



Integración
de sistemas

Consulte nuestra página web: www.sintesis.com
En ella encontrará el catálogo completo y comentado



NO fotocopies el libro

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con autorización de los titulares de la propiedad intelectual. La infracción de los

derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (arts. 270 y sigs. Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (www.cedro.org) vela por el respeto de los citados derechos.

Integración de sistemas

César Gómez Palacios

© César Gómez Palacios

© EDITORIAL SÍNTESIS, S. A.
Vallehermoso, 34. 28015 Madrid
Teléfono 91 593 20 98
<http://www.sintesis.com>

ISBN: 978-84-9171-157-5
Depósito Legal: M-15.037-2018

Impreso en España - Printed in Spain

Reservados todos los derechos. Está prohibido, bajo las sanciones penales y el resarcimiento civil previstos en las leyes, reproducir, registrar o transmitir esta publicación, íntegra o parcialmente, por cualquier sistema de recuperación y por cualquier medio, sea mecánico, electrónico, magnético, electroóptico, por fotocopia o por cualquier otro, sin la autorización previa por escrito de Editorial Síntesis, S. A.

Índice

PRESENTACIÓN	13
1. INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL	15
Objetivos	15
Mapa conceptual	16
Glosario	16
1.1. Automatización industrial	16
1.2. Automatización en la sociedad actual	17
1.3. Revolución de la automatización con la edad del silicio	19
1.4. Automatización en la industria	21
1.4.1. Ilustración del ahorro de costes en la fabricación industrial	22
1.4.2. Evolución de la automatización industrial desde el presente: la fábrica inteligente	23
1.5. Tipos de procesos industriales	26
1.5.1. Procesos discretos o discontinuos	26
1.5.2. Procesos continuos	27
1.5.3. Procesos por lotes	28
1.6. Tipos de control industrial	28
1.6.1. Controladores secuenciales	30
1.6.2. Controladores PID	31
Resumen	33
Ejercicios propuestos	34
Caso práctico	36
Actividades de autoevaluación	36

2. CÓDIGOS NUMÉRICOS	39
Objetivos	39
Mapa conceptual	40
Glosario	40
2.1. Introducción	41
2.2. Sistemas numéricos posicionales	41
2.2.1. Conversión de otros sistemas a decimal	43
2.2.2. Conversión de decimal a otra base	46
2.3. Código binario	51
2.3.1. Cadenas de números binarios	52
2.3.2. Combinaciones posibles en binario	54
2.3.3. Tipos de datos	56
2.4. Otros códigos	59
2.4.1. BCD	59
2.4.2. Coma flotante	60
2.4.3. ASCII	63
2.4.4. Expresión de binario en hexadecimal	64
2.5. Aritmética simple en binario	64
2.5.1. Signo	65
2.5.2. Suma	66
2.5.3. Resta	67
2.5.4. Multiplicación	68
2.5.5. División	69
Resumen	69
Ejercicios propuestos	70
Caso práctico	72
Actividades de autoevaluación	72
3. ÁLGEBRA DE BOOLE	75
Objetivos	75
Mapa conceptual	76
Glosario	76
3.1. Introducción al álgebra de Boole	77
3.1.1. Función lógica	78
3.1.2. Tabla de verdad	79
3.1.3. Combinaciones superfluas o de error	82
3.2. Representación con diagramas de puertas lógicas y de contactos	82
3.2.1. Puertas lógicas	83
3.2.2. Diagrama de contactos	84
3.2.3. Operaciones del álgebra de Boole	86
3.2.4. Ejemplo de función lógica expresada con tabla de verdad, puertas lógicas y diagrama de contactos	91
3.3. Propiedades de las operaciones en álgebra de Boole	94
3.4. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad	96
3.4.1. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por unos	96
3.4.2. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por ceros	97
3.4.3. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por tablas de Karnaugh	97

Resumen	102
Ejercicios propuestos	103
Caso práctico	104
Actividades de autoevaluación	105
4. AUTÓMATAS PROGRAMABLES	107
Objetivos	107
Mapa conceptual	108
Glosario	109
4.1. Introducción	110
4.2. Definición del autómata programable y la IEC 61131	111
4.2.1. Características básicas de un PLC	111
4.2.2. Funcionalidad e interacción del PLC con su entorno	113
4.3. Entradas y salidas del PLC	114
4.3.1. Tipos de señal eléctrica de entrada y salida del PLC	114
4.3.2. Circuito eléctrico en las entradas	119
4.3.3. Clasificación de las entradas disponibles en el PLC según su funcionalidad ..	124
4.3.4. Circuito eléctrico en las salidas	125
4.3.5. Inconvenientes de la conexión directa de preactuadores a las salidas del PLC	132
4.3.6. Activación indirecta de preactuadores mediante batería de relés borna	132
4.3.7. Clasificación de las salidas según su funcionalidad	135
4.3.8. Tratamiento de la señal en entradas y salidas analógicas	136
4.4. Otros componentes del PLC	139
4.5. Modos de operación y ciclo de <i>scan</i>	140
4.5.1. Modos de operación	140
4.5.2. Ciclo de <i>scan</i>	141
Resumen	143
Ejercicios propuestos	143
Caso práctico	145
Actividades de autoevaluación	146
5. SENSÓRICA	149
Objetivos	149
Mapa conceptual	150
Glosario	151
5.1. Introducción y conectores	151
5.1.1. Conectores	153
5.2. Sensores y mandos	155
5.2.1. Características generales	155
5.2.2. Dispositivos de mando	157
5.2.3. Finales de carrera y dispositivos electromecánicos	163
5.2.4. Detectores electrónicos de proximidad	164
5.2.5. Sensores o detectores electrónicos de posición	174
5.2.6. Detectores ópticos de color y marcas	175
5.2.7. Sensores de presión y fuerza	176
5.2.8. Sensores de temperatura	177
5.2.9. Sensores de velocidad: encoder y resolver	179

5.2.10. Detectores de nivel	183
5.2.11. Lectores de códigos de barras y códigos QR	186
Resumen	186
Ejercicios propuestos	187
Caso práctico	188
Actividades de autoevaluación	188
6. PREACTUADORES Y VARIADOR DE FRECUENCIA	191
Objetivos	191
Mapa conceptual	192
Glosario	192
6.1. Preactuadores y actuadores	193
6.1.1. Preactuadores o preaccionadores	194
6.1.2. Actuadores o accionadores	195
6.2. Preactuadores fundamentales	199
6.2.1. Principio de funcionamiento de electroimanes	199
6.2.2. Principio de funcionamiento de relés y contactores en estado sólido	200
6.2.3. Relé	201
6.2.4. Contactor	206
6.2.5. Electroválvulas de distribución de flujo todo o nada	208
6.2.6. Preactuadores o controladores electrónicos	211
6.2.7. Características generales de los preactuadores	215
6.3. El variador de frecuencia	220
6.3.1. Principio de funcionamiento	222
6.3.2. Etiqueta de identificación y características básicas	223
6.3.3. Conexiones y comunicaciones	223
6.3.4. Modos de funcionamiento	230
6.3.5. Configuración	230
Resumen	233
Ejercicios propuestos	233
Caso práctico	235
Actividades de autoevaluación	236
7. PROGRAMACIÓN BÁSICA A PARTIR DE GRAFCET-SFC	239
Objetivos	239
Mapa conceptual	240
Glosario	240
7.1. Introducción	241
7.1.1. Orígenes y evolución	242
7.1.2. Proceso secuencial	243
7.1.3. Definición de GRAFCET	244
7.1.4. Elementos del GRAFCET	245
7.1.5. Valores de las variables en GRAFCET	250
7.1.6. Tipos o niveles de GRAFCET	250
7.1.7. Reglas de evolución del GRAFCET	252
7.1.8. Tablas de variables y evolución del GRAFCET	252
7.1.9. Etapas del método para llegar a la programación desde el GRAFCET	255

7.2. Comportamiento, diagrama de contactos y ecuaciones de cada elemento del GRAFCET	255
7.2.1. Etapas	256
7.2.2. Acciones asociadas	258
7.2.3. Transición y condición de transición (función lógica)	259
7.2.4. Divergencia y convergencia OR	260
7.2.5. Divergencia y convergencia AND	263
7.3. Funciones o instrucciones de bloque	265
7.3.1. Definición de función o instrucción de bloque	265
7.3.2. Comportamiento eléctrico de las funciones o instrucciones de bloque	266
7.3.3. Variaciones en las funciones o instrucciones de bloque según el fabricante	266
7.3.4. Enclavamientos en GRAFCET-SFC y diagrama de contactos: SET, RESET	267
7.3.5. Temporizador básico con retardo a la conexión	269
7.3.6. Contador básico	271
7.3.7. Flancos de subida y de bajada	272
Resumen	274
Ejercicios propuestos	274
Caso práctico	275
Actividades de autoevaluación	276
8. CONCEPTOS DE PROGRAMACIÓN Y GRAFCET ADICIONALES	279
Objetivos	279
Mapa conceptual	280
Glosario	281
8.1. Introducción	282
8.2. Funciones y conceptos de programación en el diagrama de contactos	282
8.2.1. Funciones o instrucciones de bloque	282
8.2.2. Precauciones con los tipos de datos empleados y su compatibilidad	291
8.2.3. Filosofía de organización y ejecución de los programas	294
8.3. Otros conceptos de GRAFCET para la programación	297
8.3.1. Forzados	297
8.3.2. Etapas y transiciones fuente y sumidero (o pozo)	298
8.3.3. Macroetapas	299
8.3.4. Subrutinas	300
8.4. Programación en SET-RESET de las etapas del GRAFCET	302
8.4.1. Justificación	302
8.4.2. Método 1: SET-RESET de la etapa con dos líneas por etapa	303
8.4.3. Método 2: SET de la etapa y RESET de la previa en una línea	304
8.4.4. Método 3: SET de la etapa y RESET de la previa en una línea a través de una marca intermedia	305
Resumen	306
Ejercicios propuestos	306
Caso práctico	307
Actividades de autoevaluación	308
9. PROGRAMACIÓN AMPLIADA Y CONTROL DE PROCESOS EN CONTINUO	311
Objetivos	311

Mapa conceptual	312
Glosario	313
9.1. Introducción	314
9.2. Propuesta de GRAFCET múltiples para modos de marcha en un automatismo sin emergencia ni salvaguardas	315
9.2.1. Algunos supuestos previos	315
9.2.2. Planteamiento multi-GRAFCET	317
9.2.3. GRAFCET 1 de marcha (máquina en servicio) y paro sin emergencia ni salvaguarda	321
9.2.4. GRAFCET 2 o de modos de marcha sin emergencia ni salvaguardas	322
9.2.5. GRAFCET 3 o de proceso sin emergencia ni salvaguardas	323
9.2.6. GRAFCET 4 o de reset sin emergencia ni salvaguardas	326
9.3. Propuesta de GRAFCET múltiples para modos de marcha en un automatismo con emergencia	328
9.3.1. Cómo se relacionan las normas técnicas con la legalidad europea (marcado CE para comercialización) de una máquina	329
9.3.2. Certificación de un sistema compuesto de diversos elementos	330
9.3.3. Hardware de control en seguridad y emergencias y ámbito de aplicación	330
9.4. Control de procesos continuos y controladores PID	334
9.4.1. Modelado de sistemas continuos por Laplace	334
9.4.2. Representación de los sistemas continuos con un diagrama de bloques	338
9.4.3. Modelado de sistemas de control de procesos continuos	340
9.4.4. Controladores PID	344
9.4.5. Ajuste del regulador PID	347
9.4.6. Sistemas SCADA	348
9.4.7. Sistemas HMI	351
Resumen	352
Ejercicios propuestos	353
Caso práctico	353
Actividades de autoevaluación	354
10. NECESIDAD DE LA COMUNICACIÓN EN LA INDUSTRIA	357
Objetivos	357
Mapa conceptual	358
Glosario	359
10.1. Comunicación	360
10.1.1. Pirámide de la automatización	361
10.1.2. Niveles de comunicación del modelo OSI	363
10.2. Conceptos básicos de señales de comunicación	364
10.2.1. Fundamentos de la generación e interpretación de señales	364
10.2.2. Protocolo de comunicaciones	365
10.2.3. Comunicación en serie o en paralelo	366
10.2.4. Configuración del sentido de transmisión de datos en el canal	367
10.2.5. Unidades de ancho de banda o velocidad de transmisión de la información	368
10.2.6. Tipos de sistemas de comunicación según la gestión del tiempo	370
10.2.7. Control del flujo de comunicaciones	370
10.2.8. Control de errores (detección y corrección)	370
10.3. Conceptos básicos de redes	371
10.3.1. Clasificación según el tamaño	371

10.3.2.	Topologías de red	372
10.3.3.	Elementos de conexión de nodos en redes	373
10.3.4.	Direccionamiento de elementos de la red	374
10.3.5.	Métodos de acceso a la red	381
10.4.	Normas físicas y protocolos en comunicaciones industriales	382
10.4.1.	Protocolos serie RS232, RS422, y RS485	383
10.4.2.	IO-Link	384
10.4.3.	AS-i	384
10.4.4.	Modbus	385
10.4.5.	CIP	385
10.4.6.	CAN Bus	385
10.4.7.	CANopen	386
10.4.8.	DeviceNet	386
10.4.9.	CC-Link	386
10.4.10.	Industrial Ethernet	387
10.4.11.	EtherCAT	388
10.4.12.	Profinet	389
10.4.13.	Profibus	389
10.4.14.	HART	390
10.4.15.	Foundation Fieldbus	390
Resumen	391	
Ejercicios propuestos	391	
Actividades de autoevaluación	393	

11. ROBÓTICA INDUSTRIAL	395
Objetivos	395
Mapa conceptual	396
Glosario	397
11.1. Introducción	398
11.1.1. Robots industriales	398
11.1.2. Visión artificial	399
11.2. Sistemas robóticos	399
11.2.1. Elementos de un sistema robótico	400
11.2.2. Herramienta final o pinza	401
11.2.3. Ventajas del empleo de los robots industriales en los procesos	401
11.3. Aspectos fundamentales de un robot industrial	402
11.3.1. Grados de libertad y movimientos del robot	402
11.3.2. Espacio, volumen o área de trabajo	406
11.3.3. Precisión de los movimientos	407
11.3.4. Capacidad de carga máxima y velocidad de movimientos	407
11.3.5. Tipos de actuadores	408
11.3.6. Especialidad (diseño y pinza) y programabilidad (software)	408
11.4. Tipos de robots industriales	409
11.4.1. Según su movilidad	409
11.4.2. Según la configuración de sus movimientos y morfología	410
11.5. Funciones de los robots industriales	413
11.5.1. Funciones de robots no industriales	414
11.5.2. Riesgos derivados de los robots industriales	415
11.5.3. Configuración y programación de los robots industriales	417
11.6. Visión artificial	420

11.6.1. Definición y funciones de la visión artificial	420
11.6.2. Etapas en el proceso de visión artificial	421
Resumen	426
Ejercicios propuestos	427
Caso práctico	428
Actividades de autoevaluación	430

Presentación

Mecatrónica industrial es el término empleado para describir un área de conocimiento ligada a la fabricación, en la que se unen diversas disciplinas, entre las que destacan la ingeniería mecánica y la automática para el diseño y configuración de maquinaria.

Consideremos dos actividades relacionadas entre sí y estratégicas en la industria moderna:

1. *Mantenimiento industrial*. Se trata de una función clave, pues los procesos fabriles deben alcanzar la mayor productividad posible en un entorno competitivo para conseguir la generación de riqueza y la retribución social del capital a la colectividad. Maquinaria mantenida para lograr un óptimo funcionamiento, sin paros imprevistos, brindando la máxima calidad y mínimos desperdicios de cualquier recurso. La requerida utilización intensiva de las instalaciones en el funcionamiento descrito es imposible sin un mantenimiento excelente. Es, por tanto, un motor económico y social de gran importancia.
2. *Automatización industrial*. La incorporación de la automatización, junto con las nuevas tecnologías, a la sociedad y a la industria ha sido especialmente intensiva alrededor del cambio de siglo. Este protagonismo tiene una causa evidente: ambas incrementan la productividad y la generación de valor añadido. Su importancia es tal que, en todos los sectores industriales, la automatización se mueve entre el concepto de gran ventaja competitiva y absoluto requisito para la supervivencia.

Además, es imposible un correcto desempeño en el área de mantenimiento sin tener conocimientos de la automatización, dado el protagonismo de esta.

El objetivo primordial de este libro es formar al futuro profesional en las bases de la automatización industrial, de forma conceptual y práctica. El texto presupone nulos conocimientos previos del lector para, de forma progresiva, construir una base de capacidades con la que poder abordar la integración, configuración, programación básica y mantenimiento de maquinaria automatizada y sus componentes dentro de los procesos de los que forman parte.

La obra se dirige principalmente a los estudiantes de Ciclo Formativo de Grado Superior en Mecatrónica Industrial y desarrolla lo estipulado en el Real Decreto 1576/2011, de 4 de noviembre, por el que se establece el Título de Técnico Superior en Mecatrónica Industrial y se fijan sus enseñanzas mínimas (*BOE* núm. 297, de 10 de diciembre de 2011, páginas 131008 a 131079) para el módulo profesional de Integración de Sistemas.

Los contenidos se estructuran conforme a los siguientes capítulos:

1. Introducción a la automatización industrial.
2. Códigos numéricos.
3. Álgebra de Boole.
4. Automatas programables.
5. Sensórica.
6. Preactuadores y variador de frecuencia.
7. Programación básica a partir de GRAFCET-SFC.
8. Conceptos de programación y GRAFCET adicionales.
9. Programación ampliada y control de procesos en continuo.
10. Necesidad de la comunicación en la industria.
11. Robótica industrial.

Y en correspondencia con cada capítulo, se aportan anexos que incluyen material no menos interesante con acceso para el lector en la sección no impresa del libro.

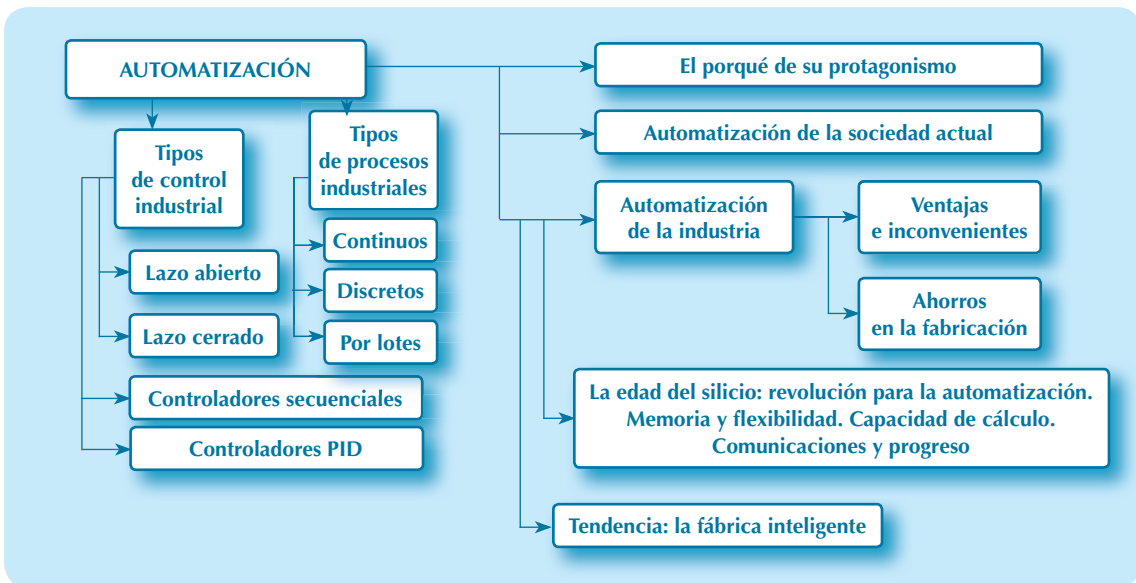
Además de la explicación de los contenidos que componen los distintos capítulos y anexos web, el texto pone a disposición del lector y del profesional encargado de la docencia de esta materia una propuesta de actividades, llamadas y cuadros resumen que guiarán y mediarán en el proceso de enseñanza y aprendizaje, así como un glosario en cada capítulo en el que se explican los términos que pudieran resultar más novedosos o confusos para el estudiante y que son de especial importancia para la comprensión

Introducción a la automatización industrial

Objetivos

- ✓ Introducir los conceptos de *automatización* y *automatización industrial*.
- ✓ Entender la necesidad de la automatización industrial en toda la industria y sociedad actual.
- ✓ Reflexionar sobre los efectos de la automatización en la industria y su evolución futura.
- ✓ Conocer los tipos de procesos industriales y métodos de control.

Mapa conceptual



Glosario

Automática. Ciencia que trata de sustituir en un proceso al operador humano mediante dispositivos mecánicos o electrónicos.

Automatismo. Desarrollo de un proceso o funcionamiento de un mecanismo por sí solo.

Automatización. Acción y efecto de automatizar.

Automatización industrial. Aplicación de la automática a procesos o máquinas para su control y comunicación en una fábrica o en el ámbito industrial.

Automatizar. Aplicar la automática a un proceso o a un dispositivo.

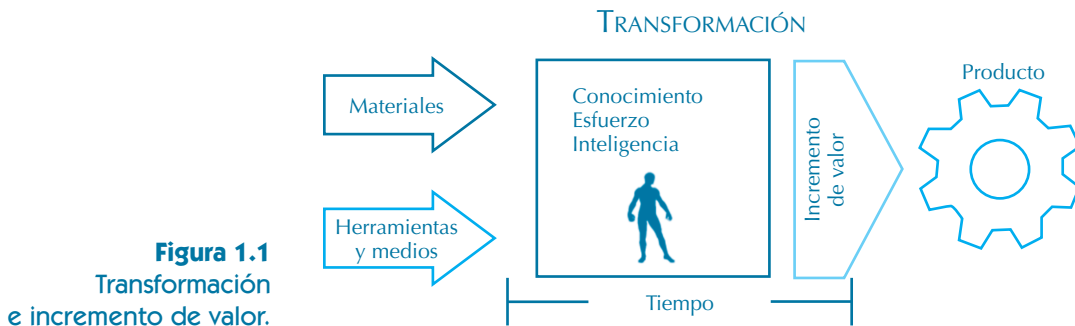
Dispositivo automatizado. Ingenio diseñado y fabricado que incluye las funciones que aportan la acción mecánica y el control inteligente del hombre con el objetivo de realizar un trabajo con cierta o total autonomía.

Nivel de vida. Grado de bienestar, fundamentalmente material o económico, alcanzado por una persona o por un colectivo como, por ejemplo, el conjunto de los habitantes de un país o región.

1.1. Automatización industrial

En este apartado, se justifica la presencia y necesidad de la automatización en el contexto presente económico y social. Desde siempre, el hombre ha intentado transformar aquello de lo que disponía para conseguir un beneficio. Por ejemplo, afilar un palo de madera para tener un arma o una lanza con la que cazar. Obtener una vasija de barro a partir de arcilla y un horno donde cocerla.

El hombre empleaba un tiempo y aportaba materiales y herramientas (el horno, por ejemplo, o una piedra con la que afilar el palo), junto con sus conocimientos e inteligencia, para realizar con su esfuerzo una transformación que aumentaba el valor del producto.



El resultado siempre debía ser más valioso que los elementos de partida. Mediante esta transformación (figura 1.1), se añade valor al resultado (o lo que se denomina *valor añadido*). Esta ganancia de valor ha permitido a las personas y pueblos mejorar sus condiciones de vida o generar riqueza gracias al uso de los productos y su intercambio o venta con otros humanos. Con el tiempo, se ha buscado perfeccionar y potenciar la forma de realizar estas transformaciones hasta el día de hoy. La progresión es evidente, pues, con la tecnología, los humanos consiguen resultados que eran considerados imposibles en el pasado.

Una forma de potenciar e incrementar la transformación es crear dispositivos automatizados que hagan el trabajo por los humanos. Consiste en utilizar dichos dispositivos para automatizar los procesos en los que este cambio resulte rentable. Para ello, la transformación automatizada debe obtener resultados similares o mejores que antes de su aplicación.

Posteriormente, se analizan las ventajas e inconvenientes de estos cambios, pero, cuando una máquina o automatismo hace el trabajo de los humanos, una de las primeras consecuencias es que estos pueden utilizar sus recursos (trabajo, inteligencia y tiempo) en realizar otras tareas.

1.2. Automatización en la sociedad actual

Actualmente, en cualquier situación de la vida cotidiana, se convive con y se utilizan automatismos incorporados a cientos de elementos: el teléfono móvil, los ordenadores, los ascensores, los semáforos, internet, etc. ¿Cómo sería la vida prescindiendo de todos estos instrumentos?



Figura 1.2
La automatización sostiene las comunicaciones digitales.

RECUERDA

- ✓ Los colectivos y sociedades que dominan la automatización tienen más capacidad de generar riqueza y bienestar en el mundo actual.

En el caso de no disponer de telefonía y otros medios de comunicación actuales sostenidos por la automatización (figura 1.2), para la comunicación con otros seres humanos, sería necesario hablar en persona con ellos. Si no hubiera medios digitales de almacenamiento, habría que apuntar absolutamente todos los datos en papel. Por lo tanto, para consultar cualquier dato (teléfonos, personas o movimientos de una cuenta corriente), sería necesario revisar listados impresos. ¿Cuánto se tardaría en llevar a cabo dichas búsquedas si aún continuase este sistema y todo el mundo tuviera que hacer lo mismo?

En el caso de que no hubiera automatización en las máquinas que sirven a la industria, muchos electrodomésticos ni existirían, los coches serían arcaicos y, por ejemplo, no podrían incorporar ayudas a la seguridad activa como el ABS. Igualmente, al no poder diseñar el habitáculo del vehículo con software avanzado por ordenador, estos serían mucho menos seguros en caso de impacto.



SABÍAS QUE...

Antiguamente, para comunicarse con alguien que estuviese en otro país, se escribía una carta y, dentro de un sobre, se depositaba para su recogida y transporte por un servicio de correos integrado por muchas personas y medios. Tras días o semanas, alcanzaba su destino. Hoy basta con abrir una aplicación de mensajería o chat en un terminal móvil y la comunicación es instantánea. Esta gestión de la interfaz en la que se escribe, emite, transporta y recibe en destino está desarrollada por una cadena de máquinas y procesos automatizados que han sustituido a aquellos medios y personas que, con mucho esfuerzo y tiempo, realizaban la misma función.

Son tantos los elementos que disponen de la automatización para conseguir llevar a cabo las actividades necesarias de manera más fácil, eficiente y eficaz, y desde hace tanto tiempo, que cuesta identificarla y aún más imaginar la vida sin ella (cuadro 1.1).

CUADRO 1.1

Logros obtenidos con la automatización de los procesos

Sustitución de prestaciones	La automatización ha permitido sustituir a las personas en diversas actividades y eliminar, en muchos casos, tareas tediosas y que requerían grandes esfuerzos. Por ejemplo, los robots de ensamblaje, pintura, soldadura y otros en la industria.
Mejora de prestaciones	Con el tiempo y su evolución, no solo sustituye, sino que perfecciona las capacidades que tenían las personas o máquinas que realizaban esa actividad. La velocidad y precisión de soldadura, manipulado, pintado de un robot, la capacidad de carga en el manipulado de piezas, etc., superan en mucho las que puedan tener las personas.
Generación de prestaciones	En algunos casos, no hay sustitución de actividad previa. Las máquinas automatizadas son capaces de realizar tareas que nunca estuvieron dentro de las capacidades humanas. Por ejemplo, el control ultrapreciso de trayectorias complejas en máquinas herramienta en concordancia con la lectura a la centésima de su posición.

Si se debate sobre diferencias entre regiones geográficas y países, las conclusiones son similares. La automatización es uno de los campos que, actualmente, acompaña siempre a los avances

tecnológicos que mejoran la vida humana. Aunque hay otras consideraciones, suele haber una relación directa entre el nivel tecnológico de una sociedad y su nivel de vida. La conclusión es que, actualmente, la automatización es fundamental para el funcionamiento de la sociedad.

INTERESANTE

El instrumental médico que, hoy en día, sirve para mejorar la salud y salvar vidas depende enormemente de la automatización. Dos ejemplos son las resonancias magnéticas y la tomografía axial computarizada (TAC). En ambos casos, se obtiene información mediante análisis complejos sobre cómo los te-

cidos responden a una energía emitida (campos magnéticos o rayos X). Sin la resolución automática por las máquinas de complicados algoritmos matemáticos, sería imposible visualizar el resultado de resonancias o TAC.

Ambas técnicas supusieron en su momento premios Nobel para sus descubridores.

1.3. Revolución de la automatización con la edad del silicio

Todas las áreas del conocimiento humano evolucionan con el desarrollo tecnológico. Sin embargo, hay grandes diferencias. Por ejemplo, aunque con distinta composición y probablemente técnicas, las carreteras siguen asfaltándose igual desde hace muchos años. La gastronomía tradicional tampoco ha sufrido revoluciones. Sin embargo, la evolución de la automatización con la tecnología ha sido especialmente singular.

Los primeros dispositivos comerciales capaces de trabajar de forma autónoma datan del siglo XVIII, coincidiendo con la revolución industrial. El matiz que permite distinguir las máquinas que surgieron en esta época de un automatismo es la capacidad de realizar algún control autónomo. Un bonito ejemplo es el regulador centrífugo mostrado en la figura 1.3.

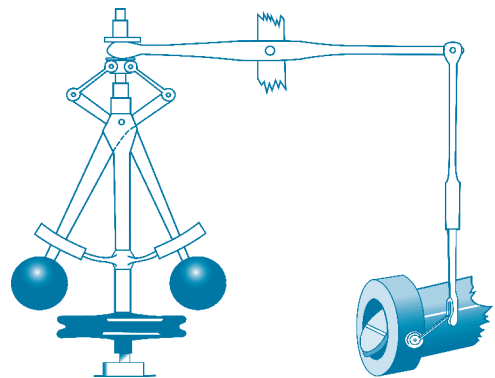


Figura 1.3
Regulador de Watt.

PARA SABER MÁS

El regulador centrífugo (*flyball governor*) o más conocido por *regulador* o *péndulo de Watt* (figura 1.3) fue uno de los primeros dispositivos con capacidad de regulación. Presente en el escudo de los colectivos de ingenieros industriales, servía, por ejemplo, para regular la velocidad. Consistía en dos bolas unidas con articulaciones a un eje que giraba a una velocidad proporcional a la de la máquina que deseaba controlarse. Cuando la velocidad aumentaba, las bolas, por su masa e inercia, se separaban y movían las articulaciones, lo que accionaba la regulación para tratar de reducir la velocidad (activando una válvula reguladora) y mantenerla constante.

Inicialmente, la automatización se conseguía de forma ingeniosa mediante montajes de dispositivos mecánicos, electromecánicos, neumáticos o hidráulicos. Eran montajes como, por ejemplo, muestra la figura 1.4, con relés electromecánicos dentro de cuadros eléctricos con un diseño específico para automatizar una secuencia determinada. Este detalle es importante: para cualquier modificación de la secuencia, era necesario modificar físicamente el dispositivo, por ejemplo, el cuadro eléctrico, cambiando sus elementos y su cableado.

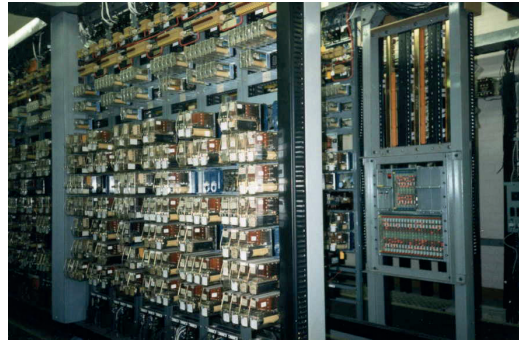


Figura 1.4
Cuadro de relés.

Estas tecnologías evolucionaron inicialmente, pero llegaron a un estancamiento. Un cilindro hidráulico convencional o un relé no han evolucionado radicalmente en los últimos cuarenta años. Sin embargo, la llegada de la denominada *era del silicio* catapultó la automatización que sigue hoy en día en constante ascenso. ¿Por qué?

Tecnológicamente, la edad del silicio surge con el nacimiento de los circuitos integrados en los años sesenta. El silicio es un material que permite fabricar circuitos eléctricos en miniatura, que se llaman *circuitos integrados*, gracias a que tiene la particularidad de que puede controlarse su comportamiento cambiando entre aislante o conductor (semiconductor). Con esta propiedad, pueden fabricarse circuitos de millones de microtransistores que, en conjunto, son chips que disponen de memoria donde almacenar datos y programas. Además, estos chips disponen de unidades de cálculo capaces de realizar operaciones con los datos almacenados.

Así, desde su creación, las órdenes del automatismo expresadas en un programa modificable se almacenan y ejecutan en la memoria de un circuito integrado. La *inteligencia* del automatismo y, por tanto, el control de una máquina son ahora flexibles.



RECURSO ELECTRÓNICO 1.1

La ley de Moore es una observación de Gordon E. Moore que, originalmente, se formuló indicando que, cada dos años, se duplica el número de transistores en un circuito integrado. Actualmente, se formula de forma simplificada señalando que la potencia de un circuito integrado se duplica cada dos años. Puedes saber más sobre esta ley mediante la consulta del anexo web 1.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro.

La cantidad de memoria disponible, la velocidad de operación y la capacidad de realizar cálculos matemáticos y lógicos permitieron una automatización infinitamente más compleja. Adicionalmente, los integrados permiten disponer de mejor comunicación de datos entre dispositivos: un automatismo programado con chips integrados puede enviar gran cantidad de datos en forma binaria de tiempos, temperaturas, etc.

Esta tecnología se encuentra en constante evolución y miniaturización desde su nacimiento. La complejidad de los circuitos ha crecido mucho desde su nacimiento y, con ella, la memoria y potencia de cálculo. También se ha progresado en las técnicas para aprovechar dicha memoria y potencia incrementando cada año la inteligencia de los automatismos en general y el software para su configuración y programación. También han crecido sus capacidades de

comunicación y, como consecuencia de todas estas mejoras, se ha producido un abaratamiento constante de esta tecnología que ha contribuido a su expansión.

La automatización ha experimentado una revolución con la era del silicio y ha revolucionado la vida actual por los siguientes factores:

1. Facilidad de creación y modificación del programa (instrucciones) –al almacenarse en memoria (lógica programada, no cableada)– que define la secuencia o el control deseados.
2. Memoria electrónica con gran capacidad de almacenamiento en la que guardar programas de control de gran volumen.
3. Alta potencia de cálculo gracias a un número elevado de transistores en los circuitos y a su alta velocidad de operación.
4. Abaratamiento constante de los chips integrados con el transcurso del tiempo.
5. Incremento constante de todas las prestaciones (puntos 2 al 4), gracias en gran parte al continuo progreso de miniaturización de los circuitos.
6. Capacidad de comunicación de datos.

Por lo tanto, estas cualidades de los chips integrados los convirtieron en el perfecto *cerebro* que se requería para proporcionar autonomía a una máquina o automatizar un proceso y, además, con un abaratamiento constante.

Hoy en día, la mayoría de dispositivos que se utilizan, desde electrodomésticos, ordenadores y teléfonos hasta un cartucho de tinta de impresora, contienen circuitos integrados o microprocesadores con alguna función automática programada y ejecutada.



Actividad propuesta 1.1

Busca dos modelos de procesador para ordenadores personales distantes en el tiempo (por ejemplo, un Intel 80286 y un Intel I7) e intenta averiguar los siguientes datos:

- a) El tamaño de puerta del transistor.
- b) La velocidad (MHz).
- c) El número de transistores.
- d) La cantidad de MIPS (millones de instrucciones ejecutadas por segundo).

Comprueba en qué medida se cumple la ley de Moore en lo que respecta a transistores y rendimiento MIPS.

1.4. Automatización en la industria

Ya se ha visto en el apartado previo que la capacidad general del ser humano de realizar tareas se multiplica gracias a la automatización: comunicar, desplazarse, diseñar, organizar, manipular, transformar, etc.

La automatización está presente en muchas actividades, pero solo se consideran automatización industrial aquellos automatismos o dispositivos exclusivos del área de fabricación. Por ejemplo, una *suite* ofimática es una herramienta automatizada, pero es de un ámbito tan general

que no se considera industrial. Sin embargo, un robot industrial sí es un elemento de automatización industrial.

Para entender su importancia actual y hacia el futuro, a continuación, se proponen beneficios e inconvenientes de la automatización en la industria (cuadro 1.2).

CUADRO 1.2

Ventajas e inconvenientes de la automatización industrial

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> – Mejora la precisión y fiabilidad de los procesos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Más calidad conseguida y percibida por el cliente en el producto. 2. Ahorro por menos desperdicios debidos a desviaciones. – Incrementa la productividad: mayor eficiencia de los procesos y la capacidad, pues se fabrica lo mismo con menor tiempo, energía, contaminación y costes. – Produce un ahorro con la eliminación de almacenes intermedios y semielaborados o circulantes. – Consigue mejor rendimiento y gestión gracias a la información y comunicación que incorpora la automatización. – Logra mayor seguridad y calidad en el trabajo. – Reduce costes de mano de obra. 	<ul style="list-style-type: none"> – Es un desafío económico, técnico y cultural. – Requiere mayor cualificación del personal. – Baja flexibilidad frente a los cambios rápidos. – Transformación y destrucción de empleo. – Fallos más críticos con mayor automatización. – Ineludible.



RECURSO ELECTRÓNICO 1.2

Las ventajas de la automatización, entre las que destacan la mayor competitividad conseguida en las prestaciones, la eficiencia y, en conjunto, un ahorro global muy importante, superan con creces a las desventajas, lo que explica su gran implantación y avance actual. En el anexo web 1.2, puedes profundizar sobre las ventajas e inconvenientes de la automatización, las consideraciones generales y su futura repercusión social. Además, encontrarás algunos ejemplos sobre el efecto de la automatización en la vida cotidiana.

1.4.1. Ilustración del ahorro de costes en la fabricación industrial

Tras ver las ventajas, destaca en conjunto la optimización en el proceso de fabricación, con la que se obtiene una mejora de los productos y el enorme ahorro frente a la fabricación tradicional.

Es interesante resaltar que aún hoy existen muchas fábricas con procesos manuales y oportunidades de automatizar, pero llegará un punto en el que la automatización esté presente sistemáticamente en todas las fábricas. En ese momento, el margen de mejora será únicamente el

que aporte el avance que pueda realizarse sobre la propia automatización ya existente. En este estado se encuentran ya las fábricas modernas.

