en la **forma normal conjuntiva** (de aquí en adelante **CNF**, acrónimo de *conjunctive normal form*). La forma DNF suele denominarse informalmente “**suma de productos**”, mientras que la forma CNF recibe el apelativo de “**producto de sumas**”.

Examinamos a continuación cada forma canónica en detalle.

3.2.1 Forma normal disyuntiva (DNF)

Formalmente, sea ϕ una fórmula lógica expresada en términos de DNF (sumas de productos), entonces:

$$\phi \equiv \sum_1^n C_i \text{ siendo } C_i = (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_m)$$

Es posible obtener una expresión canónica para ϕ a partir de todas sus interpretaciones que la satisfacen (combinaciones de valores de sus variables para las que ϕ toma el valor '1'), un minitérmino por cada interpretación.

Por ejemplo, dada la tabla de verdad de la función XOR (Tabla 3.6), se observa que las filas con resultado '1' son la segunda y la tercera. Consecuentemente, ϕ puede escribirse como la suma de minterms siguiente:

$$\phi = \bar{a} \cdot b + a \cdot \bar{b}$$

El ejemplo muestra que existe una correspondencia entre cada minitérmino y las filas de la tabla de verdad con resultado '1', así como entre los literales y los valores de verdad de las celdas.

3.2.2 Forma normal conjuntiva (CNF)

Formalmente, sea ϕ una fórmula lógica expresada en términos de DNF (sumas de productos), entonces:

$$\phi \equiv \prod_1^n C_i \text{ siendo } C_i = (\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_m)$$

Es posible obtener una expresión canónica para ϕ a partir de todas las interpretaciones para las que ϕ toma el valor '0', un maxitérmino por cada combinación. Por ejemplo, dada la tabla de verdad de la función XOR (Tabla 3.6), se observa que las filas con resultado '0' son la primera y la cuarta. Consecuentemente, ϕ puede escribirse como la suma de maxterms siguiente:

$$f = (a + b) \cdot (\bar{a} + \bar{b})$$

El ejemplo muestra que existe una correspondencia entre cada maxitérmino y las filas de la tabla de verdad con resultado '0'. En este caso, y a diferencia de la forma DNF, los literales de cada maxitérmino toman signo opuesto a los valores de verdad de las celdas. Para entender esto, considere que cada maxitérmino está "impidiendo" que la fila correspondiente de la tabla de verdad (que tiene resultado '0') sea una interpretación verdadera de ϕ . Siguiendo el razonamiento, la conjunción de todos estos maxitérminos elimina todas aquellas interpretaciones que no satisfacen ϕ , lo que equivale a la expresión lógica de la propia ϕ .

Ejercicio.- Demuestre que ambas fórmulas de la función XOR (DNF y CNF) son equivalentes.

Ejercicio.- Expresé la función lógica definida por la tabla de verdad que aparece en la Tabla 3.8, en las dos formas canónicas.

Tabla 3.8: Tabla de verdad del ejercicio

a	b	c	y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

3.3 Mapa de Karnaugh

Un mapa de Karnaugh² (también conocido como tabla de Karnaugh o diagrama de Veitch) es un diagrama utilizado para la simplificación de funciones algebraicas en forma canónica. A partir de la tabla de

²Debe su nombre a Maurice Karnaugh, un físico y matemático de los laboratorios Bell, quien lo inventó en 1953

Karnaugh se puede obtener una forma canónica mínima (con el mínimo número de términos). En este texto emplearemos indistintamente los términos “mapa” y “tabla” de Karnaugh.

Nota.- Observe que siempre existirán dos formas canónicas mínimas, una DNF y otra CNF.

La tabla de Karnaugh consiste en una representación bidimensional de la función que se quiere simplificar. Si la función viene expresada como una tabla de verdad, entonces la tabla de Karnaugh puede verse como una forma alternativa de representación 2D. Puesto que la tabla de verdad de una función de n variables posee 2^n filas, la tabla de Karnaugh correspondiente debe poseer también 2^n celdas. La construcción de la tabla de Karnaugh pasa por codificar cada celda en código binario reflejado (o código Gray) de manera que celdas adyacentes tengan un código que difiere en un solo dígito.

cd\ab	00	01	11	10
00	0	4	12	8
01	1	5	13	9
11	2	6	14	10
10	3	7	15	11

abcd	
0000: 0	1000: 8
0001: 1	1001: 9
0010: 2	1010: 10
0011: 3	1011: 11
0100: 4	1100: 12
0101: 5	1101: 13
0110: 6	1110: 14
0111: 7	1111: 15

Figura 3.1: Descripción del mapa de Karnaugh

En la Fig. 3.1 puede verse un ejemplo de codificación Gray para el caso de funciones lógicas de 4 variables. Cada variable lógica (A, B, C, D en la figura) se corresponde con un bit del código Gray.

En la práctica, no es necesario explicitar el código de cada celda; basta con expresar las cabeceras de las filas y columnas en código Gray (el código de la celda se construye combinando la fila y columna correspondiente), según se desprende de la figura.

Definida la codificación Gray para la tabla, las celdas se rellenan asignando el valor ‘1’ para el caso que exista el término canónico correspondiente en la función objeto de análisis, y el valor ‘0’ en caso contrario. Si la función lógica viene expresada como tabla de verdad, se puede elegir la forma canónica para expresar la función. El criterio más lógico es elegir aquella forma que contenga inicialmente el menor número de términos. Para ello basta con contar el número de interpretaciones que satisfacen la fórmula lógica (filas de la tabla de verdad con resultado ‘1’). Cuando el número de interpretaciones que satisfacen la fórmula lógica es menor que el número de interpretaciones que no la satisfacen, se elige la forma canónica DNF. En caso contrario la CNF.

Nota.- Las tablas de Karnaugh se pueden realizar fácilmente a mano con funciones de hasta 6 variables. Para funciones de mayor cantidad de variables es más eficiente el uso de software especializado.

Una vez construida la tabla de Karnaugh se procede a la reducción del número de términos (si es posible) mediante la agrupación de celdas adyacentes en la tabla con valor ‘1’³.

Las dos secciones siguientes describen el algoritmo de simplificación en detalle para las formas canónicas DNF y CNF.

3.3.1 Simplificación de una función lógica expresada en DNF

Dada la tabla de Karnaugh correspondiente a una función lógica expresada en DNF, el procedimiento para su simplificación se describe a continuación.

En primer lugar, se agrupan las celdas con valor ‘1’ de la tabla teniendo en cuenta las siguientes reglas:

1. Un grupo está formado por un número variable de celdas con valor ‘1’.
2. El número de celdas con valor ‘1’ dentro de un grupo debe ser potencia de dos: 1, 2, 4, 8, 16.

³Por la naturaleza dual las dos formas canónicas, también es posible razonar con las celdas de valor ‘0’ de la tabla (las que no dan lugar a minitérminos) con consideraciones adicionales. La sección 3.3.2 muestra un ejemplo.

3. A efectos de la formación de grupos se debe considerar la tabla como toroidal, pues los extremos de la tabla son adyacentes: el extremo derecho es adyacente al izquierdo, y el inferior al superior. Se puede apreciar mejor en la Fig. 3.2⁴.
4. Todas las celdas con valor '1' deben pertenecer al menos a un grupo.
5. Una celda con valor '1' puede pertenecer a varios grupos distintos.
6. El número de grupos debe ser mínimo.
7. Cuanto mayor sea el tamaño del grupo, mayor será la simplificación, tanto en número de términos como en número de literales por cada término.
8. No es necesario que todos los grupos tengan el mismo tamaño.
9. Por último, puede darse el caso de que la función contenga alguna interpretación 'x' que no sea posible (por ejemplo, por representar parte de un sistema físico con combinaciones de entradas que son físicamente imposibles). A las celdas correspondientes a esas interpretaciones se les asigna un valor 'x'. Dichas celdas no tienen por qué pertenecer a ningún grupo, pero pueden emplearse para agrandar grupos ya existentes.

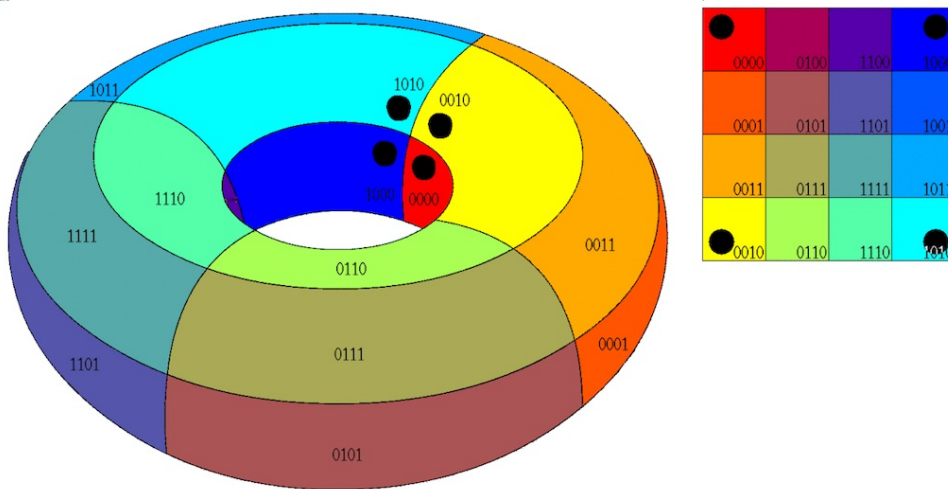


Figura 3.2: Tabla de Karnaugh dibujado en un toroide y en un plano. Las celdas marcadas con puntos son adyacentes.

En segundo lugar, cada grupo generará un mintermino en la función mínima resultante. Ese minterm estará formado por aquellos literales comunes dentro del grupo correspondiente, con signo negativo o positivo si toman el valor '0', o '1' en la codificación Gray. Los literales que aparecen con códigos distintos en el grupo se eliminan.

La función resultante DNF, compuesta por la suma de los minterminos correspondientes de cada grupo, es mínima.

A modo de ejemplo, se considera la función lógica expresada en la tabla de verdad 3.9:

Tabla 3.9: Ejemplo de tabla de verdad

a	b	c	y
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

⁴Por Jochen Burghardt - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28286441>

Al tener 3 variables tendremos $2^3 = 8$ celdas. Para construir la codificación Gray inicial, las variables se pueden agrupar como se quieran. En este caso representaremos a y b juntas (columnas) frente a c (filas). La tabla de Karnaugh, con dos formas de representar las cabeceras de filas y columnas, aparece en la Fig. 3.3.

		b		
	0	1	0	0
c	1	1	1	1
		a		

=

c \ ab	00	01	11	10
0	0	1	0	0
1	1	1	1	1

Figura 3.3: Tabla de Karnaugh DNF

En la representación de la izquierda, las cabeceras de las filas y columnas representan con una raya gris los literales positivos (variables con valor '1'). Consecuentemente, la ausencia de raya indica los literales negativos (variables con valor '0'). En la representación de la derecha aparecen explícitamente los valores de las entradas. En este libro usaremos la notación de la izquierda para las tablas de Karnaugh por su sencillez.

Una vez tenemos la tabla de Karnaugh agrupamos los unos. Como hay 5 celdas con valor '1' no se puede agrupar a todos en un mismo grupo porque no es una potencia de dos. Pero vemos que sí se puede hacer un grupo de 4 unos: el rojo. El '1' que queda suelto podría formar un grupo el sólo, pero si se junta con la celda de valor '1' de la fila inferior se obtiene un grupo más grande: el azul.

El término asociado al grupo rojo sería $y = c$, ya que dicho literal es el único común a todo el grupo (observe que a y b aparecen con distinto signo -toman valores tanto '1' como '0'). El término asociado al grupo azul sería $y = \bar{a} \cdot b$, porque en este grupo a vale siempre '0' y b siempre '1' mientras que aparecen literales positivos y negativos de la variable c. En consecuencia, la función simplificada sería:

$$y = c + \bar{a} \cdot b$$

3.3.2 Simplificación de una función lógica expresada en CNF

La simplificación de una función en forma canónica CNF es dual con respecto a la metodología vista en la sección anterior para una forma canónica DNF.

Según lo expuesto en la sección 3.2.2, cada fila de ceros de la tabla de verdad produce un maxitérmino de la forma CNF con los signos de los literales opuestos a los valores de las celdas de la tabla. La tabla de Karnaugh, a partir de los maxitérminos, se obtiene de la misma forma que para los minitérminos. La agrupación de las celdas de dicha tabla con valor '1' conduce a los maxitérminos simplificados de la forma canónica CNF original. Se deja al alumno que emplee esta metodología para obtener la simplificación del ejemplo anterior (tabla de la Fig. 3.3).

Como metodología alternativa, y partiendo de la tabla de Karnaugh obtenida para los minitérminos en la sección anterior (Fig. 3.3), se puede obtener la fórmula CNF mínima agrupando las celdas con valor '0' de dicha tabla de acuerdo con las reglas generales ya expuestas (ver Fig. 3.4, agrupaciones violeta y verde). Si se razona de esta forma, cada grupo de celdas con valor '0' produce un maxitérmino siempre y cuando se consideren sus literales con signo opuesto a los que les corresponden en la codificación Gray de la tabla de Karnaugh original.

En el ejemplo, el término asociado al grupo violeta es $y = (c + b)$, pues c siempre aparece negado (y consideramos el literal con el signo cambiado), b también aparece siempre negado (así que aparece con signo también positivo) y a cambia de signo (con lo que se elimina). Razonando de la misma manera puede verse que el término asociado al grupo verde es $y = (c + \bar{a})$. La función mínima CNF es, por tanto:

	B			
	0	1	0	0
c	1	1	1	1
	A			

Figura 3.4: Tabla de Karnaugh CNF

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

Ejercicio.- Demuestre que las expresiones canónicas mínimas CNF y DNF obtenidas corresponden a la misma función (tienen exactamente las mismas interpretaciones que las satisfacen).

Ejercicio.- Simplifique la función ‘y’ dada por la siguiente tabla de verdad.

Tabla 3.10: Tabla de verdad del ejercicio

a	b	c	d	y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Solucion

La solución al ejercicio es:

$$y = d + (\bar{a} \cdot b \cdot c)$$

3.4 Autoevaluación

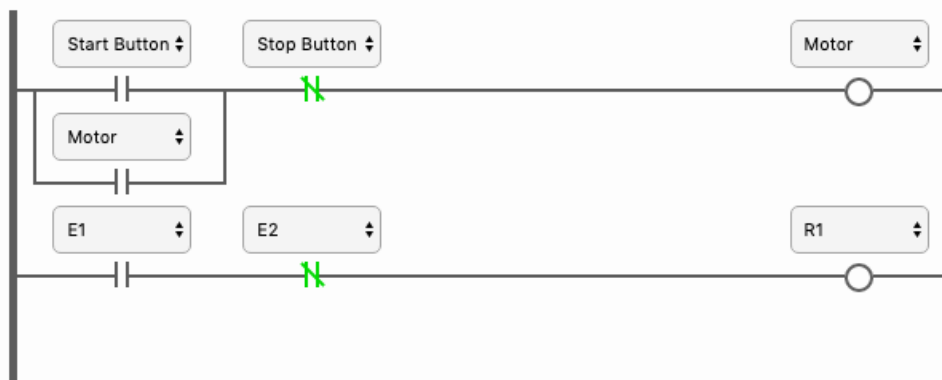
Responde a las siguientes cuestiones y presiona el botón de “Ver Resultados” para ver tu puntuación:

Capítulo 4

Métodos de representación

En el capítulo 3 hemos visto como generar ecuaciones que representan una determinada función lógica, por ejemplo, la salida de un sistema. En este capítulo vamos a ver como implementar dicha ecuación mediante un sistema físico. Para ello veremos:

- Diagrama de escalera (KOP)
- Esquema de contactos
- Plano de funciones (FUP)
- Lista de instrucciones (AWL)



4.1 Diagrama de escalera (KOP)

El diagrama en escalera, también llamado KOP, ladder o diagrama ladder, es un lenguaje de programación gráfico muy popular dentro de los autómatas programables debido a que está basado en los esquemas eléctricos de control clásicos. De este modo, con los conocimientos que todo técnico o ingeniero eléctrico posee, es muy fácil adaptarse a la programación en este tipo de lenguaje.

Ladder es uno de los diferentes lenguajes de programación para los controladores lógicos programables (PLCs) estandarizados con IEC 61131-3. En Ladder, la energía se desplaza de izquierda a derecha en lugar de arriba hacia abajo como en los esquemas eléctricos. En un circuito típico aparecen los contactos en la parte izquierda y una bobina en la parte derecha. La lógica de control que representa dicho circuito puede verse como una inferencia lógica que tiene como antecedente la lógica de los contactos y como concluyente la bobina.

Para programar un autómata con Ladder, además de estar familiarizado con las reglas de los circuitos de conmutación, (también denominada Lógica de Contactos), es necesario conocer cada uno de los elementos de que consta este lenguaje. A continuación se describen de modo general los más comunes (ver Fig. 4.1):

- Contacto normalmente abierto (E1): si la variable asociada E1 vale '0', el contacto permanece abierto, y si vale '1' se cierra.

- Contacto normalmente cerrado (E2): si la variable asociada E1 vale '1', el contacto permanece abierto, y si vale '0' se cierra.
- Salida, bobina o relé (S1): la variable asociada S1 tomará el valor de la variable (o combinación de variables) que esté a su entrada (punto de conexión del lado izquierdo). También se puede enclavar o desenclavar, indicándolo con una S o R como se indica en los casos de S2 y S3.

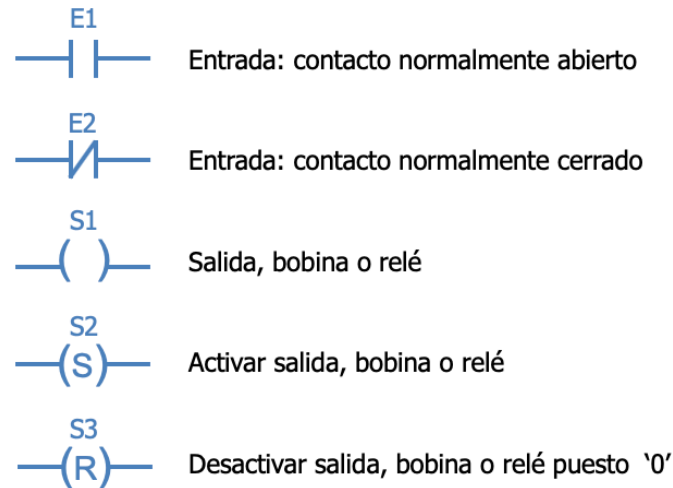


Figura 4.1: Elementos básicos del diagrama de escalera

Nota.- Una bobina normal puede verse como una asignación del valor lógico conectado a su izquierda. Por contra, una bobina de enclavamiento (S / R) se activa de la misma manera que la bobina anterior, pero retiene el valor ('1' / '0') aunque el valor lógico conectado a su izquierda pase a '0'.