Se muestra a continuación el principal impulsor de la automatización en la industria: se trata de comprender por qué el valor del ahorro de costes que se consigue es tan importante en la fabricación en serie. El área industrial es el perfecto ejemplo de incremento de valor en una transformación para obtener un producto en busca de un beneficio, pero, además, en la mayoría de los casos, se caracteriza por la fabricación repetitiva en grandes volúmenes o fabricación en serie, como muestra la figura 1.5.

1. La fabricación en serie de productos iguales o similares se consigue con procesos muy repetitivos y, por tanto, fácilmente automatizables (presentan un entorno invariable y totalmente predecible, por lo que son sencillos de automatizar).
2. La automatización consigue ahorro y avances en cada etapa o proceso (frente a la falta de automatización o fabricación tradicional).
3. El conjunto de procesos mejorados empleados para generar un producto aporta sumando las mejoras parciales, un avance sustancioso que se traslada a cada unidad de producto.
4. Del mismo modo, estos adelantos y ahorros en la confección de cada producto se multiplican cuando se trata de grandes cifras de fabricación en la industria.

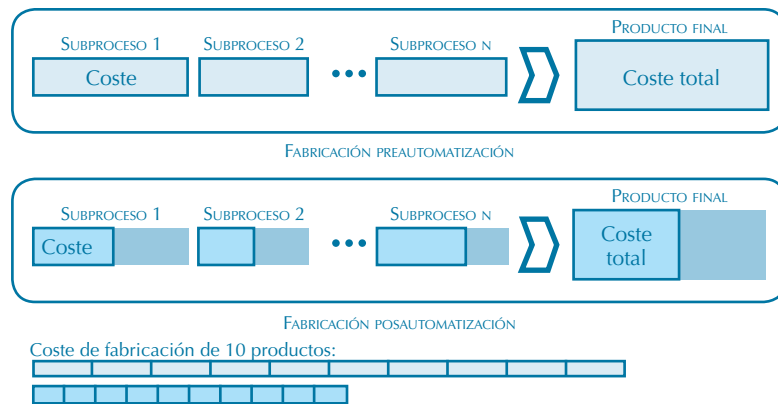


Figura 1.5
Reducción de costes
con la automatización.

1.4.2. Evolución de la automatización industrial desde el presente: la fábrica inteligente

Igual que ha sucedido en términos generales, con la era del silicio, la evolución de la automática en el mundo industrial también ha sufrido una revolución, y sigue cambiando notablemente. Desde los años setenta, puede hablarse de tres etapas, que se detallan en los siguientes subapartados.

A) Etapa 1: Automatización fundamentalmente mecánica y de baja complejidad

Al principio, con movimientos sencillos, los primeros robots sustituyeron principalmente el esfuerzo manual de las personas en el manipulado de cargas pesadas y tareas muy repetitivas. Sin embargo, la baja inteligencia artificial inicial impedía la realización de tareas complejas, ya que los controladores programables no disponían de funciones complejas.

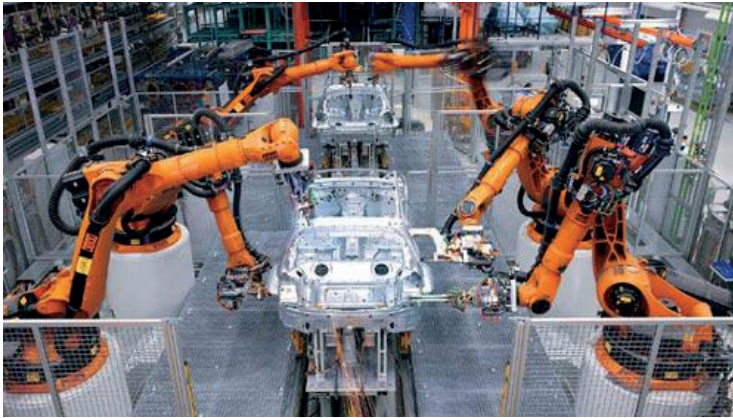


Figura 1.6
Robots industriales en labores de soldadura.

B) Etapa 2: Automatización compleja

La progresión en los actuadores ha mejorado los movimientos, pero destaca la evolución de las capacidades cognitivas y de inteligencia de los sistemas de control. Ahora los automatismos son capaces de realizar funciones más complejas en la toma de decisiones y en el control de movimientos (figura 1.6). Por ejemplo, a través de la visión artificial, un robot modifica su trayectoria para colocar una pieza o realizar una operación. Un sencillo variador de frecuencia actual (para gobernar un motor) tiene más potentes funciones de control que los primeros controladores industriales. La mejora de las comunicaciones también ha permitido una mejor coordinación entre dispositivos y, por tanto, entre procesos.

C) Etapa 3: Tendencias actuales y futuras en el ámbito industrial

1. Importancia de las redes y gestión de datos en los procesos

- *Avance de Ethernet industrial.* Se trata de un sistema de comunicaciones industriales que, frente a otros, es capaz de unificar prácticamente la totalidad de las comunicaciones en una fábrica y facilita su conexión con otras redes, el exterior (internet) y otros dispositivos moviendo grandes volúmenes de datos.
- *Información de los procesos en internet y conectividad remota.* La gestión remota o centralizada de fábricas permite intervenciones de sistemas de control u operarios en diversos lugares distantes desde una única ubicación. Para ello, la información de los procesos se transmite y muestra de forma segura en ordenadores, tabletas y teléfonos conectados remotamente.
- *Automatización y comunicación extendida a más dispositivos e incluso al producto en elaboración.* En una red industrial actual, pueden encontrarse cientos de dispositivos con capacidad de comunicación, lo que incrementa la recepción de información de los procesos y su capacidad de control y monitorización. Incluso se realiza el seguimiento del producto en fabricación mediante un etiquetado inteligente y dotado de memoria y comunicación (puede proporcionar información de trazabilidad, modelo, estado dentro de la fabricación, operaciones pendientes, destino logístico, etc.).

2. Integración de más funciones en dispositivos únicos más potentes

Los avances tecnológicos y el abaratamiento de los circuitos integrados permiten ofrecer a los fabricantes, por el mismo precio, cada vez más funciones en un solo producto. Un ejemplo es la escalada de prestaciones que los PLC (del inglés *programmable logic controllers*) –controladores lógicos programables o autómatas programables– han experimentado en los últimos años incorporando cada vez más funciones.

3. Mejora de la interfaz máquina-humano con pantallas táctiles HMI (human machine interface) evolucionadas

Pantallas HMI mejoradas, pues, integran un dispositivo de automatización (controlador o PLC) y comunicación con toda su funcionalidad, aparte de proporcionar una pantalla táctil en la que se muestra información y un diseño esquemático del proceso que facilita al operario su comprensión y el análisis de sus datos. Además de aglutinar cada vez más funciones, pueden comunicar con y proporcionar información de otros procesos y cualquier otro dato en tiempo real que sea necesario. La potencia gráfica y alta definición, junto con propiedades multitáctiles, enriquecen la interacción. El software de control es el protagonista, con lo que el límite de la funcionalidad en el control por HMI lo impone el propio propietario en la configuración.

4. Mejora continua del software para control, programación y comunicaciones de dispositivos industriales con integración de distintas áreas

Los paquetes que ofrecen los fabricantes de automatización también mejoran a la par que el hardware, lo que facilita la labor de configurar la automatización de procesos, las comunicaciones y la integración de distintos dispositivos entre sí y en sistemas SCADA. Si bien hay estándares en la comunicación, el fabricante permite la configuración integrada en el software con sus propios dispositivos y, a menudo, con una compatibilidad más reducida con los de otros fabricantes.

5. Introducción de robots colaborativos

Hasta ahora, los robots industriales operaban en unas condiciones de aislamiento total de los operarios humanos por cuestiones evidentes de seguridad. La enorme potencia y velocidad, junto con ausencia de sensibilidad, exige que el volumen o espacio de trabajo de un robot industrial convencional esté aislado totalmente de cualquier presencia humana mediante una jaula. La existencia de procesos en los que aún los operarios humanos tienen que intervenir directamente, junto con la conocida productividad de los robots, ha generado una nueva familia. Se trata de un producto relativamente reciente que consiste en robots con control de colisión de

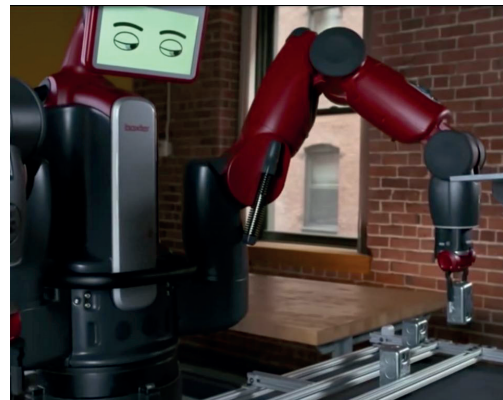


Figura 1.7
Robot colaborativo Baxter.

alta sensibilidad, facilidad de programación para mayor flexibilidad y, en definitiva, capacidad de interacción con humanos de forma segura (figura 1.7). Estos robots pueden trabajar en paralelo o complementariamente con personas en los mismos espacios.

6. Fabrica inteligente

Integrando todas estas tendencias actuales, se denomina a la futura industria ideal como *fábrica inteligente*, llamada también *industry 4.0* o *smart manufacturing*. Esta fábrica inteligente se caracterizará por lo siguiente:

- a) Las comunicaciones y la gestión de los datos aún tendrán más protagonismo que ahora:
 - *Integración aún mayor de las comunicaciones.* Se trabajará con un sistema de control global que intente coordinar cada proceso de la fábrica. Para ello, se dispondrá de sensorica avanzada y automatización máxima, de modo que se reciba información de todo lo necesario.
 - *Análisis de big data con inteligencia artificial.* El enorme volumen de datos se analizará con la asistencia de la inteligencia artificial, identificando tendencias y relaciones entre ellos. Esta información permitirá mejorar los procesos y la gestión (*big data* y *smart data*).
- b) La fábrica inteligente seguirá empleando y potenciando los clásicos sistemas de máxima eficiencia, mejora continua y cero desperdicios como *lean production*, *six sigma*, incluyendo JIT, *kanban*, calidad total, 5S, cero papeles, *empowerment* y otras.
- c) Su objetivo final es conseguir la optimización entera de una fábrica con la ayuda de la automatización, comunicaciones y gestión eficiente.

Actividad propuesta 1.2



Trabajando por grupos, indicad las ventajas e inconvenientes que tienen los coches autónomos.

1.5. Tipos de procesos industriales

Los procesos pueden clasificarse según diferentes características. Por ejemplo, el tipo de industria (automoción, naval, metalúrgica, etc.), el tipo de sector (agricultura, industria o servicios) y el de materiales o transformación (de transformación de metales, químicos, biológicos, etc.).

Pero, en lo que concierne a la automatización, interesa clasificarlos según su comportamiento, con lo que se establecen tres tipos principales de procesos industriales, que se explican.

1.5.1. Procesos discretos o discontinuos

En este caso, se transforma una cantidad específica de materia prima de forma no continua, sino con operaciones en etapas que generan cambios sustanciales (discretos) cada vez, formando una secuencia y fabricando piezas discretas. El producto se transforma sufriendo un conjunto de operaciones separadas temporalmente en cada una de las cuales se realiza una transformación tangible

sobre una cantidad de materia prima o semielaborada (figura 1.8).

Algunos ejemplos serían el montaje de unas gafas de sol, el troquelado de una arandela o el mecanizado de una pieza.

En el caso de los procesos discretos, la detención del proceso significa la detención de la secuencia, donde cada elemento semielaborado queda detenido en una etapa.

A veces, se interpreta a la producción por lotes como un proceso discreto con un determinado número o cantidad objetiva de piezas (lote) o producto por fabricar.



Figura 1.8

Línea de montaje de vehículos Hyundai.

1.5.2. Procesos continuos

Una cantidad no dividida (continua) de producto se transforma transfiriendo el material entre diferentes equipos transformadores como un flujo continuo. Este flujo es continuo en la entrada y en la salida, desde el inicio con la entrada de materia prima, pasando por las transformaciones necesarias, hasta el final, generando en la salida el producto terminado también de forma continua. Puede entenderse como un proceso único de transformación progresiva, y el tiempo para completar el proceso total suele ser considerable entre la entrada de la materia prima y la salida como producto terminado. Además, una parada del proceso en marcha implica la parada de todo el flujo de material, algo que, habitualmente, solo se hará por fuerza mayor.

Un ejemplo es la obtención por colada de barras o planchón de producto siderúrgico (figura 1.9). Otro ejemplo podría ser el acondicionamiento de temperatura de una nave industrial, donde el aire caliente se recoge y se enfría de forma continua para ser introducido de nuevo en la estancia. Dentro de la producción continua también se emplea el concepto de fabricación en distintos lotes. Se asigna un cambio de lote, por ejemplo, cuando se haya producido una determinada cantidad o cuando haya un cambio de características o tipo de producto.



Figura 1.9

Palanquilla de acero en colada continua.

A la acción de cambiar el tipo de producto en un proceso de producción continua se le denomina también *cambio de lote de producción*.

Los procesos continuos son típicos también de la industria química y algunos productos de la industria alimentaria.

El sistema puede caracterizarse y controlarse con magnitudes físicas continuas e inintermitidas en el tiempo (por ejemplo, la temperatura de un reactor). Por ello, el control de procesos continuos suele involucrar a variables analógicas con valores continuos o que proporcionan una gran cantidad de valores (velocidad, temperatura y presión).

1.5.3. Procesos por lotes

A veces, con la producción discreta de una cantidad de producción de piezas, se dice que se ha fabricado un *lote* (por ejemplo, un lote de fabricación de 126 000 tornillos). También se dice que se fabrican *lotes distintos en fabricación en continuo*, con la modificación del producto fabricado en dicho proceso (la modificación del conformado final para fabricar planchón de distinto espesor implicará un lote diferente al previo).

En otros casos, se refiere a menudo a un *proceso por lotes* como aquel en el que se requiere combinar, durante un tiempo y de una vez, cantidades específicas de componentes o materias primas para producir un resultado intermedio o final. Por ejemplo, en la producción de adhesivos y colas, que requieren la mezcla en un reactor a temperatura de materias primas durante un periodo de tiempo para formar una cantidad de producto final. Otro ejemplo es la producción de algunos alimentos y bebidas, como el vino o la cerveza, en reactores o cubas de un tamaño y por un tiempo determinado. Estos procesos también denominados *por lotes* se usan, generalmente, para producir un gran volumen o masa determinada conocida *a priori* de producto.

1.6. Tipos de control industrial

Un proceso es una transformación de algún tipo, donde las entradas pasan por las acciones y se obtienen unas salidas. En las acciones del proceso industrial, tiene lugar un proceso de control, que puede ser de dos tipos:

1. **Control en lazo abierto.** Se trata de un control *ciego* a partir de algún tipo de mando o señal externo al estado del proceso. El control actúa sobre el proceso, sin ningún tipo de información (ni, por tanto, capacidad de corrección) o parámetro del resultado (figura 1.10).

Ejemplos de este control pueden ser unas *luces de Navidad*, un *horno microondas* o un *ventilador*. Todos ellos obedecen a un comando de puesta en marcha y realizan un cierto control del proceso (secuencia de encendido y apagado de luces de colores, activación de emisión de radiación y giro del plato interno del horno y movimiento de las aspas del ventilador según velocidad demandada), pero en ningún caso tienen información de si el resultado es el pretendido (no se controla si las luces funcionan ni el calentamiento de la comida dentro del microondas ni si el flujo de aire es el deseado). También suele denominarse *control sin realimentación*.

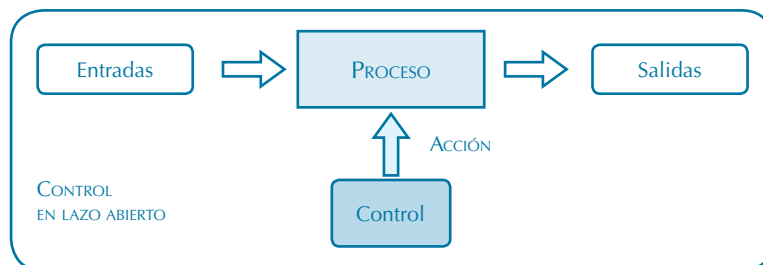


Figura 1.10

Esquema de control en lazo abierto, con la acción del control sobre el proceso.

2. **Control en lazo cerrado.** El control en lazo cerrado tiene en consideración desviaciones que se producen fundamentalmente a la salida del proceso (figura 1.11). Se determina el error como desviación de lo medido a la salida respecto a un valor de consigna deseado y se establece la acción de control para la corrección del proceso en función de dicho error. También suele denominarse **control con realimentación**. Este control puede ver el resultado final e intentar corregir desviaciones.

Por ejemplo, un equipo de bomba de calor con termostato puede registrar, mediante este último, cuándo la temperatura de la habitación (salida) está por debajo o por encima de la deseada y activar entonces la emisión de calor o no.

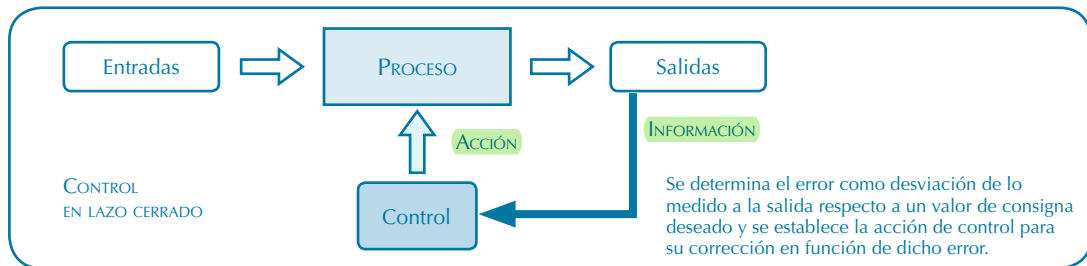


Figura 1.11
Esquema de control en lazo cerrado, con la acción del control sobre el proceso.

Un control aún más avanzado puede tener en consideración valores de medida o información del proceso también en la entrada y durante el proceso a través de la medición de parámetros (con sensores) y la comparación con los valores de referencia para intentar realizar correcciones todavía más eficientes en las acciones realizadas sobre el proceso (figura 1.12).

En el caso de un calentador de agua externa para un proceso, probablemente, no solo se mediría la temperatura del agua en la salida, sino también en la entrada, para estimar qué potencia ha de aplicarse y, así, anticipar mejor su acondicionamiento (sin esperar únicamente a verificar la temperatura en la salida).

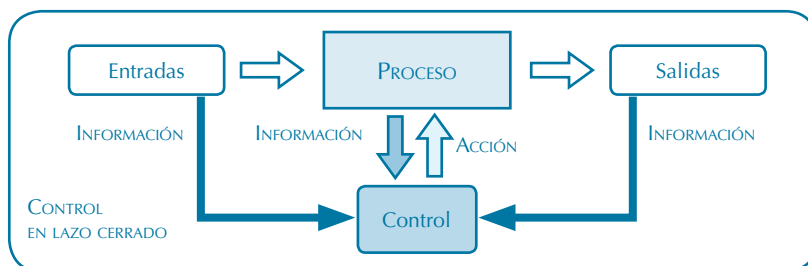


Figura 1.12
Esquema de control avanzado en lazo cerrado (medición en salida) y, adicionalmente, con flujo de información desde entradas, proceso o salidas hacia el control y la acción de este sobre el propio proceso.

Este control más completo permite mejores tiempos de reacción y mayor precisión en el control.

1.6.1. Controladores secuenciales

Como se ha explicado previamente, a menudo, para fabricar un producto, es preciso realizar acciones por etapas que siguen una secuencia. Para que un proceso discreto secuencial sea correcto, debe controlarse la ejecución de las acciones vinculadas a sus etapas. Los cambios entre una etapa y otra de un proceso secuencial (finalización de una etapa y activación de la siguiente) están vinculados a una condición de transición entre etapas. Estas condiciones de transición pueden ser:

- Señales de eventos indicados por mandos y sensores internos o externos al proceso: botones de mando, temperaturas, sensores de posición, alcance del conteo de un número determinado de repetición de eventos del proceso (contadores), señales de otros procesos, etc. Estos eventos, normalmente, están vinculados al mando o al proceso (certifican que la acción deseada en cada etapa se ha realizado correctamente). Este tipo de condición de transición configura el sistema de control como un control con realimentación para procesos secuenciales si las condiciones incluidas están relacionadas (como así suele ser) con el correcto desarrollo de las etapas del proceso y sus acciones.
- El transcurso de periodos de tiempo determinados (temporizadores). Si solo existen condiciones de transición de este tipo en el control secuencial, el sistema de control podría considerarse un control ciego secuencial (como, por ejemplo, un semáforo).

Considerando la forma temporal en la que se controla el avance entre etapas, existen dos tipos de controladores secuenciales (figura 1.13).

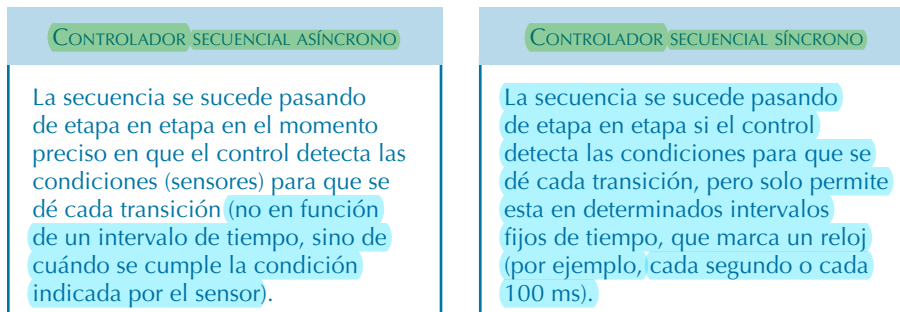


Figura 1.13
Tipos de controladores secuenciales.

En los sistemas digitales, todo sucede en intervalos de tiempo fijos que dependen de la velocidad a la que el sistema ejecuta el conjunto de instrucciones o a la velocidad de ciclo o reloj de la electrónica. Por ejemplo, si un procesador funciona a 10 MHz, su periodo o ciclo de trabajo dura 100 ns o 0,0000001 s. En el espacio temporal entre ciclos, por ejemplo, entre 0,0000211 s y 0,0000212 s desde el inicio, no habrá ejecución alguna, aunque se active la condición de transición. Pero esto no significa que el sistema sea síncrono, sino que todos los sistemas digitales funcionan de modo cíclico y que hay limitaciones dadas por la máxima velocidad del sistema. Tener esto en cuenta puede ser necesario y fundamental para procesos que requieran muy alta velocidad de respuesta, pues quizá el sistema sea demasiado lento y

no pueda garantizar dicha respuesta rápida. Habrá que seleccionar hardware capaz de cumplir con lo requerido en este sentido.

En un sistema síncrono, se especificaría en el programa que la lectura se realizará, por ejemplo, en intervalos determinados de tiempo. Por tanto, si el intervalo es de una centésima de segundo, cada centésima de segundo se evaluaría la condición de transición y se actuaría en consecuencia.

Un ejemplo de sistema síncrono sería una estación meteorológica que dispara una alarma si el viento supera determinado valor y donde la evaluación proviene del anemómetro (aparato para medir la velocidad del viento) solo se realiza cada 10 s.

Sin embargo, un sistema síncrono sería aquel sistema de alarma que está esperando la señal de detección de alguno de sus sensores y disparará la alarma y otras acciones (comunicaciones) con la mayor celeridad posible tras verificar dicho disparo, sin esperar el transcurso de ningún intervalo de tiempo prefijado.

Los procesos discretos o discontinuos suelen tener naturaleza secuencial (unas transformaciones diferenciadas entre sí formando etapas que suceden a lo largo del tiempo) y gran parte de los procesos industriales son de este tipo. Cualquier tipo de montaje de cualquier producto va a seguir una secuencia de operaciones de montaje y, para conseguir ejecutar los procesos secuenciales, se emplea el control secuencial.

1.6.2. Controladores PID

Se trata de un tipo de control en lazo cerrado donde se actúa constantemente sobre un proceso para mantener una o varias magnitudes (temperatura, salinidad, caudal, presión, etc.) en torno a un valor o en un rango deseado. Estos controladores son los protagonistas del control de procesos en continuo o por lotes, por lo que se estudian con mayor detenimiento más adelante y aquí solo se realizará una introducción.

Para realizar un control PID (figura 1.14), se hace la lectura del resultado y se resta a un valor inicial deseado. El error resultante sirve para definir una acción correctora de control para intentar dirigir el proceso hacia alcanzar en el resultado el valor deseado (error mínimo o cero).

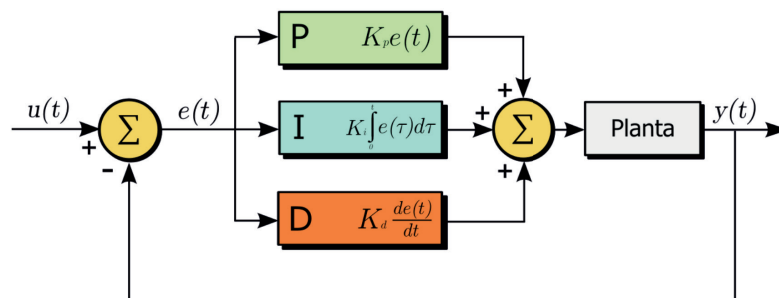


Figura 1.14
Control PID.

En la acción del control, se realizan tres tipos de corrección: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Según la corrección que incorporen, se denominarán *controladores P, I, PI, PD y PID* (cuadro 1.3).

CUADRO 1.3



Tipos de controladores

P	La corrección proporcional es directamente proporcional al error o desviación entre lo medido y lo deseado a la salida. Para que exista en un momento una corrección significativa, debe existir también un error considerable.
I	La corrección integral es proporcional al error acumulado (tiene cierto tiempo de reacción o proporciona un control lento frente a las desviaciones). Con una corrección integral, un error, aunque sea pequeño, va acumulándose y se generará una corrección creciente tendente a eliminar el error. Se supone que, con este tipo de control, el error en régimen permanente será siempre cero.
PI	La corrección proporcional-integral combina las dos anteriores. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI.
PD	La corrección proporcional-derivativa es proporcional al error y a la tendencia con el tiempo de dicho error. La corrección derivativa es proporcional a la pendiente del error (con el tiempo), lo que quiere decir que, si el error es constante (pendiente cero), pero grande, la corrección derivativa no ejercerá acción ninguna; por ello, nunca se utiliza por sí sola. Corrige únicamente periodos transitorios (zonas de cambio) y tiene carácter de previsión con una acción de control rápida, pero que también puede responder excesivamente a ruido o picos de lectura. La unión de una acción de control derivativa y otra proporcional consigue un control con buena sensibilidad, que responde a la velocidad del cambio del error (parte derivativa) con una corrección significativa antes de que el error crezca mucho y, además, reacciona en periodos permanentes donde hay que corregir error sin pendiente. Aparte de que la reacción al cambio del término derivativo otorga amortiguamiento frente a los cambios y permite incrementar la corrección proporcional.
PID	La corrección proporcional-integral-derivativa es un control que reúne las ventajas de los tres tipos de corrección, es decir, corrección en régimen permanente con la corrección P, corrección del error acumulado con la corrección I y, finalmente, previsión del error y amortiguamiento a cambios con la corrección derivativa D.

Actividad resuelta 1.1



Indica qué tipos de control (en lazo abierto o cerrado) crees que tienen los siguientes dispositivos: cisterna del váter, horno microondas, aire acondicionado, ventilador, lavadora y sistema de freno ABS.

- 
 • Cisterna del váter: el flotador es capaz de detectar si el nivel se aproxima al máximo y va cerrando la válvula conforme esto sucede hasta cerrarla totalmente. Por lo tanto, recibe información del proceso y es un control en lazo cerrado.
- 
 • Horno microondas: cuando se activa con una potencia y tiempo determinado, este se pone a funcionar según el comando de control, pero no hay corrección alguna. Si se introduce comida con suficiente tiempo y potencia, se carbonizará sin que el horno haga corrección alguna. Es un control en lazo abierto.

- *Aire acondicionado*: el tipo más sencillo tendrá como referencia una temperatura para la habitación que pretende acondicionar. El termostato es un sensor que indica al aparato el resultado del enfriamiento o calentamiento de la estancia respecto a un valor umbral, y el aparato actuará en consecuencia (se detendrá o actuará). Si es un sistema avanzado, podrá medir parámetros como la temperatura del aire exterior y la humedad existente para su funcionamiento. Es un control en lazo cerrado.
- *Ventilador*: su sistema de control permite seleccionar varias velocidades, pero el ventilador se pone a la velocidad indicada sin ningún tipo de información del proceso ni corrección alguna. Es un control de lazo abierto.
- *Lavadora*: es una máquina compleja y las hay con diversas prestaciones, pero todas necesitan regular la temperatura del programa y la velocidad de centrifugado. La segunda puede venir tarada de fábrica sin regulación (lazo abierto) o llevar una lectura de velocidad y control del motor (lazo cerrado). Pero la temperatura del agua, necesariamente, depende del funcionamiento de una resistencia calefactora controlada por una señal de temperatura (lazo cerrado).
- *Sistema de frenado ABS*: es un sistema complejo que reacciona al accionamiento del freno por el conductor y a la detección de que la rueda desliza en la frenada gracias a la medición de diferentes parámetros. Es un control de lazo cerrado.

RECURSO ELECTRÓNICO 1.3



En el anexo web 1.3, encontrarás un artículo para leer y debatir en clase.









Resumen

- Es preciso empezar conociendo **definiciones importantes**, como automatizar (aplicar la automática a un proceso o a un dispositivo) y automática (ciencia que trata de sustituir en un proceso al operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos).
- Se automatiza porque una forma de potenciar e incrementar las transformaciones que generan valor añadido es, simplemente, crear dispositivos automatizados que hagan el trabajo por los humanos. Consiste en utilizar esta ciencia para automatizar los procesos en los que este cambio resulte rentable. Para ello, la transformación automatizada debe obtener resultados similares o mejores que los de las personas y liberarlas de las tareas rutinarias.
- La automatización está transformando a la propia sociedad y la forma de vivir de las personas que la componen. Esta transformación se produce paulatinamente, pero de forma constante e intensa, incorporando tanto la mejora de prestaciones existentes como la generación de nuevas prestaciones. Los rendimientos en todas las actividades realizadas se multiplican y, de igual modo, la productividad como sociedad.

- A partir de la edad del silicio es cuando se ha producido una explosión de la automatización, dada la creciente potencia, memoria, flexibilidad y comunicaciones que los circuitos integrados han proporcionado. En la industria y en la sociedad en general, la automatización no viene sin inconvenientes, pero las ventajas son realmente abrumadoras. Este hecho, junto con la necesidad de que las empresas sean competitivas, supone que el progreso de la automatización sea imparable en las décadas próximas. La tendencia en el ámbito industrial será hacia la *fábrica inteligente*, donde los sistemas de gestión proeficiencia se integrarán en sistemas de control, supervisión y mejora de procesos del conjunto de cada fábrica. Para ello, las comunicaciones, la automatización total y la colaboración entre humanos y máquinas tendrán papeles protagonistas.
- Una de las problemáticas futuras será la mayor absorción del trabajo por parte de las máquinas, dado el enorme incremento de sus capacidades –que rivalizarán con las propias de los humanos en todos los campos–. La transición a una ocupación lógica de las personas y al equilibrio entre estas y los robots, máquinas y automatismos será un desafío social y económico sin duda importante.
- Los procesos industriales se clasifican en continuos y discretos, y sus sistemas de control, como lazo abierto o cerrado. Por último, existen sistemas para control secuencial (según su actuación en intervalos determinados de tiempo, serán sistemas de control síncronos o asíncronos) y para control en continuo, denominados *controladores PID*.





Ejercicios propuestos









1. Investiga sobre los siguientes cinco ejemplos en los que una máquina ha automatizado una tarea para dar un servicio e identifica si, antes, lo hacían los humanos o no existía (elige entre sustitución, mejora o generación de prestaciones):
 - a) Calculadora de bolsillo. 
 - b) Implantes corporales de microchips. 
 - c) Robot de cocina. 
 - d) Centro de mecanizado CNC con cambio de herramienta. 
 - e) Tren de lavado. 
2. Responde a las siguientes cuestiones:
 - a) ¿Qué es una transformación para obtener valor añadido realizada por el hombre y cómo ayuda la automatización? 
 - b) ¿Por qué se realizan más actividades y de un modo más eficiente en la sociedad actual gracias a la automatización? Pon algún ejemplo e indica un país próspero económicamente donde no exista un protagonismo visible de la automatización. 
 - c) ¿Qué tres posibles cambios prestacionales aporta la automatización? 

- d) ¿Qué características aportó la introducción de la era de los circuitos integrados a la automatización?
- e) ¿Por qué la automatización puede suponer un problema en el futuro?
- f) ¿Cómo explicarías el ahorro directo que aporta la automatización en la fabricación en serie?
- g) ¿Cuáles son las tres principales características de la fábrica inteligente?

3. Completa el siguiente cuadro:

Inconvenientes	Ventajas
Es un desafío económico, técnico y cultural.	
	Mejora la eficiencia de los procesos y la capacidad, pues se fabrica lo mismo con menor tiempo, energía, contaminación y costes.
Baja flexibilidad frente a los cambios.	
	Consigue mejor rendimiento y gestión gracias a la información y comunicación que incorpora la automatización.
Fallos más críticos con mayor automatización.	

4. Completa el siguiente cuadro:

Descripción	¿Es un proceso o un control?	Tipo de proceso o control
Fabricación de barras de acero por colada y conformado en continuo.		
Control de temperatura de un depósito.		
Montaje automatizado por etapas de un conjunto.		
Control de las etapas de un tren de lavado.		

5. Dibuja un diagrama de un sistema de control de una bomba eléctrica trifásica que debe mantener el caudal de suministro de salida. Indica qué debería leer el sistema (si debe leer algo), dónde y qué parámetro habría de modificarse en el control.



Caso práctico

La familia Ortiz tiene una fábrica tradicional de velas aromáticas, incluyendo esencias de hierbas de la comarca muy apreciadas. Laura es la gerente y, últimamente, ha observado que las ventas locales están descendiendo. Además, ha aparecido en las estanterías de las tiendas de la provincia un nuevo competidor, cuyo producto es bueno y tiene un precio algo menor. Tras hablar con los comerciantes, estos confirman a Laura que el producto de la competencia se vende mejor.

La realidad es que Laura vende un producto de mucha calidad y la cliente la aprecia el proceso de fabricación tradicional. Ella conoce el proceso y está convencida, tras ver el producto de la competencia, de que también lo fabrican artesanalmente. Sin embargo, observa que el sello en las velas, el embalado y el etiquetado son muy uniformes. Hace tiempo que Laura es consciente de que el mercado

y embalado en su pequeña fábrica es un cuello de botella, pero, hasta ahora, sus ventas no se habían resentido. Su proceso es el siguiente: tras salir las velas de los moldes, la empresa de la familia Ortiz realiza un marcado y embalado manual. Un operario coge una a una las velas y plasma la marca con un martillo que lleva su sello. A continuación, coge una bolsa que tiene delante y le pega manualmente una etiqueta. Finalmente, introduce la vela en la bolsa y realiza manualmente un termosellado con una máquina de la que dispone en un lateral. Finalmente, va llenando cajas de 30 unidades. A menudo, trabajan dos operarios al unísono, pues la productividad no alcanza a la demanda con el embalado de un operario.

Señala qué puede hacer Laura para intentar abaratar costos, mejorar el producto y aumentar la productividad frente al producto de la competencia.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cuál es la definición de *automatizar*?

- a) Desarrollo de un proceso o funcionamiento de un mecanismo por sí solo.
- b) Dispositivo automatizado. Ingenio diseñado y fabricado incluyendo las funciones que aportan la acción mecánica y control inteligente del hombre con el objetivo de realizar un trabajo con cierta o total autonomía.
- c) Aplicar la automática a un proceso o a un dispositivo.
- d) Ciencia que trata de sustituir en un proceso al operador humano por dispositivos mecánicos o electrónicos.

2. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?

- a) La automatización de un trabajo permite que el hombre dedique su tiempo a realizar otras tareas.
- b) La automatización solo sustituye al hombre en tareas que antes ya realizaba.

- c) La automatización está presente en muchos dispositivos que se utilizan en la vida cotidiana moderna.
 - d) El hombre ha transformado desde siempre elementos buscando generar un valor añadido con la transformación.
3. ¿Cuál de las siguientes frases es falsa?
- a) Muchos avances de la medicina cuentan con equipos que disponen de automatización.
 - b) Antiguamente, sin automatización, se hacían las tareas exactamente igual que ahora, pero empleando más tiempo.
 - c) Las comunicaciones de hoy en día dependen de la automatización.
 - d) Las herramientas que proporciona la automatización permiten llevar a cabo más tareas, de una manera más eficiente y en menos tiempo.
4. ¿Cuál de las siguientes frases describe mejor la aportación a la automatización de la era del silicio?
- a) Su flexibilidad gracias a la capacidad de cálculo, sus capacidades de comunicación y su evolución.
 - b) Su flexibilidad gracias a su memoria, sus capacidades de comunicación y su evolución.
 - c) Su flexibilidad debida a su memoria, su capacidad de cálculo, sus capacidades de comunicación y su evolución.
 - d) Su flexibilidad gracias a su velocidad, su capacidad de cálculo, sus capacidades de comunicación y su evolución.
5. ¿Cuál de los siguientes elementos no es una ventaja actual de la automatización?
- a) Mayor seguridad y calidad en el trabajo.
 - b) Flexibilidad frente a cambios rápidos.
 - c) Ahorro con la eliminación de almacenes intermedios y semielaborados o circulantes.
 - d) Mejor funcionamiento gracias a la comunicación que incorpora la automatización.
6. ¿Cuál de los siguientes elementos no es un inconveniente de la automatización?
- a) Es un desafío económico, técnico y cultural.
 - b) Requiere mayor cualificación del personal.
 - c) Eliminación de almacenes intermedios y semielaborados o circulantes.
 - d) Transformación y destrucción de empleo.
7. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso?
- a) La reducción general de costes no es una conclusión general de las ventajas de la automatización.
 - b) La automatización no suele suponer grandes cambios en la forma de trabajar de los operarios.
 - c) Con la automatización será más fácil seguir la evolución de los lotes fabricados y, así, programar la producción para el siguiente día.
 - d) Habitualmente, la automatización requerirá mayor cualificación del personal.

8. ¿Cuál de las siguientes oraciones es falsa?