Se pueden implementar funciones lógicas de forma sencilla. Por ejemplo, en la figura siguiente (Fig. 4.2) se implementa un función AND y una OR.

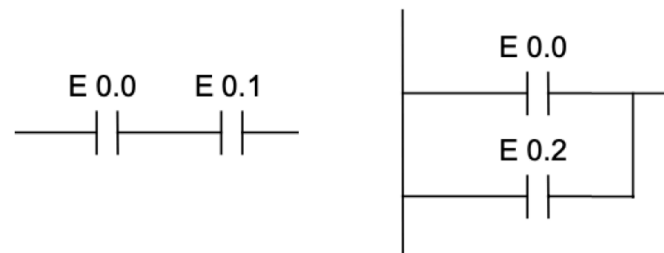


Figura 4.2: Implementación de funciones básicas: AND (izquierda) y OR (derecha)

Más información disponible en [7].

Nota.- Si se quiere hacer una simulación de un diagrama KOP de manera interactiva se sugiere el siguiente simulador: <https://www.plcfiddle.com/>

4.1.1 Ejemplos

El circuito de la Fig. 4.3

equivale a:

$$A4.0 = \overline{E0.0} \cdot E0.1 + E0.0 \cdot \overline{E0.1} = E0.0 \oplus E0.1$$

que corresponde con una puerta XOR.

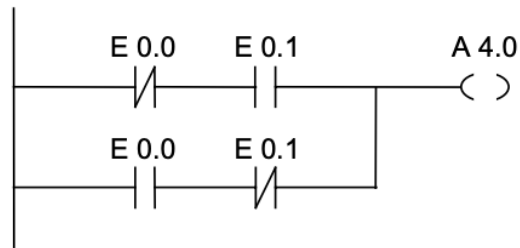


Figura 4.3: Diagrama de escalera: ejemplo 1

En el circuito de la Fig. 4.4

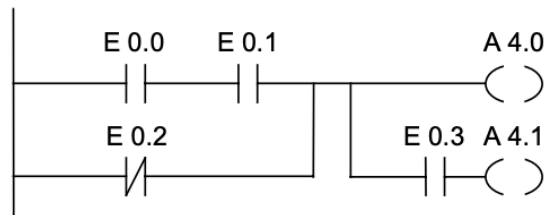


Figura 4.4: Diagrama de escalera: ejemplo 2

la ecuación correspondiente sería la siguiente:

$$\begin{aligned} A4.0 &= (E0.0 \cdot E0.1) + \overline{E0.2} \\ A4.1 &= E0.3 \cdot ((\overline{E0.0} \cdot E0.1) + \overline{E0.2}) \end{aligned} \quad (4.1)$$

En el entorno de desarrollo STEP-7 de SIEMENS, los circuitos se dividen en segmentos, como se muestra en la Fig. 4.5. En este caso se utilizan salidas con activación (S) y desactivación (R).

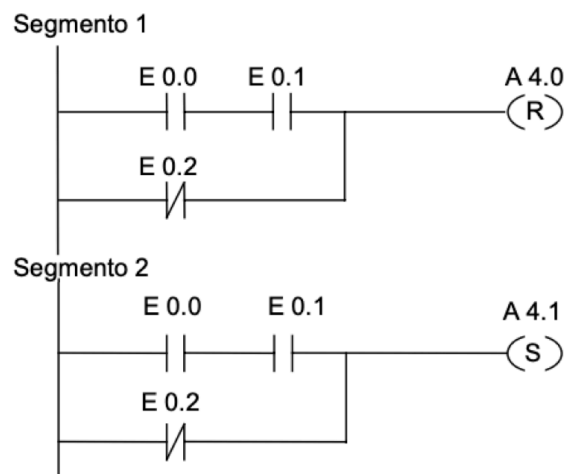


Figura 4.5: Diagrama de escalera: ejemplo 3

Las ecuaciones serían:

$$\begin{aligned} A4.0 &= 0 \text{ si } ((E0.0 \cdot E0.1) + \overline{E0.2}) \text{ tiene valor '1'} \\ A4.1 &= 1 \text{ si } ((E0.0 \cdot E0.1) + \overline{E0.2}) \text{ tiene valor '1'} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Según lo expuesto anteriormente acerca de las bobinas con enclavamiento, cuando A4.0 toma el valor '0' ya no volverá a tomar el valor '1' (queda desactivada para siempre). De la misma forma, cuando A4.1 toma el valor '1', ya no volverá a tomar el valor '0' (queda activada para siempre).

4.2 Esquema de contactos

Es un método de representación que se corresponde directamente con el esquema de conexiones eléctricas que habría que realizar para construir un automatismo. Se rige por la norma DIN 40713-6. La Fig. 4.6 muestra la representación de los elementos más típicos según este esquema.

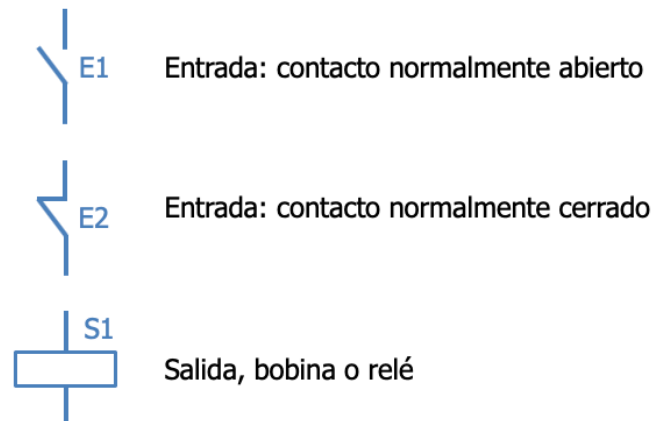


Figura 4.6: Elementos básicos del esquema de contactos

La implementación de funciones lógicas básicas (AND, OR, XOR) se muestra en la Fig. 4.7:

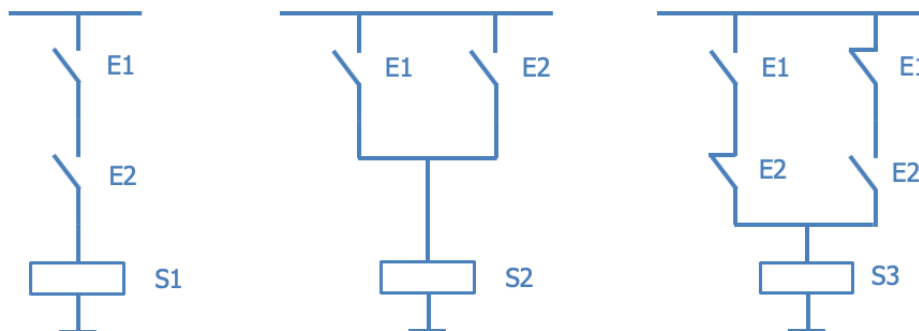


Figura 4.7: Funciones lógicas con diagrama de contactos: AND, OR, XOR

y se corresponde con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 S1 &= E1 \cdot E2 \\
 S2 &= E1 + E2 \\
 S3 &= E1 \cdot \overline{E2} + \overline{E1} \cdot E2
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

En la Fig. 4.8 se puede apreciar el uso de un relé (K1) para controlar una luz L. El relé se compone de una bobina más uno o varios contactos normalmente abiertos o cerrados. En este caso un contacto normalmente abierto. Cuando se activa la bobina del relé, el contacto se cierra y la luz se enciende:

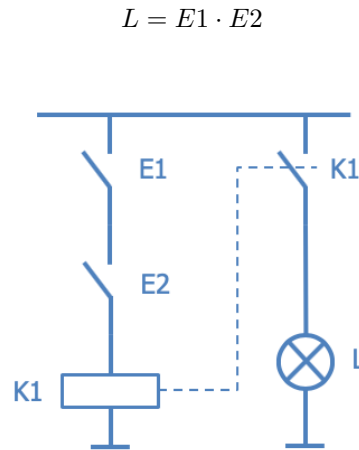


Figura 4.8: Esquema de contactos : ejemplo de luz controlada por relé

4.3 Plano de funciones (FUP)

El plano de funciones lógicas (o FUP en términos de autómatas) se refiere a la utilización de las puertas lógicas típicas de la electrónica digital. Tiene un uso menor que los otros dos lenguajes en control automático, y se suele restringir a documentación.

En la Fig. 4.9 se pueden ver los conectores básicos empleados en FUP y su equivalencia con conectores del esquema de contactos (en sentido horizontal) y puertas lógicas.

4.4 Lista de instrucciones (AWL)

El lenguaje de lista de instrucciones (AWL - *Anweisungs-Liste* - en alemán o STL - *Statement List* - en inglés), también conocido como el ensamblador de SIEMENS, es un conjunto de nemónicos y operandos que componen instrucciones traducibles a código máquina.

AWL es un lenguaje potente y compacto que permite implementar programas de control complejos. A diferencia de otros lenguajes de STEP 7, AWL es el que está más cerca de la máquina y por tanto no está pensado para expertos en instalaciones y dispositivos de control (para los que existen lenguajes gráficos como FUP o KOP), sino para personas con formación en informática y electrónica digital.

AWL dispone de un juego de nemónicos extenso (más de 100) al igual que de operandos y de modos de direccionamiento. En su creación, se han seguido los preceptos del lenguaje **Instruction List** fijado por la norma IEC 61131-3 (o su equivalente alemana DIN EN-61131-3) con algunas diferencias poco significativas en el plano conceptual.

4.4.1 Instrucciones básicas para programar AWL en Step 7

Las instrucciones básicas van a ser:

- **U**: AND (Und en alemán)
- **UN**: AND negada
- **O**: OR
- **ON**: OR negada
- **X**: XOR
- **XN**: XOR negada
- **=**: asignación

Se pueden usar paréntesis para agrupar operaciones.

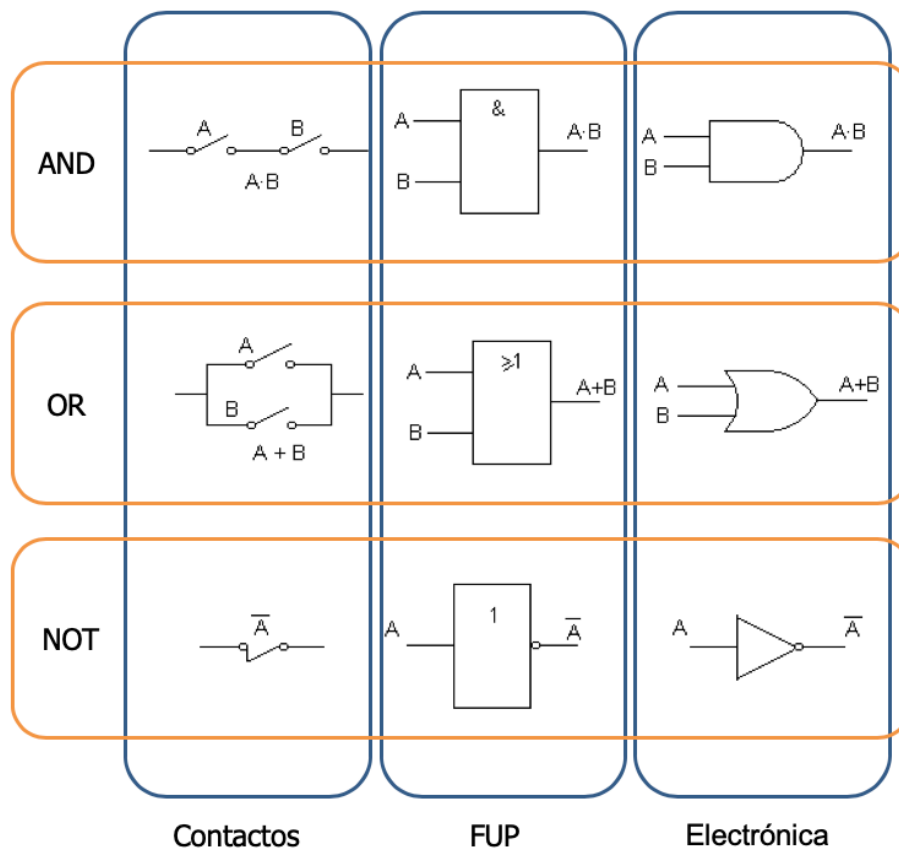


Figura 4.9: Comparativa de conectores de FUP con puertas lógicas y contactos.

4.4.2 Funciones básicas

AND

U E32.0
UN E32.1
= A 32.0

Equivale a:

$$A_{32.0} = E_{32.0} \cdot \overline{E_{32.1}}$$

OR

O E32.0
ON E32.1
= A 32.0

Equivale a:

$$A_{32.0} = E_{32.0} + \overline{E_{32.1}}$$

XOR

U E32.0
UN E32.1
O
UN E32.0
U E32.1
= A 32.0

Equivale a:

$$A_{32.0} = (E_{32.0} \cdot \overline{E_{32.1}}) + (\overline{E_{32.0}} \cdot E_{32.1})$$

4.4.3 Ejemplos

Por ejemplo, el siguiente código:

U(
O E32.0
O E32.1
)
U(
ON E32.0
ON E32.1
)
UN E32.2
= A 33.0

Equivale a:

$$A_{33.0} = (E_{32.0} + E_{32.1}) \cdot (\overline{E_{32.0}} + \overline{E_{32.1}}) \cdot \overline{E_{32.2}}$$

La representación equivalente en esquema de contactos se muestra en la Fig. 4.10 (obtenida de [8]).

Más información disponible en [8].

4.5 Autoevaluación

Responde a las siguientes cuestiones y presiona el botón de “Ver Resultados” para ver tu puntuación:

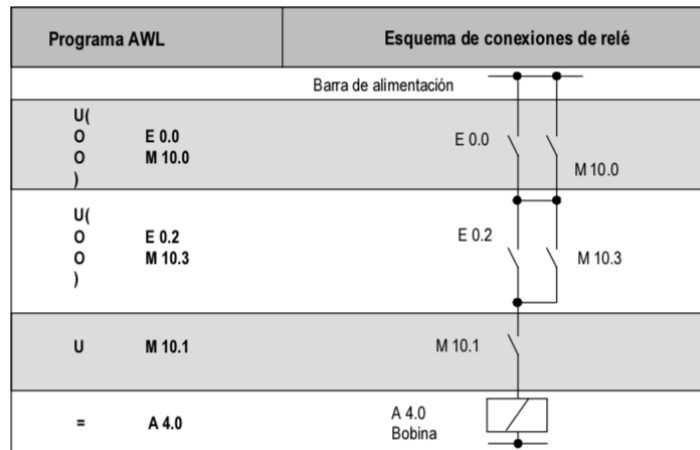
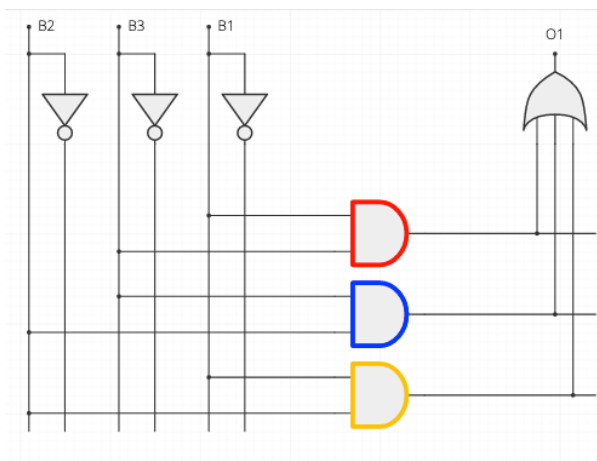


Figura 4.10: Código AWL vs esquema de contactos

Capítulo 5

Sistemas combinacionales

Se denomina sistema combinacional o lógica combinacional a todo sistema digital en el que sus salidas son función exclusiva del valor de sus entradas en un momento dado, sin que intervengan en ningún caso estados anteriores de las entradas o de las salidas. Las funciones booleanas –compuestas por operadores OR, AND, NAND, XOR– se pueden representar íntegramente mediante una tabla de verdad. Por tanto, carecen de memoria y de retroalimentación.



5.1 Ejercicios resueltos

5.1.1 Control de una luz

Un pasillo cuenta con una luz (L) y dos interruptores (A y B), cada uno de ellos con dos posiciones (derecha e izquierda). Para que la luz se encienda los interruptores deben estar en posiciones distintas. Si los dos están a la derecha, la luz estará apagada. Cuando se modifique uno, la luz se encenderá. Y cuando, a continuación, se modifique el otro, se apagará.

Se pide la función booleana que expresa el comportamiento de la luz en función de los dos interruptores.

Lo primero que debemos hacer es la tabla de verdad mostrada en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Control de una luz: Tabla de verdad

A	B	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

De la tabla de verdad obtendremos la salida que será:

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

En este ejemplo, dado su sencillez, la expresión lógica obtenida es óptima en cuanto al número de términos.

5.1.2 Control de otra luz

Se quiere diseñar un sistema de tres interruptores (B1, B2 y B3) y una bombilla (L), de manera que se encienda L cuando haya al menos dos interruptores activados.

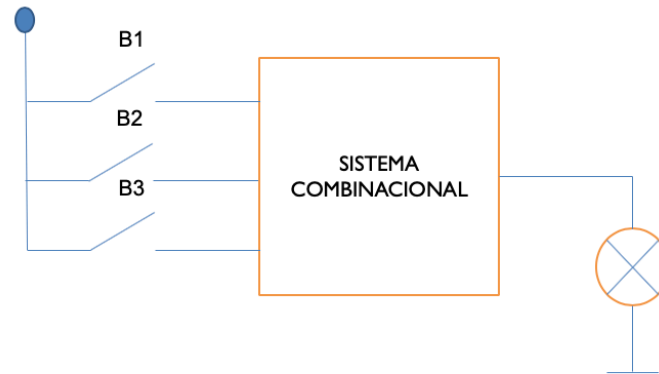


Figura 5.1: Control de luces mediante tres interruptores

La tabla de verdad sería la mostrada en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Control de una luz 2: Tabla de verdad

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

La tabla de Karnaugh correspondiente a la forma canónica DNF, agrupando los términos por colores, es la siguiente:

Del grupo rojo obtenemos el término $B_1 \cdot B_3$, del naranja $B_1 \cdot B_2$ y del azul $B_2 \cdot B_3$. En total:

$$L = B_1 \cdot B_3 + B_1 \cdot B_2 + B_2 \cdot B_3$$

5.1.3 Ejercicio de depósitos

En una nave se han instalado tres depósitos de aceite de oliva (d1, d2 y d3). Cada uno de ellos tiene instalado una boya en la parte superior para indicar que está completamente lleno. Para señalar de forma simple el estado del conjunto de los depósitos, se ha colocado un panel a la entrada de la nave que tiene tres pilotos de colores diferentes: Rojo (R), Naranja (N) y Verde (V).

La lógica de los pilotos es la siguiente:

- El piloto V se activa cuando no hay ningún depósito lleno.

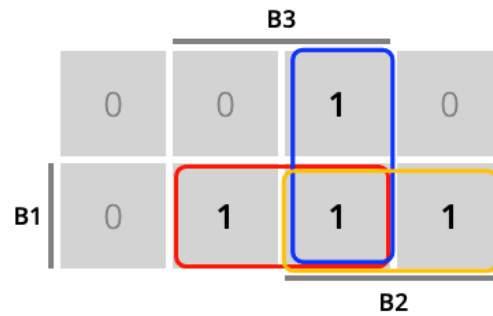


Figura 5.2: Control de luces mediante tres interruptores

- El piloto N se activa cuando hay un único depósito lleno.
- El piloto R se activa cuando el número de depósitos llenos es mayor que 1.

Se pide obtener las ecuaciones lógicas simplificadas del control de los tres pilotos.

Solucion

$$V = \bar{d1} \cdot \bar{d2} \cdot \bar{d3}$$

$$N = d1 \cdot \bar{d2} \cdot \bar{d3} + d2 \cdot \bar{d1} \cdot \bar{d3} + d3 \cdot \bar{d1} \cdot \bar{d2}$$

$$R = d1 \cdot d2 + d1 \cdot d3 + d2 \cdot d3$$

5.1.4 Ejercicio de simplificación

Dada la siguiente función:

$$S = a \cdot b + \bar{a} \cdot \bar{c} + a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c} + \bar{a} \cdot b$$

Obtenga su expresión más simplificada.

Solucion

En primer lugar podemos simplificar directamente algunos términos. En concreto, el primer y el último minterm darían 'b':

$$S = b + \bar{a} \cdot \bar{c} + a \cdot \bar{b} \cdot \bar{c}$$

A partir de aquí podemos continuar simplificando, expandir los términos para hacer la tabla de verdad o hacer la tabla de verdad directamente.

Si la hacemos directamente debemos dar valores a las variables para ir rellenándola. Vemos que si b vale '1' entonces S vale '1' directamente. Y si b vale '0', S valdría \bar{c} .

a	b	c	S
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

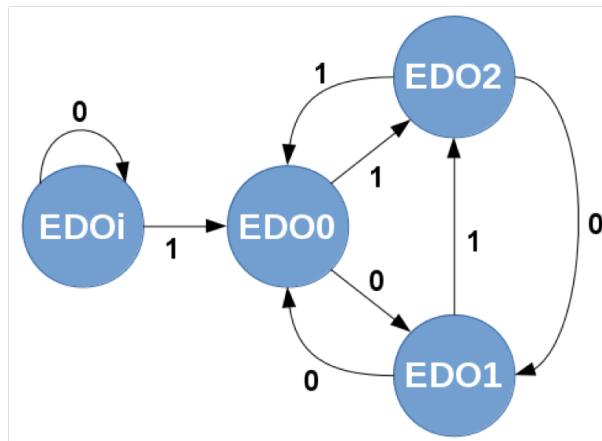
Mediante Karnaugh obtendríamos:

$$S = b + \bar{c}$$

Capítulo 6

Sistemas secuenciales

En este capítulo vamos a estudiar los sistemas secuenciales y, más concretamente, las máquinas de estado finitas, que son el formalismo en el que se fundamenta su diseño.



6.1 Introducción

Según lo expuesto al comienzo del capítulo 5, se denomina sistema combinacional o lógica combinacional a todo sistema digital en el que sus salidas son función exclusiva del valor de sus entradas en un momento dado, sin que intervengan en ningún caso estados anteriores de las entradas o de las salidas. Las funciones booleanas –compuestas por operadores OR, AND, NAND, XOR– se pueden representar íntegramente mediante una tabla de la verdad. Por tanto, carecen de memoria y de retroalimentación.

A diferencia de los sistemas combinacionales, en los sistemas secuenciales los valores de las salidas en cada instante de tiempo no dependen exclusivamente de los valores de las entradas en dicho momento, sino también dependen del estado anterior o estado interno. El sistema secuencial requiere de la utilización de un dispositivo de memoria que pueda almacenar la historia pasada de sus entradas (denominadas variables de estado) y le permita mantener su estado durante algún tiempo. Estos dispositivos de memoria pueden ser sencillos como un biestable, un relé o una celda de memoria.

El 99.9 % de los sistemas que son útiles en la práctica son secuenciales. Los sistemas combinacionales pueden verse como un caso particular de los sistemas secuenciales. O, de otra forma, los sistemas secuenciales se pueden ver como la suma de un sistema combinacional más un conjunto de memorias (biestables) que actúan como estados.

Formalmente, dado un sistema secuencial discreto formado por n entradas y m salidas y que admite un modelo de máquina de estados finita formado por q estados internos, la relación en el instante de tiempo k entre las entradas y las salidas puede expresarse mediante la función siguiente:

$$Y_k = f(X_k, M_k) \text{ donde } |X| = n, |Y| = m, |M| = q$$

Asimismo, la dinámica del sistema viene determinado por la evolución de sus estados. Sea M_{k+1} la codificación del estado en el instante $k+1$. La dinámica del sistema puede expresarse mediante la función:

$$M_{k+1} = f(X_k, M_k)$$

En otras palabras, la dinámica depende de las entradas y del estado del sistema en el instante anterior, pero no de las salidas. El resto del capítulo estudia en detalle el modelo de máquina de estado finita para describir a los sistemas secuenciales.

6.1.1 Ejemplo de sistema secuencial

Se dispone de dos pulsadores: P1 (ENCENDIDO) y P2 (APAGADO). Si se pulsa P1 se enciende una luz L (y se mantiene encendida indefinidamente). Si se pulsa P2 la luz se apaga. Si ambos pulsadores están activados, la luz se apaga (parada PREFERENTE). Ver Fig. 6.1.

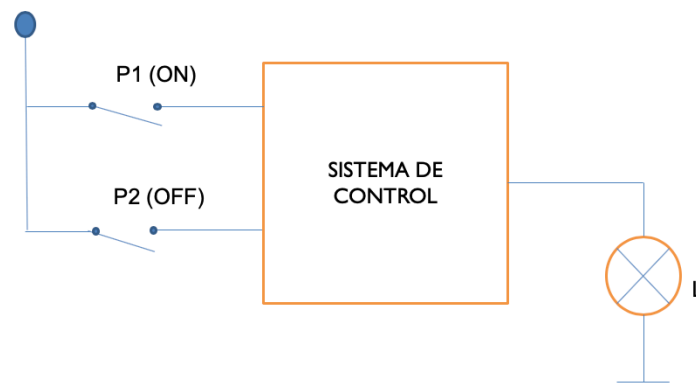


Figura 6.1: Ejercicio de interruptores

Para resolver el ejercicio podríamos pensar en hacer directamente una tabla de verdad (Tabla 6.1):

Tabla 6.1: Tabla de verdad inicial

P1	P2	Salida
0	0	¿0/1?
0	1	0
1	0	1
1	1	0

Parece claro que cuando se pulse P1 la luz debe encenderse, cuando se pulsa P2 debe apagarse y cuando se pulsen las dos también apagarse. Pero, ¿qué debe ocurrir cuando no se pulse ningún pulsador? Si ponemos un 0 en la tabla de verdad, cuando pulsemos P1 se encenderá la luz pero al soltar el pulsador se apagará (porque hemos puesto un 0 en la primera fila), no quedándose encendida tal y como deseábamos. Por el contrario si ponemos un 1 en la primera fila, al presionar P2 la luz se apagará pero al soltar se volverá a encender. ¿Entonces?

Lo que ocurre es que éste no es un sistema combinacional y por tanto la salida (L) no depende sólo de las entradas. Lo que queremos hacer cuando no se pulse ni P1 ni P2 es **mantener el estado**. Y, ¿cómo se hace esto? Pues tenemos que definir dos estados. Cuando no se active ningún pulsador, si la luz estaba apagada (estado apagado) seguirá apagada, y si estaba encendida (estado encendido) seguirá encendida.

Para codificar los dos estados es suficiente añadir una única variable booleana m : el valor '0' de la variable representará el estado apagado y el valor '1' el estado encendido.

Y para capturar la dinámica del sistema (la evolución del estado) consideramos dos entradas en la tabla de verdad, el estado en el instante k (m_k) y el estado en el instante $k+1$ (m_{k+1}).

De este modo la tabla de verdad nos quedará de la siguiente forma:

Tabla 6.2: Tabla de verdad inicial

P1	P2	m_k	m_{k+1}	L
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	1	0	1

Como puede verse en la Tabla 6.2, la salida L coincide con el valor del estado m_k , ya que la semántica del estado coincide con el encendido y apagado de la luz.

La tabla de Karnaugh considerando la variable m_{k+1} en términos de P1, P2 y m_k puede verse en la Fig. 6.2.

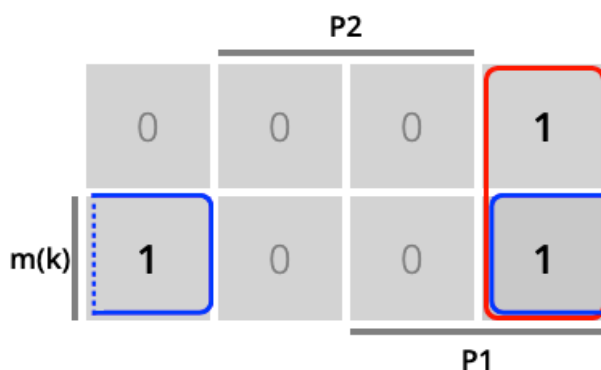


Figura 6.2: Tabla de Karnaugh para el ejercicio de interruptores

A tenor del agrupamiento de minterminos, la expresión lógica simplificada de m_{k+1} queda de la siguiente forma:

$$m_{k+1} = \overline{P2_k} \cdot m_k + \overline{P2_k} \cdot P1_k = \overline{P2_k} \cdot (m_k + P1_k)$$

Por último, y según lo expuesto con anterioridad, la expresión de la luz L en función del estado es:

$$L_k = m_k$$

Nota.- Se puede observar como se cumplen las premisas de un sistema secuencial descritas en la Introducción del capítulo: la salida (L_k) depende del estado (m_k) (nótese que, en este caso, la salida solo depende del estado), y el estado siguiente (m_{k+1}) depende del estado actual (m_k) y de las entradas ($P1_k$ y $\overline{P2_k}$).

Por último, podemos ver una posible implementación en diagrama de contactos en la Fig. 6.3.

Ejercicio.- Identificar a qué variables corresponden en la Fig. 6.3: MARCHA, PARADA y M1.

6.1.2 Tipos de sistemas secuenciales

En este tipo de circuitos entra un factor que no se había considerado en los circuitos combinacionales: el tiempo. Según como manejan el tiempo, los sistemas secuenciales se pueden clasificar en síncronos y asíncronos.

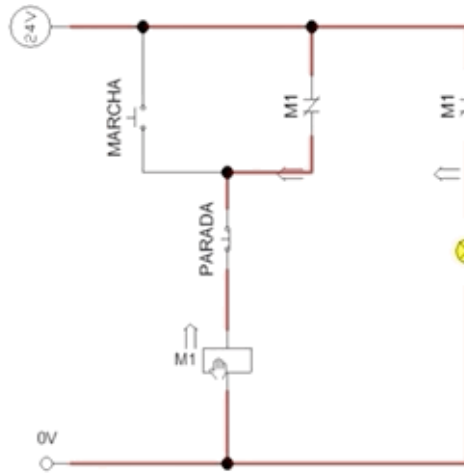


Figura 6.3: Ejemplo de funcionamiento del ejercicio de marcha-paro

Circuitos secuenciales asíncronos: en los circuitos secuenciales asíncronos, los cambios de estados ocurren al ritmo natural asociado a los elementos que componen el sistema. Esto produce retardos en cascada y puede ocasionar problemas de funcionamiento, ya que estos retardos naturales no están bajo el control del diseñador y además no son idénticos en cada elemento (ej. compuerta lógica).

Circuitos secuenciales síncronos: los circuitos secuenciales síncronos solo permiten un cambio de estado en los instantes marcados o autorizados por una señal de sincronismo de tipo oscilatorio denominada reloj (cristal o circuito capaz de producir una serie de pulsos regulares en el tiempo), lo que soluciona los problemas que tienen los circuitos asíncronos originados por cambios de estado no uniformes dentro del sistema. Los sistemas de control se fundamentan en sistemas secuenciales síncronos.

6.1.3 Máquinas de Moore y de Mealy

Dependiendo de como se obtengan las funciones de salida, los sistemas secuenciales pueden tener dos estructuras denominadas Máquina de Moore y Máquina de Mealy.

Una **Máquina de Moore**¹ es una máquina de estados con la particularidad de que las salidas en un instante dado sólo dependen de los estados en ese instante, es decir:

$$Y_k = f(M_k) \text{ donde } |X|=n, |Y|=m, |M|=q$$

$$M_{k+1} = f(X_k, M_k)$$

El diagrama de estados para una máquina Moore se representa en la Fig. 6.4:

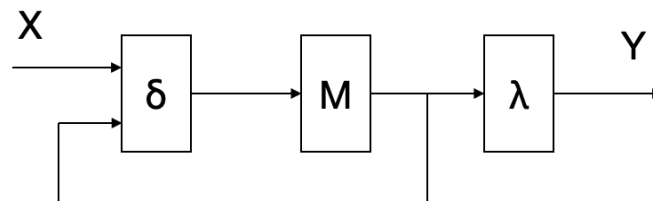


Figura 6.4: Máquina de Moore

Más formalmente, una máquina de estados de tipo Moore es una 5-tupla $S = (M, X, Y, \delta, \lambda)$ donde:

¹El nombre “máquina de Moore” viene de su promotor, Edward F. Moore, un pionero de las máquinas de estados, quien escribió *Gedanken-experiments on Sequential Machines*, pp 129 – 153, Estudios de Autómatas, Anuales de los Estudios Matemáticos, no. 34, Princeton University Press, Princeton, N. J., 1956.”

- $M \neq \emptyset$ es un conjunto finito de estados
- $X \neq \emptyset$ es un conjunto finito de entradas
- $Y \neq \emptyset$ es un conjunto finito de salidas
- $\delta : M \times X \rightarrow M$ es la función que determina la evolución de los estados
- $\lambda : M \rightarrow Y$ es la función que determina los valores de las salidas a partir del estado

Obsérvese que la función δ determina la evolución del estado, esto es, $M_{k+1} = \delta(X_k, M_k)$, y la función λ el valor de las salidas, $Y_k = \lambda(M_k)$. Ambas relaciones representan subsistemas combinacionales dentro del sistema secuencial.

En contraposición con la máquina de Moore, una **Máquina de Mealy**² se corresponde con la descripción realizada en la Introducción, esto es, tiene la particularidad de que las salidas dependen tanto del estado como de las entradas en cada instante. Según lo expuesto anteriormente, $Y_k = f(X_k, M_k)$ y $M_{k+1} = f(X_k, M_k)$.

El diagrama de estados para una máquina de Mealy se representa en la Fig. 6.5:

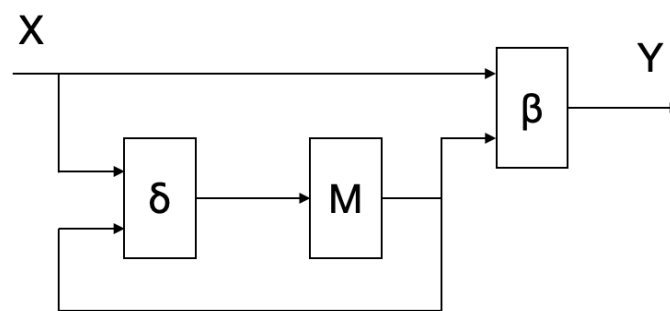


Figura 6.5: Máquina de Mealy

Al igual que en el caso anterior, una Máquina de Mealy puede verse como una 5-tupla $S = (M, X, Y, \delta, \beta)$ donde:

- $M \neq \emptyset$ es un conjunto finito de estados
- $X \neq \emptyset$ es un conjunto finito de entradas
- $Y \neq \emptyset$ es un conjunto finito de salidas
- $\delta : M \times X \rightarrow M$ es la función que determina la evolución de los estados
- $\beta : M \times X \rightarrow Y$ es la función que determina los valores de las salidas a partir del estado y las entradas

Las mismas consideraciones hechas para la máquina de Moore con respecto a las funciones δ y λ , aplican aquí para las funciones δ y β .

Es interesante destacar la naturaleza aparentemente generalista de la Máquina de Mealy frente a la Máquina de Moore; al fin y al cabo, la función β es más expresiva que la función λ . Sin embargo, y de manera contraintuitiva, existe siempre una conversión entre los dos tipos de máquinas. En el caso general, la conversión de una máquina Mealy a una de Moore conlleva un aumento en el número de estados, según se desprenderá de los ejemplos de la sección 6.6.

Para terminar esta sección se recuerda que la caracterización de una máquina de estados S pasa por definir unívocamente todos y cada uno de los elementos que conforman su 5-tupla.

6.2 Diagramas de estado

Las máquinas de estado se suelen representar mediante un grafo, denominado diagrama de estados, cuyos vértices representan estados (normalmente círculos) y los arcos dirigidos (líneas entre vértices) la evolución entre estados. El arco siempre apunta en la dirección del estado nuevo. La etiqueta del arco refleja el valor de las entradas que provoca la transición desde el estado origen al estado apuntado por el arco.

²El nombre “Máquina de Mealy” viene del promotor del concepto, George H. Mealy, un pionero de las máquinas de estados, quien escribió *Un Método para sintetizar Circuitos Secuenciales*, Bell System Tech. J. vol 34, pp. 1045–1079, 1955

En el caso de una **máquina de Moore**, y siempre y cuando las salidas dependan de un único estado, el diagrama de estados permite dibujar el valor de las salidas dentro de los vértices (estados), indicando así la relación de dependencia. La Fig. 6.6 muestra un ejemplo de este caso (se corresponde con el ejemplo de sumador binario que se verá en la sección 6.6.1). En los vértices la notación empleada es $\langle \text{estado} \rangle / \langle \text{salidas} \rangle$.