- a) En la fabricación industrial, es frecuente la fabricación en serie o en grandes volúmenes de productos iguales.
- b) Si se consigue un ahorro en cada proceso de los que componen la fabricación del producto, al final, se obtendrá un ahorro acumulado sustancial.
- c) Con un ahorro sustancial en cada producto, obtengo un gran ahorro en la fabricación de grandes series.
- d) El ahorro obtenido en la fabricación en grandes volúmenes es el único ahorro atribuible a la automatización.

9. ¿Cuál de las siguientes no es una de las tendencias actuales de la automatización?

- a) Integración de más funciones en dispositivos únicos más potentes.
- b) Introducción de robots colaborativos.
- c) Disminución de los robots tradicionales.
- d) *Industry 4.0* aplica, a partir de las comunicaciones integradas por la automatización, una gestión industrial basada en sistemas de cero desperdicios como *lean production*, *six sigma*, incluyendo JIT, *kanban*, calidad total, 5S, cero papeles, *empowerment* y otras.

10. ¿Cuál de los siguientes no es un control en lazo cerrado?

- a) Llenado de un depósito de riego con sistema de cisterna.
- b) Aire acondicionado.
- c) Freno de una bicicleta.
- d) Estufa con termostato.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

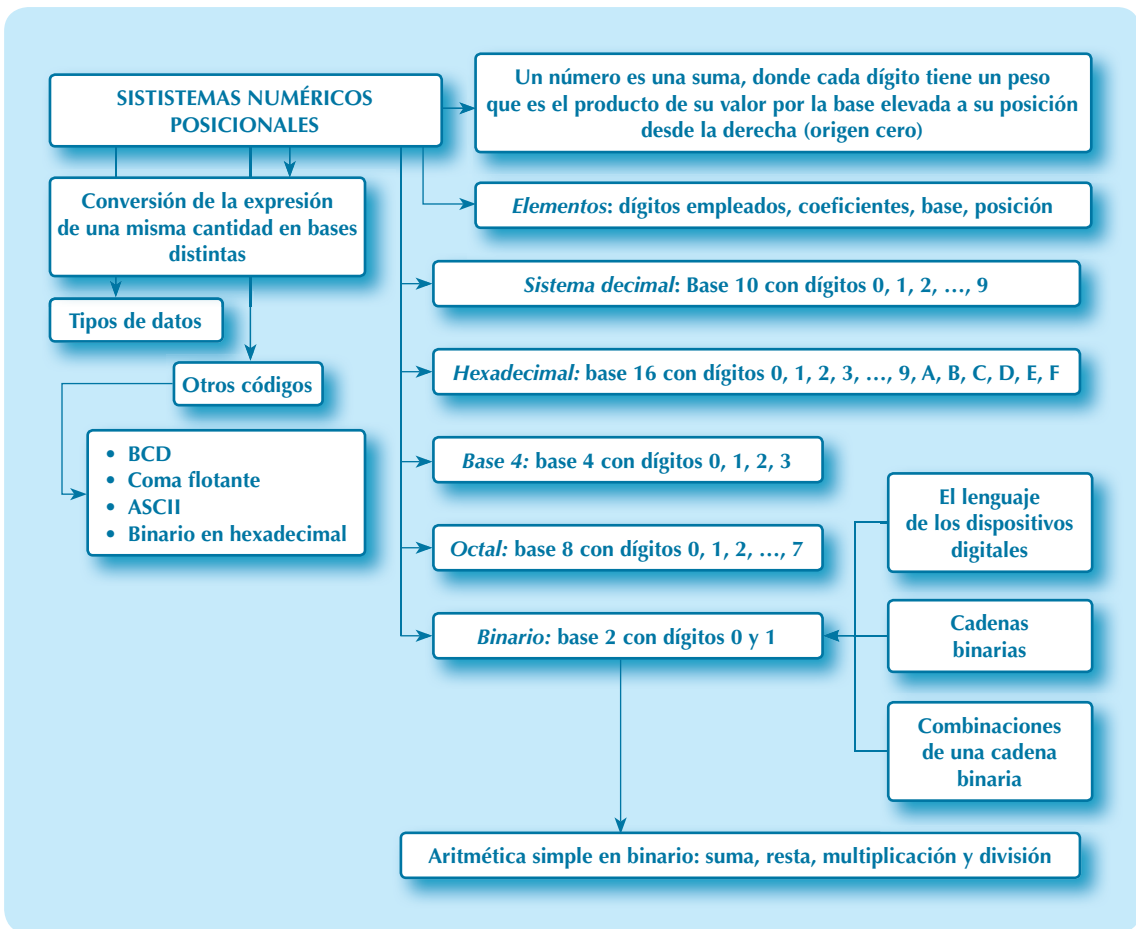
10. a b c d

Códigos numéricos

Objetivos

- ✓ Entender matemáticamente los sistemas posicionales de numeración, utilizando bases de numeración diferentes a la decimal (principalmente, los sistemas binario y hexadecimal, lenguajes que emplean los dispositivos digitales).
- ✓ Conocer el vínculo entre el sistema binario y los dispositivos digitales, para justificar el esfuerzo del alumno en su aprendizaje.
- ✓ Familiarizarse con el uso del sistema binario, operaciones aritméticas y su conversión a otros sistemas (decimal, hexadecimal, etc.).
- ✓ Estudiar otros sistemas de representación de la información con los que el alumno puede encontrarse en la programación y uso de los PLC y otros dispositivos de automatización.

Mapa conceptual



Glosario

Ancho de banda. En la transferencia de información, este es la cantidad de código binario o bits de datos que pueden moverse en un segundo.

Binario. Dicho de un sistema numérico posicional de base dos. Este sistema utiliza como cifras exclusivamente el 0 y el 1.

Bit. Unidad básica de almacenamiento de información.

Byte. Unidad de información compuesta por ocho bits ordenados.

Código. Combinación de letras, números u otros caracteres que tiene un determinado valor dentro de un sistema establecido.

Hexadecimal. Dicho de un sistema de numeración, que tiene como base el número 16.

Número dígito. Aquel que puede expresarse con un solo guarismo y que, en la numeración decimal, es alguno de los comprendidos entre el 0 y el 9, ambos inclusive.

2.1. Introducción

Los dispositivos electrónicos digitales que funcionan a partir de circuitos integrados (y que, como se vio en el capítulo previo, rigen el funcionamiento de la civilización actual) trabajan y se comunican en un sistema numérico particular. Se trata del sistema binario, donde solo existen ceros y unos (figura 2.1). Igualmente, para su funcionamiento y para su programación, se emplea un álgebra algo particular y un lenguaje binario que es necesario conocer.

Estos elementos que, inicialmente, pueden parecer algo extraños, pues no son habituales en el día a día, son fundamentales para seguir adquiriendo conocimientos posteriores. Igualmente, la oportunidad de consolidarlos va a ser continua, ya que aparecerán recurrentemente (binario y hexadecimal) o constantemente (álgebra booleana y diagrama de contactos).

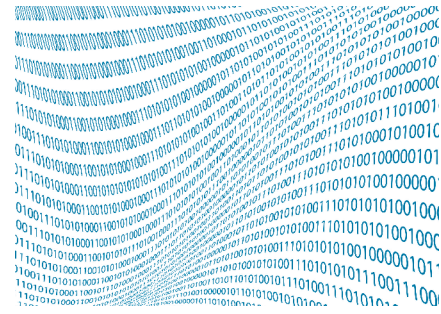


Figura 2.1
Códigos binario.

2.2. Sistemas numéricos posicionales

Para poder establecer una comunicación, hay que consensuar un código común que permita a emisor y receptor entenderse. Si alguien tiene sed y dice “agua”, el emisor y receptor deben comúnmente aceptar que *agua* tiene el mismo significado para que el segundo entienda al primero si se expresan en castellano. Sin embargo, el código para expresar “agua” es *water* en inglés, *eau* en francés o *вода* en ruso. Por lo tanto, puede haber distintos códigos e incluso caracteres gráficos para expresar la misma información.

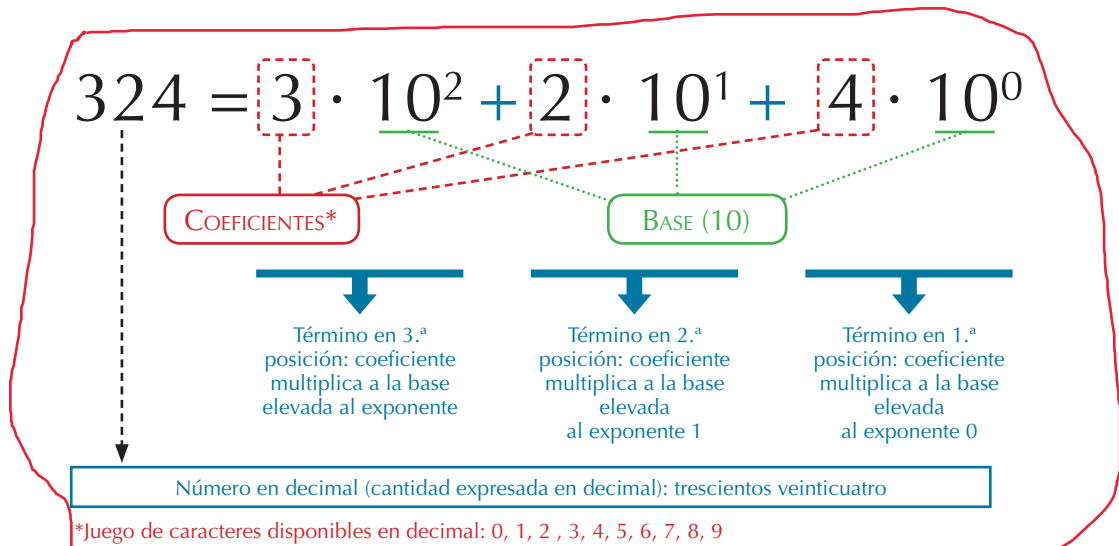
En el caso de las palabras en español y muchas otras lenguas, la asignación del significado es mayoritariamente arbitraria. Es decir, la composición de la palabra con unas letras y en un orden determinado no permite conocer el significado asociado a la palabra.

Para expresar una cantidad de cualquier entidad medible, se utiliza un número. Este número es un código, igual que otro lenguaje, donde se acuerda una cantidad correspondiente según el número empleado. La diferencia con el lenguaje textual es que, en los sistemas numéricos posicionales, sí hay unas reglas, de modo que conociéndolas puede saberse cualquier cantidad expresada por cualquier número.

Normalmente, se trabaja con el código numérico decimal y, cuando se dice “cuarenta”, la mente inmediatamente ofrece una idea de la cantidad que son cuarenta unidades. Sin embargo, si se dijera en binario “uno, cero, uno, cero, cero, cero” (101000), salvo que se esté muy familiarizado con el binario, no se vería inicialmente que está expresándose la misma cantidad, solo que en otro código o sistema numérico.

Tanto el decimal como el binario son sistemas numéricos posicionales. Los sistemas posicionales expresan la cantidad según unas reglas, basándose en sus dígitos y en su posición dentro del número. Cuando se habla del número 5645 en decimal, se dice “cinco mil, seiscientos, cuarenta y cinco”. Evidentemente, cada dígito expresa una cantidad distinta (millares, centenas, decenas o unidades) y el número final es la suma: cinco mil más seiscientos, más cuarenta, más cinco.

A continuación, se detallan los elementos que se observan en los sistemas numéricos posicionales (figura 2.2):

**Figura 2.2**

Ejemplo de elementos de un sistema numérico posicional (número decimal).

1. *Dígitos*: son los caracteres empleados y el número disponible coincide con la base. Por ejemplo, en decimal, se dispone de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9, que son 10 caracteres. En base 4, se dispone de 4 caracteres, que serán 0, 1, 2 y 3. En hexadecimal (base 16), serán 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E y F. En este último caso, dado que, a partir del 9 en decimal (en lo que se está acostumbrado a pensar), se emplean dos posiciones, es preciso asignar otros caracteres a las cantidades entre 10 y 15 que ocupen una única posición y, para ello, se recurre a las letras mayúsculas de la A a la F.
2. *Coeficientes*: son los propios dígitos formando parte de un número, que tienen un valor inicial asignado y que, según su posición, aportarán distintas cantidades al total.
3. *Base*: se corresponde con la cantidad de dígitos manejados por el sistema. La base estará elevada a un exponente que depende de la posición del coeficiente. En decimal, la base es 10 (sistema en base 10, 10 dígitos); en binario, es 2 (sistema en base 2, dígitos 0 y 1); en hexadecimal, es 16 (sistema en base 16, 16 dígitos).
4. *Posición*: aquella en la que se encuentra cada carácter del número en cuestión. Determina el término al que el coeficiente multiplicará y, por tanto, su peso o valor en la suma (dicho término se multiplica por el valor que tiene asignado el propio carácter). En decimal, el número 5645, el 5 situado a la izquierda de la coma representa un valor de 5 unidades ($5 \cdot 10^0 = 5 \cdot 1 = 5$). Sin embargo, el 5 situado más a la izquierda representa 5 unidades de millar y, por tanto, no tiene el mismo valor ($5 \cdot 10^3 = 5 \cdot 1000 = 5000$) que el 5 situado en las unidades. En cada posición, un mismo carácter aporta un valor distinto y, en cada posición, solo cabe un dígito o carácter.

FUNDAMENTAL

En un número según un sistema numérico posicional, la cantidad total expresada en decimal es una suma de términos compuestos por coeficientes que multiplican a la base elevada a un exponente que depende de su posición en el número.

2.2.1. Conversión de otros sistemas a decimal

Se ha explicado antes que una misma cantidad puede expresarse de distintas formas, con distintos sistemas posicionales, al igual que el concepto de *agua* también puede expresarse en diferentes códigos (idiomas). La mejor forma de entender cómo realizar conversiones para expresar una misma cantidad en distintos sistemas es con ejemplos sobre cómo se obtiene la cantidad en el sistema decimal de cualquier cantidad expresada en cualquier sistema posicional. Se verá inicialmente la propia descomposición de números en base 10, dado que es el sistema empleado más habitualmente por las personas.

Ejemplo

Descomposición del número decimal 5647 en sumandos del sistema numérico posicional en base 10:

$$\begin{aligned}
 &5 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^3 \text{ (la cuarta posición indica exponente 3, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &6 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^2 \text{ (la tercera posición indica exponente 2, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &4 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^1 \text{ (la segunda posición indica exponente 1, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &7 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^0 \text{ (la primera posición multiplica coeficiente por la base elevada a 0, que será siempre 1)} \\
 &= 5000 + 600 + 40 + 7 = 5647
 \end{aligned}$$

Quizá ahora sea más fácil entender el significado de la expresión “vale menos que un cero a la izquierda”. Se refiere a que, en el número 05 647, el 0, siendo el último número a la izquierda, es un coeficiente que multiplicaría a 10^4 . Evidentemente, al ser valor nulo, es un dígito que no vale absolutamente nada y se omite.



Actividad resuelta 2.1

Realiza la descomposición del número decimal 909 517 en sumandos del sistema numérico posicional en base 10.

$$\begin{aligned}
 &9 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^5 \text{ (la sexta posición indica exponente 5, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &0 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^4 \text{ (la quinta posición indica exponente 4, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &9 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^3 \text{ (la cuarta posición indica exponente 3, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &5 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^2 \text{ (la tercera posición indica exponente 2, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &1 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^1 \text{ (la segunda posición indica exponente 1, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &7 \text{ (coeficiente)} \cdot 10 \text{ (base)}^0 \text{ (la primera posición multiplica el coeficiente por la base elevada a 0, que será siempre 1)} \\
 &= 900\,000 + 0 + 9000 + 500 + 10 + 7 = 909\,517
 \end{aligned}$$

A continuación, se aborda la obtención de la cantidad en decimal de números expresados en otras bases, que es exactamente igual que hasta ahora.

Inicialmente, puede resultar algo confuso, pues se emplean números con caracteres que el sistema decimal incluye, pero que, en conjunto, al estar expresados en otra base, representan realmente otra cantidad a la que se leería en decimal directamente.

Ejemplo

El número binario 1011_2 no es el mil once, sino el uno, cero, uno, uno, y su cantidad en decimal se obtiene como sigue:

$$\begin{aligned}
 &1 \text{ (coeficiente)} \cdot 2 \text{ (base)}^3 \text{ (la cuarta posición indica exponente 3, pues se cuenta desde el 0 a} \\
 &\text{partir de la cifra más a la derecha)} \\
 &+ \\
 &0 \text{ (coeficiente)} \cdot 2 \text{ (base)}^2 \text{ (la tercera posición indica exponente 2, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &1 \text{ (coeficiente)} \cdot 2 \text{ (base)}^1 \text{ (la segunda posición indica exponente 1, pues se cuenta desde el 0)} \\
 &+ \\
 &1 \text{ (coeficiente)} \cdot 2 \text{ (base)}^0 \text{ (la primera posición multiplica coeficiente por la base elevada a 0,} \\
 &\text{que será siempre 1)} \\
 &= 8 + 0 + 2 + 1 = 11. \text{ Este es el valor en decimal del número binario } 1011.
 \end{aligned}$$

De nuevo, es importante recordar que no puede interpretarse un número expresado en otra base como si fuera decimal o de otra base que incluya esos caracteres.

Por ejemplo, el número 3210 en base 4 no es el tres mil doscientos diez, que sería el correspondiente en decimal, sino el tres, dos, uno, cero en base 4. A menudo, para aclarar esta posible confusión, se sitúa un subíndice a la derecha del número con la base en la que está expresado. Por ejemplo, si observa el 1011_2 , el subíndice 2 indica que está expresado en base 2 o binario.

Es interesante notar que, en el ejemplo anterior, para expresar la cantidad que en decimal se escribe como 11 con dos dígitos, en binario, se necesita el doble de dígitos (cuatro). Para expresar una cantidad con bases menores, se requiere un número más largo.

Actividad resuelta 2.2



Expresa en decimal el número $45\ 041_6$ (en base 6).

$$4 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^4 + 5 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^3 + 0 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^2 + 4 \text{ (coeficiente)} \\
 \cdot 6 \text{ (base)}^1 + 1 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^0 = 5184 + 1080 + 0 + 24 + 1 = 6289 \text{ en decimal.}$$

A continuación, se muestra cómo proceder cuando hay decimales. Se hace exactamente igual y, cuando existen números tras la coma, las posiciones son negativas y, por tanto, los exponentes a los que se eleva la base también.

Ejemplo

El número $123,45_6$ (en base 6) expresado en decimal es:

$$1 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^2 + 2 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^1 + 3 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^0 + 4 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^{-1} + 5 \text{ (coeficiente)} \cdot 6 \text{ (base)}^{-2} = 51,805555 \text{ en decimal}$$

Como puede observarse, es sencillo, solo es preciso continuar con la misma dinámica empleando exponentes negativos cuando se trata de posiciones a la derecha de la coma y se opera igual sea cual sea la base.



Actividad resuelta 2.3

Expresa en decimal el número $4\ 300,012_5$ (en base 5).

$$4 \text{ (coeficiente)} \cdot 5 \text{ (base)}^3 + 3 \text{ (coeficiente)} \cdot 5 \text{ (base)}^2 + 1 \text{ (coeficiente)} \cdot 5 \text{ (base)}^{-2} + 2 \text{ (coeficiente)} \cdot 5 \text{ (base)}^{-3} = 575,056 \text{ en decimal}$$

Va a convertirse ahora el número 3FA expresado en hexadecimal (en base 16) a decimal. Como se observa, es un número aparentemente extraño, pues tiene algunas letras en lugar de números. Esto se debe a la costumbre de trabajar solo con los dígitos decimales. Cuando se tiene una base superior a 10, se necesitan símbolos que representen valores por encima de 9 y que ocupen un único lugar. En hexadecimal, hasta el 9, es igual que en decimal, pero los valores posteriores hasta el 15 se representan por las letras A (cantidad en decimal 10), B (11), C (12), D (13), E (14) y F (15), como se observa en el cuadro 2.1.

CUADRO 2.1
Correlación del juego de caracteres empleados en hexadecimal y cantidades correspondientes en decimal

<i>Decimal</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>Hexadecimal</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

Es interesante ahora ver la relación entre los primeros números en decimal, binario y hexadecimal para familiarizarse, sobre todo, con el orden en binario. Se muestran en el cuadro 2.2, hasta el número 32.

CUADRO 2.2
Listado de los 32 primeros números, desde e incluyendo el 0, en decimal, binario y hexadecimal

Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.
0	00000	00	8	01000	08	16	10000	10	24	11000	18
1	00001	01	9	01001	09	17	10001	11	25	11001	19
2	00010	02	10	01010	0A	18	10010	12	26	11010	1A

[.../...]

CUADRO 2.2 (CONT.)

Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.	Dec.	Bin.	Hex.
3	00011	03	11	01011	0B	19	10011	13	27	11011	1B
4	00100	04	12	01100	0C	20	10100	14	28	11100	1C
5	00101	05	13	01101	0D	21	10101	15	29	11101	1D
6	00110	06	14	01110	0E	22	10110	16	30	11110	1E
7	00111	07	15	01111	0F	23	10111	17	31	11111	1F

Ejemplo

El número 3FA en hexadecimal o base 16 es la siguiente cantidad en decimal:

$$3 \text{ (coeficiente)} \cdot 16 \text{ (base)}^2 + 15 \text{ (coeficiente F, 15 en decimal)} \cdot 16 \text{ (base)}^1 + 10 \text{ (coeficiente A, 10 en decimal)} \cdot 16 \text{ (base)}^0 = 768 + 240 + 10 = 1018$$

2.2.2. Conversión de decimal a otra base

En el apartado previo, se ha explicado, a partir de sistemas posicionales, el modo de convertir desde un número en cualquier base a la cantidad en decimal.

A continuación, se indica cómo operar al revés, es decir, pasar de la expresión de una cantidad en decimal a otra en cualquier otra base.

A) Números enteros

Se trata de dividir el número decimal por la base en sucesivas operaciones, dejando en cada operación el resto aparte y llevando el cociente obtenido a la siguiente operación. Finalmente, se toma el último cociente (correspondiente a la última operación) para situarlo en la construcción del resultado, a la izquierda del todo, seguido de los restos que previamente se habían obtenido (en orden inverso a su obtención) para componer el número buscado.

Los siguientes ejemplos y actividades ilustrarán el método.

Ejemplo

Conversión de 345_{10} a binario:

Resultado		Resto
345	: 2	1 (se divide 345 entre 2 y se traslada el cociente resultado 172; el resto es lo que queda aquí indicado)
172	: 2	0

[.../...]

86	: 2	0
43	: 2	1
21	: 2	1
10	: 2	0
5	: 2	1
2	: 2	0
1		

Aquí se sitúa el último cociente

Se compone el número buscado desde el final (último cociente hacia arriba) hacia el inicio y el resultado es 101011001. Este es el número en binario equivalente al número 345 en decimal.

Se insiste en el binario por su especial protagonismo. Con otras bases, el procedimiento es el mismo, pero el divisor es la base en cuestión. Por ejemplo, para convertir desde base 10 a base 7, se divide entre 7 y se anotan igualmente los restos de cada operación.



Actividad resuelta 2.4

Expresa el número 512_{10} en binario.

Resultado		Resto
512	: 2	0 (se divide 512 entre 2 y se traslada debajo el resultado 256; el resto es lo que se deja aquí indicado)
256	: 2	0
128	: 2	0
64	: 2	0
32	: 2	0
16	: 2	0
8	: 2	0
4	: 2	0
2	: 2	0
1		

Se compone el número desde el final hacia el inicio y el resultado es 100000000.

B) Números fraccionarios

En el caso de tratarse de un número no entero o fraccionario, que contenga dígitos tras la coma, el tratamiento se hace de modo distinto para la parte entera que para la parte fraccionaria.

Cuanto existe parte fraccionaria, el conjunto de los dígitos comprendidos a la izquierda de la coma (la parte entera) se convierte igual.

Sin embargo, para la parte del número a la derecha de la coma (parte fraccionaria), también se realizan operaciones sucesivas, pero, esta vez, multiplicando por la base y, cuando en esta multiplicación se obtiene parte entera, se sustrae y queda indicada, continuando con la parte decimal restante para la siguiente operación. Se continúa así hasta que no quede parte decimal o según la precisión que se desee. Para la parte decimal, se compone el resultado en orden inverso a como se hace con la parte entera (de arriba abajo).

De nuevo, hay que recordar que también al convertir la parte fraccionaria a otra base se procede igual que la conversión a binario, salvo que las operaciones de multiplicación sucesivas serán por dicha base.

Ejemplo

Se convierte un número en base 10 con decimales a binario: $29,3125_{10}$.

Parte entera:

Resultado		Resto
29	: 2	1
14	: 2	0
7	: 2	1
3	: 2	1
1		

Para la parte fraccionaria, se multiplica por la base (2 en este ejemplo) y, cuando se obtiene la parte entera, se indica y se resta, continuando con la parte decimal que queda. Se continúa hasta que no quede parte fraccionaria o se detiene la operación según la precisión que se desee. Para la parte fraccionaria, se compone el número resultado desde arriba.

Resultado		Parte entera
0,3125	· 2	0
0,625	· 2	1
0,25	· 2	0
0,5	· 2	1

El resultado es $11101,0101_2$.

Actividades resueltas



2.5. Convierte el número $10,0703125_{10}$ a binario.

Parte entera:

Resultado		Resto
10	: 2	0
5	: 2	1
2	: 2	0
1		

Parte decimal:

Resultado		Parte entera
0,0703125	· 2	0
0,140625	· 2	0
0,28125	· 2	0
0,5625	· 2	1
0,125	· 2	0
0,250	· 2	0
0,5	· 2	1

El resultado es $1010,0001001_2$.

2.6. Convierte el número $56,375_{10}$ a base 16 (hexadecimal).

Parte entera:

Resultado		Resto
56	: 16	8 (se divide 56 entre 16 y se traslada debajo el resultado; el resto es lo que se deja aquí indicado)
3		

Parte decimal:

Resultado		Parte entera
0,375	· 16	6

El resultado es $38,6_{16}$.

C) Conversión de binario a base 4, octal y hexadecimal por agrupación de bits

A continuación, se muestra un modo rápido de conversión entre estas cuatro bases (2, 4, 8 y 16). Se emplea como ejemplo el decimal $151,6015625_{10}$, que convertido a binario es $10010111,1001101_2$.

1. Conversión de binario a base 4 por agrupación de bits en parejas

Con el número en binario 10001000110 , en primer lugar, se divide en parejas binarias hacia la izquierda desde la coma para la parte entera y hacia la derecha desde la coma para la parte fraccionaria. Posteriormente, se convierte cada pareja binaria a su valor decimal.

Binario	10010111,1001101							
Base 4	10	01	01	11,	10	01	10	10
	2	1	1	3,	2	1	2	2

2. Conversión de binario a octal por agrupación de bits en tríos

Se realiza la misma operación, pero dividiendo el binario en tríos.

Binario	10010111,1001101					
Octal	010	010	111,	100	110	100
	2	2	7,	4	6	4

3. Conversión de binario a hexadecimal por agrupación de bits en cuartetos

Se procede exactamente igual, pero dividiendo en cuartetos y expresando el valor decimal de cada cuarteto binario en dígitos hexadecimales.

Binario	10010111,1001101			
Hexadecimal	1001	0111,	1001	1010
	9	7,	9	A (10)

Al comparar lo obtenido con los resultados del método previo de conversión a base 4, octal y hexadecimal, se observa que son coincidentes (ver cuadro 2.3).

En algunos lenguajes de programación, se indica de otras formas (distintas a un subíndice a la derecha del número) que un número está expresado en una base específica:

1. *Número binario*: se indica que un número es binario con el prefijo 0b. Si se observa el número 0b1101, el prefijo 0b indica que es el binario 1101_2 . También puede indicarse con una *b* como sufijo, con lo que el ejemplo indicado quedaría como 1101b, o prefijo 2#, con lo que quedaría como 2#1101.
2. *Número hexadecimal*: se indica que un número es hexadecimal con el prefijo 0x. Si se observa el número 0x9A1, el prefijo 0x indica que es el hexadecimal $9A1_{16}$. Para indicar hexadecimal, también puede encontrarse el prefijo #, 16# o incluso un sufijo *h*, con lo que el ejemplo quedaría en cada caso como #9A1, 16#9A1 y 9A1h respectivamente.
3. *Número octal*: se indica que un número es octal simplemente con un 0 a la izquierda, es decir, con el prefijo 0. Si se observa el número 07166, el prefijo 0 indica que es el octal 7166_8 . También es posible encontrar 0o (0 y o minúscula) o incluso simplemente una o minúscula como prefijo.

Existen incluso otras convenciones, por lo que, al abordar la configuración o programar un dispositivo digital cualquiera, habrá que conocer bien cuál es la notación empleada.

CUADRO 2.3
Correlación de los valores iniciales entre binario, decimal, base 4, octal y hexadecimal

Decimal	Binario	Base 4	Octal	Hexadecimal
0	0000	0	0	0
1	0001	1	1	1
2	0010	2	2	2
3	0011	3	3	3
4	0100	10	4	4
5	0101	11	5	5
6	0110	12	6	6
7	0111	13	7	7
8	1000	20	10	8
9	1001	21	11	9
10	1010	22	12	A
11	1011	23	13	B
12	1100	30	14	C
13	1101	31	15	D
14	1110	32	16	E
15	1111	33	17	F

TOMA NOTA



Puede convertirse un número binario fácilmente en:

- Base 4*: se agrupan bits por parejas hacia la izquierda y derecha de la coma y se convierten las parejas a decimal.
- Octal o base 8*: se agrupan bits por tríos hacia la izquierda y derecha de la coma y se convierten los tríos a decimal.
- Hexadecimal o base 16*: se agrupan bits por cuartetos hacia la izquierda y derecha de la coma y se convierten los cuartetos a decimal.

2.3. Código binario

Ya se ha tratado el binario como un sistema numérico posicional en el apartado previo. Pero ¿por qué es tan importante? La tecnología más fundamental de los ordenadores está basada

en el estado eléctrico de un transistor (figura 2.3): o conduce, o no (está activo o no). Es decir, hay dos estados. Por ello, su lenguaje o código óptimo, heredado de su naturaleza, es el binario con únicamente dos dígitos posibles: 0 y 1.

El binario, en definitiva, es el código en el que la información va a almacenarse y manipularse en cualquier dispositivo digital. Por ello, en su configuración o programación, es frecuente tener que tratar y entender dígitos en binario y este es el motivo de su gran protagonismo.

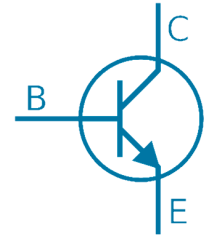
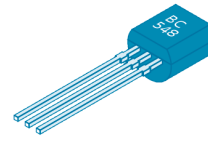


Figura 2.3
Transistor NPN.

2.3.1. Cadenas de números binarios

Un número que expresa una cantidad tiene caracteres o dígitos en distintas posiciones. Por ejemplo, en el número decimal 356 478, el 7 está en la segunda posición empezando por la derecha.

En un número binario, sucede lo mismo. En el 1011, el 0 ocupa la tercera posición por la derecha.

A) Bits y su posición en un número binario

Cada posición en un número binario se denomina *bit* y ofrece dos opciones: o será 0, o será 1. Se cuenta su posición desde la derecha de la coma. En el ejemplo, el 0 estaría en el tercer bit del 1011 (binario de 4 bits) empezando por la derecha. El número binario 101101 tiene 6 bits.

RECUERDA

- ✓ Cada dígito en un número binario se denomina *bit*.

En este punto, es preciso tener una precaución. Aunque el cero sea el tercer bit del 1011 empezando por la derecha, en algunos casos, se emplea una numeración que comienza por 0 para el bit más a la derecha y, por lo tanto, el 0 situado en la tercera posición desde la derecha sería numerado como el bit 2 (el primer bit a la derecha de la coma estaría en la posición 0; el segundo, en la posición 1 y tercero, en la posición 2).

B) Cadenas principales en binario

Se habla de cadena de bits como un número binario de varios bits. Habitualmente, se emplean cadenas de cantidades de bits que son potencias de 2 (8, 16, 32, 64, 128, etc.) y que tienen denominación propia:

- 1 bit, por ejemplo, 1.

- 1 byte = 8 bits, por ejemplo, 10010011.
- 1 *word* o palabra = 2 bytes = 16 bits. Por ejemplo, 11110101 10110001.
- 1 *double word* o palabra doble = 2 *words* = 4 bytes = 32 bits. Por ejemplo, 11110101 10110111 10010101 10110001.

Hay cadenas más largas, pero suelen tener longitudes de 64, 128 bits, etc., aunque también puede haberlas de cualquier cantidad de bits.

Cuando se habla de grandes cantidades de información o memoria, se antepone prefijos como *kilo*, *mega*, *tera* y *peta* con símbolos *k*, *M*, *G*, *T* y *P*. Actualmente, se emplean como prefijos del sistema internacional, siendo, por tanto, el equivalente a 10^3 , 10^6 , 10^{12} y 10^{15} veces la unidad indicada, tal como muestra el cuadro 2.4.

CUADRO 2.4
Prefijos del sistema internacional
para grandes cantidades de bits

PREFIJO DEL SISTEMA INTERNACIONAL (SI)		
Nombre	Símbolo	Cantidad de bits
Kilobit	kbit	10^3
Megabit	Mbit	10^6
Gigabit	Gbit	10^9
Terabit	Tbit	10^{12}
Petabit	Pbit	10^{15}

Ha habido confusión en el pasado respecto a la cantidad que cada prefijo supone, pues antiguamente se hacía referencia con estos mismos prefijos indicados en el cuadro 2.4 a potencias de la base binaria 2. Por ejemplo, un kilobyte eran 1024 bytes (2^{10}). Un megabit eran 1 048 576 bits (2^{20}). Para poner fin a esta confusión, en la IEC 60027-2:2005 “Letter symbols to be used in electrical technology—Part. 2: Telecommunications and electronics”, se acuñan nuevos prefijos *kibi*, *mebi*, *gibi*, *tebi* y *pebi* con símbolos *Ki*, *Mi*, *Gi*, *Ti* y *Pi*, componiendo términos para su uso como potencias de 2 para poder diferenciarlos de los prefijos del sistema internacional, tal como muestra el cuadro 2.5.

CUADRO 2.5
Prefijos según la IEC 60027-2 para grandes
cantidades de bits en potencias de 2

SEGÚN LA IEC 60027-2			
Nombre	Símbolo	Cantidad de bits	
Kibibit	Kibit	2^{10}	1024
Mebibit	Mibit	2^{20}	1048576
Gibibit	Gibit	2^{30}	1073741824
Tebibit	Tibit	2^{40}	1099511627776
Pebibit	Pibit	2^{50}	1125899906842624

2.3.2. Combinaciones posibles en binario

Un aspecto interesante es ver las combinaciones que ofrece una cadena binaria según lo larga que es o la cantidad de bits que tiene. Se empieza por analizar un número binario de un solo bit. ¿Cuántas combinaciones ofrece? Claramente, solo dos: 0 o 1.

- Primera combinación posible: 0.
- Segunda combinación posible: 1.

En el cuadro 2.6, se observan las combinaciones disponibles con números binarios o cadenas de más bits.

CUADRO 2.6

Combinaciones disponibles con números binarios de 2, 3 y 4 bits

Dos bits (4 combinaciones)	Tres bits (8 combinaciones)	Cuatro bits (16 combinaciones)
00	000	0000
01	001	0001
10	010	0010
11	011	0011
	100	0100
	101	0101
	110	0110
	111	1000
		...
		1110
		1111



SABÍAS QUE...

Cuando se mueve información, se mide la cantidad de información desplazada por unidad de tiempo en lo que se denomina *ancho de banda* o *tasa de bits*, en bits por segundo, utilizando los prefijos del SI indicados: kilobit por segundo (kbit/s o kbps), megabit por segundo (Mbit/s o Mbps), gigabit por segundo (Gbit/s o Gbps), etc.

También puede emplearse como unidad fundamental el byte (8 bits): byte por segundo (byte/s o B/s), kilobyte por segundo (kilobyte/s o kB/s), megabyte por segundo (megabyte/s o MB/s) y gigabyte por segundo (gigabyte/s o GB/s).

Claramente, puede intuirse un patrón: las combinaciones posibles de una cadena binaria se corresponden con 2 elevado al número de posiciones disponibles. Por tanto, 4 bits ofrecerán 2^4 combinaciones, es decir, 16, y 5 bits ofrecen 2^5 , es decir, 32 combinaciones.

Esto es importante porque, a menudo, es preciso asignar una numeración a grupos de elementos para identificarlos, agruparlos y conocer la cantidad total. Por ejemplo, en una carrera popular, van asignándose dorsales con números en decimal a todos los inscritos. Si se dispone de dorsales de 3 dígitos decimales y hay 1200 inscritos, a partir del 999, ya no podrán identificarse con un número decimal de 3 dígitos.

Obsérvese el ejemplo que muestra la figura 2.4 para el caso de un dispositivo digital que haga la numeración en binario. Si se dispone de 4 bits para la numeración, donde quiere asignarse a cada combinación una letra del abecedario español (27 letras), simplemente no es posible. Efectivamente, solo puede asignarse una combinación a las primeras 16 letras, pues, con 4 bits, no se dispone de más combinaciones. Tendría que recurrirse, por tanto, a un dígito con más bits (al menos 5, que ofrece 32 combinaciones).

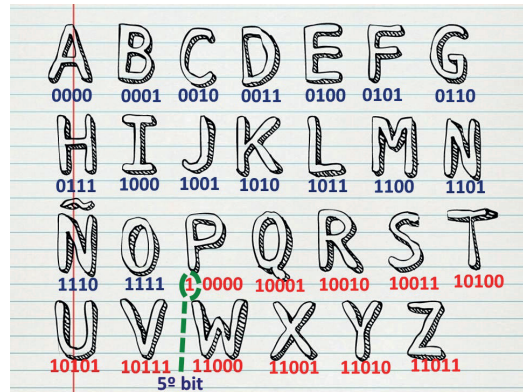


Figura 2.4
Asignación de letras del abecedario español a números binarios.

El primer dígito binario de 4 bits, el 0000, se ha asignado a la A. La B tiene asignada el siguiente dígito: 0001. Así, se llega hasta la última combinación de 4 bits, la 1111, que queda asignada a la O. La O es la decimosexta letra y se han agotado las combinaciones de un número binario de 4 bits ($2^4 = 16$).

Para poder seguir asignando números binarios, es necesario otro bit. Un quinto bit a la izquierda eleva en conjunto las combinaciones a 32 ($2^5 = 32$). Con 32 combinaciones, aún sobran 5 tras asignar números binarios de 5 bits a las letras del abecedario. Considerando tener los 5 bits desde el principio, la asignación quedaría tal como muestra el cuadro 2.7.