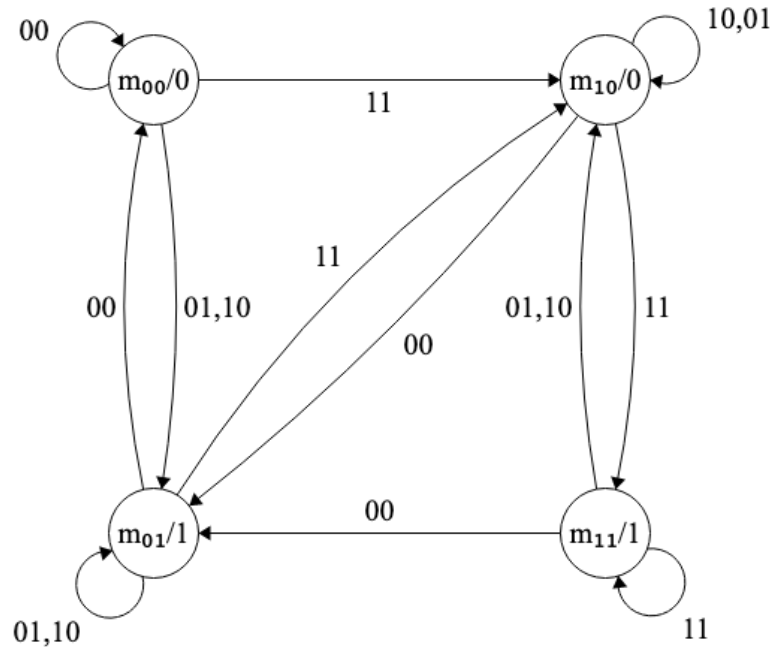


Figura 6.6: Ejemplo de Máquina de Moore (2 entradas y una salida): sumador binario

En una máquina de Mealy, los valores de las salidas se muestran también en los arcos, junto a los valores de las entradas, en la forma $\langle \text{entradas} \rangle / \langle \text{salidas} \rangle$. Esto es debido a que las salidas dependen tanto del estado como de las entradas. Como ejemplo, la Fig. 6.7 muestra el mismo ejemplo de antes (máquina de Moore del sumador binario que se verá en la sección 6.6.1) pero en este caso implementado mediante una Máquina de Mealy con dos entradas y una única salida.

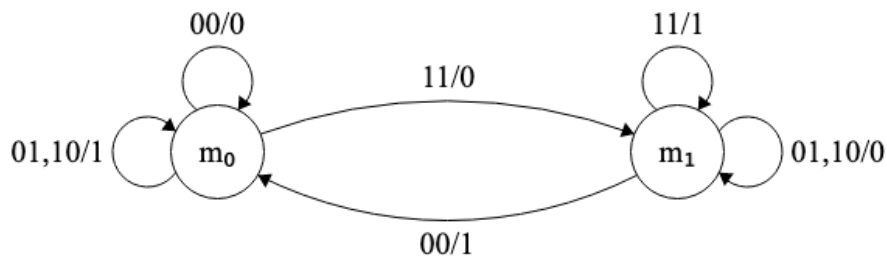


Figura 6.7: Ejemplo de Máquina de Mealy (2 entradas y una salida): : sumador binario

6.2.1 Elección de estados

La elección de los estados para modelar un sistema secuencial es una de las labores propias de los diseñadores. Hay muchas formas de elegir los estados que llevan a máquinas de estados que cumplen con la especificación del sistema.

En el caso de sistemas secuenciales con aplicaciones a control industrial, se suele partir de un estado inicial (también llamado estado de reposo) y un conjunto de estados que representan salidas de control

a los que puede evolucionar el sistema. A partir de ahí se va analizando qué ocurre cuando varían los valores de las entradas: si el sistema permanece en el mismo estado (es decir, esa combinación de entradas no produce como efecto el cambio de estado) o si por el contrario evoluciona a otro estado.

6.2.2 Ecuaciones de activación y retención de estados

Se define la ecuación de activación de un estado a aquella función que expresa las combinaciones de entradas y estados que producen que el sistema evolucione de otro estado al estado en cuestión. Y se denomina ecuación de retención de un estado a aquella función que expresa las combinaciones de entradas y estados que producen que el sistema se mantenga en el estado en cuestión. La combinación de las ecuaciones de activación y retención de todos los estados determina unívocamente la función que gobierna la transición entre estados, el cuarto elemento de la 5-tupla que define a la máquina (véase la sección 6.1.3).

Para explicarlo mejor tomemos como ejemplo la máquina de estados de la Fig. 6.7. La ecuación de activación del estado m_0 sería (suponiendo que las entradas son x_1 y x_2):

$$m_0 = m_1 \cdot (\overline{x_1} \cdot \overline{x_2})$$

puesto que para que se active el estado m_0 se debe estar en el estado m_1 , y la única combinación de entradas que lleva a m_0 es $\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$.

La ecuación de retención del estado m_0 se puede obtener de varias formas. La primera sería en función de las entradas que no provocan un cambio de estado:

$$m_0 = m_0 \cdot (x_1 \cdot \overline{x_2} + \overline{x_1} \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2)$$

Otra forma de expresar la retención del estado m_0 , con aplicación directa a los sistemas de control automático, se basa en razonar con los estados futuros inmediatos alcanzables desde m_0 . En el ejemplo, se “retiene” el estado m_0 mientras no se active el estado m_1 , y la ecuación de retención toma la forma:

$$m_0 = m_0 \cdot \overline{m_1}$$

La ecuación que expresa la evolución de la máquina al estado m_0 es el OR de los minitérminos de activación y retención anteriores:

$$m_0 = m_1 \cdot (\overline{x_1} \cdot \overline{x_2}) + m_0 \cdot \overline{m_1}$$

El primer minitérmino corresponde con la ecuación de **activación** y el segundo con la de **retención**.

Nota.- La implementación de las ecuaciones de activación siempre se realiza de forma explícita, pues es imprescindible para el cambio de estados. No así la implementación de las ecuaciones de retención que suele ser de forma implícita: si no se activa un nuevo estado, se permanece en el estado actual.

6.3 Tabla de transición de estados

Las máquinas de estados de sistemas secuenciales también se pueden representar mediante una tabla en la que, a diferencia de la tabla de verdad de los sistemas combinatoriales, se muestran no solo las funciones de salida sino también las funciones de transición de estado (el cuarto elemento de la 5-tupla, δ).

En las máquinas de Moore en las que la salida depende de un único estado, algo frecuente en los sistemas de control automático, las filas de la tabla de transición representan estados y las columnas entradas y salidas (un ejemplo aparece en la Tabla 6.3).

Tabla 6.3: Tabla de transición de estados de Moore

$m \setminus x_1x_2$	00	01	11	10	Salida
m_{00}	m_{00}	m_{01}	m_{10}	m_{01}	0
m_{01}	m_{00}	m_{01}	m_{10}	m_{01}	1
m_{10}	m_{01}	m_{10}	m_{11}	m_{10}	0
m_{11}	m_{01}	m_{10}	m_{11}	m_{10}	1

En una máquina de Mealy se representan estados (filas) frente a entradas (columnas). Los valores de las salidas, puesto que dependen del estado, aparecen en cada celda, tal y como se muestra a modo de ejemplo en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Tabla de transición de estados de Mealy

$m \setminus x_1x_2$	00	01	11	10
m_0	$m_0,0$	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_0,1$
m_1	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_1,1$	$m_1,0$

Cada fila de la tabla representa el estado activo en un instante determinado k . En cada celda puede leerse el conjunto de estados que se activarían para la combinación de entradas de la columna correspondiente de la celda en el instante $k+1$. Los valores de las salidas en una celda se corresponden con la combinación de estado/entradas de la fila/columna. Observe que no dependen de los estados futuros en la misma celda.

Un posible inconveniente que puede darse en la máquina de Mealy es el siguiente. Partiendo de la Tabla 6.4, supongamos que estamos en el estado m_0 y las entradas son “11”. Según la tabla se debería pasar al estado m_1 y la salida debería pasar a ser ‘0’. Sin embargo, podría ocurrir que al pasar al estado m_1 , las entradas continuaran siendo “11”, y por tanto la salida debería pasar a ser ‘1’. Si la transición es muy rápida, podría incluso ocurrir que la salida pasara a ser ‘1’ sin pasar por ‘0’. Esta es una de las razones por las que se emplean diseños basados en máquinas de Moore en automatismos.

6.3.1 Ecuaciones de activación y retención a partir de la tabla de transición de estados

A partir de la tabla de transición podemos obtener las ecuaciones simplificadas de activación y retención y salida para cada uno de los estados construyendo las correspondientes tablas de Karnaugh, pues dichas ecuaciones representan subsistemas combinacionales. Por ejemplo, consideremos la tabla de transición de estados de la máquina de Moore dada por la Tabla 6.3. Para calcular la ecuación de activación de m_{10} se consideran los valores de las filas de los estados desde los que se llega a m_{10} , es decir m_{00} (con entradas “11”), m_{01} (con entradas “11”) y m_{11} (con entradas “01” y “10”).

La tabla de Karnaugh para la activación del estado m_{10} desde m_{11} puede verse en la Fig. 6.8.

		x_2	
		0	1
x_1	1	1	0

Figura 6.8: Tabla de Karnaugh

En este caso no se puede simplificar y obtendríamos la ecuación:

$$m_{10} = m_{11} \cdot (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2)$$

Simplificando vía Karnaugh la activación del estado m_{10} a partir del resto de estados (m_{00} y m_{01}) se obtiene la ecuación completa de activación del estado m_{10} :

$$m_{10} = m_{00} \cdot x_1 x_2 + m_{01} \cdot x_1 x_2 + m_{11} \cdot (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2)$$

La ecuación de retención del estado m_{10} se obtiene de forma análoga. Se hace un diagrama de Karnaugh a partir de la fila del estado m_{10} , con unos en las entradas en las que se mantiene el estado m_{10} , y ceros en las que evoluciona a otro estado. Casualmente, el diagrama es el mismo que el de la Fig. 6.8. La ecuación de retención para m_{10} quedaría:

$$m_{10} = m_{10} \cdot (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2)$$

Y la ecuación completa de m_{10} sería la suma de la de activación y retención:

$$m_{10} = m_{00} \cdot x_1 x_2 + m_{01} \cdot x_1 x_2 + m_{11} \cdot (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2) + m_{10} \cdot (x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2)$$

6.4 Simplificación de estados

Dos estados son equivalentes cuando para cualquier secuencia de entradas la máquina evoluciona de la misma manera:

- Pasa por los mismos estados
- Presenta la misma salida en todo momento

En la tabla de transición de estados, la caracterización de estados equivalentes se corresponde con aquellas filas que presentan los mismos valores en todas las celdas. Todos aquellos estados equivalentes pueden simplificarse en uno solo.

Por ejemplo, en la Tabla 6.5, se puede simplificar la fila 2 y la 3, fusionando m_1 con m_2 (y dejando, por ejemplo, m_1):

Tabla 6.5: Ejemplo de tabla de estados equivalentes

$m \setminus x_1 x_2$	00	01	11	10
m_0	$m_0,0$	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_2,1$
m_1	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_1,1$	$m_1,0$
m_2	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_1,1$	$m_1,0$

En el ejemplo, si se elimina el estado m_2 , habría que modificar el resto de filas en las que apareciera m_2 y cambiarlo por m_1 . Por tanto la Tabla 6.5 se transformaría en la Tabla 6.6:

Tabla 6.6: Ejemplo de tabla de estados equivalentes simplificada.

$m \setminus x_1 x_2$	00	01	11	10
m_0	$m_0,0$	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_1,1$
m_1	$m_0,1$	$m_1,0$	$m_1,1$	$m_1,0$

La simplificación de estados no es obligatoria realizarla. Hay veces que al simplificar estados se pierde el significado físico del estado (i.e. cilindro expandido, puerta abierta, etc.). Y, consecuentemente, se puede elegir no simplificar al máximo, manteniendo los estados elegidos inicialmente. Es una decisión del diseñador. La simplificación es interesante realizarla cuando se tienen recursos técnicos limitados (por ejemplo, memoria). También es interesante para dilucidar si el sistema es combinacional o secuencial.

6.4.1 Método de simplificación

Aunque las filas de la tabla de transición de estados no sean idénticas, también es posible reducir el número de estados fusionándolas. Esto se puede hacer cuando tengamos combinaciones de entradas que “no importan” (nos dan igual bien porque no se pueden dar o porque es indiferente hacia donde evolucione el sistema), representadas por una X y llamadas también indefinidas o imposibles (en inglés se denominan “don’t care”). Se pueden fusionar filas que tengan en sus columnas:

- El mismo estado.
- Condiciones de “no importa” (X).

Incluso se pueden fusionar filas que tengan salidas distintas. En este caso estaríamos creando una máquina de Mealy. Es decir, si partimos de una máquina de Moore, en la que la salida está definida por cada estado, y fusionamos filas con salidas iguales, mantenemos la máquina de Moore. Si, por el contrario, fusionamos filas con salidas diferentes, estaríamos pasando a una máquina de Mealy³.

Vamos a verlo con unos ejemplos.

6.4.2 Ejemplo de simplificación con salidas iguales

Se pide realizar un automatismo para el control de un cilindro de doble efecto con una electroválvula 5/2 monoestable. Se dispone de un pulsador P y un sensor de posición S, que detecta la expansión máxima del cilindro. Al pulsar P se realizará un ciclo completo de expansión/compresión del cilindro. Para la compresión del cilindro P debe estar desactivado.

En primer lugar identificamos las entradas {P, S} y las salidas {A1}.

A continuación dibujamos el diagrama de estados (Fig. 6.9). Partimos de un estado de reposo m_1 . Si pulsamos P pasaremos a m_2 , activando la salida y expandiendo el cilindro. En m_2 hay dos opciones. La primera es que soltemos P, pasando a m_3 (y el cilindro se sigue expandiendo). La segunda, que no soltemos P y que el cilindro llegue a su expansión máxima (m_4). Estando en m_3 , cuando el cilindro llegue a su expansión máxima, se activará S y pasaremos al estado m_5 . En m_4 , cuando soltemos P, también pasaremos a m_5 . En m_5 el cilindro se está comprimiendo y cuando se desactive S se pasará al estado m_1 , en el que el cilindro se terminará de comprimir y permanecerá comprimido.

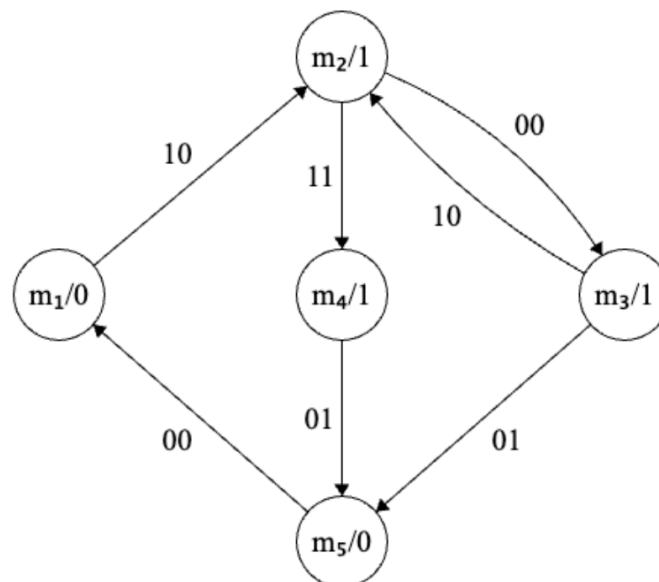


Figura 6.9: Diagrama de estado

A partir del diagrama obtenemos la tabla de transición de estados.

³Este método se puede encontrar en la bibliografía como método de Huffman [3] o método de la tabla de fases [5].

Tabla 6.7: Tabla de estados

$m \setminus PS$	00	01	11	10	Salida(A1)
m_1	m_1	x	x	m_2	0
m_2	m_3	x	m_4	m_2	1
m_3	m_3	m_5	x	m_2	1
m_4	x	m_5	m_4	x	1
m_5	m_1	m_5	m_4	x	0

Vemos que se indican varios estados imposibles (X). Estos estados surgen porque, o bien el estado no se puede dar (por motivos físicos o mecánicos), o bien porque la funcionalidad del sistema no lo permite. En este caso consideramos que las dos entradas no pueden cambiar a la vez. Siempre habrá una que cambie un poco antes que la otra.

Procedemos a fusionar filas (estados). A simple vista vemos que podemos fusionar las filas 1 y 5, y por otro lado las filas 2, 3, y 4. Nos quedaría la tabla simplificada (Tabla 6.8), en la que renombramos los estados: m_1 y m_5 pasan a ser m_a . Y m_2 , m_3 y m_4 pasan a ser m_b .

Tabla 6.8: Tabla de estados simplificada

$m \setminus PS$	00	01	11	10	Salida(A1)
m_a	m_1	m_5	m_4	m_2	0
m_b	m_3	m_5	m_4	m_2	1

Renombrando los estados obtenemos:

Tabla 6.9: Tabla de estados simplificada con memoria.

$m \setminus PS$	00	01	11	10	Salida(A1)
m_a	m_a	m_a	m_b	m_b	0
m_b	m_b	m_a	m_b	m_b	1

A partir de aquí, para obtener las ecuaciones del sistema podemos utilizar dos métodos: ecuaciones de activación/retención o tabla de verdad.

6.4.2.1 Resolución mediante ecuaciones de activación y retención

A partir de la Tabla 6.9 podemos obtener fácilmente las ecuaciones de los estados:

$$m_a(k+1) = m_b(k) \cdot \bar{P} \cdot S + m_a(k) \cdot \overline{m_b(k+1)}$$

$$m_b(k+1) = m_a(k) \cdot P + m_b(k) \cdot \overline{m_a(k+1)}$$

Y de la salida:

$$A1(k) = m_b(k)$$

6.4.2.2 Resolución mediante tabla de verdad

Al tener sólo dos estados, que hemos llamado m_a y m_b , podemos codificarlos con sólo un bit de memoria.

Tabla 6.10: Tabla de estados simplificada con memoria.

$m \setminus PS$	00	01	11	10	Salida(A1)	Memoria
m_a	m_a	m_a	m_b	m_b	0	0
m_b	m_b	m_a	m_b	m_b	1	1

También podemos hacer la tabla de verdad, con dos entradas, P y S, una memoria y una salida. $m_k=0$ corresponde a m_a , y $m_k=1$ corresponde a m_b . Para cada fila de la tabla de verdad 6.11, se obtienen los valores a partir de la tabla de estados 6.10, mediante la fila que indica el estado (m_a o m_b) y la columna que indican PS.

Tabla 6.11: Tabla de verdad.

P	S	m_k	m_{k+1}	$A1_k$
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	1	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	1	1
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Finalmente podemos obtener las ecuaciones. Se ve claramente (porque las columnas son idénticas) que:

$$A1(k) = m(k)$$

Mediante un diagrama de Karnaugh (Fig. 6.10) podemos obtener la ecuación del estado siguiente:

$$m(k + 1) = P + m(k) \cdot \bar{S}$$

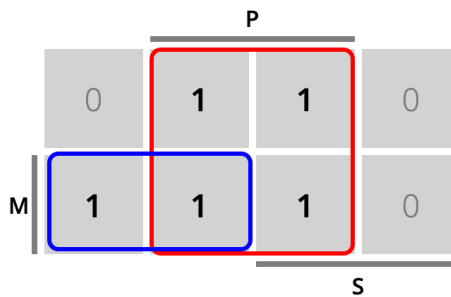


Figura 6.10: Diagrama de estado

Nota.- Se puede observar que las ecuaciones de transición de estados son equivalentes a las del apartado 6.4.2.1, y que éste último está empleando dos variables internas en lugar de una. No siendo mínimo, tiene la ventaja de que son estados con semántica física y de uso habitual en los modelos reales de control.

6.4.3 Ejemplo de simplificación con salidas distintas

Se pide diseñar un sistema de control de señalización de un cruce de vías. Cuando un tren es detectado por la vía A, se activa el semáforo en la vía B, RB. En el caso de detectar un tren por la vía B, el semáforo RA se encenderá.

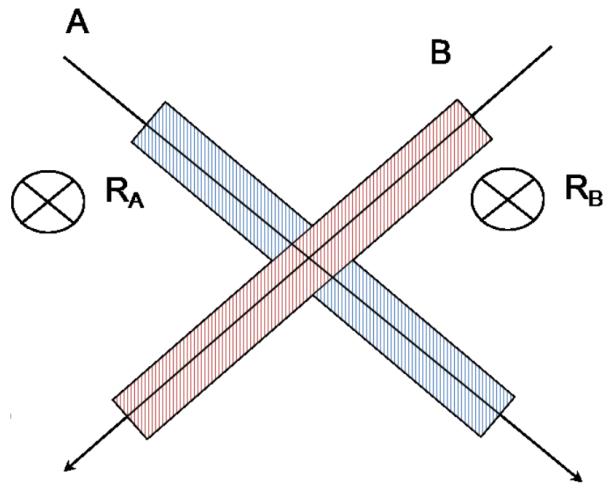


Figura 6.11: Cruce de trenes

En primer lugar, realizamos el diagrama de estados (Fig. 6.12). La semántica de los estados es la siguiente: m_0 es el estado de reposo. m_1 indica que se ha detectado un tren por la vía A, por lo que se activa el semáforo R_B . De forma análoga, m_2 indica que se ha detectado un tren por la vía B, por lo que se activa el semáforo R_A . m_3 indica que, habiéndose detectado un tren en la vía A, también se detecta un tren por la vía B, teniendo prioridad el tren de la vía A (semáforo R_B activo). De forma análoga, m_4 indica que, habiéndose detectado un tren en la vía B, también se detecta un tren por la vía A, teniendo prioridad el tren de la vía B (semáforo R_A activo). En los arcos se indican las entradas (AB) y en los estados las salidas $R_A R_B$.

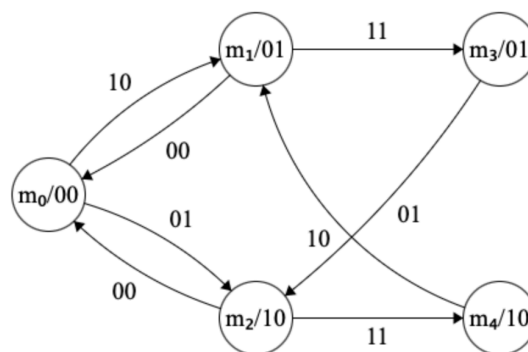


Figura 6.12: Diagrama de estados de cruce de trenes

A continuación, la tabla de transición de estados:

Tabla 6.12: Tabla de transición de estados.

$m \setminus AB$	00	01	11	10	Salidas($R_A R_B$)
m_0	m_0	m_2	x	m_1	0 0
m_1	m_0	x	m_3	m_1	0 1
m_2	m_0	m_2	m_4	x	1 0
m_3	x	m_2	m_3	x	0 1
m_4	x	x	m_4	m_1	1 0

Ahora procedemos a simplificar la tabla. Al igual que antes, podemos ir por dos caminos.

6.4.3.1 Resolución por ecuaciones de activación y retención

Si no necesitamos hacer una simplificación máxima, podemos fusionar las filas que tengas las mismas salidas. En este caso, fusionamos m_1 con m_3 (llamado m_{13}), y m_2 con m_4 (llamado m_{24}).

Tabla 6.13: Tabla de transición de estados.

$m \setminus AB$	00	01	11	10	Salidas(R_A R_B)
m_0	m_0	m_{24}	x	m_{13}	0 0
m_{13}	m_0	m_{24}	m_{13}	m_{13}	0 1
m_{24}	m_0	m_{24}	m_{24}	m_{13}	1 0

A partir de aquí obtenemos las ecuaciones de activación y retención:

$$\begin{aligned}
 m_0(k+1) &= (m_{13}(k) + m_{24}(k)) \cdot \bar{A} \cdot \bar{B} + m_0(k) \cdot (\overline{m_{13}(k+1)} + \overline{m_{24}(k+1)}) \\
 m_{13}(k+1) &= m_0(k) \cdot A + m_{24}(k) \cdot A \cdot \bar{B} + m_{13}(k) \cdot (\overline{m_0(k+1)} + \overline{m_{24}(k+1)}) \\
 m_{24}(k+1) &= m_0(k) \cdot B + m_{13}(k) \cdot \bar{A} \cdot B + m_{24}(k) \cdot (\overline{m_0(k+1)} + \overline{m_{13}(k+1)})
 \end{aligned}$$

Observando la tabla detenidamente también se podría obtener:

$$m_0(k+1) = \bar{A} \cdot \bar{B}$$

Y las de las salidas:

$$Ra(k) = m_{24}(k)$$

$$Rb(k) = m_{13}(k)$$

6.4.3.2 Resolución por tabla de verdad

Ahora vamos a buscar la simplificación máxima. En este caso vamos a fusionar estados no equivalentes, es decir, fusionamos filas aunque no tengan las mismas salidas. Fusionamos los estado 0, 1 y 3 por un lado (m_a), y 2 y 4 por otro (m_b). La nueva tabla quedaría:

Tabla 6.14: Tabla de transición de estados simplificada (sin salidas).

$m \setminus AB$	00	01	11	10	Memoria
m_a	m_a	m_b	m_a	m_a	0
m_b	m_a	m_b	m_b	m_a	1

Para representar los nuevos estados nos basta con una memoria (1 bit). Ya no podemos indicar las salidas porque no dependen exclusivamente del estado. Aunque podemos expresarla como una máquina de Mealy:

Tabla 6.15: Tabla de transición de estados simplificada con salidas (Mealy).

$m \setminus AB$	00	01	11	10	Memoria
m_a	$m_a,00$	$m_b,10$	$m_a,01$	$m_a,01$	0
m_b	$m_a,00$	$m_b,10$	$m_b,10$	$m_a,01$	1

Por tanto, la tabla de verdad quedaría:

Tabla 6.16: Tabla de verdad.

A	B	m_k	m_{k+1}	R_{Ak}	R_{Bk}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	0

Y las ecuaciones quedarían de la siguiente forma. R_A se obtiene de forma inmediata:

$$R_A(k) = m(k+1)$$

El resto se pueden obtener mediante diagrama de Karnaugh:

$$m(k+1) = B \cdot (\bar{A} + m(k))$$

$$R_B(k) = A \cdot (\bar{B} + \bar{m}(k))$$

6.4.4 Ejemplo de simplificación combinacional

Se desea realizar un sistema de control de calidad para una fábrica. Se dispone de:

- una cinta transportadora que se mueve mediante un motor, accionado mediante una señal R ('0': paro, '1': marcha).
- una cámara que detecta si alguna pieza está defectuosa, generando una señal S que vale '1' cuando la pieza está defectuosa y '0' en caso contrario.
- un interruptor I (si está en ON genera un '1'; si está en OFF genera un '0')
- un cilindro neumático que se controla mediante una válvula neumática y una señal A.

Cuando se pone el interruptor en ON, el motor se pone en marcha y empiezan a llegar piezas. Si la cámara detecta una pieza defectuosa, la cinta se para y se activa el cilindro para expulsar la pieza de la cinta. Cuando la cámara no detecta la pieza se vuelve a poner en marcha. Si el interruptor se pone en OFF la cinta se para (siempre que no haya una pieza defectuosa bajo la cámara).

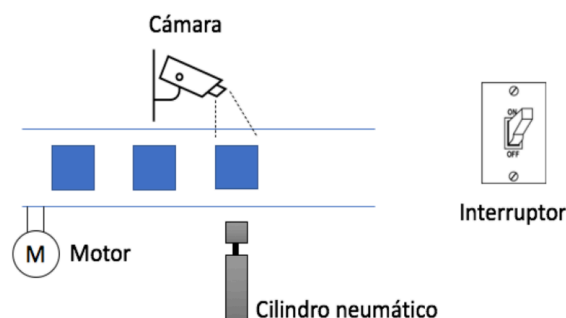


Figura 6.13: Ejemplo de cámara de detección de piezas defectuosas.

En primer lugar dibujamos el diagrama de estados, empezando por el estado de reposo m_1 .

Pasamos a la tabla de transición de estados:

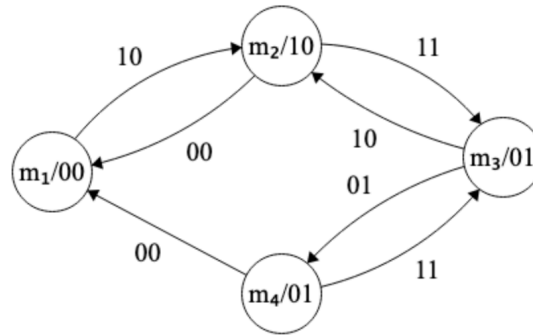


Figura 6.14: Diagrama de estados del ejemplo de cámara de detección de piezas defectuosas.

Tabla 6.17: Tabla de transición de estados.

$m \setminus IS$	00	01	11	10	Salidas(R A)
m_1	m_1	m_4	x	m_2	0 0
m_2	m_1	x	m_3	m_2	1 0
m_3	x	m_4	m_3	m_2	0 1
m_4	m_1	m_4	m_3	x	0 1

Vemos que podemos fusionar todas las filas, obteniendo:

Tabla 6.18: Tabla de transición de estados simplificada.

$m \setminus IS$	00	01	11	10
m_1	m_1	m_4	m_3	m_2

La podemos expresar con la salidas:

Tabla 6.19: Tabla de transición de estados simplificada (Mealy).

$m \setminus IS$	00	01	11	10
m_1	$m_1,00$	$m_4,01$	$m_3,01$	$m_2,10$

Se trata, por tanto, de un sistema combinacional.

La tabla de verdad quedaría (no hace falta indicar estados porque no hay, es combinacional):

Tabla 6.20: Tabla de verdad.

I	S	R	A
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1

Y las ecuaciones:

$$R = I \cdot \bar{S}$$

$$A = S$$

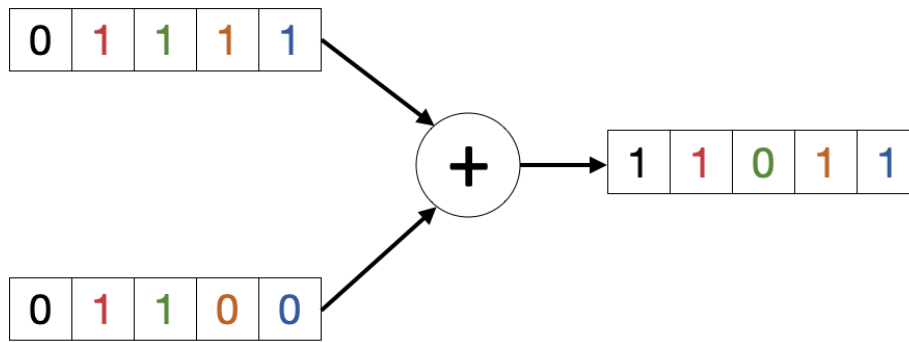


Figura 6.16: Sumador binario

Tabla 6.21: Tabla de verdad del ejercicio del sumador binario

x_1	x_2	y	Acarreo
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Claramente es un sistema secuencial porque la suma de dos bits depende de la suma anterior, es decir, del acarreo. Por ejemplo, si sumamos en binario “11” y “11”, en la primera suma de ‘1’ y ‘1’ el resultado será ‘0’ y el acarreo ‘1’. Pero en la siguiente suma de ‘1’ y ‘1’, hay que añadir el acarreo anterior, y por tanto el resultado será ‘1’ y el acarreo ‘1’.

Máquina de estados

Por lo visto anteriormente parece lógico elegir dos estados: m_0 representa el estado en el que no hay acarreo y m_1 el estado en el que sí hay. Para estos dos estados, el diagrama de estados aparece dibujado en la Fig. 6.7. Repetimos el diagrama aquí (Fig. 6.17) para facilitar la lectura. La notación en los arcos corresponde al patrón de variables $x_1, x_2/y$.

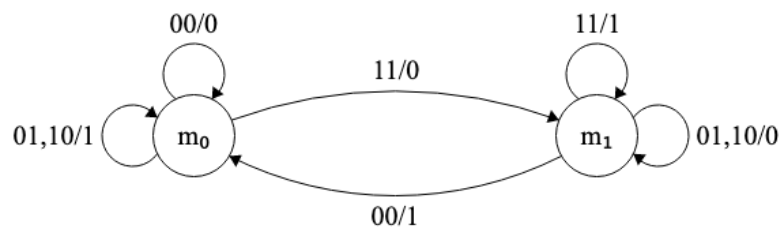


Figura 6.17: Diagrama de estados para sumador binario

La máquina propuesta se corresponde con una máquina de **Mealy**, pues la salida depende del estado y de las entradas. Por ejemplo, en m_0 , si las entradas valen “00” ó “11” la salida vale ‘0’, y si las entradas son “01” ó “10” la salida vale ‘1’.

Funciones de transición y de salida

Para la máquina de Mealy las funciones de transición δ y de salida β serían las ecuaciones (6.1) y (6.2) respectivamente:

$$\begin{aligned}
 \delta(m_0, 11) &:= m_1 \\
 \delta(m_1, 00) &:= m_0 \\
 \delta(m_0, 00/01/10) &:= m_0 \\
 \delta(m_1, 10/01/11) &:= m_1
 \end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\beta(m_0, 00/11) := 0$$

Tabla 6.22: Tabla de verdad del ejercicio del sumador binario con estados

x_1	x_2	m_k	m_{k+1}	y
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

Y las ecuaciones:

$$m_{k+1} = \delta = x_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot m_k + x_2 \cdot m_k$$

$$y = \beta = x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{m_k} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{m_k} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot m_k + x_1 \cdot x_2 \cdot m_k$$

A partir de la función de transición mostrada en la Eq. (6.6.1) se deduce que el estado de acarreo se activa (hay acarreo real) cuando al menos dos de las variables que intervienen toman el valor “1”. En otras palabras, habrá acarreo cuando bien los dos sumandos valen “1”, bien un sumando vale “1” y hay un acarreo anterior.

Ejercicio.- Se deja al lector hacer una interpretación similar para la Eq. (6.6.1) de las salidas.

Tanteo con máquina de Moore

Se ha podido comprobar que el diseño anterior no se corresponde con una máquina de Moore. Por tanto se propone como ejercicio diseñar una máquina de Moore partiendo de los dos estados m_0 y m_1 vistos anteriormente. Para ello, al ser una máquina de Moore, deberemos asignar una salida a cada estado. ¿Qué salida asignamos a m_0 ? ¿‘0’? ¿‘1’? Vemos que ninguna de las opciones es correcta.

Esto es debido a que dos estados no son suficiente para codificar la información necesaria en una máquina de Moore para el sumador binario.

Pasaremos entonces a intentarlo con cuatro estados añadiendo un estado más con semántica de salida para cada uno de los estados anteriores:

- m_{00} : estado de no acarreo con salida $y=0$
- m_{01} : estado de no acarreo con salida $y=1$
- m_{10} : estado de acarreo con salida $y=0$
- m_{11} : estado de acarreo con salida $y=1$

Para estos estados, la nueva máquina (de tipo Moore) se corresponde con la Figura 6.6 y se repite aquí (Figura 6.18) para facilitar la lectura. En este caso los arcos muestran solamente valores de las entradas x_1x_2 ; los valores de la salida aparecen dentro de los estados.

Para la máquina de Moore las funciones de transición δ y de salida λ serían las ecuaciones (6.3) y (6.4) respectivamente:

$$\begin{aligned}
 \delta(m_{00}/m_{01}, 00) &:= m_{00} \\
 \delta(m_{10}/m_{11}, 00) &:= m_{01} \\
 \delta(m_{00}/m_{01}, 01/10) &:= m_{01} \\
 \delta(m_{00}/m_{01}, 11) &:= m_{10} \\
 \delta(m_{10}/m_{11}, 11) &:= m_{11} \\
 \delta(m_{10}/m_{11}, 01/10) &:= m_{10}
 \end{aligned}
 \tag{6.3}$$

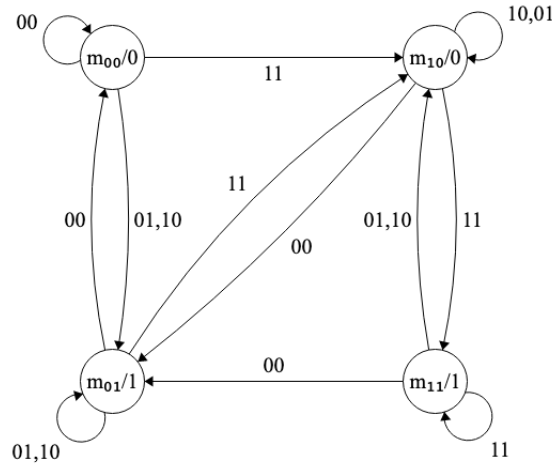


Figura 6.18: Diagrama de estados para sumador binario (versión Moore)

$$\begin{aligned} \lambda(m_{00}/m_{10}) &:= 0 \\ \lambda(m_{01}/m_{11}) &:= 1 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Ejercicio.- Indique otra posible conversión de Mealy a Moore (estados con semántica de entradas) para el sumador binario.

Tabla de transición de estado

Las **tablas de transición de estado** para las dos máquinas se corresponden con las Tablas 6.3 y 6.4 vistas en la sección 6.3.

6.6.2 Detector de secuencia binaria

En este ejercicio vamos a implementar un detector de secuencias binarias. En este caso será la secuencia “101”. En la Fig. 6.19 podemos ver un diagrama del reconocedor. Consta de una entrada x y una salida y. Por la entrada x van llegando bits. Cuando se detecta la secuencia “101” la salida vale ‘1’, y cuando no ‘0’. Como aclaración, la secuencia “10101” es una sola secuencia reconocida, no dos.

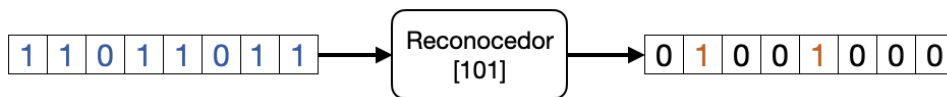


Figura 6.19: Diagrama de sistema reconocedor de secuencias binarias

Partimos de un estado inicial, correspondiente al caso de que no se ha reconocido ninguna letra de la secuencia, y elegimos el resto de estados con semántica de cada nueva subcadena reconocida. El último estado corresponde con la secuencia completa “101”. Por tanto, los estados serían:

- m_n : ningún símbolo reconocido
- m_1 : subcadena 1 reconocida
- m_{10} : subcadena 10 reconocida
- m_{101} : cadena 101 reconocida

El diagrama se puede ver en la Fig. 6.20.