CUADRO 2.7
Asignación de letras a números binarios de 5 dígitos

00000	A	10000	P
00001	B	10001	Q
00010	C	10010	R
00011	D	10011	S
00100	E	10100	T
00101	F	10101	U
00110	G	10110	V
00111	H	10111	W
01000	I	11000	X
01001	J	11001	Y
01010	K	11010	Z
01011	L	11011	
01100	M	11100	
01101	N	11101	
01110	Ñ	11110	
01111	O	11111	

Actividad propuesta 2.1



Es preciso guardar una combinación en la memoria del PLC para proteger la modificación de parámetros de una máquina. La combinación elegida es de 6 dígitos decimales. Si dicha combinación debe almacenarse en binario en células de memoria en bloques de bytes, calcula la longitud de cadena necesaria y, por tanto, los bloques requeridos.

2.3.3. Tipos de datos

En la programación, será necesario almacenar información de distinta naturaleza. Por ejemplo, pueden ser letras o cantidades expresadas en números. En este último caso, también pueden querer almacenarse números enteros pequeños, grandes, números reales con cierta precisión, etc.

Pero, para ello, hay que indicar a la máquina qué es lo que está almacenándose o guardándose con una determinada cadena de bits, y el dispositivo lo guardará en binario sabiendo ya qué tipo de información es. Esta distinción se hace definiendo y empleando los distintos tipos de datos disponibles. Algunos, como los enteros pequeños, ocuparán menos memoria, pues pueden almacenarse con un número menor de bits, mientras que otros, como un número real (con muchos decimales), requerirán una cadena más larga y, por tanto, serán un dato más *pesado* en la memoria y el tratamiento. También un tipo de dato determina qué tipo de valores puede tener y qué operaciones pueden realizarse con el objeto almacenado. Por ejemplo, no puede almacenarse un número real en un tipo de dato para enteros pequeños o un entero en un carácter.

Por lo tanto, definir el tipo de dato es importante, sobre todo por dos aspectos:

1. Para poder interpretar la información, pues cada tipo de dato define la interpretación de una cadena de bits de diferente forma.
2. Por el *peso* o longitud que cada tipo de dato tiene. Hay que tener en cuenta que, si se declara un elemento como un tipo de dato muy largo para almacenar un número muy sencillo, estarán ocupándose memoria y recursos de forma inútil. Ese dato podría haberse almacenado en una cadena mucho más corta ocupando menos bits. Del mismo modo, si hay que mover el dato, habrá que desplazar todos los bits correspondientes, aunque no se utilicen, desperdiciando ancho de banda. Si hay que hacer cálculos con el dato, sucederá análogamente. Igualmente no puedo almacenar un número muy grande en un tipo de dato para números pequeños.

CUADRO 2.8
Tipos de datos habituales

Tipos básicos	Características, longitud y rango en decimal
BOOL (bit)	Longitud de un bit, con valores 0 o 1. Se interpreta en Boole como FALSE (0) o TRUE (1).
Byte	Longitud de 8 bits, 1 byte. Sin signo. El rango en decimal es de 0 a 255, 0000 0000 a 1111 1111 o 16#0 a 16#FF.
CHAR	Longitud de 8 bits, 1 byte. Sin signo. El rango en decimal es de 0 a 255. Se refiere a un carácter que se corresponde al orden numérico que el carácter tendría en un set básico de caracteres (la tabla ASCII). También puede encontrarse de 16 bits, refiriéndose a un set mucho más amplio de caracteres Unicode.

[.../...]

CUADRO 2.8 (CONT.)

Tipos básicos	
INT	Entero. Longitud de 16 bits. Almacena un entero entre $-32\,768$ y $+32\,767$.
UNSIGNED INT o WORD	Entero sin signo. Longitud de 16 bits. Almacena un entero entre 0 y 65 535.
DOUBLE INT	Entero doble. Longitud de 32 bits. Almacena un entero entre $-2\,147\,483\,648$ y $+2\,147\,483\,647$.
DOUBLE WORD	Palabra doble. Longitud de 32 bits. Almacena un entero positivo entre 0 y 4 294 967 295.
LONG INT	Entero largo. Longitud de 64 bits. Almacena un entero entre $-9\,223\,372\,036\,854\,775\,808$ y $+9\,223\,372\,036\,854\,775\,807$.
LONG WORD	Entero largo. Longitud de 64 bits. Almacena un entero positivo entre 0 y 18 446 744 073 709 551 615.
REAL o FLOAT	Almacena un número real o en coma flotante de 32 bits de longitud, con un rango entre $-3,4028235 \cdot 1038$ a $+3,4028235 \cdot 1038$.
LONG REAL o FLOAT 64 (DOUBLE FLOAT)	Almacena un número real o en coma flotante de 8 bytes o 64 bits de longitud, con un rango entre $-1,79769313486232 \cdot 10\,308$ a $+1,79769313486232 \cdot 10\,308$. También existen LONG DOUBLE FLOAT (10 bytes) y FLOAT 128 (16 bytes).
Tipos derivados o compuestos (aunque menos habituales en PLC)	
ARRAY	Almacena un número de elementos del mismo tipo en un orden específico.
STRING	Lista de uno o más caracteres, que pueden ser letras, números o de otro tipo, como texto sin formato. Todos los caracteres incluidos en el string son considerados como si fueran texto, incluso si los caracteres son números o espacios, y, para evitar confusiones, a menudo se marca el comienzo y el final de una cadena con un carácter especial. Por ejemplo, el uso de comillas en "Hola Mundo 50!" se reconoce como una cadena y no como dos palabras separadas que pudieran tener un significado especial en el lenguaje de programación, así como la distinción del 50 indica que, dentro de las comillas, son simplemente caracteres.
DATE/TIME	Bloques de datos diseñados para almacenar la fecha en un formato específico.

Dada su importancia y relación con las cadenas de bits, en el cuadro 2.8, se indican los tipos de datos principales. Por desgracia, no hay un compromiso válido para todos los lenguajes de programación, pues siempre hay diferencias, pero se incluyen los tipos más habituales.

A) Tipos de datos según la IEC 61131-3

Los PLC (controladores lógicos programables) son dispositivos fundamentales en la automatización industrial actual y, aunque se estudiarán más adelante, es interesante indicar que son dispositivos programables y que también se definen para ellos los tipos de datos. La norma IEC (International Electrotechnical Commission) 61131 regula una gran cantidad de características de los PLC, entre ellos, los tipos de datos empleados en los lenguajes de programación de autómatas están definidos en

su parte 3: “Lenguajes de programación”. Constituye una referencia importante hoy en día, aunque los fabricantes de PLC se ajustan solo al listado que la norma facilita e incorporan sus propios tipos de datos. En el cuadro 2.9, se muestran los tipos de datos elementales y su longitud según esta norma.

CUADRO 2.9
Tipos de datos según la IEC 61131

Número	Denominación	Tipos de datos	bits
1	BOOL	Booleano (<i>boolean</i>)	1 ^h
2	SINT	Entero corto (<i>short integer</i>)	8 ^c
3	INT	Entero (<i>integer</i>)	16 ^c
4	DINT	Entero doble (<i>double integer</i>)	32 ^c
5	LINT	Entero largo (<i>long integer</i>)	64 ^c
6	USINT	Entero corto sin signo (<i>unsigned short integer</i>)	8 ^d
7	UINT	Entero sin signo (<i>unsigned integer</i>)	16 ^d
8	UDINT	Entero doble sin signo (<i>unsigned double integer</i>)	32 ^d
9	ULINT	Entero largo sin signo (<i>unsigned long integer</i>)	64 ^d
10	REAL	Números reales (<i>real numbers</i>)	32 ^e
11	LREAL	Reales largos (<i>long reals</i>)	64 ^f
12	TIME	Duración (<i>duration</i>)	— ^b
13	DATE	Fecha (únicamente) / <i>date (only)</i>	— ^b
14	TIME_OF_DAY o TOD	Hora del día (únicamente) / <i>Time of day (only)</i>	— ^b
15	DATE_AND_TIME o DT	Fecha y hora del día (<i>date and time of day</i>)	— ^b
16	STRING	Cadena de caracteres de longitud variable y único byte (<i>variable-length single-byte character string</i>)	8 ^g
17	Byte	Cadena de bits de longitud 8 (<i>bit string of length 8</i>)	8 ^g
18	WORD	Cadena de bits de longitud 16 (<i>bit string of length 16</i>)	16 ^g
19	DWORD	Cadena de bits de longitud 32 (<i>bit string of length 32</i>)	32 ^g
20	LWORD	Cadena de bits de longitud 64 (<i>bit string of length 64</i>)	64 ^g
21	WSTRING	Cadena de caracteres de longitud variable y doble byte (<i>variable-length double-byte character string</i>)	16 ^g

(b) La gama de valores y la precisión de la representación en estos tipos de datos depende de la implementación realizada.

(c) El rango de valores para variables de este tipo de datos es de $-(2^N - 1)$ a $(2^N - 1) - 1$.

(d) El rango de valores para las variables de este tipo de datos es de 0 a $(2^N) - 1$.

(e) El rango de valores para las variables de este tipo de datos se define tal como indica la norma IEC 559 para el formato básico de coma flotante sencillo.

(f) El rango de valores para las variables de este tipo de datos se define tal como indica la norma IEC 559 para el formato básico de coma flotante doble.

(g) Un rango numérico de los valores no es aplicable a este tipo de datos, pues no son numéricos.

(h) Los valores posibles de las variables de este tipo de datos estará comprendido entre 0 y 1, que corresponden a las palabras claves *falso* y *verdadero* o TRUE y FALSE respectivamente.



Actividad propuesta 2.2

En una aplicación industrial, es preciso mover en momentos puntuales, de una zona de memoria a otra, 120 números definidos como LREAL (IEC 61131-3) cada 10 ms durante 1,1 s. Indica:

- El espacio de almacenamiento requerido para esa operación.
- El ancho de banda a lo largo de la operación entera en kilobytes por segundo.
- La tasa de bits en megabits por segundo.

2.4. Otros códigos

En el tratamiento de la información digital por parte de ordenadores y otros dispositivos en la automatización, a menudo se emplean otras formas de expresión de textos o cantidades. Siempre estarán relacionados con el binario, pero en cada caso con un convenio concreto. A continuación, se exponen algunos de los más habituales.

2.4.1. BCD

Una codificación empleada son los denominados *códigos BCD* (del inglés *binary coded decimal*) basados en el sistema binario. Se trata, simplemente, de que cada cifra de un número decimal queda codificado individualmente en un binario de 4 bits.

A su vez, existen varios tipos de codificación BCD, por lo que la conversión de los números decimales a BCD se fija según el tipo o estándar empleado. A continuación, el cuadro 2.10 muestra los códigos más habituales.

CUADRO 2.10
Algunos códigos BCD

Decimal	BCD Natural (cada cifra en binario)/8421	Exceso 3 (se suma 3 a BCD Nat.)	Aiken/2421	5 4 2 1
0	0000	0011	0000	0000
1	0001	0100	0001	0001
2	0010	0101	0010	0010
3	0011	0110	0011	0011
4	0100	0111	0100	0100
5	0101	1000	1011	1000
6	0110	1001	1100	1001
7	0111	1010	1101	1010
8	1000	1011	1110	1011
9	1001	1100	1111	1100

Ejemplo

Véase la codificación en BCD Natural del decimal 843 906:

- Decimal: 8 4 3 9 0 6.
- BCD Natural/8421: 1000 0100 0011 1001 0000 0110.

2.4.2. Coma flotante

Se ha visto previamente que los números binarios también pueden expresar cantidades no enteras. Sin embargo, existe una forma de expresar números con una precisión determinada. Son estándares de representación denominados *en coma flotante*. La coma flotante y su aritmética se definen con estándares o normas. El más habitual es el IEEE 754 (IEEE “Standard for binary floating-point arithmetic” ANSI/IEEE Std 754-1985 o también su equivalente por la IEC 60559:1989 “Binary floating-point arithmetic for microprocessor systems”). Se define en cada sistema de programación como un tipo de datos, habiendo varios.

Para su explicación, se describen los elementos en los que se basa, pero, primero, va a repasar el concepto de *notación científica*.

A) Notación científica

El sistema de representación en coma flotante utiliza la notación científica, por lo que, primero, debe recordarse dicha notación. En la notación científica, se definen una cantidad de números significativos (por ejemplo 8) y se lleva la coma hasta tener a la izquierda solo unidades (un dígito) compensando este movimiento con la multiplicación por la base del sistema numérico empleado (decimal en este caso) elevada al exponente adecuado.

Por ejemplo: 324,0923256 tiene diez dígitos. Si decide trabajarse con 8 significativos, se descartarían aquellos menos significativos (a la derecha) redondeando el último escogido: 324,09233. Quiere dejarse el número con forma de unidad y decimales, por lo que se obtendría 3,2409233. Esto es el equivalente a dividir por 100, por lo que, para mantener el valor, es necesario multiplicar por 10^2 : $3,2409233 \cdot 10^2$. Es la misma cantidad, pero expresada en notación científica. Interesa conocer esta notación en binario, pues se emplea en el sistema de coma flotante, a su vez utilizado en dispositivos digitales.

Se explica a continuación la representación en coma flotante con precisión de 32 bits (que emplea un total de 32 bits) de un número (que, al ser para un equipo digital u ordenador, se guardará en binario) con las partes que se detallan a continuación.

1. Signo

A la izquierda del todo, se dedica un bit para el signo: + es 0 y – es 1. Este bit es de los 32 disponibles y, numerando de derecha a izquierda (empezando por el 0), el 31.

2. Exponente expresado en desplazamiento 127

Los siguientes 8 bits de izquierda a derecha (entre el 30 y el 23) almacenarán el valor del exponente.

Son 8 bits y, por tanto, como $2^8 = 256$, esta cadena permite 256 combinaciones. Con ellas, podría representarse un exponente entre el 0 y el 255, pero también es necesario poder representar el signo del exponente. Para ello, se representa con desplazamiento de +127. Es decir, se acuerda que el 0 represente al -127 y el 255, al 128. No se almacena como un número binario con signo (desde -127 hasta $+128$), sino como un entero positivo equivalente que irá entre 0 y 126 para representar a exponentes entre -127 y -1 e irá entre 127 y 255 para representar a exponentes entre 0 y 128.

Ejemplos

Si hay que expresar un exponente de -25 , se le suma 127 y el resultado es 102_{10} , que, en binario, es 01100110_2 . Estos ocho bits serán los que habrá que situar en el espacio destinado al exponente.

Si hay que expresar un exponente de 115, se le suma 127 y el resultado es 242_{10} , que, en binario, es 11110010_2 . Estos ocho bits serán los que habrá que situar en el espacio destinado al exponente.

Si hay que expresar un exponente de -127 , se le suma 127 y el resultado es 0_{10} , que, en binario, es 00000000_2 . Estos ocho bits serán los que habrá que situar en el espacio destinado al exponente.

No hay que olvidar que, con este tipo de datos, no pueden representarse exponentes por debajo de -127 ni por encima de 128.

3. La mantisa

Representa a los dígitos significativos, con los bits que quedan para representar a exponentes entre -127 y -1 e irá entre 127 y 255 para representar a exponentes entre 0 y 128. ($32 - 1 - 8 = 23$), entre el 22 y el 0. Aquí hay una particularidad. En cualquier número binario, evidentemente, el primer dígito significativo por la izquierda va a ser un 1. Por ello, una vez que se disponga de dicho número, el primer 1 a la izquierda se omite, pues se sabe que, de forma cierta, va a tener ese valor y así se aprovechan los 23 dígitos restantes disponibles para el resto de valores a la derecha.

Como se ha indicado, el número en coma flotante se almacena en binario, por lo tanto, cualquier número decimal debe convertirse en binario y acomodarse su representación según lo descrito.

Ejemplo

Representa el número decimal 156,78 en coma flotante 32

Primer paso: conversión a binario: 1001 1100, 1100 0111 1010 1110 0001 0100 0111 10. Solo hace falta obtener 24 bits (el 1 presupuesto a la izquierda de la coma y los 23 disponibles para la mantisa): 1001 1100, 1100 0111 1010 1110.

Segundo paso: desplazamiento de la coma para notación científica y obtención del exponente.

Se desplaza la coma hasta dejar un dígito a la izquierda (contando los desplazamientos y, por tanto, multiplicando por 2 elevado al exponente correspondiente). Por tanto, se desplaza la coma 7 posiciones: $1,00111001100011110101110_2 \cdot 2^7_{10}$. Expresando ambos en binario: $1,00111001100011110101110_2 \cdot 1000\ 0000_2$.

Dado que, normalmente, se discurre en decimal, cuesta entender estas operaciones, pero se ilustra con un ejemplo rápido. Puede expresarse en binario 1000 como $1,0_2 \cdot 1000_2$, ya que 1000_2 es efectivamente 2^3 . Por lo tanto, en binario, se mueve la coma (o se añaden y quitan ceros) de un número multiplicando o dividiendo por una potencia de 2, igual que en decimal se efectúa con una potencia de 10. El exponente 7 en binario es 111.

Tercer paso: conversión del exponente con desplazamiento + 127.

Simplemente, se suma al exponente obtenido (111) el valor 127 (en binario, 1111111). El resultado expresado en binario (10000110) es lo que debe ir en los 8 bits reservados en la representación en coma flotante para el exponente.

Cuarto paso: inclusión del bit de signo.

El número es positivo, por lo que el bit más a la izquierda será un 0.

Quedará como sigue: 0 10000110 0011 1001 1000 1111 0101 110.

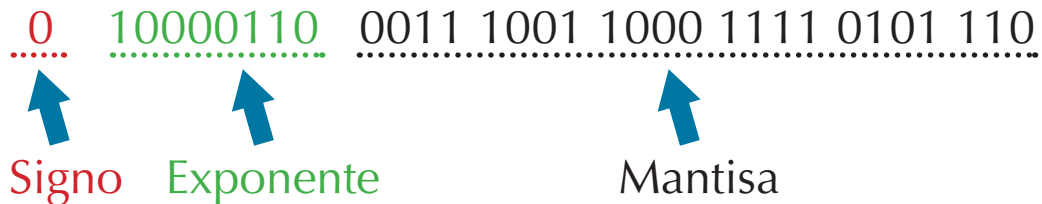


Figura 2.5

Asignación de bits de coma flotante (32 bits) a signo, exponente y mantisa.

Hay un aspecto que debe tenerse muy en cuenta en los ejemplos que se tratan aquí y es que estos se han realizado sin redondeo, el cual permite reducir el error debido a que se utiliza una precisión de dígitos limitada. Habitualmente, se opera por los dispositivos digitales con redondeo y un resultado levemente distinto en los bits más a la derecha respecto al resultado sin redondeo.

Ejemplo

Convertir el siguiente número en coma flotante de 32 bits a decimal

```
11000010110001010001011101000100
1 10000101 10001010001011101000100
```

Primer paso: signo.

El primer bit por la izquierda es un 1, por lo que es un número negativo.

Segundo paso: obtención del exponente.

Se toman los siguientes ocho bits hacia la derecha: 10000101.

En decimal, es el 133. Dado que la representación es en exceso 127, debe sustraerse dicha cantidad para obtener el verdadero exponente: $133 - 127 = 6$.

Tercer paso: obtención de la mantisa.

Los siguientes 23 bits corresponden a la mantisa: 10001010001011101000100. Dado que, en la formación del número binario en coma flotante, se omite el primer 1 a la izquierda, en realidad, se obtiene el binario: 1,10001010001011101000100.

Cuarto paso: construcción.

Al haber empleado la notación científica y construcción del número binario en coma flotante desplazando previamente la coma a la izquierda 6 posiciones (exponente 6), se obtiene: 1100010,10001011101000100.

Si se convierte el binario previo a decimal, teniendo en cuenta el signo y hasta obtener 4 decimales, el número en base 10 resulta ser: $-98,5429$.



Actividad propuesta 2.3

Expresa los siguientes números decimales en coma flotante 32 (sin redondeo):

Número	Decimal
1	443,4324
2	12,78346
3	-778,78
4	1,0032
5	-100023

2.4.3. ASCII

Es evidente que los humanos no trabajan con el sistema binario, sino con muchos otros símbolos. Por ejemplo, los caracteres que permiten leer estas mismas líneas. Dado que un dispositivo digital sí que solo maneja cadenas de ceros y unos, es necesario establecer una correspondencia entre todos los caracteres necesarios (y que manejan los humanos) y una cadena determinada de bits que el ordenador o dispositivo digital pueda interpretar y manejar.

En el pasado, se crearon tablas que ofrecen un índice decimal para cada carácter y su valor en binario, para realizar la traducción. Incluyen a la mayoría de los caracteres imprimibles de un alfabeto como A, B, C, ... 1, 2, 3..., !, ?... También hay caracteres no imprimibles, pero que controlaban cómo se procesaba el texto, para iniciar una nueva línea, por ejemplo. Muchos de estos caracteres de control ya no se utilizan para su propósito original dada la evolución de los ordenadores.

La codificación ASCII son tablas que constituyen un método para establecer esta necesaria relación entre caracteres y números binarios. ASCII (*American standard code for information interchange*) se creó en los años sesenta y dispone de diversas versiones, según alfabetos o conjuntos de caracteres distintos. En el caso más sencillo, se emplea el alfabeto inglés y se utilizan 7 bits, lo que ofrece 128 combinaciones para asociar 128 caracteres a un binario (figura 2.6). La versión de 8 bits (1 byte) es una tabla que ofrece 256 combinaciones, por lo que puede codificar en este caso 256 caracteres (128

caracteres extras respecto a la versión de 7 bits). Suele denominarse *ASCII 256* y el conjunto de 128 caracteres extras, *ASCII extendido*.

Existen otros estándares o tablas, como EBCDIC (*extended binary coded decimal interchange code* creado por IBM), Unicode o ISO 8859-1.

Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char	Decimal	Hex	Char
0	0	[NULL]	32	20	[SPACE]	64	40	@	96	60	`
1	1	[START OF HEADING]	33	21	!	65	41	A	97	61	a
2	2	[START OF TEXT]	34	22	"	66	42	B	98	62	b
3	3	[END OF TEXT]	35	23	#	67	43	C	99	63	c
4	4	[END OF TRANSMISSION]	36	24	\$	68	44	D	100	64	d
5	5	[ENQUIRY]	37	25	%	69	45	E	101	65	e
6	6	[ACKNOWLEDGE]	38	26	&	70	46	F	102	66	f
7	7	[BELL]	39	27	'	71	47	G	103	67	g
8	8	[BACKSPACE]	40	28	(	72	48	H	104	68	h
9	9	[HORIZONTAL TAB]	41	29	)	73	49	I	105	69	i
10	A	[LINE FEED]	42	2A	*	74	4A	J	106	6A	j
11	B	[VERTICAL TAB]	43	2B	+	75	4B	K	107	6B	k
12	C	[FORM FEED]	44	2C	,	76	4C	L	108	6C	l
13	D	[CARRIAGE RETURN]	45	2D	-	77	4D	M	109	6D	m
14	E	[SHIFT OUT]	46	2E	.	78	4E	N	110	6E	n
15	F	[SHIFT IN]	47	2F	/	79	4F	O	111	6F	o
16	10	[DATA LINK ESCAPE]	48	30	0	80	50	P	112	70	p
17	11	[DEVICE CONTROL 1]	49	31	1	81	51	Q	113	71	q
18	12	[DEVICE CONTROL 2]	50	32	2	82	52	R	114	72	r
19	13	[DEVICE CONTROL 3]	51	33	3	83	53	S	115	73	s
20	14	[DEVICE CONTROL 4]	52	34	4	84	54	T	116	74	t
21	15	[NEGATIVE ACKNOWLEDGE]	53	35	5	85	55	U	117	75	u
22	16	[SYNCHRONOUS IDLE]	54	36	6	86	56	V	118	76	v
23	17	[ENG OF TRANS. BLOCK]	55	37	7	87	57	W	119	77	w
24	18	[CANCEL]	56	38	8	88	58	X	120	78	x
25	19	[END OF MEDIUM]	57	39	9	89	59	Y	121	79	y
26	1A	[SUBSTITUTE]	58	3A	:	90	5A	Z	122	7A	z
27	1B	[ESCAPE]	59	3B	;	91	5B	[	123	7B	{
28	1C	[FILE SEPARATOR]	60	3C	<	92	5C	\	124	7C	|
29	1D	[GROUP SEPARATOR]	61	3D	=	93	5D	]	125	7D	}
30	1E	[RECORD SEPARATOR]	62	3E	>	94	5E	^	126	7E	~
31	1F	[UNIT SEPARATOR]	63	3F	?	95	5F	_	127	7F	[DEL]

Figura 2.6

Tabla ASCII de 7 bits (128 caracteres).

Actividad propuesta 2.4



Busca la tabla ASCII 256, incluyendo ASCII extendida de caracteres en español, y codifica "integración de sistemas".

2.4.4. Expresión de binario en hexadecimal

A menudo, en la programación y configuración de dispositivos digitales, la introducción de números binarios se acepta por el software en hexadecimal para hacerlo con cadenas más cortas.

Por ejemplo, el número binario 101111001011, de 12 dígitos binarios, será BCB en hexadecimal y ocupará solo 3 dígitos (por tanto, solo hace falta teclear la cuarta parte de caracteres).

2.5. Aritmética simple en binario

La mecánica de la aritmética simple en binario (suma, resta, multiplicación y división) es exactamente igual que en decimal, solo hace falta un poco de práctica.

2.5.1. Signo

El signo en binario puede tener el mismo tratamiento que en decimal empleando el signo (-). El número -3 en decimal sería el -11 en binario. Sin embargo, el protagonismo del sistema binario se debe a su uso por los dispositivos digitales que solo almacenan unos o ceros, no almacenan el carácter (-). Por ello, suele convenirse que el último bit a la izquierda de una cadena determinada en binario represente el signo, habitualmente con un 0 para el positivo y un 1 para el negativo.

Por ejemplo, en un byte con el bit a la izquierda dedicado al signo, el 52_{10} será en binario $0011\ 0100_2$ y el -52_{10} será en binario $1011\ 0100_2$. Al reservar el bit a la izquierda para el signo, cambia el rango de representación, es decir, puede representarse la mitad de la cantidad repartida alrededor del 0.

Se observa que el rango es de -127 a +127 y el 0 tiene dos representaciones. Pero suele convenirse otra forma de representar el signo para aprovechar todas las combinaciones posibles y aumentar un poco el rango de representación. Para ello, se define primero lo que es el complemento a uno y el complemento a dos:

1. *Complemento a uno de un binario B*: se cambian los ceros por unos y unos por ceros en B. Por ejemplo, el complemento a uno del 1001010 es el 0110101.

CUADRO 2.11
Tratamiento del signo en binario

Byte	Decimal considerando el bit a la izquierda como signo	Decimal sin considerar el bit a la izquierda como signo
00000000	0	0
00000001	1	1
00000010	2	2
...
01111110	126	126
01111111	127	127
10000000	-0	128
10000001	-1	129
10000010	-2	130
...
11111101	-125	253
11111110	-126	254
11111111	-127	255

2. *Complemento a dos de un binario B*, $C2B = 2^n - B$: otra forma más sencilla de calcularlo es sumando 1 al complemento a uno. Por ejemplo, el complemento a dos del 1001010

puede calcularse como el número siguiente a su complemento a uno o, sencillamente, sumándole 1: complemento a uno 0110101, número siguiente (o +1) = 0110110.

Para aprovechar la segunda combinación que equivale a un 0, lo que se hace es mantener el bit más significativo como bit de signo, pero, para los números negativos (bit de signo = 1), el resto de bits (parte entera) se representan en complemento a dos.

Por ejemplo, el -3 en decimal sería en binario tal como se ha visto antes: 1000 0011.

El complemento a uno de 000 0011 es 111 1100. El siguiente número será el complemento a dos: 111 1101. Por tanto, el número completo será ahora: 1111 1101. Véase cómo quedaría en el cuadro 2.12.

CUADRO 2.12

Tratamiento del signo en binario con complemento a dos

Byte	Decimal considerando que la parte entera binaria negativa está representada en complemento a dos	Decimal sin considerar el bit a la izquierda como signo
00000000	0	0
00000001	1	1
00000010	2	2
...
01111110	126	126
01111111	127	127
10000000	-128	128
10000001	-127	129
10000010	-126	130
...
11111101	-3	253
11111110	-2	254
11111111	-1	255

Con esta segunda representación del signo, para 8 bits, el rango pasa a ser de -128 a $+127$.

2.5.2. Suma

Las sumas $0 + 0$, $0 + 1$ y $1 + 0$ son como se entienden en decimal:

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

Pero la suma de $1 + 1$, que da la cantidad dos y que, en decimal, se representa como 2, en binario, es 10 (uno, cero). Lo que se hace es poner en la primera posición de la suma un 0 y llevar a la posición siguiente ese uno (como se hace en decimal, cuando se lleva a la posición siguiente un 1 si, en la posición de la suma, se obtiene una cantidad superior a 9).

Ejemplos

DECIMAL		BINARIO		DECIMAL		BINARIO
44		101100		54		110110
+ 45	+	+ 101101		+ 421	+	+ 110100101
89		1011001		475		111011011
DECIMAL		BINARIO		DECIMAL		BINARIO
115		1110011		123		1111011
+ 222	+	+ 11011110		+ 200	+	+ 11001000
337		101010001		323		101000011

2.5.3. Resta

En la resta en binario sucede lo mismo, así que es la misma técnica que en el sistema decimal. Las restas siguientes son como en decimal:

$$0 - 0 = 0$$

$$1 - 0 = 1$$

$$1 - 1 = 0$$

$$0 - 1 = -1 \text{ (o } 1000 \text{ } 0001 \text{ con un byte y bit a la izquierda indicando signo)}$$

La resta $0 - 1$ parece problemática, pero igual que en decimal, cuando el sustraendo es mayor que el minuendo, se suma la cantidad correspondiente a la base tomándola prestada de la posición siguiente. Por ejemplo, en decimal, en la resta $32 - 7$, al restar 7 a 2, dado que el primero es mayor, se suma 10 a 2 y se resta 7 a 12 (da 5). Como se ha empleado la cantidad de 10 del sustraendo, al 3 de este en la siguiente posición a la izquierda hay que quitarle la cantidad que se ha tomado prestada para hacer la resta. Por ello, se quita una unidad al 3 (que son tres decenas) y el resultado final es 25. En binario, cuando se tiene $0 - 1$, se realiza la resta $10 - 1$ (en binario), que dará 1 y tendrá que restarse un 1 a la siguiente posición del minuendo (pues es una cantidad que se ha empleado antes para esta operación).

• Resta con complemento a dos

Otra opción para hacer la resta de dos binarios es sumando al minuendo el complemento a dos del sustraendo.

Como ya se vio previamente, para calcular el complemento a dos de un binario B con n bits, se resta el valor en decimal de B a 2^n . También puede calcularse el complemento a dos, sumando 1 al complemento a uno. Esto es sencillo, pues el complemento a uno de un binario B se obtiene cambiando los unos por ceros y ceros por unos de dicho binario B.

Complemento a dos de un número binario B de n bits = $2^n - B$.

El complemento a dos de 100111 (39 en decimal) será $2^6 - 39 = 64 - 39 = 25$. En binario, será 011001.

Por ejemplo, supóngase la resta $1100011 - 100111$ ($99 - 39$ en decimal). Del sustraendo 100111, su complemento a uno es 011000. Por tanto, su complemento a dos será 011001. Para hacer la resta, se sumaría 011001 al minuendo, pero despreciando el bit más a la izquierda si el resultado es mayor al minuendo.

En este caso, el resultado es 1111100. Se observa que es mayor que el minuendo, lo que es imposible. Por lo tanto, empleando este método, si se obtiene un bit extra por la izquierda, se desprecia. El resultado es 111100 (60 en decimal).

Ejemplos

DECIMAL 56 - 23 --- 33	BINARIO 111000 - 10111 --- 100001	DECIMAL 322 - 131 --- 191	BINARIO 101000010 - 10000011 --- 101111111
DECIMAL 197 - 111 --- 86	BINARIO 11000101 - 1101111 --- 1010110	DECIMAL 423 - 211 --- 212	BINARIO 110100111 - 11010011 --- 11010100

2.5.4. Multiplicación

La multiplicación se realiza del mismo modo que como se conoce en decimal. Cuando la multiplicación es con términos no enteros (con coma), se traslada el conjunto de dígitos a la derecha de la coma que hay en ambos factores de la multiplicación al resultado (igual que se opera en decimal).

Ejemplos

1 1 1 x 1 0 0 --- 0 0 0 0 0 0 1 0 0 --- 1 0 0 0 0	1 1 0 0 1 , 1 1 x 1 0 , 1 --- 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 1 1 1 --- 1 0 0 0 0 0 0 , 0 1 1
--	--

$$\begin{array}{r}
 1011,01 \\
 \times 10,1 \\
 \hline
 101101 \\
 000000 \\
 \hline
 101101 \\
 \hline
 11100,001
 \end{array}$$

2.5.5. División

Igual que con la multiplicación, la división se realiza del mismo modo que como se lleva a cabo en decimal.

Ejemplo

$$\begin{array}{r}
 101111 \quad | \quad 100 \\
 100 \\
 \hline
 00111 \\
 100 \\
 \hline
 0111 \\
 100 \\
 \hline
 0110 \\
 100 \\
 \hline
 0100 \\
 100 \\
 \hline
 100
 \end{array}$$

RECURSO ELECTRÓNICO 2.1



En el anexo web 2.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás actividades adicionales para este capítulo.

Resumen

- En la comunicación, se expresan cantidades con códigos que deben conocer tanto el emisor como el receptor. Para expresar cantidades, se utilizan códigos que son sistemas numéricos posicionales donde la cantidad total depende de los dígitos que

forman el número componiendo una suma de términos compuestos por dichos dígitos (coeficientes) que multiplican a la base elevada a un exponente que depende de su posición. La conversión de una cantidad expresada en otras bases a la expresión en base decimal se obtiene realizando la suma de los términos indicados.

- De forma inversa, se convierte la expresión en decimal de cantidades a expresiones en otras bases dividiendo sucesivamente por la base la parte entera y tomando los restos, y multiplicando la parte decimal por la base y extrayendo la parte entera de cada resultado.
- Se desarrolla la conversión fácil entre binario, base 4, octal y hexadecimal por conversión de pares, tríos y cuartetos de bits dentro de la cadena de bits por convertir.
- Se justifica la importancia del binario para comunicarse con las máquinas, así como las cadenas más importantes y expresión de grandes cantidades de bits. También se estudian el concepto y las unidades del ancho de banda al transportar información, las combinaciones que ofrece un número binario y los distintos tipos de datos con distintas longitudes que se definen para su uso en dispositivos digitales.
- Existen aún más códigos relacionados con el binario y que se usan de forma frecuente en los automatismos. Se trata de los códigos BCD, la codificación en coma flotante IEEE 754, la tabla ASCII para codificación de caracteres y la expresión o introducción por teclado de binarios en hexadecimal. De todos ellos, se desarrolla la explicación y se ilustra cada una con ejemplos.
- Finalmente, se explica la aritmética en binario (suma, resta, multiplicación y división) con una mecánica análoga a las operaciones en decimal, donde también se elaboran ejemplos para su comprensión. Todo ello sin olvidar el tratamiento del signo cuando se trabaja en binario.



Ejercicios propuestos

1. Realiza las siguientes conversiones:
 - a) Convierte 1094_{10} a binario.
 - b) Convierte 1094_{10} a base 4.
 - c) Convierte 1094_{10} a base 4, octal y hexadecimal por agrupación de bits.
2. Completa el siguiente cuadro haciendo las distintas conversiones entre bases. Obtén en hexadecimal al menos dos decimales y ocho en binario.

N.º	Binario	Decimal	Hexadecimal
1		363,859375	16B,DC
2	1011001011010111,010011		B2D7.4CCCC
3	10011100101,10010000100	1253,5645	
4	1,1010100000101000101000011 1011111	1,65687	
5	-1100110100100		-19A4
6	111100110,101000100110111	486,6345	
7		12,444	C,71A9FBE76C8B
8	1,0000001010010101111111001 0000001		1,0295FC811A71
9	1111011000,00111000100100110 1110100101	984,221	
10		440 054	6B6F6

3. Completa el siguiente cuadro de conversión entre valores en coma flotante IEEE 32 y valores en decimal.

N.º	Decimal	Binario	S.	Exp.	Mantisa
1	443,4324				
2		1100,1100100010010000 1101010110	0	10000010	100110010001001 00001101
3	-778,78	-1100001010,110001111 0101110000			
4	1,0032				
5		-11000011010110111	1	10001111	100001101011011 10000000

4. Realiza las siguientes operaciones binarias:

- a) $10101010 + 11001100 =$
 $110110101 + 0101101111101 =$
 $111111111 + 11010110111 =$
- b) $1011110101 \cdot 101 =$
 $10110101 \cdot 1010 =$
- c) $11101110111 - 110101111 =$
 $11011101001 - 101011011 =$
 $1000110111 - 111101 =$

$$d) \quad 101111000011/11 =$$

$$10111111/1011 =$$

5. Indica la cadena de bytes (uno por carácter) que emite un teclado según ASCII al escribir la expresión (sin las comillas) “avión supersónico”.

Caso práctico

En un PLC, se da la siguiente secuencia de operaciones:

Entrada por bus y almacenamiento en memoria del texto según ASCII “EMBUTIDORA_534JEOLkjdj”, en 0,01 s.

Entrada por bus y almacenamiento en memoria de dos números en coma flotante de 32 bits en 0,007 s.

Suma aritmética de los números previos y almacenamiento del resultado.

Transferencia hacia una pantalla HMI por bus de todos los datos previos (texto, números por sumar y resultado) en un tiempo de 0,013 s.

Operación 1: indica el espacio necesario para almacenar solo los caracteres de texto indicados en la memoria del PLC. Si la memoria se organiza en palabras,

¿cuántas palabras de memoria se requerirán? y ¿cuántos bits?

Operación 2: para este tipo de operación, señala cuántas palabras de memoria se requerirán y cuántos bits. Teniendo en cuenta el tiempo empleado, indica el ancho de banda conseguido en la operación para la transferencia de los bits que representan las dos cantidades en coma flotante.

Operación 3: determina qué memoria se requiere para almacenar el valor del resultado en palabras y bits.

Operación 4: considerando que se transferirán las palabras requeridas enteras, establece el ancho de banda de esta operación.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. Respecto a un sistema numérico posicional, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) Conociendo las reglas de construcción del número y la base, es posible determinar la cantidad de cualquier número representado.
 - b) Conociendo únicamente las reglas de construcción del número, es posible determinar la cantidad de cualquier número representado.
 - c) Es necesario aprender cada combinación de dígitos para conocer la cantidad que cada número representa.
 - d) Ninguna de las anteriores es verdadera.

2. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
- a) Una misma cantidad en binario requerirá más dígitos binarios que en base 3.
 - b) Una misma cantidad en binario requerirá menos dígitos binarios que en base 4.
 - c) Una misma cantidad en decimal requerirá menos dígitos binarios que en base 4.
 - d) Una misma cantidad en binario requerirá más dígitos binarios que en base 4.
3. ¿Cuál de las siguientes equivalencias es falsa?
- a) Siete bytes son 48 bits.
 - b) Tres palabras dobles son 128 bits.
 - c) Un gibibit son 2^{30} bits.
 - d) Un petabit son 10^{15} bits.
4. En relación con el tipo de dato REAL o FLOAT, ¿cuál de las siguientes opciones es verdadera?
- a) Almacena un número entero largo de 32 bits de longitud.
 - b) Almacena un número real o en coma flotante de 64 bits de longitud.
 - c) Almacena un número real o en coma flotante de 128 bits de longitud.
 - d) Almacena un número real o en coma flotante de 32 bits de longitud.
5. Suponiendo una cadena binaria 0011001101001000 que es una expresión en BCD, ¿cuál sería el número decimal expresado?
- a) 3 3 4 8.
 - b) 8 4 3 3.
 - c) 1 4 6 4 4 0.
 - d) 10 11 1 0.
6. Si desea introducirse en un dispositivo un binario que es 1110 como BCD, ¿qué sucederá?
- a) El dispositivo recogerá el valor de 14.
 - b) El dispositivo recogerá el valor de 3 2.
 - c) El dispositivo informará de un error, pues no admitirá una cadena de cuatro dígitos binarios con valor superior a 9.
 - d) El dispositivo informará de un error, pues no admitirá una cadena de cuatro dígitos binarios, dado que construye decimales con tríos de bits.
7. Teniendo en cuenta un número en coma flotante IEEE 32, ¿cuál de las siguientes frases es verdadera?
- a) La mantisa incluye los dígitos significativos y el signo.
 - b) El signo se indica con el último bit a la derecha.
 - c) Almacena un número real o en coma flotante de 128 bits de longitud.
 - d) El exponente se expresa en exceso 127.
8. ¿Para qué sirve la tabla ASCII de caracteres?
- a) Es única y sirve para que el dispositivo digital almacene caracteres.
 - b) Constituye un método para establecer la relación entre caracteres y un número binario para que el dispositivo digital pueda asociar el binario al carácter.

- c) Habitualmente, representa 512 caracteres.
- d) Almacena un número real o en coma flotante de 32 bits de longitud.

9. ¿Cómo se obtiene el complemento a uno de un binario?

- a) Cambiando los unos por ceros y los ceros por unos.
- b) Cambiando los unos por ceros y los ceros por unos y sumándole 1.
- c) Sumándole 1.
- d) Invertiendo de izquierda a derecha los dígitos.

10. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre las operaciones aritméticas con binario es falsa?

- a) En la suma, llevamos igual que como se opera en decimal.
- b) En la resta, llevamos igual que como se opera en decimal.
- c) En la multiplicación, las comas de los factores se trasladan al resultado igual que en decimal.
- d) En la división, solo puede operarse si el numerador es menor que el denominador.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

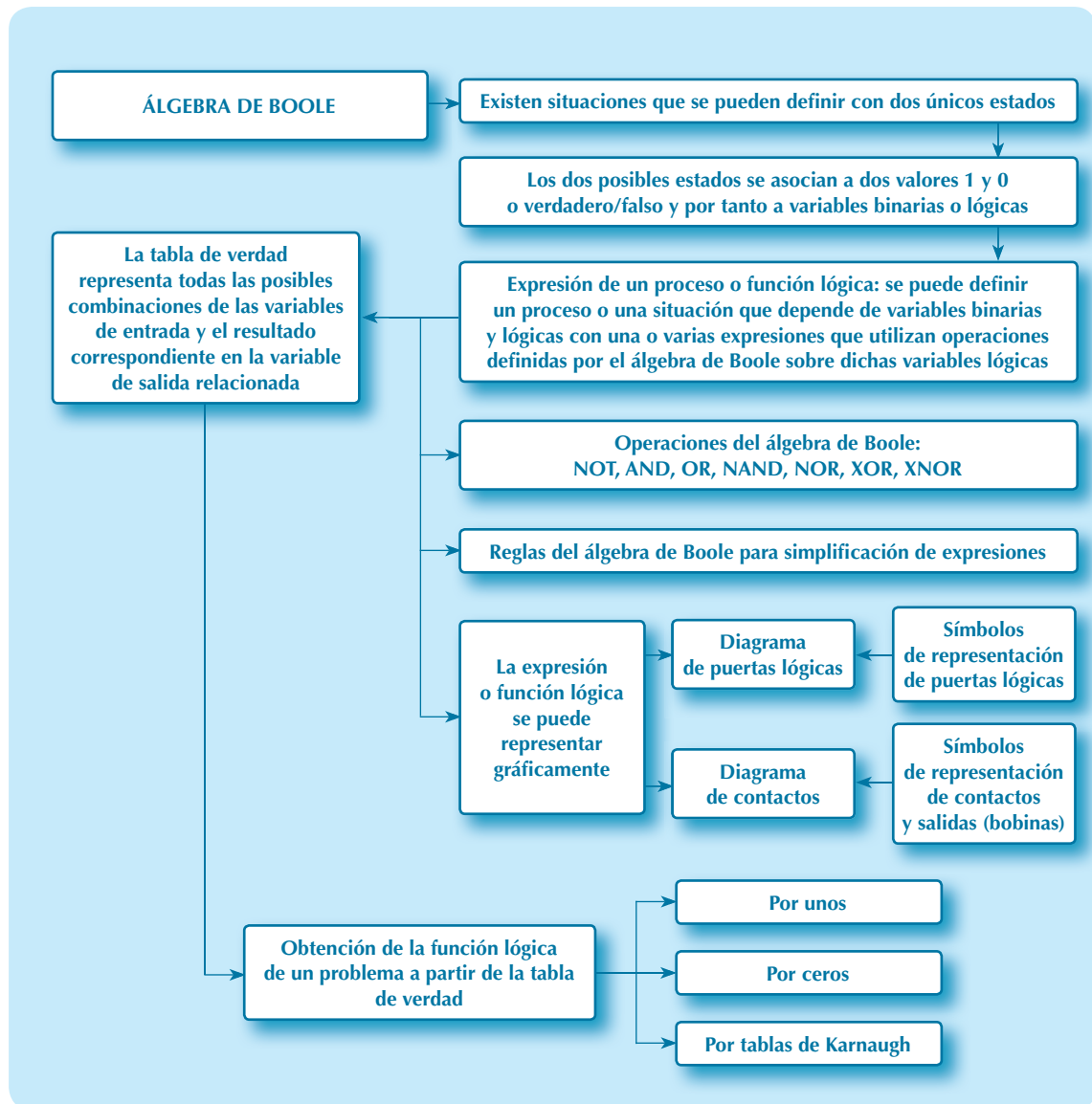
10. a b c d

Álgebra de Boole

Objetivos

- ✓ Conocer el álgebra de Boole: variables, expresiones, sus operaciones y su representación en puertas lógicas y diagrama de contactos eléctricos.
- ✓ Ser capaz de simplificar expresiones en álgebra de Boole.
- ✓ Resolver problemas lógicos combinacionales, obteniendo su función lógica por distintas técnicas: tabla de verdad y simplificación por álgebra de Boole, tablas de Karnaugh y obtención de la ecuación o función del automatismo y su representación en puertas lógicas.

Mapa conceptual



Glosario

Álgebra de Boole. Define las variables lógicas binarias, junto con las operaciones lógicas asociadas AND, OR, NOT, NAND, NOR, XOR y XNOR que pueden realizarse con ellas.

Función lógica. Expresión matemática del resultado (salida) de operaciones lógicas según el álgebra de Boole sobre un conjunto de variables booleanas (entradas), que es la representación de un proceso con variables binarias y que también puede representarse con diagramas de puertas lógicas y de contactos.

Sistema combinacional. Todo sistema con variables lógicas en el que la salida o salidas son función de las entradas en un único instante determinado, sin la presencia de la variable tiempo con estados o etapas anteriores o posteriores

Sistema secuencial. Todo sistema con variables lógicas en el que interviene la variable tiempo, pues el valor de la salida o salidas depende de valores previos de dichas variables (y, por tanto, se estructura en etapas separadas en el tiempo).

Tabla de verdad. Representación en forma de tabla de la relación entre todas las combinaciones de las variables lógicas binarias de entrada de un sistema y el resultado correspondiente en la salida por operaciones en álgebra de Boole.

Variable. Matemáticamente, es un símbolo que puede tomar un valor numérico en una expresión en la que aparece, aunque este valor aún no esté definido en dicha expresión. Puede entenderse como una caja que puede almacenar distintos valores y que lleva una etiqueta que es el símbolo que la representa.

Variable booleana (IBM Knowledge Center). Variable que almacena un valor de verdadero (*true*) o falso (*false*) para cada caso. En ocasiones, las variables booleanas se basan en una pregunta (como, por ejemplo, ¿tiene coche?) que solo puede responderse de dos maneras, por ejemplo, sí (que correspondería a *verdadero*) y no (que correspondería a *falso*).

3.1 Introducción al álgebra de Boole

Para definir el estado de muchas situaciones en la realidad, basta con dos estados: día y noche, vivo y muerto, encendido y apagado, lleno y vacío, metálico y no metálico, etc.

Estas dos posibilidades pueden asociarse a una variable binaria, un bit con valores que pueden ser 0 (apagado, vacío, etc.) o 1 (encendido, lleno, etc.). Son variables binarias que podrían definirse como DÍA, VIVO, ENCENDIDO, LLENO, METÁLICO, etc., pero también se definen como lógicas, pues su estado positivo puede expresarse como verdadero o falso. ¿Es de día? Si la respuesta es que sí, se indica que DÍA = 1 o que DÍA es verdadero. Si el depósito está vacío, se indica que LLENO = 0 o que LLENO es falso.

Cuando desea expresarse un proceso que depende de estas variables binarias, pueden relacionarse entre sí con operaciones y generar dependencias entre ellas indicando estas dependencias con expresiones matemáticas algebraicas. Por ejemplo, en un proceso, sucede lo siguiente “se enciende el piloto si el depósito está lleno o también si la pieza es metálica”. Se definen las siguientes variables PILOTO, DEPÓSITO y METAL, todas ellas binarias. Piloto encendido, depósito lleno y pieza metálica se definen con las variables PILOTO, DEPÓSITO y METAL, todas con valor 1, y piloto apagado, depósito vacío y pieza no metálica significarán que las variables PILOTO, DEPÓSITO y METAL tienen valor 0. A continuación, se expresa la relación antes indicada entre estas tres variables

$$\text{PILOTO} = \text{DEPÓSITO} + \text{METAL}$$

Como puede observarse, las variables están relacionadas y su expresión es esta ecuación, a la que se denomina *función lógica*. En ella, PILOTO depende de DEPÓSITO y de METAL, tal como indicaba la descripción del proceso “se enciende el piloto si el depósito está lleno o también si la pieza es metálica”. La operación empleada para relacionar DEPÓSITO y METAL es una suma, una suma en álgebra de Boole. Esta y el resto de operaciones en álgebra de Boole son operaciones que tienen sus propias reglas al operar con variables lógicas, que se estudian en este capítulo.



TOMA NOTA

Cuando se asocia una variable booleana o lógica a un sensor, se asume que la activación del sensor es un 1 y la desactivación, un 0. Esto es para un sensor NA (normalmente abierto) que es lo más frecuente. Sin embargo, también es habitual trabajar o encontrarse con sensores NC (normalmente cerrados), cuya lógica se denomina *lógica negativa* o *lógica inversa*, ya que (al contrario que en el NA) la activación del sensor es un 0 y la desactivación un 1.

George Boole definió un álgebra especial para operar con problemas lógicos, basados en un conjunto de variables lógicas binarias que toman el valor de verdadero o 1 y falso o 0, y las operaciones lógicas asociadas NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR y XNOR que pueden realizarse con ellas.

Dado que el álgebra de Boole trabaja con variables binarias y operaciones sobre variables binarias, también se denominan *variables booleanas* y *operaciones booleanas*.

Resumiendo, puede expresarse un proceso o situación con variables binarias o lógicas (variables que pueden tomar ambos valores 0 y 1) empleando expresiones con operaciones definidas por el álgebra de Boole.

3.1.1. Función lógica

Cuando un conjunto de variables booleanas (entradas) se relacionan a través de operaciones de álgebra de Boole, su relación con el resultado (salidas) se expresa a través de una igualdad en una ecuación que se denomina *función lógica*.

Se estudiará cómo esta función puede expresarse de diversas formas (expresión matemática, tabla de verdad y diagramas de puertas lógicas y contactos).

La función lógica es la expresión de un problema combinacional, donde un valor de estado de entradas (sin considerar estados previos) ofrece un determinado valor de estado de las salidas. Más adelante, con ayuda del SFC o GRAFCET, se abordará el estudio de problemas secuenciales, donde en cada instante (o etapa) habrá que resolver sencillos problemas combinacionales.

© FUNDAMENTAL

Una variable booleana o lógica es binaria y, por tanto, solo puede tener dos valores posibles 0 y 1. El 0 representa *falso*, pues no se cumple dicha variable en el planteamiento lógico, y el 1 representa *verdadero*, pues indica que sí se cumple dicha variable en el planteamiento lógico.

3.1.2. Tabla de verdad

Una tabla de verdad es una representación en forma de tabla de la relación entre todas las combinaciones de las variables lógicas binarias de entrada (variables independientes) de un sistema y el resultado correspondiente en la salida (variable dependiente) por operaciones en álgebra de Boole. O, lo que es lo mismo, es la expresión de una función lógica enumerando en una tabla todas las posibilidades de entrada y la consecuente salida.

Puede haber más de una salida y, para cada una de ellas, existirá una tabla de verdad. A continuación, se presenta un primer ejemplo sencillo de tabla de verdad.

Para su construcción, se definen a la izquierda tantas columnas como variables de entrada y tantas filas como combinaciones aporten dichas variables binarias. En la columna final de la derecha, se dispondrá para cada fila el resultado de la salida en función de los valores presentes de las entradas.

Ejemplo

Se dispone de dos variables para la activación del motor eléctrico M de un elevador: el botón de accionamiento A y el sensor de cierre de la puerta B. Se sitúan en columnas a la izquierda las variables de entrada A y B y se realizan por orden todas las combinaciones posibles (en este caso, con 2 entradas, solo hay 4 combinaciones). En la última columna a la derecha, se sitúa la variable de salida M y, en ella, los resultados según cada combinación de entradas:

A	B	M
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

En este caso, se observa que ambas entradas tienen que estar activas para que la salida también lo esté.

Es interesante indicar que la tabla de verdad será más grande cuanto mayor sea el número de variables de entrada implicadas, pues ello generará más combinaciones posibles. Por ejemplo, para confeccionar una tabla de verdad para un problema con cuatro variables lógicas de entrada A, B, C y D, la porción izquierda de la tabla de posibles combinaciones de entrada serían las cuatro columnas de la izquierda. La columna a la derecha será cada consiguiente resultado de la salida en función de la combinación de entradas:

A	B	C	D	M
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0

A	B	C	D	M
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

Cada vez que una casilla de la columna M de la salida tenga un 1, significará que la combinación descrita de entradas en las casillas a la izquierda tiene como resultado la activación de la salida. Por ejemplo, se observa un 1 en la antepenúltima casilla de la columna correspondiente a la salida (M). Eso significa que, cuando la función lógica opera sobre las entradas A, B, C y D teniendo respectivamente valores 1, 1, 0 y 1, sus operaciones en álgebra de Boole son tales que el resultado en M será 1. Del mismo modo, si hay un 0 en la casilla de la salida de una fila, esa combinación de entradas en dicha fila ofrecerá, según la función lógica, un 0 en la salida M.

Para mayor claridad y uniformidad en la elaboración de la tabla de verdad, debe construirse el conjunto de combinaciones de entradas como se muestra, por el mismo orden en el que se construyen los números binarios si se unieran los bits. La tabla siguiente lo ilustra para cuatro variables:

Bit ₃	Bit ₂	Bit ₁	Bit ₀	Valor decimal de los 4 bits	Bit ₃	Bit ₂	Bit ₁	Bit ₀	Valor decimal de los 4 bits
0	0	0	0	0	1	0	0	0	8
0	0	0	1	1	1	0	0	1	9
0	0	1	0	2	1	0	1	0	10
0	0	1	1	3	1	0	1	1	11
0	1	0	0	4	1	1	0	0	12
0	1	0	1	5	1	1	0	1	13
0	1	1	0	6	1	1	1	0	14
0	1	1	1	7	1	1	1	1	15

Puede observarse que una tabla de verdad tendrá tantas filas como combinaciones ofrecen las entradas. Dado que son binarias, este número de filas será 2^n , donde n es el número de entradas. Con 3 variables de entrada, son $2^3 = 8$ combinaciones o filas; con 4, son 16; con 5, serían 32, etc.

Actividad propuesta 3.1



Supóngase un candado que funciona con una combinación de cuatro interruptores binarios A, B, C y D. El candado se abre en los siguientes casos:

- Cuando están activados exclusivamente A y C.
- Cuando están activados exclusivamente A y D.
- Siempre que esté activado B.

Expresa en una tabla de verdad el funcionamiento de este candado tan poco eficaz.



Actividad resuelta 3.1

Realiza las tablas de verdad del siguiente problema: una pizza puede realizarse con cuatro ingredientes aparte del tomate y el queso: anchoas, huevo, olivas y jamón. A María le gusta si solo lleva anchoas y olivas, solo huevo y olivas o cualquiera que lleve jamón. A Pedro le gusta si lleva anchoas, olivas y jamón todo a la vez, pero sin huevo, o solo jamón o solo olivas. Obtén las tablas de verdad que reflejen las preferencias de María y Pedro.

En este problema, las salidas serán las preferencias, que se indicarán como M y P para María y Pedro respectivamente. Las entradas serán los ingredientes, que se denominarán A , H , O y J refiriéndose a anchoas, huevo, olivas y jamón respectivamente. Por lo tanto, se construye cada tabla para cuatro entradas y se rellena la activación de la preferencia M para una tabla y de la preferencia P para la otra.

Para María:

A	H	O	J	M
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
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	1
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

Para Pedro:

A	H	O	J	P
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

3.1.3. Combinaciones superfluas o de error

Hasta ahora, se han observado situaciones o problemas en los que todas las combinaciones son posibles. Sin embargo, no siempre es así. Hay problemas en los que algunas combinaciones de entrada son imposibles. Estas combinaciones suelen denominarse *superfluas* y, en teoría, no pueden darse o corresponden a un error de señales de entrada en el automatismo. Una forma sencilla y efectiva de abordar esta situación es agrupar todas estas combinaciones como errores del sistema o de lectura y la activación de una salida de error para estas. Véase un sencillo ejemplo (figura 3.1).

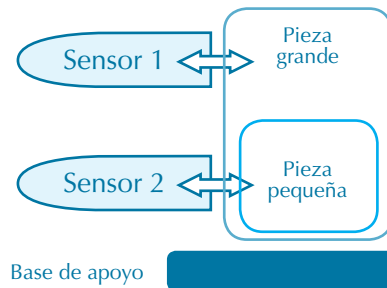


Figura 3.1
Ejemplo de posible configuración de entradas con combinaciones superfluas.

Se dispone de una zona de medición de piezas, donde se depositan por gravedad sobre una base de apoyo para su clasificación por tamaño. La clasificación se hace atendiendo a las señales de dos sensores –SENSOR 1 y SENSOR 2– situados a dos alturas que permiten clasificar como pieza grande activando la salida 1 CINTA 1 o como pieza pequeña activando la salida 2 CINTA 2. La tabla de verdad sería la siguiente:

Sensor 1 (arriba)	Sensor 2 (abajo)	Cinta 1 (pieza g.)	Cinta 2 (pieza p.)	Error
0	0	0	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	0	1
1	1	1	0	0

Es fácil deducir que, salvo que haya piezas que leviten en el aire, es imposible tener SENSOR 1 activo (valor 1) y SENSOR 2 inactivo (valor 0). Para cubrir esta combinación, se introduce una tercera salida de ERROR que se activará si se diera esta combinación. Esta salida permitiría a un sistema automatizado generar alarmas de error y las acciones pertinentes que haya que realizar en caso necesario.

3.2. Representación con diagramas de puertas lógicas y de contactos

A continuación, se estudian varias formas de representación de la función lógica. Más adelante, se recorre cada una de las operaciones para estar en disposición de operar con funciones lógicas y realizar su representación.

3.2.1. Puertas lógicas

Una puerta lógica es un dispositivo electrónico capaz de realizar una operación en álgebra de Boole sobre variables de entrada. Por lo tanto, representan una operación en álgebra de Boole.

Existe una representación normalizada con símbolos para cada una de ellas. Con esta representación y a través de interconexiones con sus entradas y sus salidas, pueden representarse operaciones complejas compuestas por múltiples operaciones simples en álgebra de Boole hasta constituir una función lógica. Algo más adelante se ilustra esta representación de función lógica con puertas lógicas.

Para la representación de las puertas lógicas, hay dos conjuntos de símbolos empleados, ambos definidos en la norma ANSI (American National Standards Institute)/IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Std 91-1984 y su suplemento ANSI/IEEE Std 91a-1991.

1. *Símbolos distintivos o diferenciados para cada puerta:* es la representación clásica (desde los años cincuenta), en la que cada puerta lógica tiene una forma geométrica diferente. Se utiliza para representaciones de esquemas sencillos (figura 3.2).

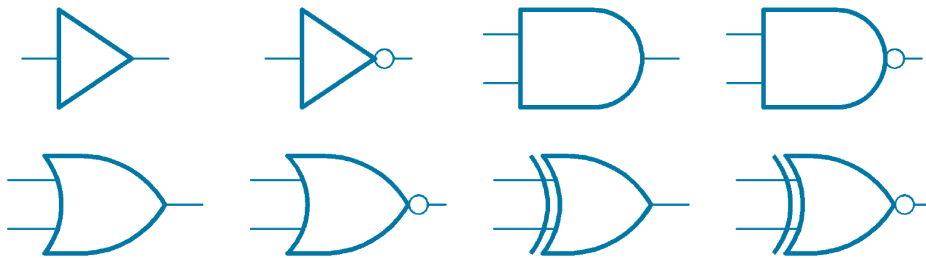


Figura 3.2

Puertas lógicas clásicas incluidas en la ANSI/IEEE Std 91-1984 y su suplemento.

2. *Símbolos con forma rectangular, basados en la norma IEC 60617-12:* describen a todos los tipos de puerta y permiten la representación de una gama mucho más amplia de dispositivos que con el conjunto de símbolos tradicional (figura 3.3). Esta norma y su sucesora, la IEC 60617-2, no aceptan ya el primer set clásico de símbolos con geometrías diferenciadas para puertas lógicas. Este sistema de representación rectangular ha sido adoptado también por otras normas como la norma EN 60617-12:1999 en Europa y BS EN 60617-12:1999 en el Reino Unido.

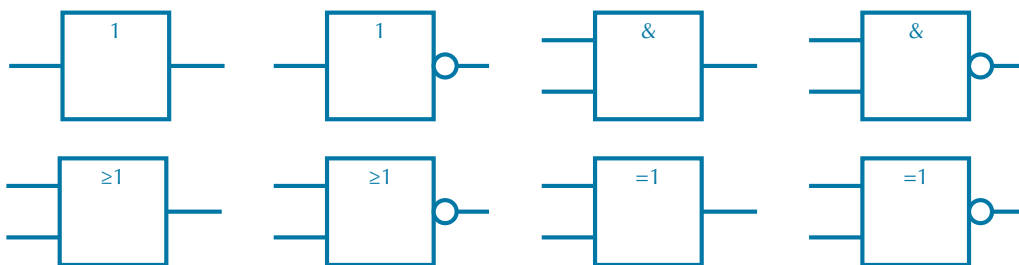


Figura 3.3

Puertas lógicas rectangulares incluidas en la IEC 60617-12 y también en la ANSI/IEEE Std 91-1984 y su suplemento ANSI/IEEE Std 91a-1991.

3.2.2. Diagrama de contactos

Previamente a explicar el diagrama de contactos, es preciso recordar el concepto de *circuito de mando eléctrico*, pues se considera interesante dada la analogía entre ambos.

A) Esquema eléctrico de mando

Un circuito eléctrico de mando es un circuito eléctrico, a menudo independiente eléctricamente del circuito de potencia, que, mediante una disposición inteligente de sus elementos, es capaz de controlar el accionamiento de elementos de potencia según convenga para una aplicación determinada. El esquema eléctrico de mando es su representación.

La razón para explicar el esquema eléctrico de mando es que, a partir del entendimiento de su funcionamiento (método de automatización cableada), es muy fácil entender el diagrama de contactos y adaptarse a la programación en este tipo de lenguaje.

La representación del esquema eléctrico de mando suele ser con una línea de alimentación eléctrica horizontal en la parte superior con tensión positiva, un circuito con la disposición de contactos hacia abajo en vertical hasta conectar con una salida (por ejemplo, un relé o un piloto), conectada finalmente a una línea eléctrica horizontal en la parte inferior a tensión cero.

Dado que representan a un cableado real de mando eléctrico, en estos esquemas, existen multitud de símbolos para representar cada elemento eléctrico existente. Esta simbología no es objeto de estudio aquí, pero, a continuación, se muestra un sencillo ejemplo (figura 3.4).

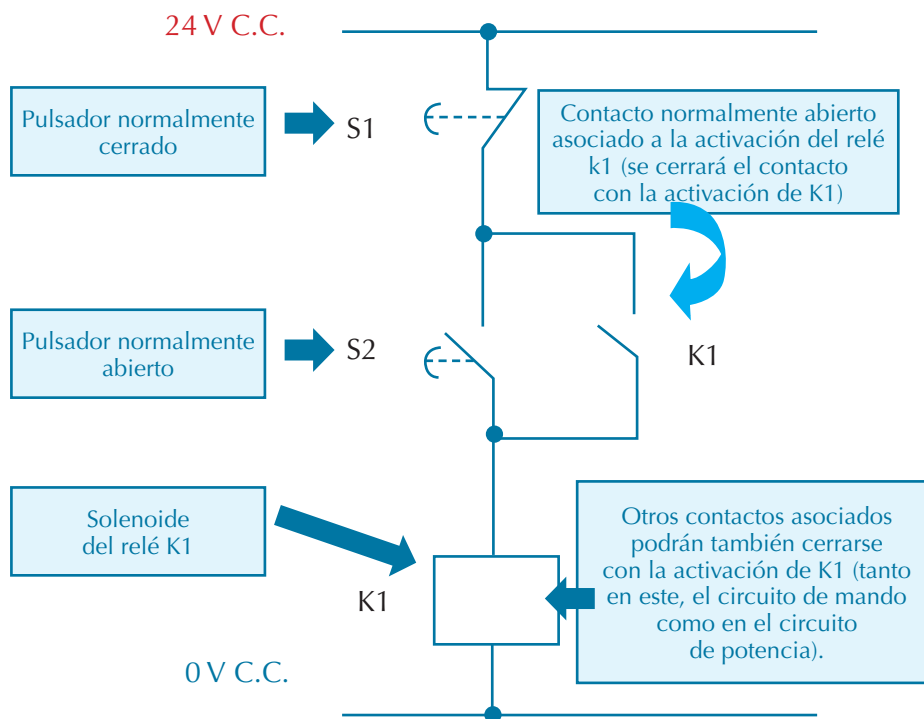


Figura 3.4
Ejemplo de un circuito eléctrico de mando.

B) Diagrama de contactos o diagrama de relés

Se trata de una representación de operaciones de álgebra de Boole mediante símbolos de contactos eléctricos conectados en serie y paralelo en un esquema eléctrico para alimentar una carga. También se denomina *diagrama de relés*. El diagrama de contactos funciona con la misma dinámica de un circuito de mando, gobernado por las leyes de la conducción de electricidad y composición de circuitos eléctricos para la transmisión mediante contactos de la tensión y la circulación de corriente hasta una carga o salida (y su activación) con el cierre del circuito. La figura 3.5 es la representación análoga al esquema de mando mostrado, pero en el diagrama de contactos.

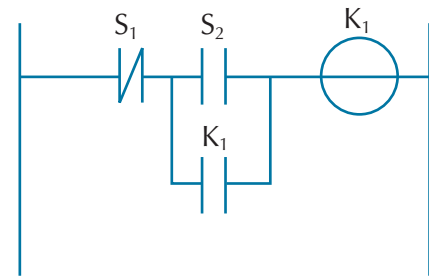


Figura 3.5
Esquema en diagrama de contactos.

Esta representación permite presentar operaciones complejas compuestas por múltiples operaciones simples en álgebra de Boole expresadas como asociaciones de contactos unidas eléctricamente y que terminan conectadas a salidas o bobinas.

Según la conexión establecida y el tipo de contacto, se obtiene que:

1. Cuando los contactos están en serie, su relación es a través de la operación lógica AND.
2. Cuando los contactos están en paralelo, su relación es a través de la operación lógica OR.
3. Cuando los contactos están negados, son contactos afectados por la operación lógica NOT.

Su representación se realiza con una línea eléctrica vertical con tensión positiva a la izquierda y con la disposición de contactos representados con los símbolos de diagrama de contactos de programación hacia la derecha en horizontal hasta conectar con una salida que, finalmente, se conecta a otra línea vertical a tensión cero a la derecha.

Añadiendo instrucciones más complejas, el diagrama de contactos, diagrama de relés o lenguaje *ladder* se estableció como el estándar básico en lenguaje de programación de autómatas programables.

Algo más adelante, se ilustra la representación de funciones lógicas con diagramas de contactos, pero se definen aquí sus elementos básicos (figura 3.6):

1. *Contactos normalmente abiertos (NA)*: cuando están inactivos, están en corte y, cuando se activan, están en conducción.
2. *Contactos normalmente cerrados (NC)*: cuando están inactivos, están en conducción y, cuando se activan, están en corte.
3. *Bobina o salida*: es la carga que se activa o no en función de que, en su entrada (a su izquierda), el cableado previo haya dispuesto o no de tensión de alimentación.



Figura 3.6
De izquierda a derecha: contacto NA del diagrama de contactos, contacto NC del diagrama de contactos y salida o bobina del diagrama de contactos.

3.2.3. Operaciones del álgebra de Boole

Las operaciones de álgebra de Boole se clasifican en los siguientes tipos:

- a) AND o Y: $A \cdot B$.
- b) OR u O: $A + B$.
- c) NOT: $\text{NOT}(A)$.
- d) NAND: $\text{NOT}(A \cdot B)$.
- e) NOR: $\text{NOT}(A + B)$.
- f) XOR u O exclusiva.
- g) XNOR.

En este apartado, se estudian una a una cada operación de álgebra de Boole u operación lógica, con la tabla de verdad que la define, sus símbolos para representación en esquema de puertas lógicas en dos versiones (tradicional y ANSI) y el diagrama de contactos, ...diagrama de contactos. Los valores de los conectores de la izquierda o de los contactos serán los de las variables de entrada A y B (0 o 1). El resultado de la operación será el existente (0 o 1) en el conector de la derecha.

RECUERDA

- ✓ Las operaciones básicas lógicas de suma y producto en álgebra de Boole (+, ·) emplean los mismos símbolos que el álgebra matemática convencional, pero no hay que confundirse. Es necesario familiarizarse con que el resultado de estas operaciones responde a sus propias reglas y que opera y ofrece resultados únicamente sobre variables binarias o lógicas. Será necesario aprender su funcionamiento para poder realizar cualquier tipo de problema posterior. También hay que familiarizarse con la variable negada. Cuando una variable está negada, deberá operarse con el valor contrario que tiene. Si $C = 1$ y aparece C negada en una operación, su valor (el valor negado) es 0. Las variables negadas se representan tachadas, con un apóstrofo previo ('C), con suprrayado (una línea por encima) o con el prefijo NOT (negada de A será NOT A).

A) AND o Y: $A \cdot B$

Se indica como el producto de las dos variables lógicas y se expresa como A y B (A AND B).

- **Tabla de verdad**

A	B	A · B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

● Puerta lógica y diagrama de contactos

El diagrama de contactos de esta operación son dos contactos abiertos en serie (tienen que estar los dos activados para que, a la salida, se obtenga tensión) (figura 3.7).

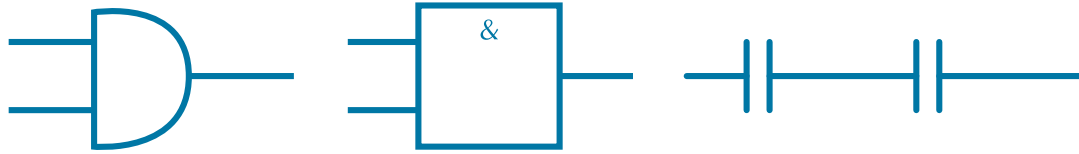


Figura 3.7

De izquierda a derecha: puerta lógica AND, puerta lógica AND IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica AND.

B) OR u O: $A + B$

Se indica como la suma de dos variables lógicas y se expresa como A o B (A OR B).

● Tabla de verdad

A	B	A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

● Puerta lógica y diagrama de contactos

El diagrama de contactos de esta operación son dos contactos abiertos en paralelo (con que uno de ellos conduzca, ya se obtiene tensión a la salida) (figura 3.8).

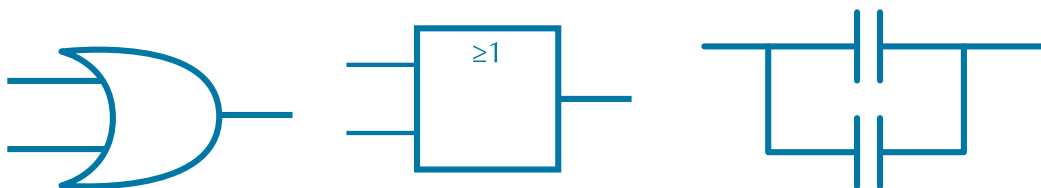


Figura 3.8

De izquierda a derecha: puerta lógica OR, puerta lógica OR IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica OR.

C) NOT: NOT (A)

La operación NOT sobre una variable se indica con una línea sobre ella y se denomina también *NEGADA*, pues se niega su estado cambiándolo (si es TRUE o 1, pasará a FALSE o 0 y, si es FALSE o 0, pasará a TRUE o 1). Se denota una variable de Boole negada con una raya horizontal superior (suprarrayado: \overline{A}).

- **Tabla de verdad**

A	NOT (A)
0	1
1	0

- **Puerta lógica y diagrama de contactos**

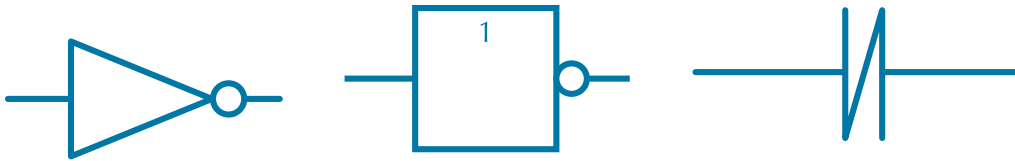


Figura 3.9

De izquierda a derecha: puerta lógica NOT, puerta lógica NOT IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y contacto negado correspondiente a la operación lógica NOT.

D) NAND: NOT (A · B)

Se indica como el producto negado de las dos variables lógicas.

- **Tabla de verdad**

A	B	NOT (A · B)
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

• Puerta lógica y diagrama de contactos

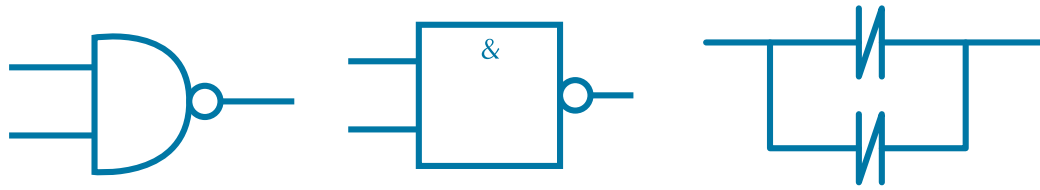


Figura 3.10

De izquierda a derecha: puerta lógica NAND, puerta lógica NAND IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica NAND.

E) NOR: $NOT (A + B)$

Se indica como la suma negada de dos variables lógicas.

• Tabla de verdad

A	B	NOT (A + B)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

• Puerta lógica y diagrama de contactos

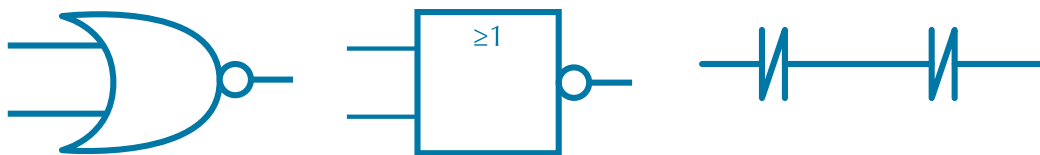


Figura 3.11

De izquierda a derecha: puerta lógica NOR, puerta lógica NOR IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica NOR.

F) XOR u O exclusiva

Es la suma, en la que la salida es 1 solo si lo es una de las entradas.

- **Tabla de verdad**

A	B	XOR (A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

- **Puerta lógica y diagrama de contactos**

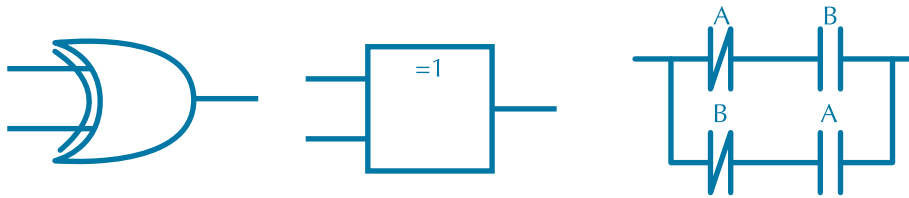


Figura 3.12

De izquierda a derecha: puerta lógica XOR, puerta lógica XOR IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica XOR.

G) XNOR

Es la XOR negada.

- **Tabla de verdad**

A	B	XNOR (A,B)
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- **Puerta lógica y diagrama de contactos**

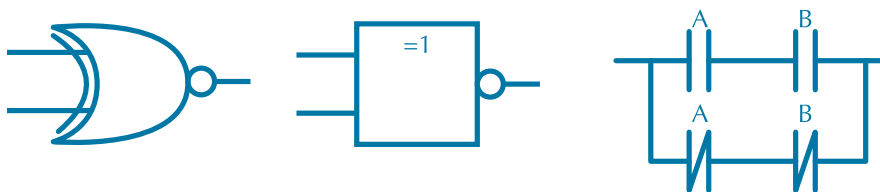


Figura 3.13

De izquierda a derecha: puerta lógica XNOR, puerta lógica XNOR IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984 y diagrama de contactos de la operación lógica XNOR.