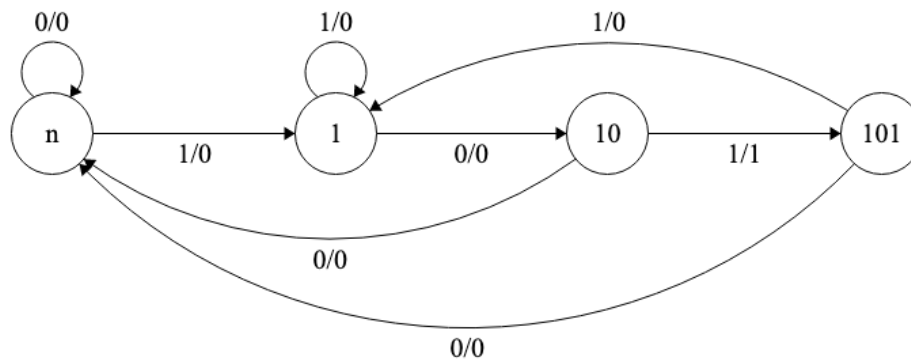


Figura 6.20: Máquina de estados de Mealy del sistema recocedor de secuencias binarias

Nota.- Aunque en este libro se suele utilizar una nomenclatura para los estados que empieza por la letra m , de ahora en adelante se suprimirá esta letra en los diagramas para una mayor legibilidad.

Ejercicio.- Justifique que es un sistema secuencial. Indique si se trata de una máquina de Moore o de Mealy.

La siguiente fase es realizar la tabla de transición de estados, mostrada en la Tabla 6.23.

Tabla 6.23: Tabla de verdad del ejercicio del sumador binario con máquina de Mealy

$m \setminus x$	0	1
m_n	$m_n/0$	$m_1/0$
m_1	$m_{10}/0$	$m_1/0$
m_{10}	$m_n/0$	$m_{101}/1$
m_{101}	$m_n/0$	$m_1/0$

Se puede apreciar que esta tabla es simplificable ya que la primera y la última fila son iguales (los estados m_n y m_{101} son equivalentes). Eliminando el estado m_{101} , la tabla de transición y el diagrama de estados se corresponden con la Tabla 6.24 y la Figura 6.21.

Tabla 6.24: Tabla de verdad del ejercicio del sumador binario con máquina de Mealy simplificada

$m \setminus x$	0	1
m_n	$m_n/0$	$m_1/0$
m_1	$m_{10}/0$	$m_1/0$
m_{10}	$m_n/0$	$m_n/1$

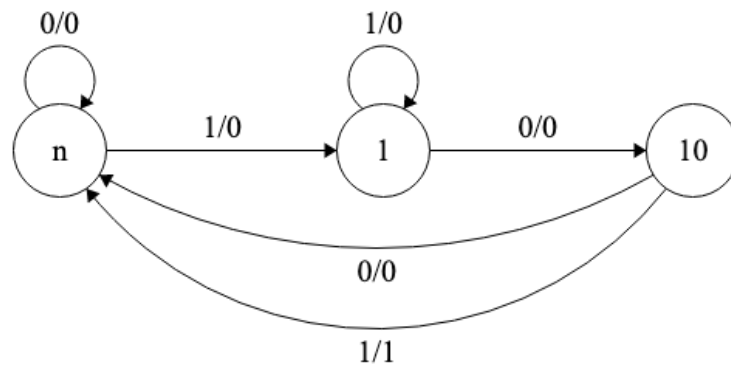


Figura 6.21: Máquina de estados de Mealy simplificada del sistema recocedor de secuencias binarias

Podemos ya desvelar que la máquina anterior era de Mealy. Una máquina de Moore para este sistema puede obtenerse sin más que “desplazar” la salida con valor ‘1’ del arco al estado m_{101} en la Fig. 6.20. Este diseño es mucho más natural ya que el estado que representa la secuencia buscada es el que tiene la salida asociada.

La máquina queda representada en la Tabla 6.25 y la Fig. 6.22.

Tabla 6.25: Tabla de verdad del ejercicio del sumador binario con máquina de Moore

$m \setminus x$	0	1	Salida
m_n	m_n	m_1	0
m_1	m_{10}	m_1	0
m_{10}	m_n	m_{101}	0
$m_n 101$	m_n	m_1	1

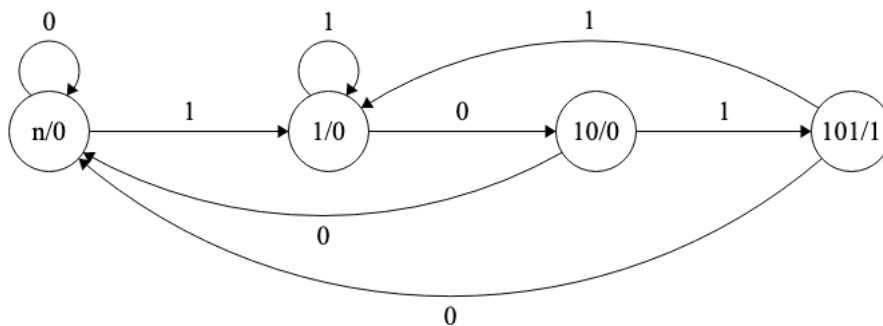


Figura 6.22: Máquina de estados de Moore del sistema recocedor de secuencias binarias

Obsérvese que dado que el estado m_{101} tiene semántica de salida, no es equivalente al estado m_n y la máquina de Moore no puede simplificarse.

Nota.- En general, las máquinas de estado de Mealy tienen menos estados que las de Moore. Sin embargo, tanto por presentar una mayor estabilidad en la salida como por la claridad del diseño, se recomienda el uso de máquinas de Moore (al menos como estructura general) para el control automático.

6.6.3 Control de una vagoneta

Se desea implementar el sistema de control del tren la Fig. 6.23 para que cuando se active un pulsador (señal P_{on}) el tren vaya del punto A al punto B y vuelva a A. Para ello se dispone de dos sensores de fin de carrera en A (señal 'A') y en B (señal 'B'). Para mover el tren se dispone de dos señales: 'yI' para mover el tren hacia la izquierda e 'yD' para mover el tren hacia la derecha.

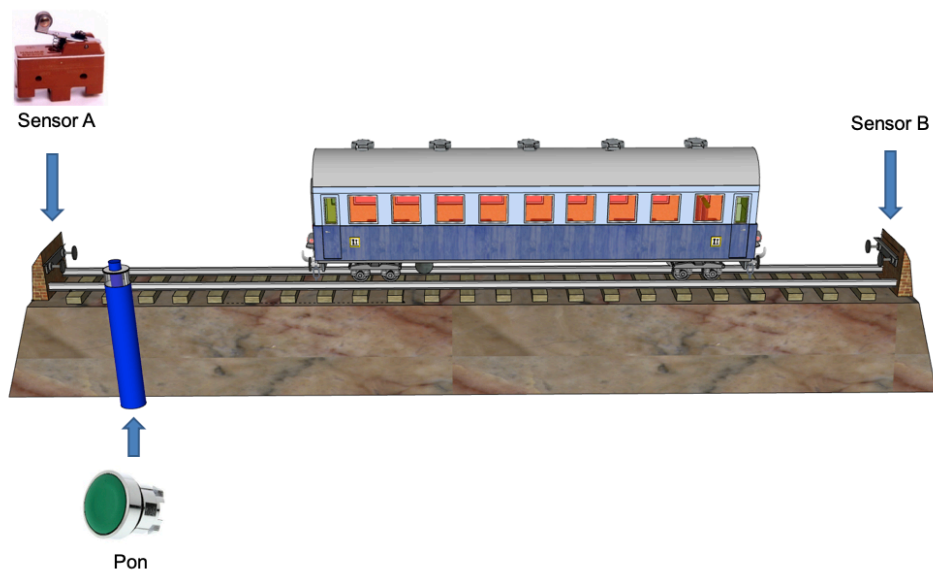


Figura 6.23: Sistema de control de una vagoneta

Vamos a proceder con un diseño con una máquina de Moore, es decir, un estado por cada acción de control (o combinaciones de acciones de control). Consideramos los siguientes estados:

- mR: Reposo
- mD: tren moviéndose hacia la derecha
- mI: tren moviéndose hacia la izquierda

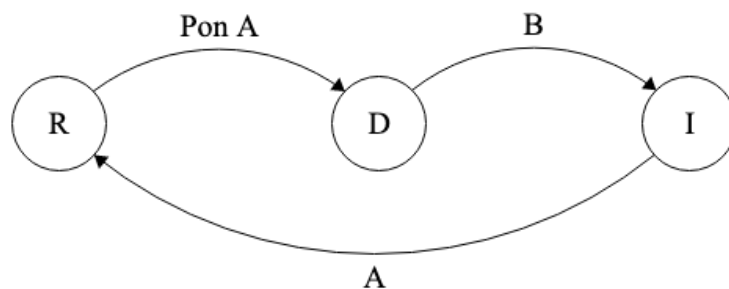


Figura 6.24: Máquina de estados del sistema de control de una vagoneta

Para generar la tabla de transición de estados se sigue el proceso siguiente. En primer lugar se rellenan

las celdas que corresponden con la activación de estados (y que darán lugar a ecuaciones de activación), obteniendo la Tabla 6.26.

Tabla 6.26: Vagoneta: Tabla de transición de estados rellena con celdas de activación de estados futuros.

$m \setminus P_{on} AB$	000	001	010	011	100	101	110	111	0
mR				x			mD	x	0,0
mD		mI		x		mI		x	1,0
mI			mR	x			mR	x	0,1

Las ‘x’ representan celdas que son físicamente imposibles de acuerdo con la descripción del problema. Consecuentemente, pueden tomar el valor de cualquier estado. En este caso, por la distribución física de los sensores, es imposible que las señales A y B estén activas a la vez.

Cada estado en una celda de la tabla genera un minitérmino de la ecuación de activación de dicho estado. Este término contiene el estado (origen) que aparece en la cabecera de la fila de la celda, junto a los literales (combinación de entradas) que figuran en la columna de la celda. En el ejemplo de la Tabla 6.26, cada una de las dos celdas en donde aparece el estado mR produce un minitérmino en la ecuación de activación de dicho estado.

Como siempre, cada ecuación de activación del estado puede simplificarse. La Fig. 6.25 muestra las tablas de Karnaugh correspondiente a la activación de cada uno de los estados. A modo de ejemplo, la tabla de Karnaugh para la activación del estado mD (en rojo) muestra un ‘1’ para la combinación de entradas que hacen que se pase de mR a mD, un ‘0’ en caso contrario y un ‘*’ para los casos imposibles o indiferentes. En azul tendremos la combinación de entradas que hacen que se pase de mD a mI (y que por tanto activarán mI). Y en verde la combinación de entradas que hacen que se pase de mI a mR (y que por tanto activarán mR).

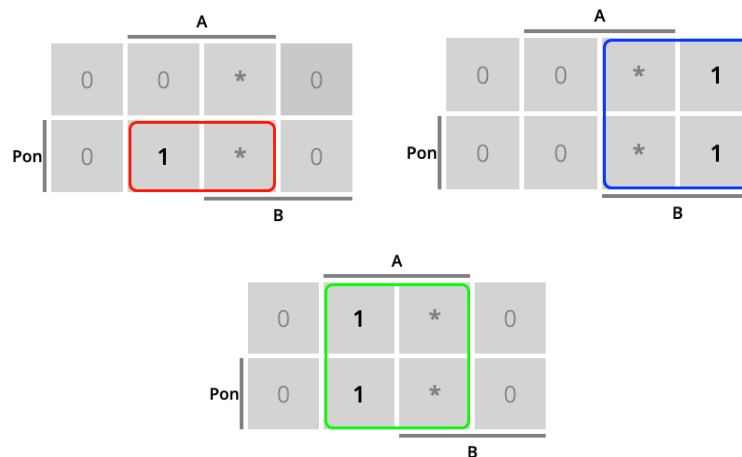


Figura 6.25: Vagoneta: tablas de Karnaugh para el cálculo de las ecuaciones de activación de mR (en verde), mD (en rojo) y mI (en azul)

De cada tabla de Karnaugh obtenemos la ecuación de activación de cada estado:

$$\begin{aligned}
 mD_{k+1} &= mR_k \cdot P_{on} \cdot A \\
 mI_{k+1} &= mD_k \cdot B \\
 mR_{k+1} &= mI_k \cdot A
 \end{aligned}
 \tag{6.5}$$

El siguiente paso es completar la Tabla 6.26 con las ecuaciones de retención de los estados. Cada celda que falta por rellenar se corresponde a combinaciones de entradas (columna) que no cambian el estado (fila). La Tabla 6.27 muestra sólo las celdas de retención.

Tabla 6.27: Vagoneta: Tabla de transición de estados para celdas de retención de estados.

$m \setminus P_{on}AB$	000	001	010	011	100	101	110	111	O
mR	mR	mR	mR	x	mR	mR		x	0,0
mD	mD		mD	x	mD		mD	x	1,0
mI	mI	mI		x	mI	mI		x	0,1

Nota.- En algunas celdas se podría elegir entre mR o x(*) indistintamente. Corresponde al diseñador elegir lo que sea más acorde a la funcionalidad empleada. Por ejemplo, estando en el estado mR no se debería activar B, por lo que se podría poner x en la fila “001”.

Las ecuaciones de retención pueden obtenerse y simplificarse de una manera similar a las ecuaciones de activación. Con esta metodología, cada ecuación de retención estará formada por un minitérmino compuesto del estado actual y las combinaciones de entradas que no provoquen un cambio de estado. La Fig. 6.26 muestra el caso de mR. Un ‘1’ supone una combinación de entradas que no provoca cambio de estado, un ‘0’ lo contrario y un ‘*’ los casos imposibles o indiferentes.

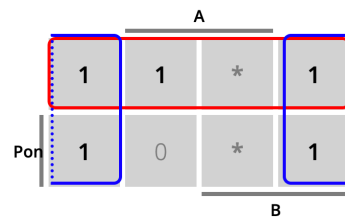


Figura 6.26: Vagoneta: tablas de Karnaugh para el cálculo de las ecuaciones de retención de mR

La ecuación correspondiente será:

$$mR_{k+1} = mR_k \cdot (\bar{A} + \bar{P}_{on})$$

En programas de control reales, no se usan estas ecuaciones para implementar la retención debido al elevado número de entradas de estos sistemas, que llevan a una explosión combinatoria de términos. En la práctica, y tal y como se comentó en la sección 6.2.2, se razona con los estados futuros inmediatos del estado a retener. A modo de ejemplo, se “retiene” el estado mR mientras no se active el estado mD, único estado alcanzable desde mR. La ecuación de retención toma la forma:

$$mR_{k+1} = mR_k \cdot \overline{mD_{k+1}}$$

Ambos tipos de ecuaciones de retención son equivalentes en la práctica.

Ejercicio.- Se deja al lector el cálculo de las ecuaciones de retención de los estados mD y mI.

Combinando ambas tablas se obtiene la tabla completa, mostrada en la Tabla 6.28.

Tabla 6.28: Vagoneta: Tabla de transición de estados completa.

$m \setminus P_{on}AB$	000	001	010	011	100	101	110	111	O
mR	mR	mR	mR	x	mR	mR	mD	x	0,0
mD	mD	mI	mD	x	mD	mI	mD	x	1,0
mI	mI	mI	mR	x	mI	mI	mR	x	0,1

Y combinando las ecuaciones de activación y retención obtenemos las ecuaciones completas, que describen la función de transición entre estados (y cuarto elemento de la 5-tupla de la máquina de estados) delta.

$$\begin{aligned} mD_{k+1} &= mR_k \cdot Pon \cdot A + mD_k \cdot \overline{mI_{k+1}} \\ mI_{k+1} &= mD_k \cdot B + mI_k \cdot \overline{mR_{k+1}} \\ mR_{k+1} &= mI_k \cdot A + mR_k \cdot \overline{mD_{k+1}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

Finalmente, las ecuaciones de las salidas son las siguientes:

$$\begin{aligned} yI_k &= mI_k \\ yD_k &= mD_k \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.6.4 Control de tráfico en un sentido

Se quiere diseñar una máquina de estados que permita detectar vehículos que circulan en dirección contraria por una carretera. Dicho sistema tendrá dos entradas e_1 y e_2 que serán las señales de dos células fotoeléctricas. Dependiendo del orden de activación de dichas señales se podrá detectar si el vehículo circula en sentido correcto o no. En la Fig. 6.27 se puede observar una simulación. Se estudiarán dos casos: en el A, las células fotoeléctricas estarán situadas a una distancia menor que la longitud del vehículo y la separación entre vehículos; en el B, las células fotoeléctricas estarán situadas a una distancia mayor que la longitud del vehículo y menor que la separación entre vehículos.

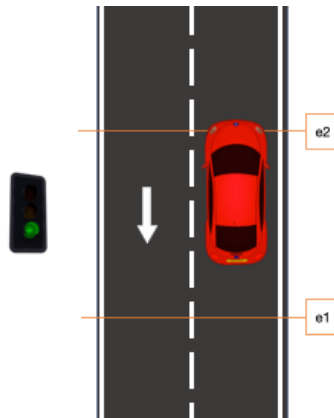


Figura 6.27: Control de tráfico en un sentido (simulación)

6.6.4.1 Control de tráfico en un sentido: caso A

Como se ha indicado, en este caso las señales de las células fotoeléctricas están situadas a una distancia menor que la longitud del vehículo y la separación entre vehículos. En la Fig. 6.28 se puede ver un esquema: si un vehículo circula de forma correcta pasará por los estados $m1$, $m2$, $m3$ y $m4$. Y si circula de forma incorrecta pasará por los estados $m1$, $m5$, $m6$ y $m7$.

Para estos 7 estados, el diagrama de estados de la máquina está dibujado en la Fig. 6.29; la Tabla 6.29 contiene la tabla de transición.

Tabla 6.29: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso A.

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
m1	m1	m5	m2	x	0
m2	X	X	m2	m3	0
m3	X	m4	X	m3	0
m4	m1	m4	X	X	0
m5	X	m5	X	m6	1

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
m6	X	X	m7	m6	1
m7	m1	X	m7	X	1

Observamos que en este caso es posible simplificar la tabla, fusionando los estados m2, m3 y m4 (en un estado que llamaremos SC, sentido correcto) por un lado, y los estados m5, m6 y m7 (en un estado que llamaremos SI, sentido incorrecto) por otro. A m1 pasaremos a llamarle NO (no hay vehículos).