3.2.4. Ejemplo de función lógica expresada con tabla de verdad, puertas lógicas y diagrama de contactos

Es necesario indicar que, para expresiones sencillas, es fácil la representación en puertas lógicas y en el diagrama de contactos. Para expresiones más complejas, a menudo no resulta práctica o sencilla su representación en diagrama de puertas lógicas o contactos sin realizar cierta simplificación. Esta simplificación es posible con determinadas reglas que se estudian más adelante.

A continuación, se muestra el ejemplo de una función lógica con su tabla de verdad, su representación en puertas lógicas y en el diagrama de contactos de PLC. La expresión en álgebra de Boole de la función lógica es:

$$F(A, B, C) = A \cdot B + \bar{C}$$

Su tabla de verdad es la que se muestra a continuación:

A	B	C	$A \cdot B + \bar{C}$	A	B	C	$A \cdot B + \bar{C}$
0	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1	1	1

Para su construcción, en la primera fila, se indica el producto de A y B, al ser ambos 0, su producto es 0, y se le suma C negada. Al tener C valor 0, su negada es 1 y, por tanto, al sumar el 0 previo al 1, el resultado es 1.

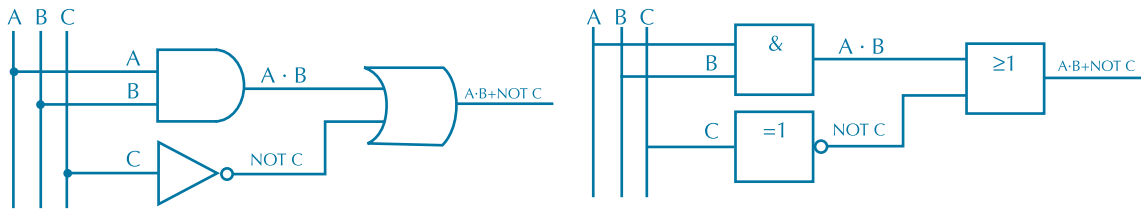
En la segunda fila, A y B valen igualmente 0 y, por tanto, su producto lógico es 0. C vale 1, pero en la expresión se suma su negada, que es 0. Por lo tanto, 0 sumado a 0 (en álgebra de Boole) es 0, expresado en el resultado.

Analizando el funcionamiento de cada operación (puede consultarse la tabla de verdad de cada una de estas), va obteniéndose el resultado (salida M) para cada fila según los valores de las entradas expresados en ella hasta completar la tabla.

Cuando la expresión es algo compleja, puede resultar de ayuda incorporar en la tabla de verdad columnas con los cálculos intermedios:

A	B	C	$A \cdot B$	\bar{C}	$A \cdot B + \bar{C}$	A	B	C	$A \cdot B$	\bar{C}	$A \cdot B + \bar{C}$
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1
0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1

En la figura 3.14, se muestra el diagrama de puertas lógicas (en ambas versiones).

**Figura 3.14**

Diagramas de puertas lógicas de la función lógica $F(A, B, C) = A \cdot B + \bar{C}$.

En la figura 3.15, se presenta el diagrama de contactos.

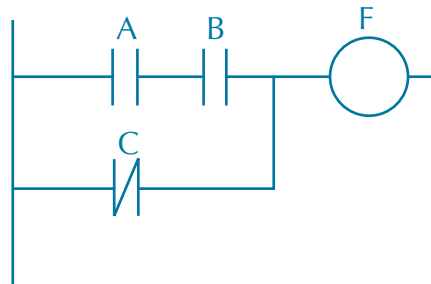
**Figura 3.15**

Diagrama de contactos de la función lógica $F(A, B, C) = A \cdot B + \bar{C}$.

WWW

Recurso web

En la calculadora de álgebra booleana de Wolfram Alpha (www.wolframalpha.com), puedes encontrar un widget que muestra el diagrama en puertas lógicas, una vez introducida la función lógica en forma textual y empleando paréntesis si es necesario. Por ejemplo, la función mostrada debajo sería "A AND B OR NOT C".

$$F(A, B, C) = A \cdot B + \bar{C}$$

Puedes consultar la tabla de verdad generada y diagrama de puertas lógicas en el QR adjunto.



Actividad propuesta 3.2



Para la siguiente función, escribe su tabla de verdad y su representación en diagrama de puertas lógicas (en la versión IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984) y de contactos.

$$F(A, B, C, D) = (\bar{A} + D) \cdot C + \bar{B} \cdot C$$

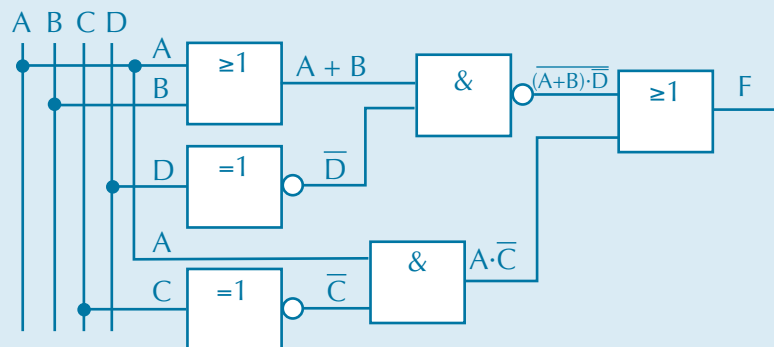


Actividad resuelta 3.2

Para la siguiente función, escribe su tabla de verdad y su representación en diagrama de puertas lógicas (en la versión IEC 617-12 e IEEE/ANSI 91-1984).

$$F(A, B, C, D) = \overline{(A + B)} \cdot \bar{D} + A \cdot \bar{C}$$

A	B	C	D	A + B	\bar{D}	$\overline{(A + B)} \cdot \bar{D}$	\bar{C}	A · \bar{C}	F
0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
0	0	0	1	0	0	1	1	0	1
0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	1	1	1
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	1	1	0	1	1	1
1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
1	1	1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	1	0	0	1



Siempre es recomendable realizar la mayor simplificación posible de la expresión de la función lógica, para lo cual es necesario conocer las propiedades del álgebra de Boole que se estudian a continuación.

3.3. Propiedades de las operaciones en álgebra de Boole

Las expresiones recogidas en el cuadro 3.1 se cumplen en el álgebra de Boole y sirven para operar con funciones lógicas y simplificar la expresión. El objetivo es obtener una función que indica el funcionamiento del automatismo de la manera más sencilla posible.

CUADRO 3.1
Propiedades de las operaciones en álgebra de Boole

Propiedad 1	Las operaciones de álgebra de Boole sobre variables binarias producen otra variable binaria.	
Propiedad 2	La suma o producto de una variable por sí misma es la propia variable (propiedad de tautología o redundancia).	$A + A = A$ $A \cdot A = A$
Propiedad 3	La negada de negada de una variable es la variable sin negar.	$\text{NOT}(\text{NOT}(A)) = A$
Propiedad 4	Se cumple la propiedad conmutativa para suma y producto en el álgebra de Boole.	$A + B = B + A$ $A \cdot B = B \cdot A$
Propiedad 5	Se cumple la propiedad asociativa para suma y producto en el álgebra de Boole.	$(A + B) + C = A + (B + C) = (A + C) + B$ $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$
Propiedad 6	Se cumple la propiedad distributiva para suma y producto en el álgebra de Boole.	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$ $(A + B) \cdot (C + D) = A \cdot C + A \cdot D + B \cdot C + B \cdot D$
Propiedad 7	Para dos variables binarias A y B...	... se cumple: $A + 1 = 1$ $A \cdot 1 = A$ Por tanto: $A + A \cdot B = A \cdot (1 + B) = A \cdot 1 = A$
Propiedad 8	Para dos variables binarias A y B...	... se cumple: $A + A = A$ $A \cdot A = A$ Por tanto: $A \cdot (A + B) = A + A \cdot B = A$
Propiedad 9	Para cualquier variable binaria A...	$\bar{A} \cdot A = 0$ $\bar{A} + A = 1$
Propiedad 10	Leyes de Morgan.	$\overline{A \cdot B} = \bar{A} + \bar{B}$ $\overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$ $\bar{A} \cdot B + A = A + B$ $B + A \cdot \bar{B} = A + B$
Propiedad 11	Para un conjunto de variables binarias (A, B, C...)...	... se cumple: $\overline{F(A + B + C + \dots)} = F(\bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \dots)$ $\overline{F(A \cdot B \cdot C \cdot \dots)} = F(\bar{A} + \bar{B} + \bar{C} + \dots)$

En relación con la propiedad 10 recogida en el cuadro 3.1, a continuación, se desarrolla su demostración:

$$\begin{aligned} \bar{A} \cdot B + A &= \overline{\bar{A} \cdot B} \cdot \bar{\bar{A}} = \overline{(A + B)} \cdot \bar{\bar{A}} = \overline{A \cdot \bar{A}} + \bar{\bar{A}} \cdot \bar{B} \\ &= \bar{\bar{A}} + \bar{B} = A + B \end{aligned}$$

Puede expresarse del siguiente modo: cuando se encuentra una expresión con una variable más su negada por otra, puede simplificarse la expresión por la variable más aquella que multiplicaba a su negada.



Dado que se cumple la propiedad distributiva, es posible sacar factor común de expresiones donde un elemento común multiplique a varios sumandos, igual que con el

álgebra convencional. Esto es importante en la simplificación, pues, a la hora de realizar los diagramas, estos resultarán más sencillos y con menor número de puertas.



Actividad resuelta 3.3

Simplifica al máximo por álgebra de Boole las siguientes expresiones:

a)

$$\begin{aligned} C \cdot \overline{A \cdot B} \cdot (A + C) &= C \cdot (\bar{A} + \bar{B} + \overline{A + C}) = \\ C \cdot (\bar{A} + \bar{B} + \bar{A} \cdot \bar{C}) &= C \cdot \bar{A} + C \cdot \bar{B} + C \cdot \bar{A} \cdot \bar{C} = \\ &C \cdot (\bar{A} + \bar{B}) \end{aligned}$$

b)

$$\begin{aligned} \overline{A \cdot B} \cdot \overline{C \cdot D} + C &= ((\bar{A} + \bar{B}) \cdot (\bar{C} + \bar{D}) + C) = \\ ((\bar{A} + \bar{B}) \cdot \bar{C} + C + (\bar{A} + \bar{B}) \cdot \bar{D}) &= \\ ((\bar{A} + \bar{B}) + C + (\bar{A} + \bar{B}) \cdot \bar{D}) &= \\ ((\bar{A} + \bar{B}) \cdot (1 + \bar{D}) + C) &= \bar{A} + \bar{B} + C \end{aligned}$$

A la hora de simplificar, es fundamental la aplicación de la propiedad 10, pues es la forma de pasar a variables individuales la negación de operaciones (la negada de la suma es el producto de las negadas y la negada del producto es la suma de las negadas). También hay que estar atento a las otras propiedades como que el producto de una variable por sí misma es dicha variable, que el producto por su negada es 0 y que la suma de cualquier variable más 1 es 1. Con todas las pro-

piedades, incluyendo la distributiva para sacar factor común, pueden simplificarse en gran medida expresiones que parecen complejas.

Actividad propuesta 3.3



Simplifica al máximo por álgebra de Boole las siguientes expresiones:

a) $(\overline{C \cdot D} + C) \cdot \overline{(A + B + C)} =$

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

3.4. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad

Conociendo el funcionamiento de determinado automatismo, puede deducirse su función lógica en forma de tabla de verdad. El procedimiento consiste en construir la tabla de verdad, anotando para cada combinación de entrada cuando se activa una determinada salida. Partiendo de esta tabla, puede obtenerse la función lógica de la salida en función de las entradas, mediante tres métodos:

1. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por unos.
2. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por ceros.
3. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por Karnaugh.

3.4.1. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por unos

El método consiste en lo siguiente: en las filas donde la salida es 1 (se activa con esa combinación de entrada), se escribe un producto en el que se multiplican las tres variables de entrada, que será negada o no según su valor en la tabla. Si es 0, se toma negada y, si es 1, sin negar. Se suman los productos obtenidos de cada fila con valor 1 en la salida para construir la expresión completa de la función lógica:

A	B	C	F	Por unos	Expresión
0	0	0	1	$\overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C}$	
0	0	1	0		$\overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C}$
0	1	0	1	$\overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}$	$+ \overline{A} \cdot B \cdot \overline{C}$
0	1	1	0		$+ A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C}$
1	0	0	1	$A \cdot \overline{B} \cdot \overline{C}$	$+ A \cdot B \cdot \overline{C}$
1	0	1	0		$+ A \cdot B \cdot C$
1	1	0	1	$A \cdot B \cdot \overline{C}$	
1	1	1	1	$A \cdot B \cdot C$	

(La expresión obtenida deberá simplificarse)

Aplicando los teoremas de Boole, debe simplificarse al máximo la expresión obtenida:

$$\begin{aligned} & \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot B \cdot \bar{C} + A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} + A \cdot B \cdot \bar{C} + A \cdot B \cdot C = \\ & \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot (\bar{A} + A) + B \cdot \bar{C} \cdot (\bar{A} + A) + A \cdot B \cdot C = \\ & \bar{C} \cdot (\bar{B} + B) + A \cdot B \cdot C = \bar{C} + A \cdot B \cdot C = A \cdot B + \bar{C} \end{aligned}$$

Simplificando de otro modo, se obtiene el mismo resultado:

$$\begin{aligned} & \bar{A} \cdot \bar{C} \cdot (\bar{B} + B) + A \cdot (\bar{B} \cdot \bar{C} + B \cdot \bar{C} + B \cdot C) = \\ & \bar{A} \cdot \bar{C} + A \cdot (\bar{C} \cdot (\bar{B} + B) + B \cdot C) = \bar{A} \cdot \bar{C} + A \cdot (\bar{C} + B \cdot C) = \\ & \bar{A} \cdot \bar{C} + A \cdot (B + \bar{C}) = \bar{A} \cdot \bar{C} + A \cdot B + A \cdot C = \\ & \bar{C} \cdot (\bar{A} + A) + A \cdot B = A \cdot B + \bar{C} \end{aligned}$$

3.4.2. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por ceros

En las filas donde la salida es 0, se construye una suma donde se suman las tres variables de entrada de modo que, si su valor es 1, se toma negada y, si es 0, sin negar (al revés que en el método por unos). Se multiplican las sumas de cada fila de ceros para obtener la expresión definitiva.

A	B	C	F	Por ceros	Expresión
0	0	0	1		
0	0	1	0	$(A + B + \bar{C})$	$(A + B + \bar{C})$
0	1	0	1		$(A + \bar{B} + \bar{C})$
0	1	1	0	$(A + \bar{B} + \bar{C})$	$(\bar{A} + B + \bar{C})$
1	0	0	1		
1	0	1	0	$(\bar{A} + B + \bar{C})$	(La expresión obtenida deberá simplificarse)
1	1	0	1		
1	1	1	1		

Este método solo se recomienda cuando la mayoría de resultados de la salida en la tabla de verdad son unos. De lo contrario, resulta un producto de sumas con muchos términos, difícil de simplificar y con el que es fácil cometer errores.

3.4.3. Obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por tablas de Karnaugh

Se trata de un método gráfico para obtener directamente la función simplificada a partir de una tabla de verdad de un sistema. Puede realizarse para un número mayor de entradas, pero se estudia aquí únicamente para problemas de tres y cuatro entradas.

Los pasos del método se detallan a continuación:

A) Construir la tabla de Karnaugh de la salida de la que quiere obtenerse la función

En los laterales de la tabla, se sitúan las combinaciones de las variables de entrada tal como se muestra y, en las celdas interiores, se introduce el valor de la salida que corresponde a la combinación de las entradas (según la tabla de verdad).

Tabla de Karnaugh para tres entradas:

	AB				
		00	01	11	10
C	0				
	1				

Tabla de Karnaugh para cuatro entradas:

	AB				
		00	01	11	10
CD	00				
	01				
	11				
	10				

La tabla de verdad del apartado previo (tres entradas) es la que se muestra a continuación:

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

La tabla de Karnaugh correspondiente es la siguiente:

	AB				
		00	01	11	10
C	0	1	1	1	1
	1	0	0	1	0

Construcción de tabla de Karnaugh a partir de la tabla de verdad:

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

F

		AB			
		00	01	11	10
C	0	0	1	1	1
C	1	0	0	0	1



Actividad resuelta 3.4

Construye la tabla de Karnaugh de F a partir de la siguiente tabla de verdad.

A	B	C	F
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

		AB			
		00	01	11	10
C	0	0	1	1	0
C	1	0	1	1	0

B) Hacer grupos de unos en las casillas interiores

Se hace siguiendo los siguientes criterios:

- ♣ Deben cubrirse todos los unos con los diversos grupos creados.
- ♣ Debe hacerse el grupo cuanto más grande mejor.

- ❖ Pueden solaparse grupos siempre que con ello los grupos sean lo más grandes posible, pero hay que intentar cubrir todos los unos con el menor número de grupos (nunca crear grupos adicionales si ya se han cubierto los unos).
- ❖ Los unos de la tabla pueden conectar por el perímetro con otros unos en los laterales opuestos para formar grupos. Por ejemplo, un 1 en cada lateral de una fila o unos en los extremos superior e inferior de una columna forman una pareja.
- ❖ Los grupos se crean con forma rectangular o cuadrada, no pueden constituirse formados por diagonales.
- ❖ Los grupos pueden contener solo las siguientes cantidades de unos: un 1, dos unos, cuatro, ocho, etc. (potencias de dos). No puede por ejemplo formarse un grupo de seis unos.

En el ejemplo del apartado anterior, la creación de grupos de unos en Karnaugh:

		F			
		AB			
C		00	01	11	10
	0	1	1	1	1
1	0	0	1	0	

WWW

Recurso web

En la página web vinculada al QR adjunto, puedes introducir la tabla de verdad y obtener la tabla de Karnaugh, los grupos y la función lógica resultante. También ofrece la representación en puertas lógicas.



C) Escribir la función simplificada

Para escribir la función simplificada, ha de tenerse en cuenta lo siguiente:

- ❖ Cada grupo es un sumando de la expresión de la función simplificada.
- ❖ Cada sumando o grupo es un producto de las variables de entrada.
- ❖ Para un grupo, se analiza por separado cada 1 existente en sus casillas y, al cambiar de uno a otro, se lee en cada uno de ellos el valor de las variables de entrada correspondientes, contenidos en las filas y columnas superior e izquierda (externas) de la tabla. Se identifica qué variable mantiene dicho valor en filas y en columnas externas al desplazarse por los unos del grupo. La variable que mantiene su valor (0 o 1) estará en la expresión. La variable que, en una fila o columna externa correspondiente a un 1 del grupo valga 1 y en otro 1 del grupo valga 0, o viceversa, no estará en la expresión. De las variables que mantienen su valor en las distintas posiciones del grupo, en caso de que el valor mantenido sea un 0, se incluirá negada y en caso de que el valor mantenido sea un 1, se incluirá sin negar.

1. Análisis del grupo verde

En vertical, se observa el 1 superior y, en la fila exterior superior de valores de A y B, donde A vale 1, al igual que B. El siguiente 1 en el análisis vertical está debajo y, por tanto, se repite que A y B valen 1. Por lo tanto, en ambos casos, tanto A como B repiten valor y, por tanto, aparecerán en un sumando. Dado que el valor con el que repiten es 1, serán sin negar: $A \cdot B$. Falta el análisis en horizontal. El primer 1 ofrece en la columna izquierda exterior de valores de C el valor de 0. El siguiente 1 ofrece para C un valor de 1. Por lo tanto, C no repite valor a lo largo de los unos del grupo y no aparece.

El término correspondiente al grupo verde será $A \cdot B$.

2. Análisis del grupo azul

Recorriendo los unos de este grupo, se observa que A y B en la fila exterior superior de valores de A y B no pueden repetirse, pues, al coger toda la fila, en unos casos, serán 0 y, en otros, 1. Por lo tanto, ni la A ni la B estarán en la expresión.

Por columnas, C mantiene valor, pues es fila única. Su valor es 0, luego aparecerá negada.

El término correspondiente al grupo azul será $\overline{NOT}(C)$.

La función simplificada del automatismo es:

$$F = A \cdot B + \overline{C}$$

TOMA NOTA



La matriz de Karnaugh puede construirse con las variables A y B en las filas y las variables C y D en las columnas (matriz transpuesta a la planteada en este texto), pero la construcción y resolución siguen exactamente la misma dinámica.



Actividad resuelta 3.5

Realiza los grupos y obtén la función lógica de las siguientes tablas de Karnaugh.

a)

F	AB			
C	00	01	11	10
0	0	1	1	1
1	0	1	1	0

$$F = B$$

b)

F	AB			
C	00	01	11	10
0	1	0	0	0
1	0	1	1	0

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

c)

	AB			
CD	00	01	11	10
00	1	0	0	1
01		1	1	0
11	0	1	0	0
10	1	0	0	1

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



RECURSOS ELECTRÓNICOS 3.1 y 3.2

En los anexos web 3.1 y 3.2, disponibles en www.sintesis.com y accesibles con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás una reseña biográfica de George Boole y actividades adicionales para este capítulo.

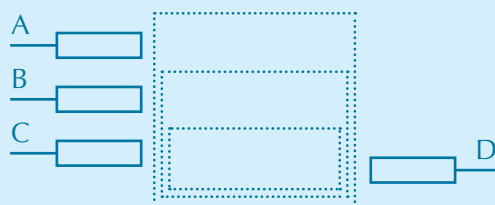
Resumen

- Inicialmente, se han definido de forma básica el álgebra de Boole y las variables lógicas (binarias) que emplea.
- Esta definición cuenta con las operaciones elementales que, según Boole, pueden realizarse sobre las variables lógicas. Cada una de estas operaciones elementales puede expresarse en cuatro vertientes y todas se han estudiado: expresión matemática, tabla de verdad, diagrama de puertas lógicas y diagrama de contactos.
- Se ha visto cómo un problema combinacional puede expresarse en una función lógica o expresión matemática en álgebra de Boole combinando operaciones elementales sobre las variables de entrada y, a su vez, representarla no solo con una tabla de verdad, sino también con circuitos de puertas lógicas y de diagrama de contactos.
- Por último, respecto al álgebra de Boole, se ha enumerado una serie de propiedades matemáticas que permiten operar con sus expresiones y simplificarlas significativamente.
- A continuación y finalmente, se ha estudiado el itinerario desde el planteamiento de un problema combinacional hasta plasmarlo en una función lógica que relaciona entradas y una salida. Empezando por la escritura de la tabla de verdad y a partir de ella, se ha mostrado la obtención de la función lógica matemática por unos, por ceros o por tablas de Karnaugh de hasta cuatro variables de entrada.

Ejercicios propuestos



1. Quiere modelarse el comportamiento de un pez a la hora de alimentarse. El pez está en un acuario y, siempre que en la comida haya carne y la iluminación esté encendida, comerá. Cuando la comida es únicamente gambas y la iluminación está encendida, solo come si está encendido el calefactor de agua. Si hay carne y no hay iluminación, come cuando no está encendido el calefactor. En los otros casos, no come. Escribe la tabla de verdad del problema. Las entradas (A, B, C y D) deben aparecer en la tabla de verdad, de izquierda a derecha, en el mismo orden de aparición que en el texto en el texto (carne, iluminación, gambas, calefactor).
2. Quiere diseñarse el siguiente automatismo de clasificación: a una máquina, llegan tres tipos de cajas: pequeñas, medianas y grandes. Mediante tres detectores (A, B y C, situados como indica la figura), hay que detectar el tamaño.



Además, hay un detector inductivo D que detecta si la caja viene con pieza metálica o no en su interior. Cuando la caja sea pequeña o mediana y, además, lleve pieza metálica, se activa la cinta transportadora C_1 . Cuando la caja sea grande (tanto con pieza metálica como sin ella) o sea mediana y pequeña sin pieza metálica, se activará la cinta transportadora C_2 . Obtén la tabla de verdad y la función lógica por unos y por Karnaugh. Las entradas (A, B, C y D) deben aparecer en la tabla de verdad, de izquierda a derecha, en el mismo orden de aparición que en el texto.

3. Para la siguiente tabla de verdad, obtén la función lógica de la salida por unos de F y simplifica.

A	B	C	F
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

4. Teniendo en cuenta la siguiente tabla de Karnaugh, obtén la función lógica correspondiente.

		AB			
		00	01	11	10
CD	00	1	1	0	1
	01	0	0	1	1
	11	0	0	0	1
	10	1	1	0	1

5. En relación con la siguiente tabla de Karnaugh, obtén la función lógica correspondiente.

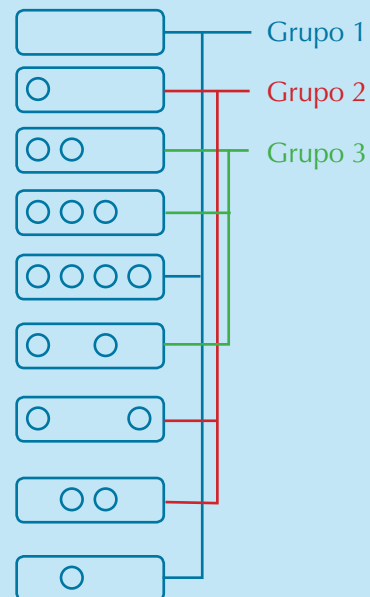
		AB			
		00	01	11	10
CD	00	1	1	1	1
	01	1	1	1	1
	11	1	1	1	1
	10	1	1	1	1

Caso práctico

En una fábrica, se ha producido un problema de selección de piezas. En el proceso que desarrollan, una máquina debe clasificar en tres grupos o categorías unas piezas rectangulares alargadas troqueladas con hasta cuatro agujeros y las configuraciones siguientes:

Así, cualquier combinación de agujeros no indicada debe entenderse como un error de proceso.



Por lo tanto, es preciso planificar la automatización, resolviendo el problema combinatorial que se plantea, para que una máquina selectora con sensores que detecten los agujeros active distintas (tres) válvulas de soplado y que, según el grupo correspondiente, expulse la pieza al contenedor asignado. Para ello:



- a) Identifica cómo plantearías entradas y salidas.
- b) Realiza un esquema del sistema.
- c) Realiza la tabla de verdad.
- d) Obtén las funciones lógicas de las salidas empleando tablas de Karnaugh.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. Respecto a una variable lógica, ¿cuál de las siguientes opciones es verdadera?
 - a) Admite dos valores posibles: 0 o 1.
 - b) Admite dos valores posibles: verdadero o falso.
 - c) Es una variable binaria.
 - d) Todas las opciones anteriores son verdaderas.
2. ¿Cuáles de las siguientes operaciones son del álgebra de Boole?
 - a) NOT, AND, OR, NAND, BOR, XOR y XNOR.
 - b) NOT, AND, OR, NAND, XOR, DOR y XNOR.
 - c) NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR y XNOR.
 - d) NOT, AND, OR, NAND, NOR, XOR y BNOR.
3. ¿Cuál de las siguientes oraciones es falsa?
 - a) La tabla de verdad solo se puede construir con las entradas y una única salida.
 - b) La tabla de verdad tiene en cuenta todas las posibles combinaciones de las entradas.
 - c) La tabla de verdad expresa un problema combinacional de variables binarias.
 - d) La tabla de verdad ordena las combinaciones de las entradas siempre en orden.
4. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
 - a) La tabla de verdad muestra la relación entre las entradas y una o varias salidas.
 - b) La tabla de verdad muestra solo las combinaciones de las entradas que activan la salida.
 - c) La tabla de verdad muestra la expresión de un problema combinacional de variables lógicas.
 - d) La tabla de verdad muestra, exactamente, 2^n filas o combinaciones posibles de entradas, siendo n el número de entradas.
5. Cuando en una tabla de verdad se dan combinaciones de entradas imposibles, ¿qué se recomienda?
 - a) No utilizar la tabla de verdad y recurrir a otro método.
 - b) Eliminar las filas correspondientes.
 - c) Ignorar dichas combinaciones en la resolución del problema.
 - d) Asignar a dichas combinaciones una salida de error.

6. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre las puertas lógicas es falsa?
- a) Representan operaciones del álgebra de Boole.
 - b) Tienen una única representación clásica con geometrías diferentes para cada puerta.
 - c) Tienen dos representaciones, de las que la más moderna con una misma geometría rectangular para todas las puertas es la más recomendable.
 - d) Pueden unirse con conectores para representar problemas combinatoriales.
7. En relación con el diagrama de contactos, ¿cuál de las siguientes frases es falsa?
- a) Presenta una analogía con un circuito eléctrico de mando.
 - b) Se representa en horizontal.
 - c) Sus elementos básicos son contactos, contactos negados y bobinas.
 - d) Solo con contactos, contactos negados y bobinas se constituye un lenguaje de programación de PLC.
8. ¿Qué puerta lógica se muestra a continuación?
- a) Se trata de una puerta BOR.
 - b) Se trata de una puerta XOR.
 - c) Se trata de una puerta DOR.
 - d) Se trata de una puerta NOR.
- 
9. ¿Cómo se denomina la siguiente puerta lógica?
- a) Puerta BOR.
 - b) Puerta XOR.
 - c) Puerta DOR.
 - d) Puerta NOR.
- 
10. Hablando sobre la obtención de la función lógica a partir de la tabla de verdad por unos, ceros o Karnaugh, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
- a) En la obtención por unos, se tienen en cuenta las combinaciones de entradas que producen un 1 en la salida.
 - b) En la obtención por ceros, se tienen en cuenta las combinaciones de entradas que producen un 0 en la salida.
 - c) La obtención por ceros es recomendable cuando, en la salida, hay muchas filas con resultado 0.
 - d) En Karnaugh, se obtiene la expresión ya simplificada, al contrario que en la obtención por unos y por ceros.

SOLUCIONES:

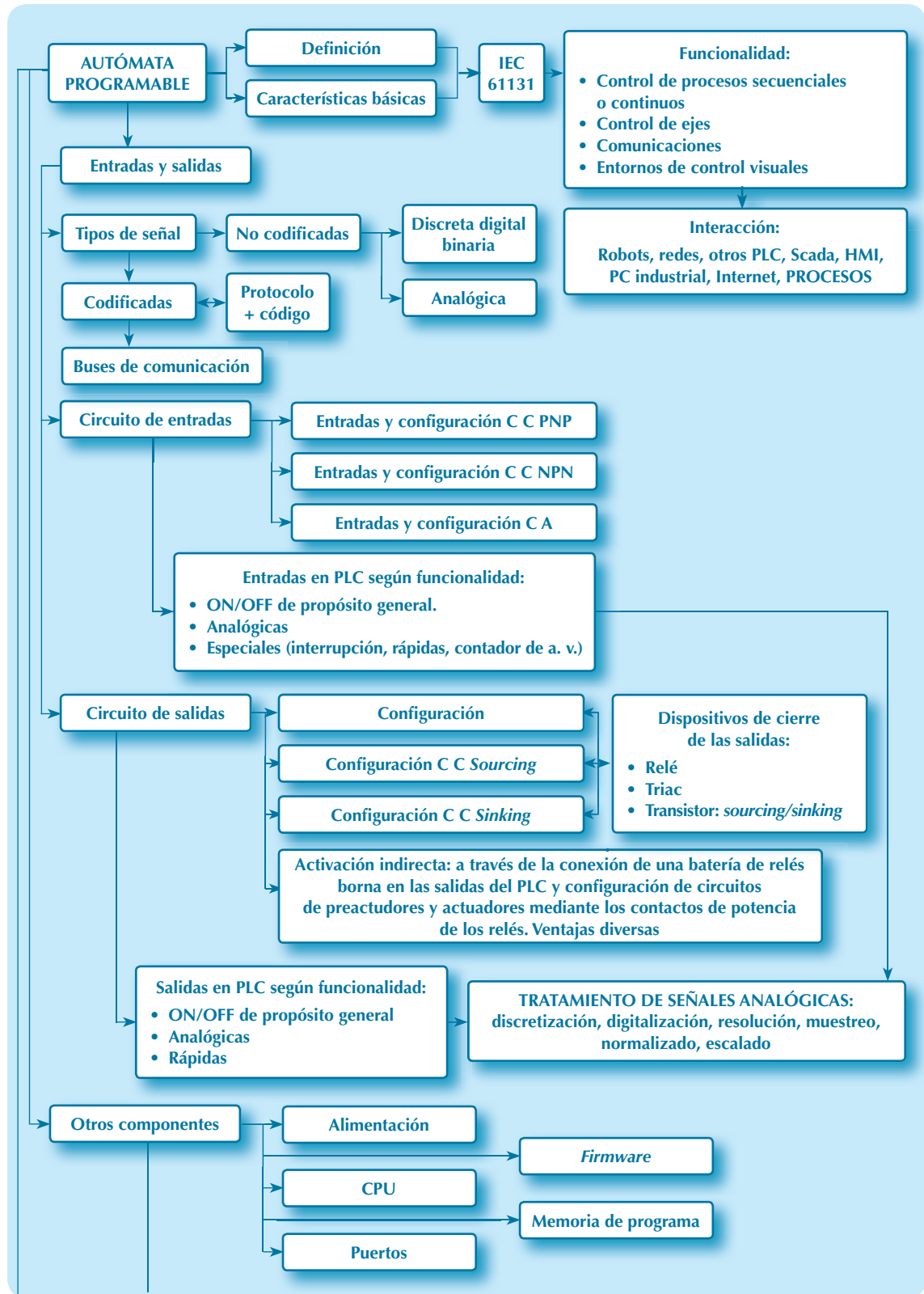
- | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d | 5. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d |
| 2. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input checked="" type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 6. <input type="checkbox"/> a | <input checked="" type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d |
| 3. <input checked="" type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 7. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d |
| 4. <input type="checkbox"/> a | <input checked="" type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 8. <input type="checkbox"/> a | <input checked="" type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d |
| | | | | 9. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d |
| | | | | 10. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input checked="" type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d |

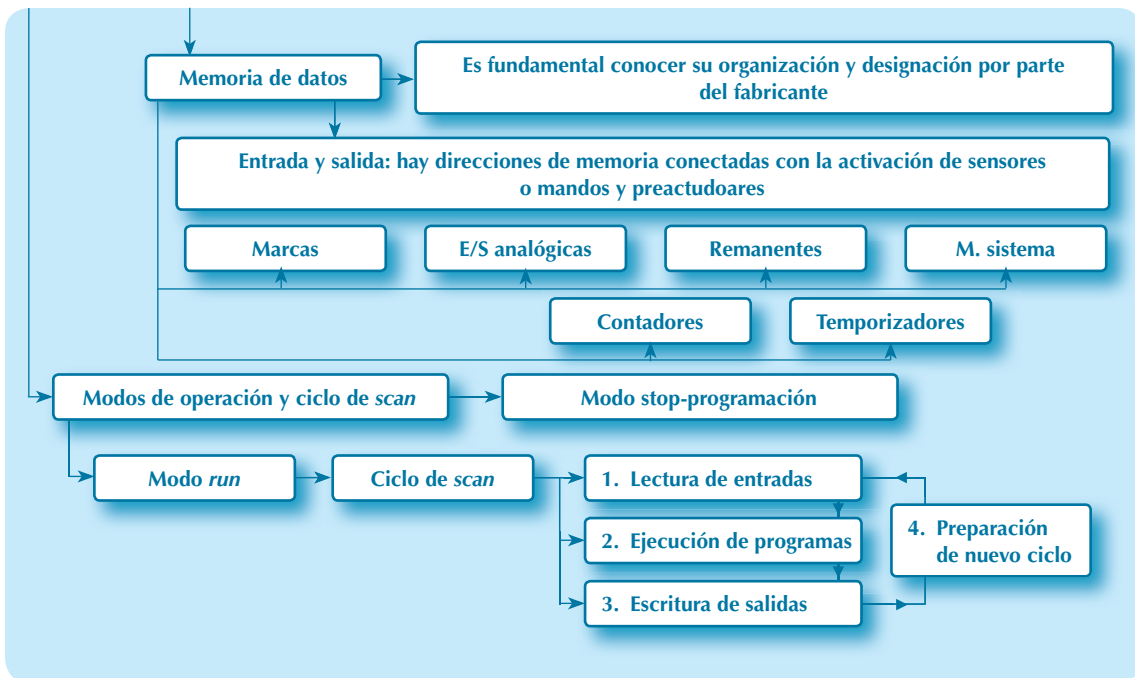
Autómatas programables

Objetivos

- ✓ Describir qué es un PLC y su filosofía de funcionamiento.
- ✓ Conocer y entender la forma básica de cablear un PLC, incluyendo elementos externos (elementos de E/S) para su correcto funcionamiento.
- ✓ A partir de los puntos anteriores, comenzar a definir la conexión de otros elementos con un PLC para automatizar una aplicación industrial.

Mapa conceptual





Glosario

Autómata programable industrial (controlado lógico programable o PLC). Dispositivo electrónico con capacidad de automatizar un proceso mediante el comando de acciones (salidas) en función de estímulos o señales (entradas) y de las órdenes que le hayan sido programadas (programa).

Bornero de conexión. Asociación de múltiples bornes de conexión, normalmente dispuestos en horizontal o vertical, ya sea de múltiples pines de conexión de un dispositivo (como un PLC) o de un montaje de bornes de conexión individuales sobre carril DIN.

Ciclo de scan. Ciclo en el que el PLC lee el valor presente en las entradas, ejecuta el programa contenido en su memoria, actualiza el valor de las salidas en consecuencia y se prepara para el siguiente ciclo. Su duración suele ser de milisegundos (ms).

Digitalización de información. Proceso de convertir la información en un formato digital. En este formato, la información se organiza en unidades de datos discretas llamadas bits capaces de almacenar ceros o unos, que, usualmente, se agrupan en grupos de múltiples bits con un significado. Estos son los datos binarios que los dispositivos de naturaleza digital con capacidad de computación pueden procesar.

Interrupción. Rutina de alta prioridad que puede configurarse en el PLC y que se vincula a un evento especial, como la activación de un sensor de las entradas, para su ejecución. Debe programarse cuidadosamente, pues, mientras ejecuta su código, interrumpe el código ordinario del programa y la operación normal en el control de proceso, lo que puede tener consecuencias que será necesario conocer y gestionar.

Marca (o flag). Bit o secuencia de bits predefinidos que contiene un valor binario. Se utiliza por el programa para recordar el estado de una variable o almacenar valores. Por ejemplo, se utilizan marcas para indicar qué etapa está activa dentro de un proceso secuencial (si está activa la etapa, su marca asignada valdrá 1 y 0 si está inactiva).

Velocidad de conmutación. Medida de la velocidad a la que un dispositivo electrónico es capaz de cambiar su estado lógico entre ON y OFF. Depende del retardo interno para dicho cambio desde la señal que lo comanda, y dicho retardo depende de la tecnología del dispositivo.

4.1. Introducción

Desde 1960, existe el controlador lógico programable (o PLC) en la industria, por lo que se considera un elemento protagonista en la automatización de procesos industriales.

Con el tiempo, ha ido creciendo en potencia y funcionalidad. Esta evolución, junto con lo conveniente de su diseño inicial para controlar máquinas y la facilidad de programación por diagrama de contactos (simulando un circuito eléctrico), ha permitido al PLC seguir manteniendo su importancia en la automatización de procesos.

En el capítulo 1, ya se analizó la importancia de la era del silicio y la tecnología digital en la automatización y se expusieron las ventajas que habían introducido dichos dispositivos digitales para el propósito de automatizar cualquier proceso. También se mencionó que, previamente a esta revolución, el control de procesos industriales se hacía de forma cableada por medio de contactores y relés o incluso neumáticamente. Eran automatismos sencillos y muy lentos y, además, cualquier variación en el proceso suponía modificar físicamente gran parte de los elementos y cableado de los montajes. En la actualidad, los autómatas programables han suplantado a este tipo de instalaciones, que ahora son controladas de forma programada, con una potencia y flexibilidad enormemente superiores (figura 4.1).

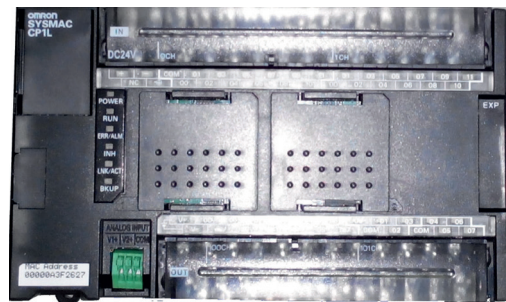


Figura 4.1
Omron CP1L-E.

RECUERDA

- ✓ El controlador lógico programable o PLC (del inglés *programmable logic controller*) – también denominado *autómata programable*– ha sido el principal protagonista de la automatización en la industria desde que sustituyó a la lógica cableada y sigue siéndolo en la actualidad.

4.2. Definición del autómata programable y la IEC 61131

El autómata programable es un dispositivo electrónico con un hardware, programación y diseño especiales para realizar tareas de control y comunicación en el entorno industrial, de modo que es capaz de captar unos estímulos externos de otros controladores, de mandos o de eventos del proceso en forma de señales de sensores con variaciones de voltaje o corriente (en su conexión mediante un circuito) y, mediante memoria y una unidad central de proceso, ejecutar las instrucciones de un lenguaje incluidas en el programa de control. Las instrucciones procesarán dichos estímulos y, en consecuencia, ordenarán, mediante señales a otros controladores y, sobre todo, señales eléctricas de salida, la excitación de preactuadores y actuadores (conectados eléctricamente a las salidas) que ejecutarán las acciones requeridas para el control del proceso según el diseño del programa de control.

Esta completa definición ya indica la función básica y más inmediata de un PLC, junto con las bases de su funcionamiento, que se muestran en la figura 4.2.

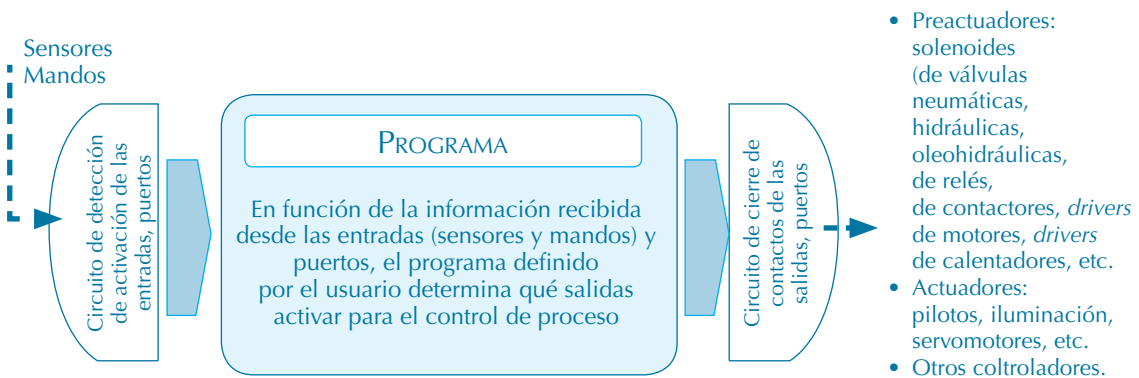


Figura 4.2

Esquema básico de un autómata programable.

Cada vez existen más actuadores y sensores que se comunican con señales digitales, sin embargo, en la automatización de máquinas actual, la señal eléctrica simple en las señales de mando (entradas) y hacia los actuadores (salidas) todavía es habitual.

Contando únicamente con estas señales eléctricas, la flexibilidad y potencia del control con PLC y el accionamiento con preactuadores de la electricidad de potencia, neumática e hidráulica, se dispone de una gran capacidad de automatización.

También vale la pena recordar la distinción entre circuitos de mando y circuitos de potencia, en los que el PLC se integra en el circuito de mando, normalmente eléctrico, mientras que, en el de potencia o actuación, hay actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos.

Un sistema básico de automatización de un proceso requiere que, en función de determinados parámetros en la máquina (temperaturas, desplazamientos, presencia de piezas, presiones, velocidades, etc.) y en función del programa de automatización (que dicta el comportamiento de la máquina), se intervenga en el proceso emitiendo señales a los actuadores para que ejecuten las acciones esperadas.

Por lo tanto, en un sistema de automatización, se hallan los siguientes bloques básicos:

- Sensores (sensórica) y elementos de mando (botones, interruptores, selectores, etc.).
- Elementos con capacidad de cálculo y decisión: autómatas o microcontroladores y un programa.

- Preactuadores y actuadores.

Para que el alumno sea capaz de plantear el conjunto de dispositivos de automatización necesarios en el diseño preliminar de una máquina, necesita conocer entre otras cosas:

1. El cableado de los autómatas programables, fundamentalmente sus entradas y salidas, configuración y programación (y, por lo tanto, lenguajes de programación).
2. La sensorial y los actuadores (que se tratarán en capítulos posteriores).

Esta introducción del PLC requiere responder a las siguientes preguntas:

- a) *¿Cómo lee el PLC el proceso que debe controlar?* El PLC va a recibir información del proceso a través de los captadores (finales de carrera, pulsadores, etc.), con lo que serían las señales de entrada y de otros controladores a través de puertos de comunicación.a.
- b) *¿Cómo decidirá?* Dará las órdenes en función de las señales de los captadores y elementos de mando, así como lo que el programa establezca.
- c) *¿Cómo actuará?* Estimulará a través de señales de salida y puertos a los preactuadores y actuadores (bobinas de contactores, electroválvulas, etc. y a otros controladores).

4.2.1. Características básicas de un PLC

Puede ampliarse la definición con las características básicas que suelen tener los PLC, algunas de las cuales lo distinguen, además, de otras opciones disponibles en el mercado:

1. *Precio competitivo frente a relés programables y ordenadores industriales:* estos dos elementos son la competencia directa del PLC. Para controles muy sencillos que requieren pocos puntos de conexión (entradas y salidas), existe una versión simplificada de los PLC denominados *relés programables*. Estos son sencillos de programar, a menudo incluso pueden programarse con unas teclas y pequeña pantalla incorporadas (sin necesidad de conexión a un ordenador). Son más económicos, pero con prestaciones muy básicas. En el otro extremo, se encuentran los ordenadores industriales con tarjetas de conexión para entradas y salidas y multitud de periféricos posibles. Más potentes, corriendo sobre sistemas operativos de ordenador y fácilmente conectables a redes Ethernet estándar, pero, a menudo, con mayores latencias y sobre todo coste. Pueden hacerse imprescindibles para sistemas que requieren mucha potencia y software basado en arquitectura X86 como los de visión artificial.
2. *Robustez por diseño para funcionar en entorno industrial:* vibraciones, suciedad, ruido eléctrico, campos magnéticos, etc. Esto incluye el diseño electrónico, aspecto no siempre habitual en ordenadores que se nutren de componentes informáticos estándar.
3. *Compatibilidad para su inserción en cuadros eléctricos sobre carril DIN:* el tamaño de un PLC es reducido frente al espacio requerido por un ordenador industrial y su posible incorporación a un armario estándar eléctrico sobre carril DIN facilita su integración en cualquier máquina. Morfológicamente, existen dos tipos:
 - a) *PLC compacto:* presenta en un solo bloque todos los elementos suficientes para una suficiente funcionalidad. Entradas, salidas y CPU, todo en un bloque integrado. Es posible que haya que completarlo con módulos para ampliar entradas,

salidas, ambas, puertos especiales, etc. Pero, en un solo elemento, se dispone de un equipo preparado.

- b) *PLC modular*: los elementos que se distinguen funcionalmente, por ejemplo, bloque de entradas, bloque de salidas, CPU, etc., están separados físicamente y deben adquirirse y conectarse a conveniencia.
4. *Fiabilidad de operación*: son aparatos que se fabrican, desde el primer boceto, para operar sin fallos, con calidades de hardware y robustez de software que ofrecen una fiabilidad necesaria en el control de procesos industriales que operan 24 horas al día durante 7 días a la semana. Esto no siempre es así con los ordenadores industriales, que pueden operar con componentes estándar y software menos fiable.
 5. *Flexibilidad, versatilidad de configuración y funcionamiento para integrarse en cualquier proceso y adaptarse a cambios*: se adquiere un PLC con un diseño de fábrica estándar, es decir, no es un controlador diseñado específicamente para una máquina (como el que, de hecho, incorporan los fabricantes a muchas máquinas), sino que deberá configurarse y adaptar sus características a los procesos del cliente. Por ello, debe ser un dispositivo diseñado para poder realizar esta adaptación disponiendo de versatilidad y así ser fácil de integrar.

Como inconvenientes, pueden indicarse los siguientes:

- a) *Formación específica de los técnicos de programación*: aunque existe una base común de programación, que es el lenguaje *ladder* o diagrama de contactos, para realizar programación avanzada, no existe un lenguaje unificado que se haya impuesto o convertido en un estándar. Cada fabricante tiene sus peculiaridades y sus propias instrucciones e incluso, dentro del mismo fabricante, hay variaciones importantes según se introducen en el mercado modelos nuevos. Lo mismo es aplicable a la integración con otros dispositivos (como pantallas de control) y la configuración de comunicaciones.
- b) *Coste inicial de automatizar*: el coste de algunos sistemas puede ser elevado inicialmente, aunque su funcionalidad, según sea el proceso, aunque suele justificarse su rentabilidad rápidamente por productividad. Este punto debe evaluarse cuidadosamente si las series son muy pequeñas o la automatización muy sencilla, adecuando las prestaciones pagadas a las necesidades del proceso.

4.2.2. Funcionalidad e interacción del PLC con su entorno

Con el paso del tiempo, el PLC ha pasado de sustituir inicialmente a los antiguos armarios con lógica cableada con relés a realizar prácticamente cualquier tarea necesaria de automatización. Actualmente, las funciones que ofrece son muy variadas y su capacidad de comunicación también. Un PLC moderno puede:

1. *Controlar procesos secuenciales o continuos con sensores y actuadores a través de*:
 - a) *Señales de entrada y salida eléctricas*. Por ejemplo, finales de carrera, sensores capacitivos o inductivos, ópticos, preactuadores como solenoides de relés, solenoides de válvulas, etc.

- b) *Señales de entrada y salida especiales y puertos conectados a buses de comunicación.* Por ejemplo, recibiendo pulsos de un encoder en una entrada rápida o emitiendo pulsos a un *driver* mediante una salida rápida. Recibiendo información codificada según protocolos por un puerto conectado a un bus de campo, de muchos sensores conectados a dicho bus; emitiéndola a actuadores más numerosos (como bloques multiválvula, etc.), o comunicando con controladores más complejos como un variador de frecuencia o un controlador PID.
2. *Realizar funciones específicas de control de ejes en maquinaria CNC (control numérico computarizado):* implica el control de posición, velocidad y par de un eje según se programe, recibiendo información también de estos parámetros.
 3. *Comunicarse con otros sistemas complejos para la coordinación y control conjunto de procesos, líneas de fabricación.* Como, por ejemplo, con ordenadores industriales, otros ordenadores en una central de control, pantallas HMI (*human-machine interface*), otros PLC, con redes e internet, etc.
 4. *Generar y gestionar pantallas de control HMI (human-machine interface) y SCADA con entornos visuales para el operario en directa comunicación con parámetros de proceso:* el PLC y su entorno de trabajo permiten generar y funcionar con la visualización de pantallas representando gráficamente los elementos del proceso junto con los parámetros necesarios para su regulación por parte del operario. La interacción de pantallas HMI con el PLC es directa e incluso se ofertan productos con la integración de ambos en un único equipo.



RECURSOS ELECTRÓNICOS 4.1 y 4.2

La IEC 61131 es una norma internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional, a la que se adscriben los principales fabricantes, que estandariza a los autómatas programables y se divide en varios documentos independientes que regulan distintos aspectos. Puedes ver un índice de estos en el anexo web 4.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro. Por otro lado, en el anexo web 4.2, se recoge un esquema que ilustra la funcionalidad de los PLC en el entorno de automatización industrial y se explica el desarrollo de la versatilidad del PLC.

4.3. Entradas y salidas del PLC

En este apartado, se estudia la conexión fundamental del PLC con su entorno: cómo siente, cómo recibe estímulos de lo que pasa en el proceso que pretende automatizarse y controlar (entradas) y cómo intenta dicho control a través de la activación de actuadores (salidas). Se exponen, desde los tipos de señal empleada hasta las áreas de memoria empleadas, y sobre todo los circuitos básicos de conexión con elementos externos (entradas y salidas).

4.3.1. Tipos de señal eléctrica de entrada y salida del PLC

Dada la importancia de las conexiones del PLC con su entorno a través de señales de entrada y salida, así como puertos de comunicación, a continuación, se estudian de forma resumida los tipos de señal para estas conexiones.

Primero, es necesario definir el concepto de *señal* desde el punto de vista de la automatización. Una de las definiciones del RAE resulta válida: “Variación (con el tiempo) de una corriente eléctrica u otra magnitud que se utiliza para transmitir información”.

Para las señales, también se emplean otras energías, como, por ejemplo, ondas de radio (wifi, *bluetooth*, etc.) o impulsos luminosos (fibra óptica), pero, de ahora en adelante, se hará referencia a señales eléctricas, que son las que se utilizan mayoritariamente por el PLC.

La figura 4.3 propone una clasificación básica de las señales en general y, por tanto, también en los PLC.

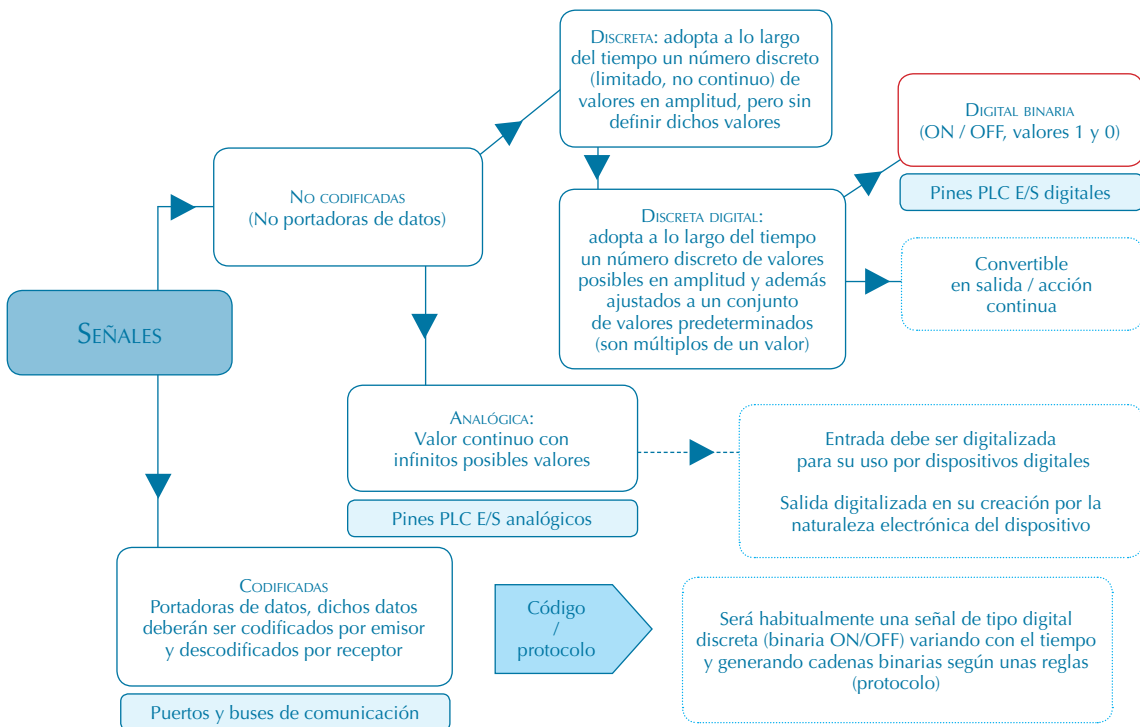


Figura 4.3
Señales.

A) Primera distinción: señal codificada

Utiliza la variación de la magnitud eléctrica tensión o intensidad, muchas veces de tipo todo o nada, para indicar unos y ceros según su nivel y conformar con los cambios de nivel en el tiempo una secuencia de bits o cadena binaria. Dicha cadena binaria se construye en el emisor según el dato que desea comunicarse conforme a un código de comunicación (establece la traducción entre bits y su significado) y un protocolo (establece las reglas de la transferencia) determinados. Cuando este código y protocolo son conocidos también en el receptor, es posible obtener el significado completo de la cadena binaria de unos y ceros transferida.

RECURSO ELECTRÓNICO 4.3



Un ejemplo de señal codificada es el código Morse utilizado para emitir con telégrafo eléctrico. Puedes leer más sobre ello en el anexo web 4.3, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro.

B) Señal no codificada

No es capaz de transportar datos como, por ejemplo, texto (compuesto por caracteres) o cualquier número en forma de mensaje. No emplea ningún código de traducción, sino que, directamente, su estado ON/OFF o el nivel de la magnitud significa directamente un nivel determinado de alguna variable o un estado de ON/OFF o activación/desactivación de una variable binaria.

Dentro de lo que es una señal eléctrica no codificada (no portadora de datos), se distinguen varios tipos, que se explican a continuación.

1. Señal analógica

La señal (por ejemplo, la diferencia de tensión entre dos cables) varía a lo largo del tiempo sin saltos, de forma continua, pasando por todos los valores intermedios (figura 4.4). En una entrada de señal analógica, hay una variación de un valor continuo de niveles de tensión o intensidad entre un valor máximo y mínimo (rango). Proporciona valores continuos a lo largo de un transcurso de tiempo continuo. Esto significa que es una señal continua tanto en tiempo como en amplitud.

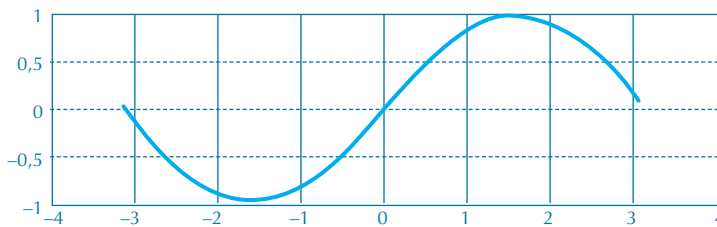


Figura 4.4
Señal analógica.

2. Señal discreta

Se trata de una señal obtenida a partir de una señal continua en la que se obtienen puntos separados cada cierto intervalo de tiempo (discretización). Ahora ya no hay una continuidad de valores (una línea continua), sino un conjunto de puntos separados en tiempo y magnitud, formados por la intersección de valores de tiempo (en los instantes de medición) y valores de amplitud, que pueden tomar cualquier valor en amplitud (el valor que tuviera la señal analógica en el instante en el que se midió). Esto se denomina normalmente *señal discreta* –discreta en tiempo, pero con cualquier valor posible en amplitud– (figura 4.5).

El intervalo de tiempo entre lecturas se denomina *intervalo de muestreo* y a su inversa, *frecuencia de muestreo*.

3. Señal digital (discreta-digital)

Se trata de una señal discreta en la que los valores de amplitud no se quedan en cualquier valor, es decir, no se quedan en el valor que tenía la señal analógica al medir para discretizarla, sino que se ajustan a un conjunto fijo de valores posibles de amplitud. Cada punto, según se ajusta su valor a un nivel de los N niveles de cuantificación discreta de un cuantificador. Entonces es cuando la señal se convierte en digital: discreta en tiempo y con un conjunto de valores predeterminados posibles en amplitud –múltiplos de un valor–. A menudo, se identifica esta denominación con

la señal digital binaria por ser la más importante, donde los posibles valores en amplitud son solo dos: 0 y 1. En la figura 4.6, se muestra la conversión de una señal analógica a otra digital binaria.

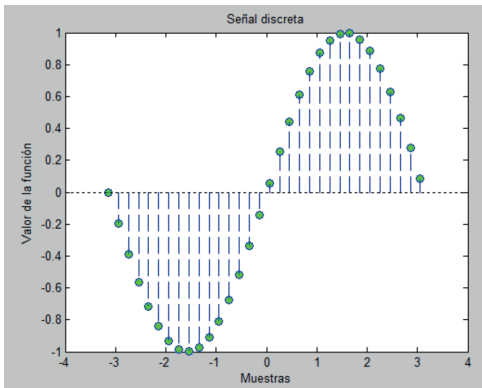


Figura 4.5
Señal discreta.

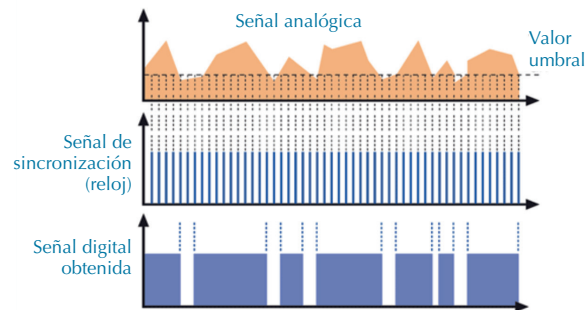


Figura 4.6
Conversión de una señal analógica a señal digital binaria.

La cantidad de valores posibles en amplitud que puede adoptar la señal discreta digital se denomina *resolución*.

Cuando existen señales de entrada analógicas (conectadas a una entrada analógica del PLC) que deben incorporarse al automatismo, como, por ejemplo, un valor relacionado con una temperatura o con un mando giratorio, se discretizan y digitalizan por parte de la entrada analógica del PLC para poder ser tratadas digitalmente por el dispositivo.

Por otro lado, las señales de salida de un PLC, dado que son generadas electrónicamente a partir de valores numéricos, serán digitales por naturaleza. Sin embargo, con un muestreo de muchísimos valores en tiempo y amplitud, a efectos prácticos, resultan similares a una verdadera señal analógica.

4. Señal digital binaria (valores ON/OFF, 1/0, únicamente)

La señal digital se define así porque cambia en su crecimiento o decrecimiento directamente de unos valores a otros predeterminados, a saltos, es decir, varía de forma escalonada, dentro de unos valores posibles conocidos, pasa de un valor a otro en el tiempo sin tomar valores intermedios. El número de valores totales que puede tomar una señal digital dependerá de su definición, ya que puede variar entre muchos o entre, por ejemplo, tan solo dos: 0 y 1. En este último caso, se dice que es una *señal digital binaria*, que son aquellas con naturaleza booleana donde su valor es todo o nada, 1 o 0. Este tipo de señales son las principales en la automatización de maquinaria sencilla y suelen ocupar la mayoría de los pines de entrada o salida de un PLC. A continuación, se detalla su funcionamiento para entradas y salidas:

- a) *Entradas*: por ejemplo, un final de carrera o un pulsador. Se observan dos posibles valores: activación o desactivación de una entrada. A partir de un circuito creado en las entradas, un nivel de tensión determinado genera circulación de corriente con un elemento sensor o de mando que cierra el circuito para indicar su activación o no a la CPU del PLC. Por el contrario, una tensión por debajo de cierto umbral hace que no circule intensidad suficiente y la CPU interpreta el estado opuesto.

- b) *Salidas*: por ejemplo, activación del solenoide de un relé. Se configura un circuito con una fuente de tensión que alimentará al preactuador. La señal de activación será, simplemente, la alimentación de dicho solenoide mediante el cierre de un contacto por parte del PLC cuando así lo indique el programa.

Estos dos bloques de entradas y salidas y sus circuitos gobiernan el flujo de información y control del proceso en la mayoría de los casos en los que se realiza la automatización de dicho proceso. Se trata de una automatización muy sencilla, con señales de entrada de sensores todo o nada y salida a preactuadores o actuadores todo o nada. Por ello, es fundamental entenderlo tal como se muestra en la figura 4.7.

En los apartados siguientes, se estudian ambos circuitos con más detenimiento.

Actividad propuesta 4.1



Clasifica cada una de las siguientes señales según su tipo y si es una señal de entrada o salida u otra:

- | | |
|--|---|
| a) Señal de un pulsador. | g) Señal entre PLC. |
| b) Señal de un selector. | h) Señal de un sensor de temperatura. |
| c) Señal a un piloto. | i) Señal a un regulador de intensidad lumínica. |
| d) Señal a un relé. | j) Señal a una pantalla HMI. |
| e) Señal a un contactor. | |
| f) Señal a un variador de frecuencia mediante bus. | |

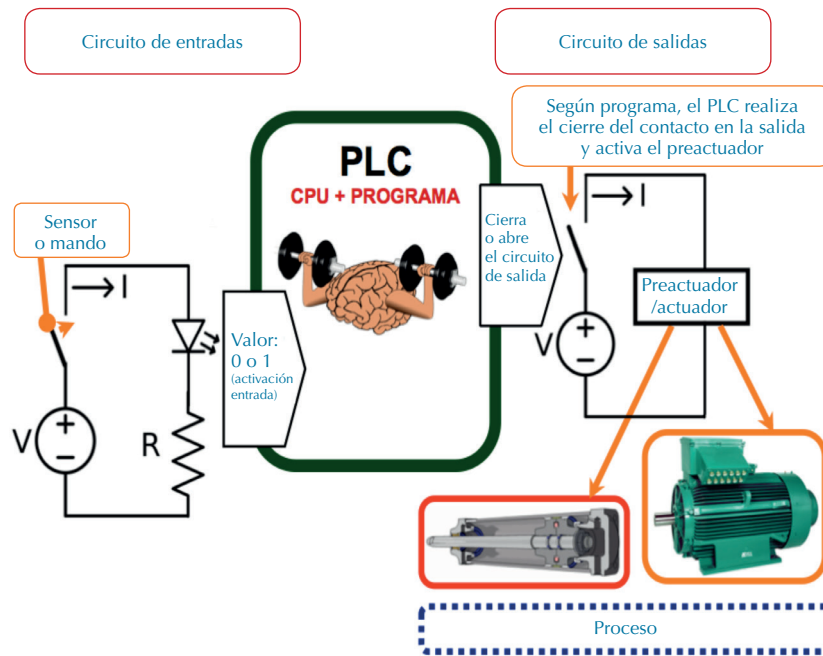


Figura 4.7

Flujo de información y control a través del circuito de entradas y el de salidas.

FUNDAMENTAL 

Conocer la cantidad de entradas y salidas de cualquier tipo (y fundamentalmente las de propósito general) requeridas para la aplicación de automatización es fundamental, pues el PLC empleado en el sistema debe disponer de suficientes en cantidad y tipo.

4.3.2. Circuito eléctrico en las entradas

Como indica la definición previa, mayoritariamente, la variación de tensión eléctrica se emplea en un circuito que produce una corriente para emitir una señal desde un punto y percibirla en otro. Por lo tanto, para el uso de una señal eléctrica, siempre se requiere un circuito eléctrico con sus tres componentes necesarios:

1. Una fuerza electromotriz.
2. Una carga con caída de tensión.
3. Un camino cerrado conductor para la circulación de corriente.

Para entender el conexionado de este circuito, es necesario conocer y entender la configuración de tensiones eléctricas y conexiones y la naturaleza de los elementos en la entrada o en la salida, aspectos que se estudian a continuación.

RECUERDA

- ✓ En el circuito eléctrico de las entradas del PLC binarias de propósito general, los sensores suelen funcionar en CC y, para este tipo de circuito, están preparadas las entradas del PLC. Dentro de la configuración en CC, existen dos configuraciones: PNP y NPN.

A) Qué es PNP y NPN en las entradas de un PLC

Lo que caracteriza a la configuración PNP o NPN es el sentido de circulación de corriente en el circuito.

PNP implica que el retorno del circuito (conexión al nivel bajo de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas) se hace por el común del bornero de entradas del PLC, según indica la figura 4.8. Para ello, se conectará dicho común al negativo de la fuente de alimentación y se completará cada circuito de entrada y su sensor o mando desde el común a través del pin de entrada; después, el propio sensor o mando, y, tras este, el positivo de la fuente de alimentación. En ocasiones, el PLC se alimenta a 230 V en CA e internamente proporciona al común la tensión en corriente continua adecuada. También es posible que haya borneros de entradas con más de un común.

NPN implica que dicho retorno se hace por los propios pines de entrada y que el común se conecta al nivel alto de tensión (positivo) de la fuente de alimentación del circuito de entradas. Se completa el lazo de cada circuito de entrada y su sensor o mando desde el común a través del pin de entrada; después, el propio sensor o mando, y, finalmente, el negativo de la fuente de alimentación (figura 4.9).



TOMA NOTA

El concepto *PNP-NPN* es importante, pues, aunque el PLC acepta ambos tipos de conexión en las entradas, solo lo hace para cada agrupación de entradas en un común. Si, por ejemplo, solo hay un común de entradas, todos los sensores deben ser PNP o NPN. Debe elegirse *a priori* tanto para la selección de sensores (para dispositivos de entrada electrónicos a tres hilos) como para la configuración del circuito a cablear. PNP es la configuración más empleada en Europa.

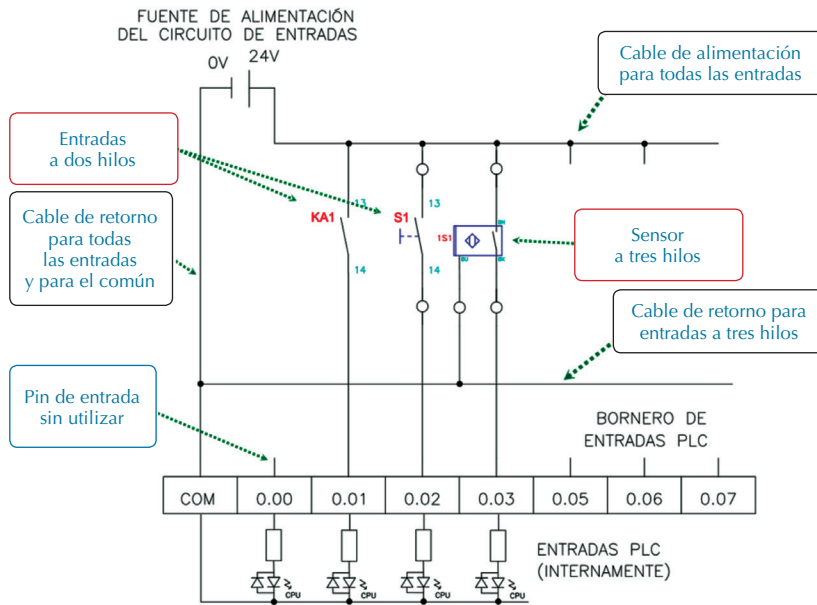


Figura 4.8
Circuito de entradas con configuración PNP.

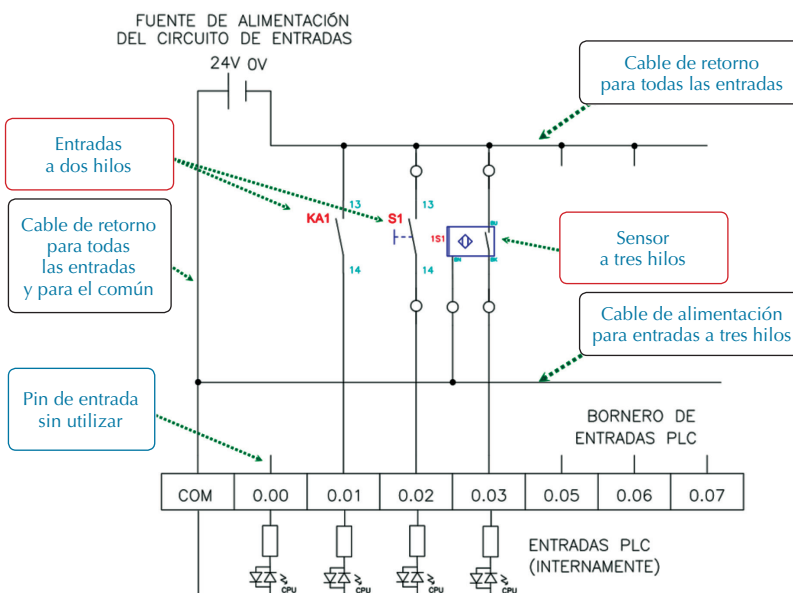


Figura 4.9
Circuito de entradas con configuración NPN.

B) Elementos del circuito de entradas

A continuación, se detallan los principales elementos del circuito de entradas:

1. *Alimentación*: de forma mayoritaria, la alimentación del circuito de entradas se realiza a 24 V en corriente continua. Para ello, será necesario disponer de una fuente de estas características conectada como muestran las figuras.
2. *Elementos de conexión a la entrada a dos hilos y a tres hilos*: se trata del mando o sensor que cerrará o abrirá este circuito para que circule o no circule corriente.

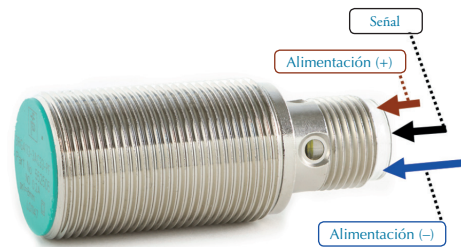


Figura 4.10
Sensor inductivo de proximidad
y colores de cableado.

- a) *A dos hilos PNP*: como indica su denominación, solo dispone de dos conexiones. Por un lado, se conectará al nivel alto de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas. Por el otro, se conectará al pin de entrada asignado a dicho elemento (un pulsador, un final de carrera, un detector inductivo, etc.). Estos dispositivos pueden ser electromecánicos (pulsador, final de carrera, etc.) o electrónicos, pero solo dejarán pasar una significativa cantidad de corriente al cerrarse si son normalmente abiertos (NA) o al abrirse si son normalmente cerrados (NC). De ser electromecánicos, se pueden configurar también como NPN.
- b) *A dos hilos NPN*: en caso de ser electromagnéticos, son los mismos detectores, pero modificando la configuración a conexión a NPN. Por un lado, se conectará al nivel bajo de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas (retorno). Por el otro lado, se conectará al pin de entrada asignado a dicho elemento.
- c) *A tres hilos PNP*: en este caso, dispone de tres conexiones, normalmente identificadas con los colores marrón, azul y negro. Por un lado, el cable marrón se conectará al nivel alto de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas. Es el cable de alimentación. El cable azul también es de alimentación y se conectará al nivel bajo de tensión de la fuente de alimentación del mismo circuito. Por último, el cable negro se conectará al pin de entrada asignado a dicho elemento (un pulsador, un final de carrera, un detector inductivo, etc.). Estos dispositivos son electrónicos y dejarán pasar por el cable negro una significativa cantidad de corriente al activarse o desactivarse (de nuevo, dependiendo de si son NA o NC). Si el detector es NA en caso de no detectar (sin activación) el cable negro estará a 0V CC. Al detectar (con activación) el cable negro se pondrá a 24V CC.
- c) *A tres hilos NPN*: en este caso, las conexiones de los tres cables no varían, el cable marrón se conectará al nivel alto de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas; el azul, al nivel bajo de tensión, y el cable negro se conectará al pin de entrada asignado al elemento de entrada. La diferencia es que la electrónica interna está diseñada para aportar niveles de tensión

opuestos a la configuración PNP, de modo que la intensidad circulará en el otro sentido cuando haya activación. Si el detector es normalmente abierto, en caso de no detectar (sin activación), el cable negro estará a 24 V en CC. Al detectar (con activación), el cable negro se pondrá a 0 V en CC.

Ejemplo

Un detector de proximidad a tres hilos NA (normalmente abierto) detectará la presencia de algún elemento en su cercanía con el siguiente funcionamiento:

- *El detector no se activa al no detectar presencia:* con las conexiones descritas y mediante su electrónica, el detector colocará un valor cercano a 0 V en su cable negro cuando esté desactivado (cuando no detecte presencia de ningún objeto). Como el común está conectado a 0 V de la fuente de alimentación, no hay diferencia de potencial entre el común y el pin de la entrada al que está conectado el cable negro del detector. Como no hay diferencia de potencial, no circula corriente y la CPU interpreta un estado de no activación o un 0 binario.
- *El detector se activa al detectar presencia:* en este caso, el detector colocará un valor cercano a 24 V en su cable negro al activarse por detectar presencia de un objeto. Como el común está conectado a 0 V de la fuente de alimentación, hay una diferencia de potencial entre el común y el pin de la entrada al que está conectado el cable negro del detector, de 24 V. Esta diferencia de potencial produce la circulación de corriente y la CPU interpreta un estado de activación o un 1 binario.