De esta forma obtenemos la Tabla 6.30.

Tabla 6.30: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso A simplificada.

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
NO	NO	SI	SC	x	0
SC	NO	SC	SC	SC	0
SI	NO	SI	SI	SI	1

El diagrama correspondiente queda como indica la Fig. 6.30.

Y las ecuaciones correspondientes (funciones delta y lambda) de la forma:

$$\begin{aligned}
 NO_{k+1} &= (SC_k + SI_k) \cdot \bar{e}_1 \cdot \bar{e}_2 + NO_k \cdot (\overline{SI_{k+1} + SC_{k+1}}) \\
 SC_{k+1} &= NO_k \cdot e_1 + SC_k \cdot \overline{NO_{k+1}} \\
 SI_{k+1} &= NO_k \cdot e_2 + SI_k \cdot \overline{NO_{k+1}} \\
 Salida_k &= SI_k
 \end{aligned} \tag{6.8}$$

6.6.4.2 Control de tráfico en un sentido: caso B

Queremos ahora diseñar una máquina de estados que permita detectar vehículos que circulan en dirección contraria por una autovía, pero las células fotoeléctricas estarán ahora situadas a una distancia mayor que la longitud del vehículo y menor que la separación entre vehículos (ver Fig. 6.31).

Lo primero que se podría pensar es en utilizar el mismo modelo de antes. Obtendríamos la siguiente máquina de estados (Fig. 6.32):

Podemos observar que no es una máquina correcta. En los estados SC o SI, para las entradas “00” la máquina debería poder evolucionar a dos estados distintos, lo que no es posible pues hablamos siempre de máquinas deterministas. Esta máquina no es, por tanto, suficientemente expresiva, ya que en SC o SI las entradas “00” podrían ser debidas a que el coche está entre los dos sensores o bien a que el coche ha salido del sistema de detección.

Está claro que se necesitan más estados. Vamos a añadir dos estados más:

- NO: no vehículo
- SC: sentido correcto
- SI: sentido incorrecto
- VEC: vehículo entre sensores correcto
- VEI: vehículo entre sensores no correcto

Para estos cinco estados obtenemos la tabla de transición mostrada en la Tabla 6.31:

Tabla 6.31: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso B considerando 5 estados.

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
NO	NO	SI	SC	x	0
SC	VEC	SC	SC	x	0

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
SI	VEI	SI	SI	x	1
VEI	VEI	x	SI	x	1
VEC	VEC	SC	x	x	0

La casilla que está en negrita presenta un nuevo problema. Vamos a analizarlo con el siguiente diagrama (se representa sólo una parte del diagrama):

Vemos que se vuelve a dar el mismo problema de antes: desde el estado SC salen dos arcos con los mismos valores de entradas (correspondiente al caso de coche no detectado), por lo que no es consistente. Esto quiere decir que, o bien no hemos elegido bien los estados, o necesitamos más de 5 estados. Puesto que el tanteo previo ha sido infructuoso, pasamos ahora a diseñar la máquina con los siete estados intuitivos con semántica de entrada, para luego buscar una simplificación correcta:

- NO: no vehículo
- SC-10: sentido correcto después de detección por parte de e_1
- SC-00: sentido correcto entre sensores
- SC-01: sentido correcto después de detección por parte de e_2
- SI-01: sentido incorrecto después de detección por parte de e_2
- SI-00: sentido incorrecto entre sensores
- SI-10: sentido incorrecto después de detección por parte de e_1

La tabla de transición de estados que obtenemos es la mostrada en la Tabla 6.32.

Tabla 6.32: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso B considerando 7 estados.

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
NO	NO	SI-01	SC-10	x	0
SC-10	SC-00	x	SC-10	x	0
SC-00	SC-00	SC-01	x	x	0
SC-01	NO	SC-01	x	x	0
SI-01	SI-00	SI-01	x	x	1
SI-00	SI-00	x	SI-10	x	1
SI-10	NO	x	SI-10	x	1

Vemos que esta tabla es simplificable: se pueden simplificar los estados SC-10 con el SC-00, y el SI-01 con el SI-00. La nueva tabla simplificada se muestra en la Tabla 6.33.

Tabla 6.33: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso B final simplificada.

$m \setminus e_1 e_2$	00	01	10	11	Salida
NO	NO	SI-01/00	SC-10/00	x	0
SC-10/00	SC-10/00	SC-01	SC-10/00	x	0
SC-01	NO	SC-01	x	x	0
SI-01/00	SI-01/00	SI-01	SI-10	x	1
SI-10	NO	x	SI-10	x	1

Podemos asignar nuevos nombre para entenderlo mejor: SCA será SC-10/00, SCB será SC-01, SIA será SI-01/00 y SIB será SI-10.

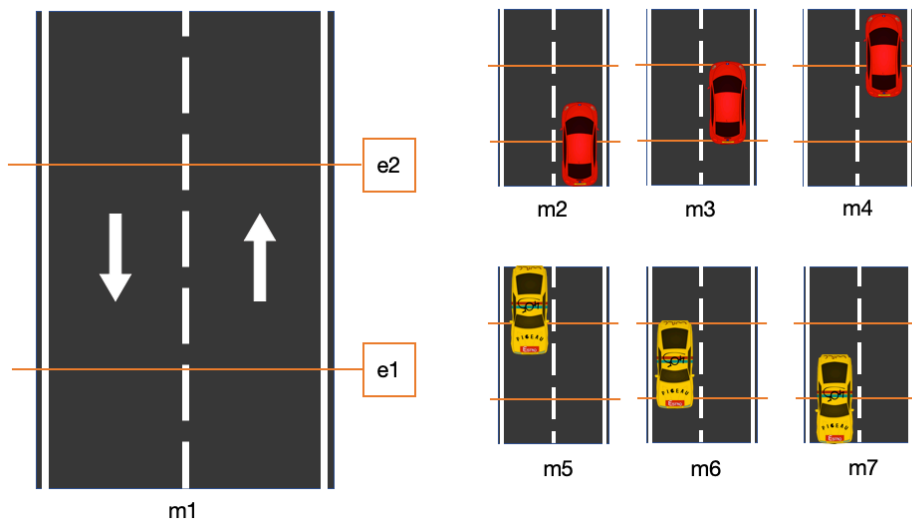


Figura 6.28: Control de tráfico en un sentido (caso A)

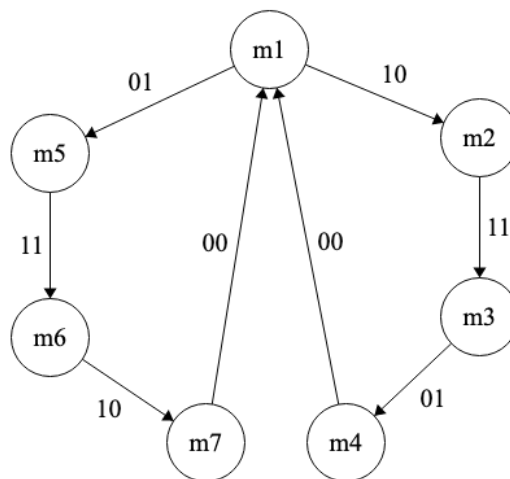


Figura 6.29: Máquina de estados para el control de tráfico en un sentido (caso A)

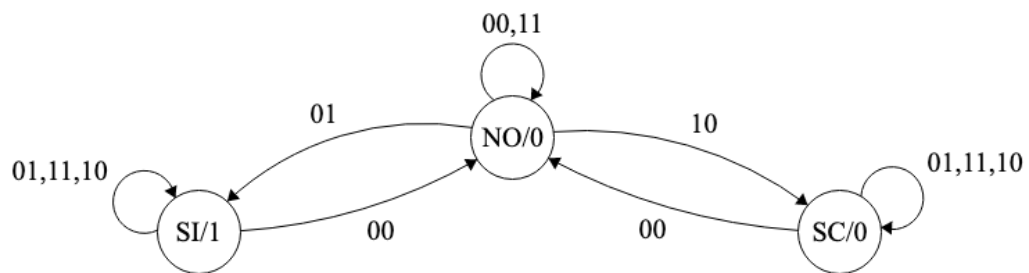


Figura 6.30: Máquina de estados para el control de tráfico en un sentido (caso A)

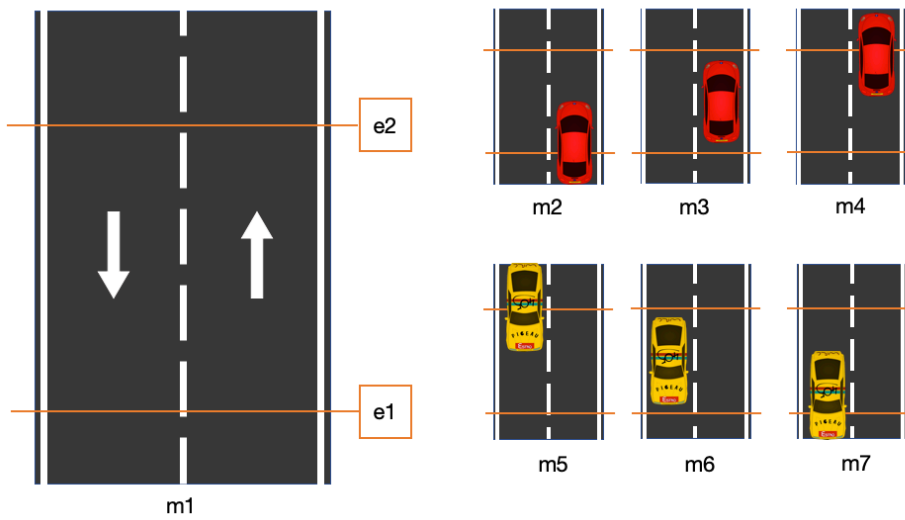


Figura 6.31: Control de tráfico en un sentido (caso B)

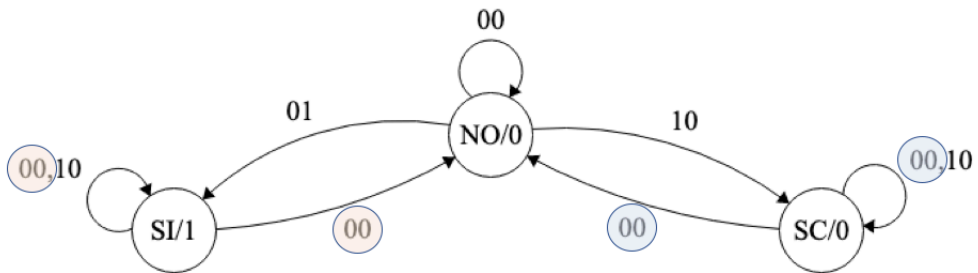


Figura 6.32: Máquina de estados para el control de tráfico en un sentido (caso B): diseño inicial

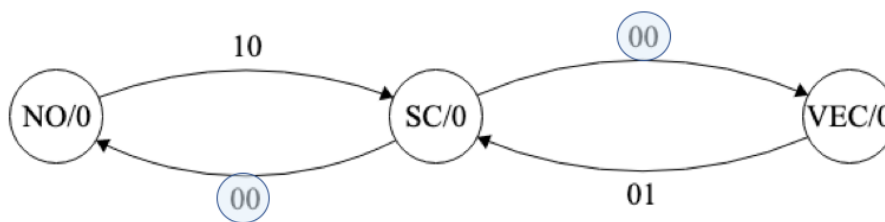


Figura 6.33: Máquina de estados para el control de tráfico en un sentido (caso B): diseño intermedio

Tabla 6.34: Control de tráfico: Tabla de transición de estados para el caso B final simplificada con nuevos nombres.

$m \setminus e_1 e_2$	Nuevo Nombre	00	01	10	11	Salida
NO	NO	NO	SIA	SCA	x	0
SC-10/00	SCA	SCA	SCB	SCA	x	0
SC-01	SCB	NO	SCB	x	x	0
SI-01/00	SIA	SIA	SIA	SIB	x	1
SI-10	SIB	NO	x	SIB	x	1

Vemos, por tanto, que cinco estados son suficientes para modelar el sistema. Las ecuaciones de la máquina son:

$$\begin{aligned}
 NO_{k+1} &= (SCB + SIB) \cdot (\bar{e}_1 \cdot \bar{e}_2) + NO_k \cdot (\overline{SCA_{k+1} + SIA_{k+1}}) \\
 SCA_{k+1} &= NO_k \cdot e_1 + SCA_k \cdot \overline{SCB_{k+1}} \\
 SCB_{k+1} &= SCA_k \cdot e_2 + SCB_k \cdot \overline{NO_{k+1}} \\
 SIA_{k+1} &= NO_k \cdot e_2 + SIA_k \cdot \overline{SIB_{k+1}} \\
 SIB_{k+1} &= SIA_k \cdot e_1 + SIB_k \cdot \overline{NO_{k+1}} \\
 Salida_k &= SIA_k + SIB_k
 \end{aligned}
 \tag{6.9}$$

Y el diagrama de estados se muestra en la Fig. 6.34.

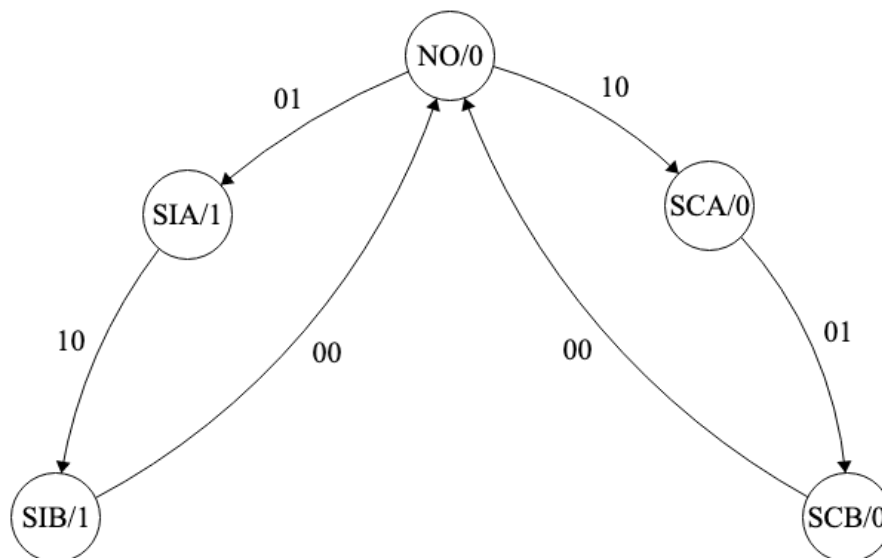


Figura 6.34: Máquina de estados para el control de tráfico en un sentido (caso B): diseño final

6.7 Ejercicios resueltos

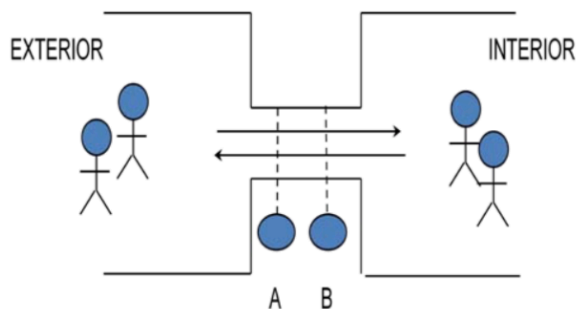
6.7.1 Control de entrada y salida

Se desea diseñar el control de entradas y salidas de un recinto mediante dos sensores ópticos A y B situados en un estrechamiento que sólo puede estar ocupado por una única persona (bien para entrar en el recinto, bien para salir del mismo). Se considera en el diseño la máquina de estados que devuelve

un '1' si la persona entra en el recinto y un '0' si sale del mismo. Asimismo se consideran dos posibles configuraciones de los sensores A y B:

1. NO es posible situarse entre A y B sin ser detectado
2. SI es posible situarse entre A y B sin ser detectado.

Nota: NO considere comportamientos anómalos de las personas.



Se pide:

1. Considere los estados, NO_PERSONA, ENTRANDO y SALIENDO en las dos configuraciones. Indique si son adecuados en cada caso y justifique la respuesta brevemente (ponga un contraejemplo en caso negativo).
2. Tabla de transición de estados y diagrama de estados para la configuración 1. En el caso del diagrama, dibuje solo los arcos dirigidos que producen un cambio de estado.
3. Ecuaciones de activación, retención y salida del modelo del apartado anterior.
4. Considere un diseño para la configuración 2 con los 5 estados siguientes: NO_PERSONA, ENTRANDO_10, ENTRANDO_00, SALIENDO_01, SALIENDO_00 —el primer dígito corresponde a A y el segundo a B—. Indique si esta configuración es adecuada razonando sobre el diagrama de estados
5. Proponga un diseño con el mínimo número de estados posible para la configuración 2 y dibuje el diagrama de estados.

Solucion

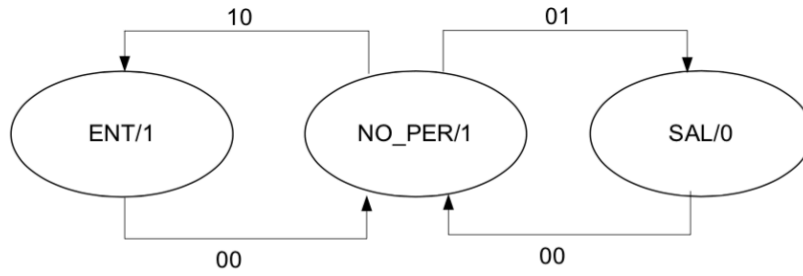
APARTADO 1 Considere los estados, NO_PERSONA, ENTRANDO y SALIENDO en las dos configuraciones. Indique si son adecuados en cada caso y justifique la respuesta brevemente (ponga un contraejemplo en caso negativo).

Configuración 1: Los estados son adecuados.

Configuración 2: Los estados NO son adecuados. Como ejemplo, el estado SALIENDO no tiene suficiente expresividad ya que pueden estar los dos sensores a nivel bajo como consecuencia de que un individuo está en el pasillo tras atravesar B—y no ser visible para A— o bien el individuo acaba de salir al exterior tras cruzar A.

APARTADO 2 Tabla de transición de estados y diagrama de estados para la configuración 1. En el caso del diagrama, dibuje solo los arcos dirigidos que producen un cambio de estado.

Qt	00	01	10	11	Salida
NO	NO	S	E	X	1
E	NO	E	E	E	1
S	NO	S	S	S	0



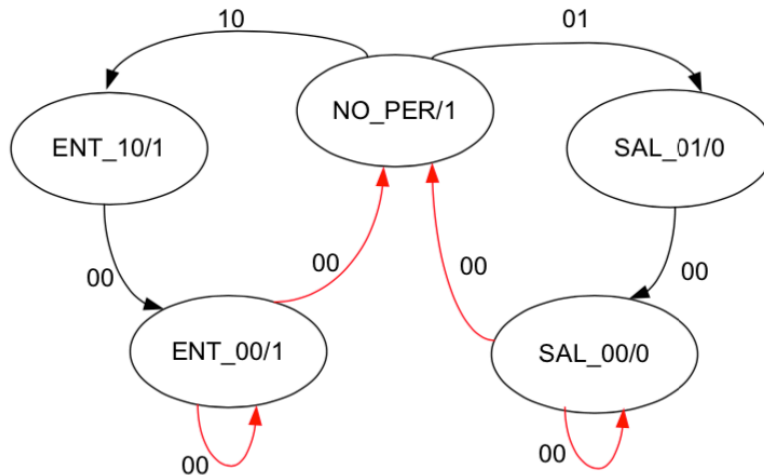
APARTADO 3 Ecuaciones de activación, retención y salida del modelo del apartado anterior.

$$N_{t+1} = (E_t + S_t) \cdot \bar{A} \cdot \bar{B} + N_t \cdot (\overline{S_{t+1} + E_{t+1}})$$

$$E_{t+1} = N_t \cdot A + E_t \cdot \overline{N_{t+1}}$$

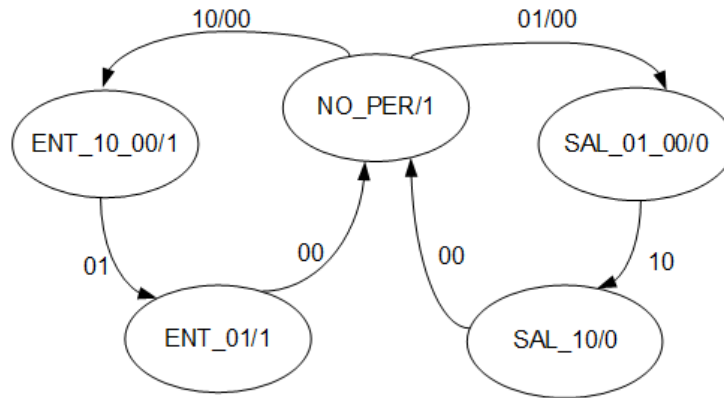
$$S_{t+1} = N_t \cdot B + S_t \cdot \overline{N_{t+1}}$$

APARTADO 4 Considere un diseño para la configuración 2 con los 5 estados siguientes: NO_PERSONA, ENTRANDO_10, ENTRANDO_00, SALIENDO_01, SALIENDO_00 —el primer dígito corresponde a A y el segundo a B—. Indique si esta configuración es adecuada razonando sobre el diagrama de estados.



APARTADO 5 Proponga un diseño con el mínimo número de estados posible para la configuración 2 y dibuje el diagrama de estados.

Se necesita ampliar el modelo con los estados de SALIENDO_10 y ENTRANDO_01. Se pueden entonces simplificar los estados ENTRANDO_10 y ENTRANDO_00, así como SALIENDO_01 y SALIENDO_00 con lo que la máquina tendría finalmente 5 estados: NO_PERSONA, ENTRANDO_10_00, SALIENDO_01_00, ENTRANDO_01 y SALIENDO_10.

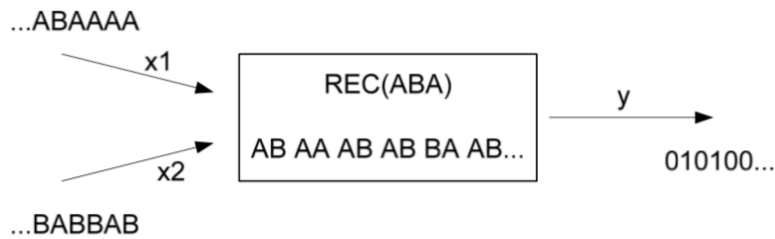


Nota.- Se puede observar que esta máquina de estado es equivalente a la vista en el ejemplo de la sección 6.6.4.2.

6.7.2 Reconocedor de cadenas (AB)

Se desea diseñar una máquina de estados síncrona para modelar un reconocedor de cadenas de un lenguaje Σ que tiene un alfabeto de dos letras A y B. La cadena se construye de dos en dos letras mediante las entradas $x_1 \in \Sigma$, $x_2 \in \Sigma$ y en la forma $\langle x_1 \rangle \langle x_2 \rangle$. El sistema indica mediante una salida ‘y’ a 1 que la cadena formada contiene la secuencia de 3 letras consecutivas “ABA”.

A modo de ejemplo, se presenta una traza del funcionamiento de dicho sistema:



ACLARACIONES: Hay un nuevo valor en la salida para cada pareja de letras $\langle x_1 \rangle \langle x_2 \rangle$ que se añaden a la cadena. En el ejemplo de la figura, el primer ‘1’ de la salida se debe a que, tras la entrada de la segunda pareja $\langle x_1 := A \rangle \langle x_2 := A \rangle$ al modelo, la cadena resultante “ABAA” contiene la secuencia buscada (las tres primeras letras). Un razonamiento análogo puede hacerse para el segundo ‘1’ de la salida.

Importante: No se pueden emplear letras de secuencias reconocidas como parte de otras secuencias reconocidas. Ejemplo: la cadena “AB AB AB” produce como salida la secuencia $y :=$ “010” y no $y :=$ “011”.

Considere los estados siguientes: X_N (ninguna letra de la secuencia buscada reconocida), X_A (primera letra de la secuencia buscada reconocida), X_AB (dos primeras letras de la secuencia buscada reconocida) y X_ABA (secuencia buscada reconocida).

Se pide:

1. Demuestre que los estados elegidos corresponden a una máquina de Mealy.
2. Tabla de transición de estados.
3. Ecuación de retención del estado X_N (función lógica simplificada y diagrama de escalera).
4. Ecuación de activación del estado X_A (función lógica simplificada y diagrama de escalera).
5. ¿Se puede simplificar alguna pareja de estados? Justifique la respuesta. En caso afirmativo, dibuje el diagrama de estados de la máquina simplificada (incluya solo los arcos correspondientes a la activación de nuevos estados).
6. Indique un nuevo conjunto de estados para obtener una máquina de Moore. Justifique la respuesta.

Solucion

Apartado 1 Demuestre que los estados elegidos corresponden a una máquina de Mealy

Basta con encontrar un ejemplo de salidas distintas desde un mismo estado: desde X_A ante entrada AA la salida es 0 y ante entrada BA la salida es 1 (cadena ABA).

Apartado 2 Tabla de transición de estados

Qt/Entradas	AA	AB	BA	BB
X_N	$X_A, 0$	$X_AB, 0$	$X_A, 0$	$X_N, 0$
X_A	$X_A, 0$	$X_AB, 0$	$X_ABA, 1$ (ó $X_N, 1$)	$X_N, 0$
X_AB	$X_A, 1$ (no X_ABA)	$X_N, 1$	$X_A, 0$	$X_N, 0$
X_ABA	$X_A, 0$	$X_AB, 0$	$X_A, 0$	$X_N, 0$

Apartado 3 Ecuación de retención del estado X_N (función lógica simplificada y diagrama de escalera).

$$X_N_{k+1} = X_N_k \cdot (\overline{X_A} \cdot \overline{X_AB})$$

También sería válido expresarlo en función de las entradas:

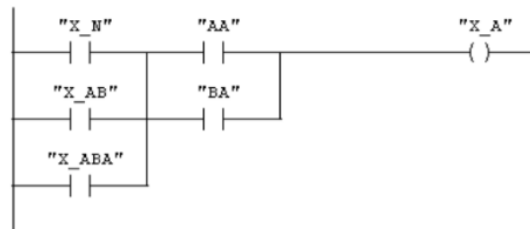
$$X_N_{k+1} = X_N_k \cdot (BB)$$

Apartado 4 Ecuación de activación del estado X_A (función lógica simplificada y diagrama de escalera).

Tendríamos:

$$X_A_{k+1} = X_N_k \cdot (AA + BA) + X_AB_k \cdot (AA + BA) + X_ABA_k \cdot (AA + BA)$$

el estado X_A se activa desde cualquier otro estado, siempre que la segunda letra de la entrada sea una A .



Apartado 5 ¿Se puede simplificar alguna pareja de estados? Justifique la respuesta. En caso afirmativo, dibuje el diagrama de estados de la máquina simplificada (incluya solo los arcos correspondientes a la activación de nuevos estados).

Se pueden simplificar los estados X_ABA y X_N . La máquina evoluciona de la misma manera desde ambos estados y la salida es la misma (las filas de la tabla de estados son iguales).

Qt/Entradas	AA	AB	BA	BB
X_N	$X_A, 0$	$X_AB, 0$	$X_A, 0$	$X_N, 0$
X_A	$X_A, 0$	X_AB	$X_N, 1$	$X_N, 0$
X_AB	$X_A, 1$	$X_N, 1$	$X_A, 0$	$X_N, 0$

El diagrama de estados se dibuja sin mayor dificultad a partir de la tabla de estados.

Apartado 6 Indique un nuevo conjunto de estados para obtener una máquina de Moore. Justifique la respuesta.

Existen diferentes soluciones de diseño. Una posibilidad es definir estados que garanticen que la salida sea 1 tras la llegada de parejas de entradas. Por ejemplo:

- Estado X_1: Cadena reconocida ABA tras llegada de AB
- Estado X_2: Cadena reconocida ABA tras llegada de AA
- Estado X_3: Cadena reconocida ABA tras llegada de BA

Estos tres estados capturan todas las posibles formas de que se produzca una secuencia ABA: X_1 se activa cuando teniendo un AB en el buffer llega AB. X_2 se activa cuando teniendo un AB en el buffer llega AA. Finalmente X_3 se activa cuando teniendo una A en el buffer, llega BA.

Complementando los tres estados anteriores con X_A, X_AB y X_N, con la misma semántica que en el diseño inicial, se garantiza suficiente expresividad para formar la máquina de Moore.

Nota: Es posible que se puedan simplificar estados en un análisis posterior.

6.7.3 Control de una escalera mecánica

Se desea realizar el sistema de control de una escalera mecánica bidireccional. Para ello se dispone de dos sensores de presión, P1 y P2, como se muestra en la figura adjunta. Cuando se activa un sensor, la escalera empezará a andar en dirección al otro sensor y no parará hasta que se active el otro sensor. La máquina deberá mostrar el comportamiento de la dirección de los motores (D=0 bajando, D=1 subiendo), así como su estado (E=1 encendido, E=0 apagado).

Las posibles secuencias que hay que describir son las siguientes:

- Si una persona se coloca sobre el sensor P1, la escalera debe empezar a bajar hasta que dicha persona se coloque sobre el sensor P2 (y viceversa)
- Cuando no se active ninguno de los sensores la escalera debe permanecer parada.

No se ha considerado la situación de que se coloquen de forma simultánea dos personas sobre P1 y P2 porque no ha sido contemplada en las especificaciones de diseño.

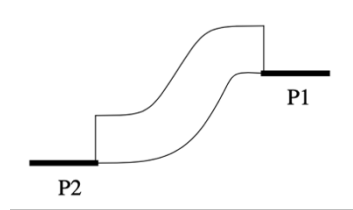


Figura 6.35: Ejercicio de control de escalera mecánica

Se pide:

1. Identificar entradas y salidas del sistema.
2. Indicar si se trata de un sistema combinacional o secuencial, y demostrarlo.
3. Diseñar el sistema. Para ello:
 - a) Dibuje el diagrama de máquina de estados de Mealy que implemente el sistema descrito.
 - b) Escriba la tabla de transición de estados. Simplifique los estados en caso de que sea posible.
 - c) Obtenga razonadamente las ecuaciones de activación y retención de los estados y de las salidas.
 - d) Implemente el sistema mediante un esquema de contactos.
4. Indique si se podría implementar una máquina de Moore y, en caso afirmativo, dibuje el diagrama.

Solucion

Apartado 1

Las entradas serían los pulsadores P1 y P2 y las salidas las señales E y D.

Apartado 2

Es un sistema secuencial. Se puede demostrar de muchas formas. Por ejemplo, cuando no se active ni P1 ni P2, la escalera a veces subirá y a veces bajará, dependiendo del estado en el que esté.

Apartado 3

- a. La máquina de estados se muestra a continuación. Se suponen los estados Reposo, Subiendo y Bajando. La nomenclatura utilizada en "P1P2 / ED".

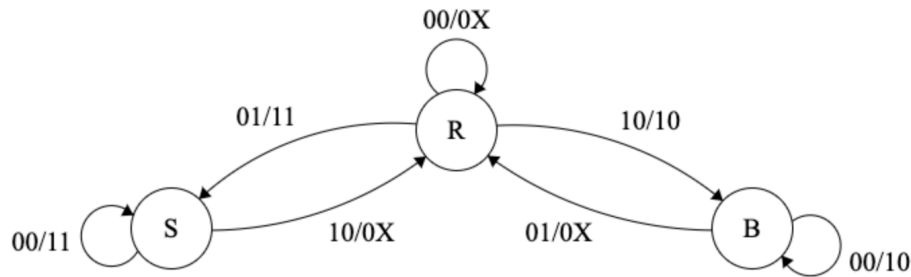


Figura 6.36: Ejercicio de control de escalera mecánica: máquina de estados de Mealy

La “X” en las salidas indica que se puede poner tanto ‘0’ como ‘1’.

b. La tabla de transición de estados será:

Qt/Entradas(P1 · P2)	00	01	11	10
R	R/0X	S/11	X	B/10
B	B/10	R/0X	X	B/10
S	S/11	S/11	X	R/0X

No se pueden simplificar estados.

c. De aquí se pueden obtener las ecuaciones de activación y retención de los estados:

$$\begin{aligned}
 R &= B \cdot P_2 + S \cdot P_1 + R \cdot \overline{B} \cdot \overline{S} \\
 B &= R \cdot P_1 + B \cdot \overline{R} \\
 S &= R \cdot P_2 + S \cdot \overline{R}
 \end{aligned}$$

y de las salidas:

$$\begin{aligned}
 D &= R \cdot P_2 + S \\
 E &= R \cdot (P_1 + P_2) + B \cdot \overline{P_2} + S \cdot \overline{P_1}
 \end{aligned}$$

d. Finalmente, el esquema de contactos sería:

Apartado 4

Como todos los sistemas secuenciales, también se puede representar como una máquina de Moore. A continuación se muestra una posible implementación.

6.8 Autoevaluación

Responde a las siguientes cuestiones y presiona el botón de “Ver Resultados” para ver tu puntuación:

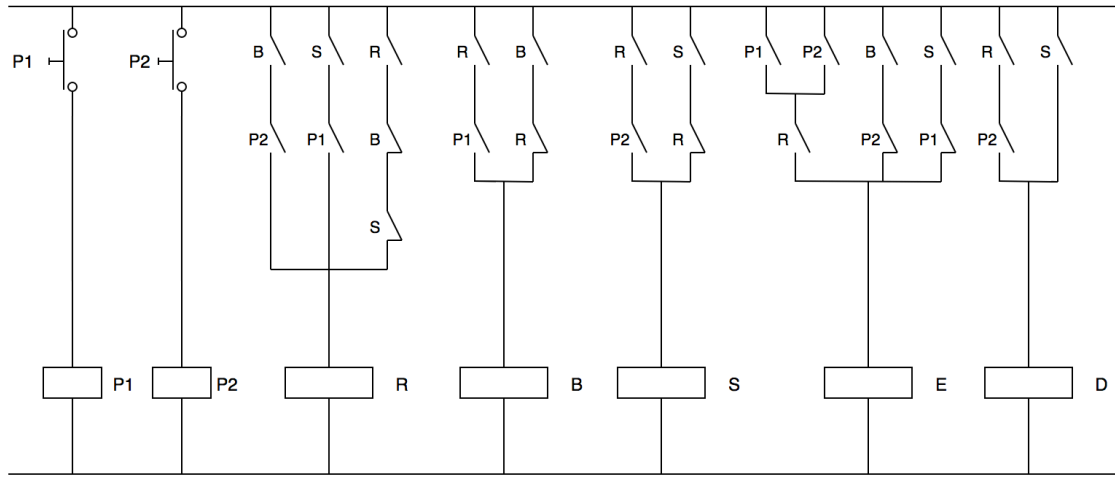


Figura 6.37: Ejercicio de control de escalera mecánica: diagrama de contactos

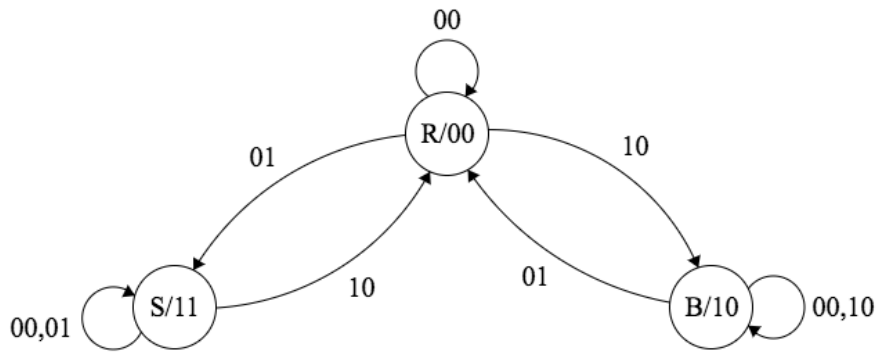


Figura 6.38: Ejercicio de control de escalera mecánica: máquina de estados de Moore

Apéndice A

Programación en STEP-7 AWL

Presentación de uso y programación del entorno SIMATIC STEP7.

Primeros pasos:

Visita la siguiente URL: https://www.youtube.com/watch?v=U4w_fr10oFU

En este segundo vídeo se profundiza un poco más en el uso del simulador:

Visita la siguiente URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wWi8NZG19ws>

Bibliografía

- [1] Antonio Barrientos y Ernesto Gambao. *Sistemas de producción automatizados*. Universidad Politécnica de Madrid, 2014. ISBN: 978-84-15302-70-4.
- [2] Carlos Cabañero, Cristina Giménez y Amaia Lusa. *Gestión de la Producción*. Inf. téc. Universitat Oberta de Catalunya, 2013.
- [3] D.A. Huffman. “The synthesis of sequential switching circuits”. En: *Journal of the Franklin Institute* 257.3 (1954), págs. 161-190. ISSN: 0016-0032. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(54\)90574-8](https://doi.org/10.1016/0016-0032(54)90574-8). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016003254905748>.
- [4] Enrique Mandado et al. *AUTÓMATAS PROGRAMABLES Y SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN*. Ed. por Marcombo. 2009. ISBN: 978-84267-1575-3.
- [5] Emilio García Moreno. *Automatización de procesos industriales*. 970-15-0658-8. Alfaomega, 2001.
- [6] Carlos Platero. *Apuntes de Regulación Automática*. 2012.
- [7] Siemens. *Esquema de contactos (KOP) para S7-300 y S7-400*. Inf. téc. Siemens, 2004.
- [8] Siemens. *Lista de instrucciones (AWL) para S7-300 y S7-400*. Inf. téc. Siemens, 2004.