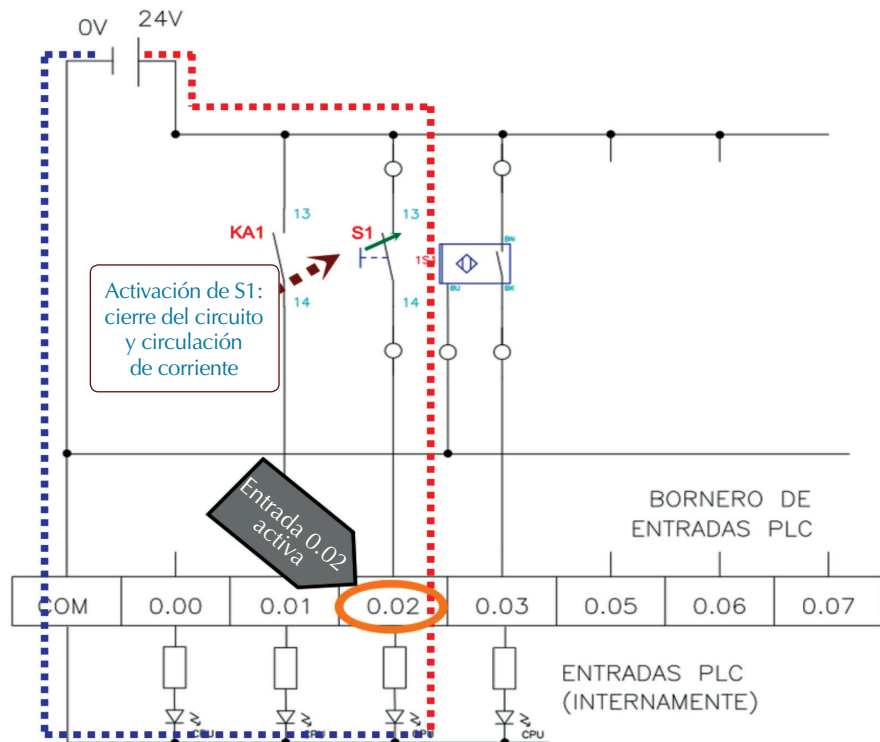


Figura 4.11
Activación de la entrada en un circuito de entradas con configuración PNP.

3. *Pines de entrada del PLC*: en los pines de conexión del bornero de entradas, existen pines etiquetados de modo diferente. Estos pines están cableados internamente con otro pin u otros pines presentes en las entradas (pin o pines comunes) a través de un circuito electrónico interno. Este circuito electrónico interno indicará a la CPU si circula corriente cuando el dispositivo en la entrada correspondiente cierre el circuito. a) , por ser electrónica, difiere de una configuración PNP a una configuración NPN. Se observa que los pines de entrada están identificados con una numeración que permite distinguirlos entre sí.
4. *Pin (o pines) común de las entradas*: es como el colector de la corriente que circula por las entradas activadas (pines por las que circula corriente), conectado a todos ellos internamente al PLC. Externamente, deberá conectarse a:
 - a) *La configuración PNP*: nivel bajo de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas.
 - b) *La configuración NPN*: nivel alto de tensión de la fuente de alimentación del circuito de entradas.
 - c) *La configuración CA*: al terminal opuesto al de alimentación de los sensores trabajando con corriente alterna.

Según los fabricantes, podemos ver que, en el bornero de entradas, no hay pin etiquetado como *común*, sino con otra denominación, pero necesariamente deberá haber pines etiquetados para la conexión de la alimentación en CC de 0 y 24V.

RECUERDA

- ✓ El etiquetado de los pines de conexión de las entradas identifica a la entrada respecto a las demás y también en el programa del PLC y la vincula al sensor o mando pertinente y que esté conectado a dicho pin.

Internamente, según la configuración PNP o NPN de las entradas del PLC, la corriente circulará en un sentido u otro (y las entradas deberán estar cableadas correctamente). En otras ocasiones, puede haber más de un común, cada uno agrupando a un conjunto de entradas.

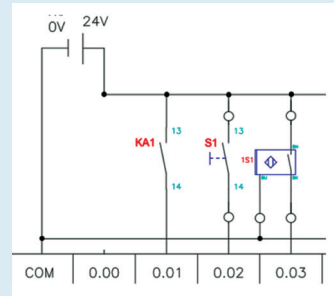
5. *Electrónica de las entradas*: internamente, tras cada pin de entrada, un circuito electrónico realiza una separación eléctrica entre la electrónica del PLC que informa a la CPU de la activación de la entrada y el circuito de entradas conectadas a los captadores. Esta separación se hace mediante acoplamiento óptico (cada señal se aísla eléctricamente mediante optoacoplador, que permite la transferencia de una señal óptica entre el circuito exterior y el circuito interior sin conexión eléctrica). De este modo, las entradas conectadas a la CPU se encuentran a salvo de posibles defectos en los circuitos exteriores.

Esta electrónica se encuentra preparada para configuración PNP o NPN, puede que ambas o incluso corriente alterna. Como se ha comentado, lo más habitual es que las entradas trabajen en CC y, dentro de esta, la configuración PNP.

Actividad propuesta 4.2



Indica el color del cableado del sensor a tres hilos del siguiente esquema.



4.3.3. Clasificación de las entradas disponibles en el PLC según su funcionalidad

En el apartado anterior, se hemos tratado la conexión de las entradas estándar o de propósito general, que son las mayoritariamente disponibles en los PLC. Según su funcionalidad, existen otros tipos de entrada. Según la función y naturaleza de la alimentación, puede establecerse la clasificación mostrada en el cuadro 4.1.

CUADRO 4.1
Clasificación de entradas en el PLC según su funcionalidad

Entradas digitales ON/OFF de propósito general	<p>La mayoría de los pines de entrada del PLC son de este tipo. Pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Para CC.</i> Son lo más habitual. Las entradas estándar, de propósito general, emplean esta alimentación y mayoritariamente a 24 V. • <i>Para CA.</i> Poco habituales. El motivo es que los sensores electrónicos (la mayoría actualmente) proporcionan señal en CC. Es habitual encontrar estas entradas para conexión directa de finales de carrera electromecánicos con circuitos conectados a 230 V en alterna en automatización sencilla (control de final de recorrido de carros portapiezas o de maquinaria, elevadores, etc.), por ejemplo en relés programables. • <i>Compatibles con continua y alterna:</i> de 24 a 230 V (poco habituales).
Entradas analógicas	<p>Son capaces de captar un rango de tensiones o intensidades entre un máximo y un mínimo. Se emplean para convertir un valor de señal analógica de tensión o intensidad recibido en el circuito de la entrada de algún captador analógico en un valor numérico (el autómatas es un dispositivo digital y, por tanto, internamente, solo trabaja con señales digitales y binario) almacenado en una variable interna, contenida en la memoria del PLC. Para ello, el PLC dispone de la electrónica para realizar una conversión analógica digital (A/D).</p>
Entradas especiales	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Entradas de interrupción:</i> son entradas que están habilitadas para disparar interrupciones en el programa. • <i>Entradas de respuesta rápida:</i> para entradas que presentan variaciones de valor importantes para el proceso en muy corto periodo de tiempo. Pueden leer señales de hasta 30 μs, independientemente del ciclo de <i>scan</i>. • <i>Entradas de contador de alta velocidad:</i> suelen emplearse para sensores como encoders, de control de posición y velocidad de ejes con capacidad para contar entradas de pulsos a altísimas frecuencias (hasta 100 kHz).

4.3.4. Circuito eléctrico en las salidas

El circuito de las salidas se basa en que, según sea el programa introducido en el PLC y la activación de las entradas, el PLC debe activar o desactivar preactuadores o actuadores (motores, cilindros neumáticos, hidráulicos, calefactores, etc.). Para ello se construye un circuito, que, de nuevo (igual que con las entradas), para ser tal, deberá disponer de:

1. Alimentación que proporciona con una diferencia de potencial.
2. Una carga donde habrá una caída de potencial (que será el preactuador o actuador).
3. Un camino conductor cerrado para que circule corriente.

FUNDAMENTAL

El control de proceso mediante la realización de acciones sobre sí mismo se consigue alimentando o no preactuadores o actuadores dentro de un circuito, que se cierra por parte del PLC en función de las entradas y de lo que indique el programa introducido.

Se necesita, por tanto, una fuente de diferencia de potencial. Lo interesante es entender que, para la realización de las acciones requeridas, debe activarse el elemento (preactuador o actuador) conectado en el circuito de la salida y, para ello, ha de circular corriente. Para que circule corriente (activación) o no (desactivación), es necesario cerrar o abrir el circuito. Esta última acción es la que realiza el PLC en función de los estímulos en las entradas y el programa (figura 4.12).

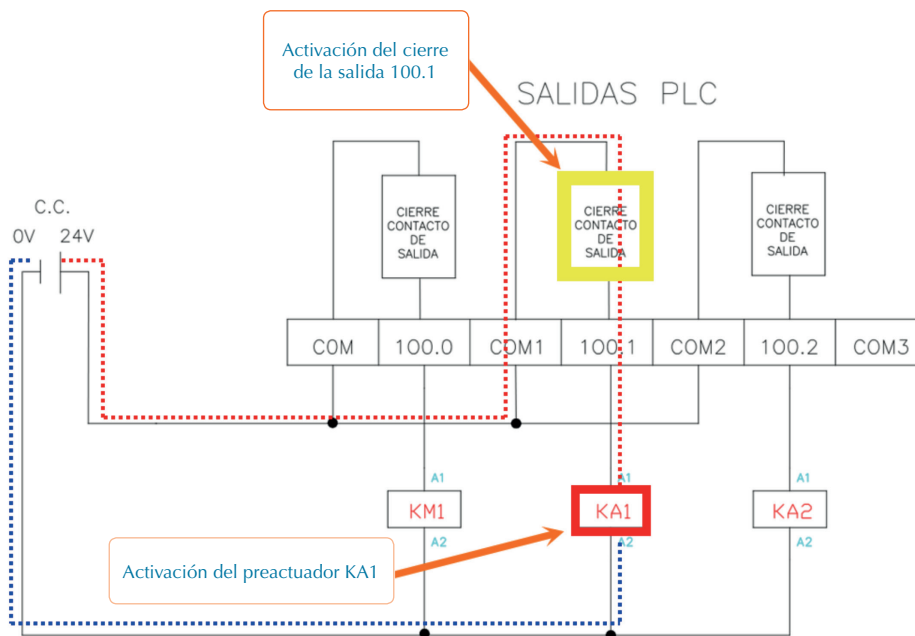


Figura 4.12

Activación del relé KA1, con el cierre de la salida 100.1 en el circuito de salidas.

La carga es el preactuador o actuador que realizará las acciones necesarias para el control del proceso. Por ejemplo, el solenoide de una válvula neumática es el preactuador, que moverá la válvula que, con el flujo de aire, mueve al actuador cilindro neumático. Si estos dispositivos tienen un consumo de potencia excesivo para la especificación de la salida, no podrán conectarse directamente, sino que será necesario hacer una activación indirecta con un relé intermedio. Actualmente, los solenoides industriales sencillos consumen poca potencia, con corrientes por debajo de 200 mA. En cualquier caso, habrá que consultar la ficha del dispositivo para conocer su consumo.

A continuación, se describe la configuración básica de un circuito de salidas destinado a activar preactuadores o actuadores como solenoides de relés, contactores o pilotos, por ejemplo, incluidos para controlar y señalar el proceso. Hay dos aspectos fundamentales que es necesario exponer previamente:

1. *Configuraciones distintas del circuito en función de la circulación de corriente:* en este caso, se trata de una situación similar al circuito de las entradas en función de la circulación de corriente (figura 4.13).

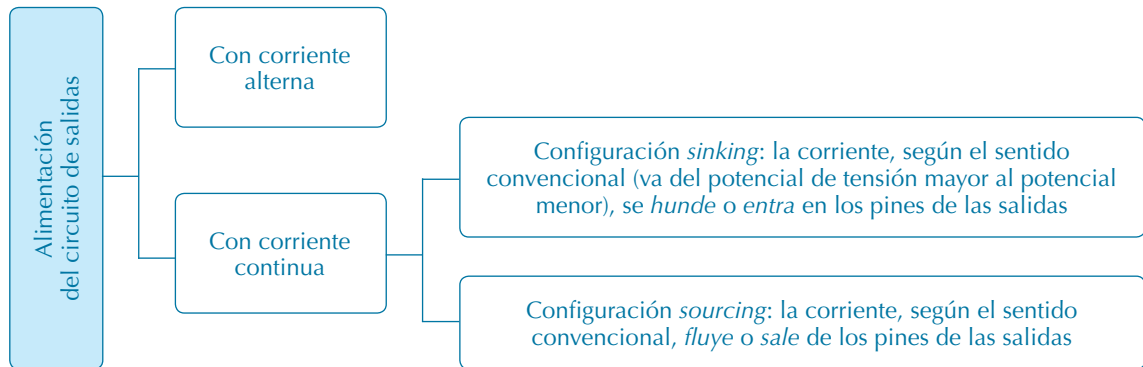


Figura 4.13
Alimentación del circuito de salidas.

2. *Múltiples circuitos de salidas:* en las entradas de un PLC, lo más habitual es que no haya muchos circuitos, incluso normalmente hay solo uno (un único común o unos únicos pines de alimentación de 0 y 24 V en CC). Mayoritariamente, todos los dispositivos de entrada funcionan en corriente continua y a 24 V, por lo que todos ellos pueden alimentarse en el mismo circuito.

Sin embargo, en las salidas, existen dispositivos con alimentación de muy variadas formas y niveles: 230V en corriente alterna; 24 V en corriente alterna; 5, 12, 24 y 48 V en corriente continua, etc. Por ello, los fabricantes proporcionan siempre la posibilidad de configurar diferentes circuitos individuales, como se ve a continuación, con múltiples comunes en los pines de salidas.

A) Circuito eléctrico de las salidas del PLC binarias de propósito general

En la figura 4.14, se muestran las tres configuraciones posibles según la circulación de corriente, con tres circuitos independientes configurados en un mismo bornero de salidas de PLC.

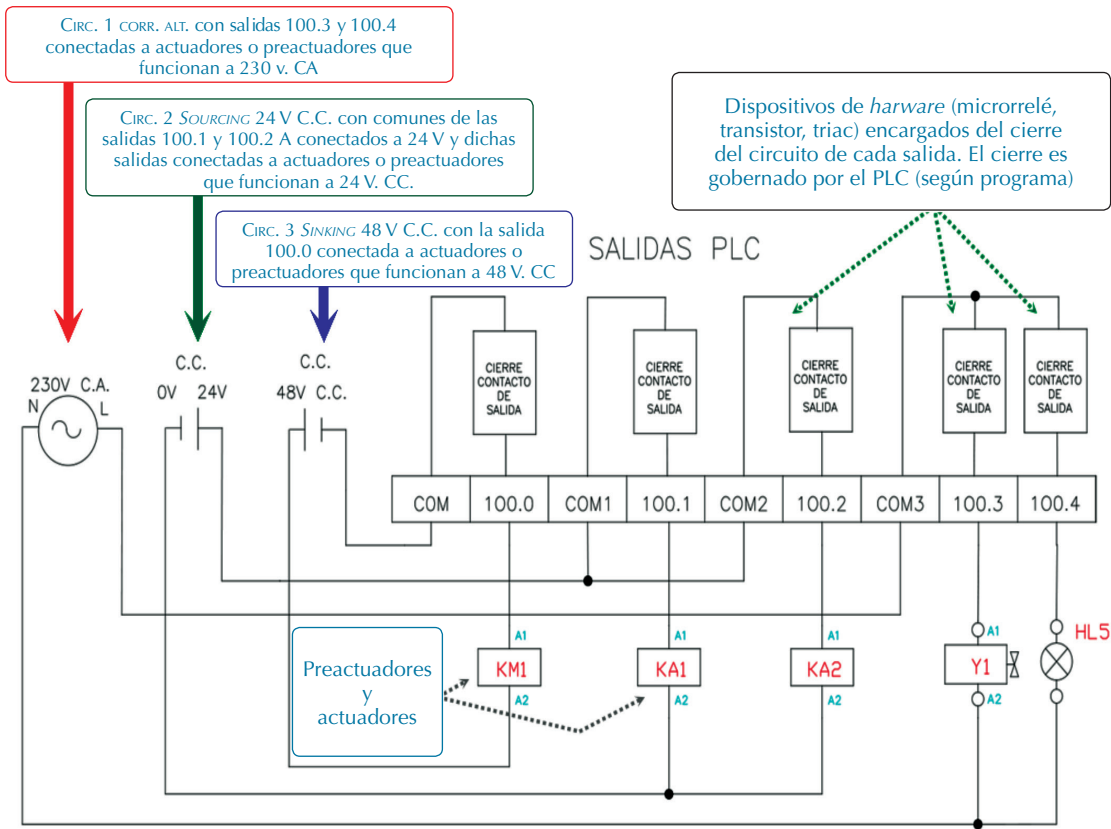


Figura 4.14

Circuitos de salidas con configuraciones para corriente alterna (circuito 1), corriente continua sourcing (circuito 2) y corriente continua sinking (circuito 3).

B) Elementos del circuito de salidas

Se describen, a continuación, los elementos observados en el circuito de las salidas:

1. *Alimentación*: la alimentación del circuito de salidas puede ser muy variada. A menudo, se realiza a 24 V en corriente continua, pero otros voltajes son habituales también, como, por ejemplo, tensión alterna a 230V en CA. Se emplean distintas tensiones, pues existen y se utilizan preactuadores y actuadores alimentados con una variedad importante de tensiones.

Además, como se ha indicado previamente, al contrario que con las entradas, es habitual disponer de la opción de configurar varios circuitos de salida independientes, cada uno de ellos con una fuente de las características requeridas por los preactuadores y actuadores conectados en dicho circuito. En la figura 4.14, se muestran tres circuitos:

- a) *Circuito 1*: para corriente alterna, con fuente de tensión alterna a 230V.
- b) *Circuito 2*: con fuente de corriente continua a 24V y configuración sourcing.
- c) *Circuito 3*: con fuente de corriente continua a 48V y configuración sinking.

2. *Preactuadores y actuadores*: son la carga del circuito que debe proporcionar la caída de tensión y realizar las acciones necesarias para controlar y ejecutar el proceso. Por ejemplo, cerrar contactos en un circuito de potencia, desplazar la corredera de una válvula neumática para accionar un cilindro, señalar acústica o lumínicamente, etc.
3. *Comunes de las salidas*: estos pines se conectan internamente (conexión por dentro del PLC) con dispositivos de cierre (también internos al PLC) de una o varias salidas y, más allá, con el pin o los pines de dichas salidas. Por ejemplo, el COM1 se conecta internamente (pasando por el dispositivo de cierre) con la salida 100.01 y el COM3 se conecta internamente (pasando por los dispositivos de cierre) con la salida 100.03 y también con la 100.4. Cada agrupación de salidas con un común permite realizar un circuito independiente de los demás, tal como muestra la figura 4.14. Los comunes pueden (igual que en las entradas) presentar otras denominaciones, como *1L*, *2L*, etc., y disposiciones algo distintas según fabricantes y modelos de PLC.
4. *Pines de conexión de las salidas*: estos pines se conectarán, internamente, en el PLC con los dispositivos de cierre de la salida y, externamente, con los preactuadores o actuadores. Están etiquetados para distinguirse las unas de las otras y para poder identificarlas a la hora de programar y también asociarlas a cada preactuador o actuador.



INTERESANTE

El etiquetado de los pines de conexión de las salidas identifica a la salida frente a las otras salidas y con un identificador que estará aso-

ciado al programa y, al mismo tiempo, al preactuador o actuador pertinente que esté conectado a dicho pin.

5. *Dispositivos de cierre del contacto de la salida*: se trata del dispositivo que realiza internamente el cierre para que el circuito pueda conducir corriente y activar el preactuador o el actuador conectado a dicha salida. Suelen estimularse desde el PLC mediante optoacopladores para protección de la electrónica interna en caso de anomalías (igual que con las entradas). Hay varios tipos según su naturaleza de hardware que, además, presentan limitaciones en la configuración de circulación de corriente, que pueden adoptar:
 - a) *Dispositivo relé*: se trata de un microrrelé, un dispositivo igual que un relé, pero más pequeño, con contactos físicos, mecánicos, por lo que acepta cualquier sentido de corriente (continua en ambos sentidos y alterna) y niveles de tensión hasta 230 V en alterna. Por lo tanto, en cuanto a conexión, es la opción más versátil. Con salidas a relé (o microrrelé), podrían configurarse los tres tipos de circuito expuestos: en alterna, *sourcing* y *sinking*. Su corriente nominal es elevada (hasta de 2 o más amperios), por lo que puede conectar directamente muchos actuadores diferentes. Sin embargo, tienen una vida relativamente corta (cantidad de ciclos de operación, aproximadamente 100 000 en carga) y una velocidad de conmutación lenta para algunas aplicaciones.
 - b) *Dispositivo basado en transistor (estado sólido)*: solo acepta CC y en un único sentido, es decir, las salidas a transistor, o son para configuración en CC *sinking*, o son para configuración en CC *sourcing*. Por lo tanto, solo es posible conectar en el circuito de salidas elementos para funcionamiento en CC. Al ser dispositivos en estado sólido, son muchísimo más longevos y ofrecen velocidades de conmutación mucho más elevadas, pero con una corriente nominal del orden de 6

veces inferior a la que ofrece un cierre con microrrelé (del orden de 300 a 500 mA). La baja corriente nominal limita también la cantidad de dispositivos conectables en cuanto a potencia. Además, presentan una cierta caída de tensión (hasta 2V) y una leve corriente de fuga.

- c) *Dispositivo basado en triacs (estado sólido)*: son la elección de estado sólido para corriente alterna. Ofrecen una corriente nominal intermedia entre los valores del microrrelé y el transistor y las ventajas de ambos en estado sólido: alta velocidad de conmutación y larga duración, por lo que pueden trabajar también en corriente alterna. Presentan el inconveniente de una leve caída de tensión y una intensidad mínima requerida en el circuito para su funcionamiento (accionando cargas muy pequeñas, pueden no funcionar correctamente). Además, presentan una leve corriente de fuga.

RECUERDA

- ✓ Siempre deben conectarse preactuadores o actuadores (carga en el circuito de salida) con una potencia de activación (por ejemplo el solenoide de un contactor) por debajo de la intensidad nominal admisible por el dispositivo de cierre (salida del PLC).

Lo habitual es que los dispositivos de cierre incluidos en las salidas de propósito general del PLC sean todas de un solo tipo (relé, triac, transistor *sourcing* o transistor *sinking*) y, según las necesidades, se adquirirá un PLC o módulo de salidas con un tipo u otro.

Sin embargo, la figura 4.14 muestra distintos tipos de circuito en una misma bornera de salidas de un PLC para ilustrar las distintas configuraciones posibles. La configuración de las salidas conectadas al común 3 (COM3) solo será posible cuando los dispositivos de cierre en dichas salidas 100.3 y 100.4 sean de tipo relé o triac, dispositivos de cierre que admiten circulación de corriente en ambos sentidos (en CC y, naturalmente, también alterna).

Si son de tipo transistor, solo admitirán un sentido de circulación de corriente, por lo que la configuración podrá ser solo *sinking* o *sourcing*. En este caso, los diversos comunes servirán para emplear distintos niveles de tensión si se desea, pero la configuración de todos los circuitos en las salidas será coherente con el tipo de salida a transistor del PLC.

Por lo tanto, todas las salidas de propósito general del PLC (ya sean integradas en un PLC compacto o en módulos de ampliación) suelen ser de una única tipología en cuanto al dispositivo de cierre de circuito: o son con microrrelé, o son con transistor *sinking*, o son con transistor *sourcing*, o son con triac. Esto limita *a priori* las posibilidades de configuración del circuito de las salidas, puesto que a transistor solo admite corriente continua y en un único sentido de circulación de corriente. Además, en las salidas a transistor, existen limitaciones de la corriente que puede circular no solo en cuanto al tipo, y sentido sino también en cuanto a la magnitud.



SABÍAS QUE...

Tanto para transistores como para triacs, debido a su naturaleza de estado sólido, hay que tener en cuenta que existe una pequeña caída de tensión y mínima fuga de corriente (en estado de corte OFF) que no existe en los relés (electromecánicos).

Se explica a continuación el funcionamiento de cada una de las tres configuraciones posibles.

1. Circuito 1: se observa una alimentación con fase y neutro en corriente alterna a 230 V

El circuito (figura 4.15) discurre desde L de la alimentación hacia el común 3 (COM3) para alimentar, pasando internamente a través del cierre de contacto de la salida gobernado por el PLC, a Y1 y HL5. En el otro terminal de Y1 y HL5, se tiene el retorno al neutro. En la figura 4.15, se muestra que, cuando el PLC procede al cierre del contacto asociado a la salida 100.3, se produce el cierre del circuito y circula corriente alimentando a Y1.

Esta configuración solo puede llevarse a cabo con dispositivos de cierre de tipo relé y triac.

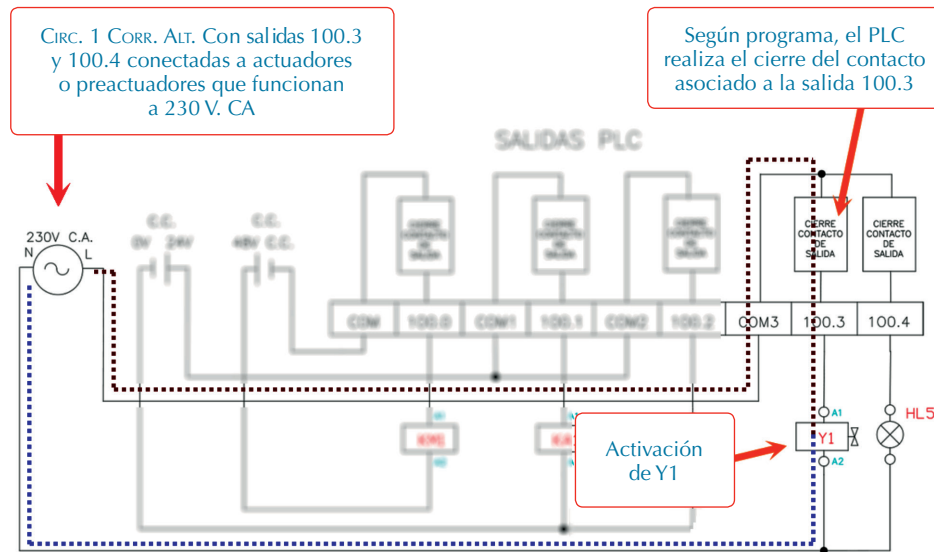


Figura 4.15

Activación del circuito de salida 1 con corriente alterna.

2. Circuito 2: se observa una alimentación con fuente en CC y configuración *sourcing*

El circuito (figura 4.16) discurre desde el positivo de la fuente de alimentación a 24V hacia dos comunes, el COM1 y COM2, pues, en el ejemplo, se emplean dos salidas, la 100.1 y la 100.2, que, conectadas internamente con el común por el dispositivo de cierre, podrán activar con el cierre a los preactuadores KA1 y KA2 (que serán para activación a 24V en CC). En la figura 4.16, se muestra que, cuando el PLC procede al cierre del contacto asociado a la salida 100.2, se produce el cierre del circuito y circula corriente alimentando a KA2.

Esta configuración solo puede llevarse a cabo con dispositivos de cierre de tipo relé, triac y transistor *sourcing*.

3. Circuito 3: se observa una alimentación con fuente en CC y configuración *sinking*

El circuito (figura 4.17) discurre desde el positivo de la fuente de alimentación a 24V hacia el preactuador KM1, su retorno asciende hacia la salida 100.0, que, internamente, conecta con el común COM por el dispositivo de cierre, que, a su vez, se conecta al 0V de la fuente. Con el cierre, se activará KM1 (que será para activación a 24V en CC).

Esta configuración solo puede llevarse a cabo con dispositivos de cierre de tipo relé, triac y transistor *sinking*.

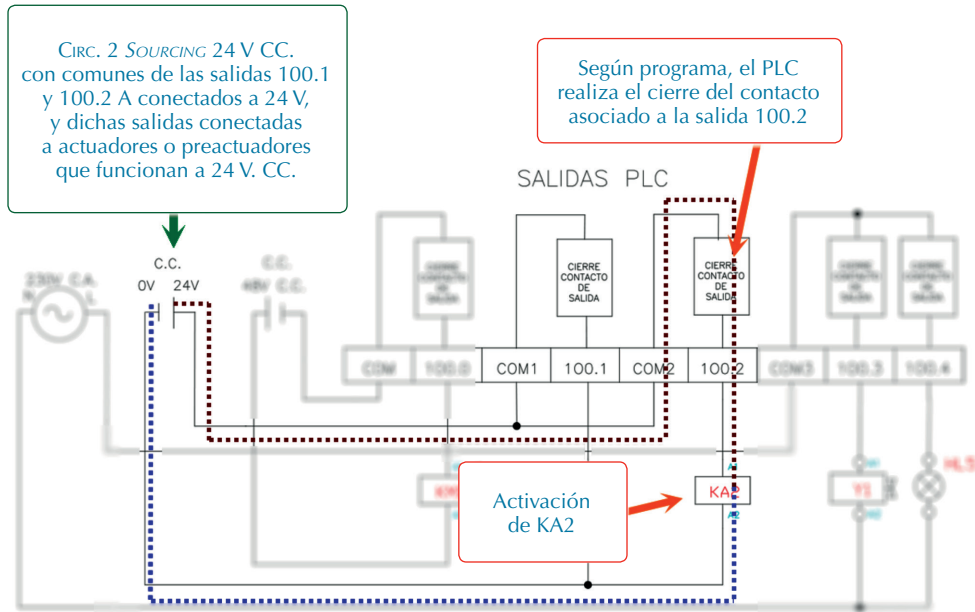


Figura 4.16
Activación del circuito de salida 2 con corriente continua en configuración *sourcing*.

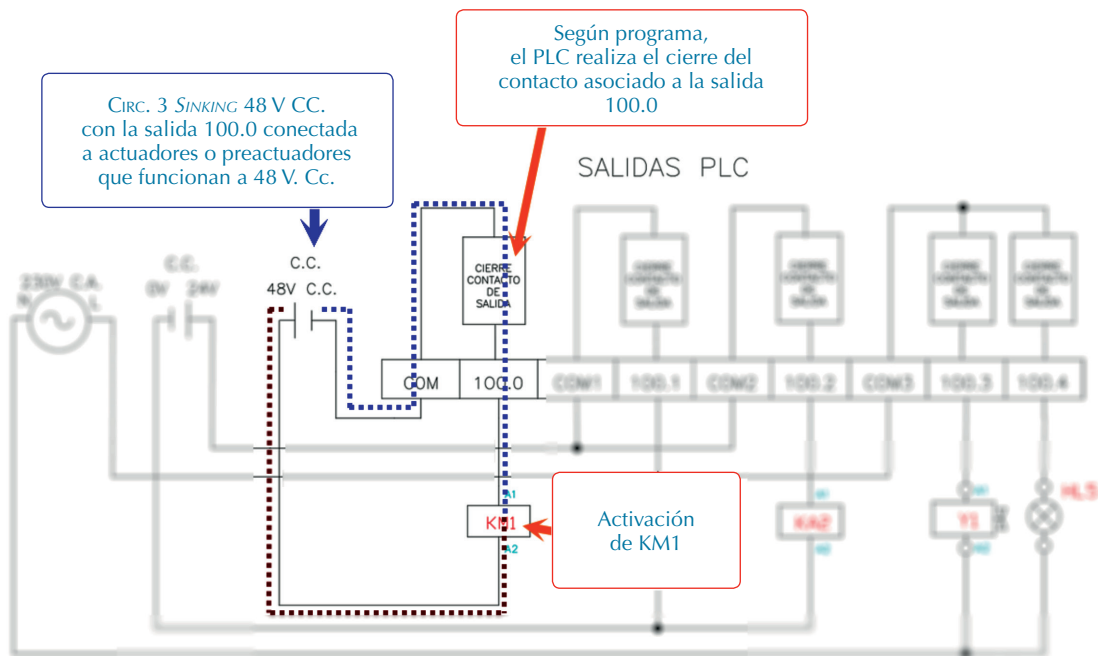


Figura 4.17
Activación del circuito de salida 3 con corriente continua en configuración *sinking*.

4.3.5. Inconvenientes de la conexión directa de preactuadores a las salidas del PLC

Hasta ahora, se han visto las opciones de configuración del circuito de salidas para la activación, directamente con el dispositivo de cierre de la salida del PLC, de solenoides de relés, contactores, válvulas electroneumáticas, pilotos de señalización, etc.

Esto es perfectamente válido y realizable dentro de los parámetros indicados por el fabricante del PLC para las salidas, pero presenta una serie de inconvenientes:

- Deben seleccionarse preactuadores compatibles expresamente con la configuración de las salidas. Por ejemplo, contactores para CC si las salidas del PLC son a transistor *sinking* o *sourcing* y configurar el circuito expresamente.
- Aunque suele haber varios comunes, el número de circuitos configurable es limitado al número de comunes.
- Las potencias de activación de preactuadores y actuadores está muy limitada, especialmente en los dispositivos de cierre de tipo transistor.
- Las salidas de tipo electrónico (sobre todo de tipo transistor) son sensibles a averías con anomalías en el circuito. Por ejemplo, picos de tensión o picos de corriente en la conexión de cargas inductivas. Además, a menudo los circuitos de accionamiento de preactuadores están en el exterior del cuadro (electroválvulas y pilotos), por lo que están expuestos a humedad o cortes por impactos y desgastes por abrasión. Entonces, pueden suceder cortocircuitos o descargas a masa en el circuito al quedar expuestos los núcleos conductores del cable. Estos picos de intensidad pueden ser fatales para una salida del PLC, sobre todo para las salidas a transistor.
- Las salidas a relé de activación electromecánica son sensibles al desgaste con cierres y cortes de potencia y tienen una vida relativamente corta.
- Si se estropea una salida, es difícil y costoso o directamente imposible de reparar (hay que recablear si hay salidas sin usar que queden disponibles y reprogramar).

Todo esto significa que es necesario tener mucha precaución con la potencia y el tipo de preactuador conectado y que una avería en las salidas puede suponer un problema importante. Si, por ejemplo, las salidas comienzan a fallar y hay que sustituir una averiada por otra que estaba vacante, hay que modificar el programa para indicar cuál es la nueva salida en uso. Si deja de haber salidas disponibles, no hay más remedio que sustituir el PLC y recablear. Si el PLC del automatismo está obsoleto (algo posible), será necesario sustituir por un nuevo modelo y adaptar el programa a él. Por ello, se emplea habitualmente una configuración recomendada que se muestra en el siguiente apartado.

4.3.6. Activación indirecta de preactuadores mediante batería de relés borna

Una solución a los problemas expuestos es hacer la activación de preactuadores de forma indirecta con dos esquemas eléctricos:

1. *Esquema de salidas del PLC a batería de relés borna*: conexión de salidas del PLC de tipo transistor a una batería de pequeños relés borna (también puede ser una batería de relés

convencionales), alimentados todos en CC (comunes del bornero de salidas del PLC conectados) con solenoide de bajo consumo, uniformes.

2. *Esquema de preactuadores*: configuración de circuitos con los contactos de potencia de los relés para la activación de preactuadores o actuadores, con fuentes de alimentación aparte, independientes del circuito de salidas del PLC.

RECURSOS ELECTRÓNICOS 4.4 y 4.5 

En el anexo web 4.4, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas que te ayudarán a entender mejor los contenidos desarrollados en el capítulo. Además, en el anexo web 4.5, puedes consultar información sobre las cargas preactuadoras inductivas.

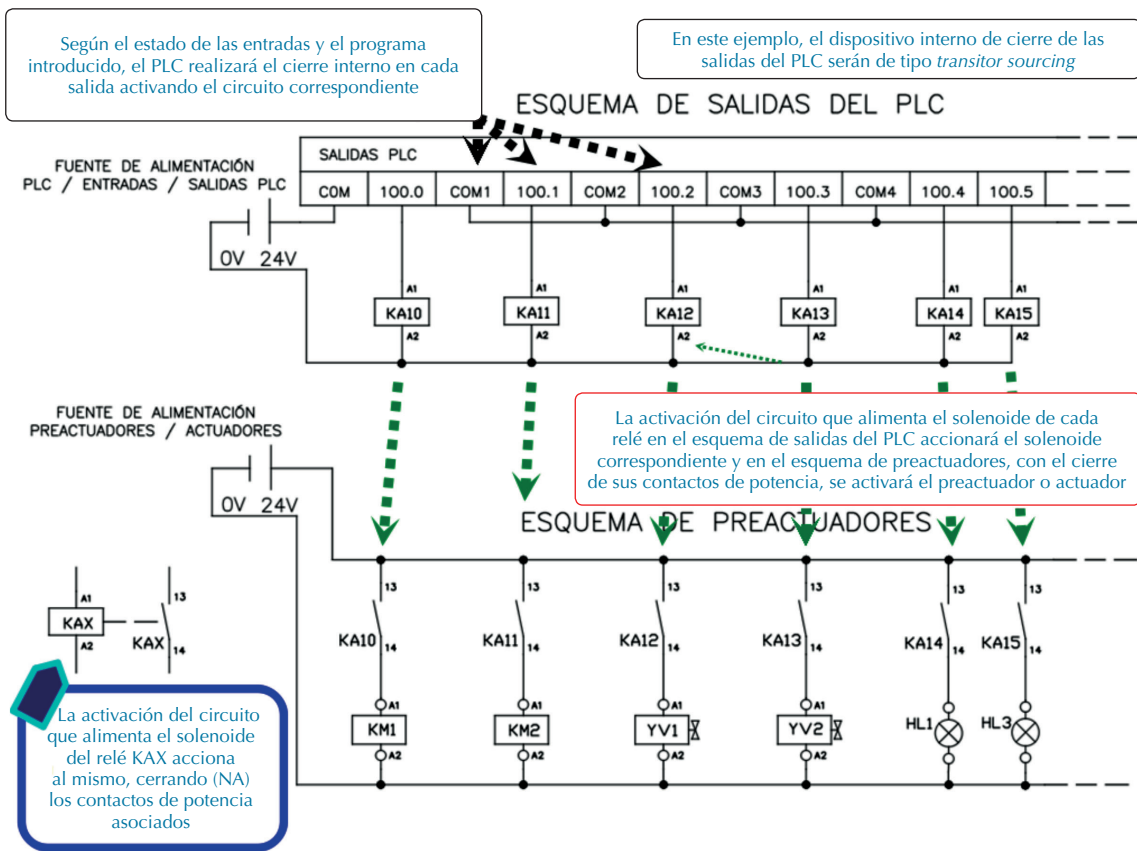


Figura 4.18

Activación indirecta de preactuadores mediante batería de relés borna.

Esta configuración resuelve los problemas indicados previamente con las siguientes características:

- a) Los relés borna son muy compactos y se montan adyacentes al PLC sobre el mismo carril DIN del cuadro eléctrico ocupando poco espacio.
- b) Son fácilmente sustituibles de forma individual si se averían por anomalías o uso.
- c) Son muy económicos.

- d) Están inmediatamente disponibles, pues son un componente muy común.
- e) Su intensidad nominal en los contactos de potencia es de, al menos, 6A, muy superior a la ofrecida habitualmente por cualquier salida disponible en el PLC. Esto permite conectar directamente preactuadores e incluso actuadores de cierta potencia en el esquema de preactuadores.



PARA SABER MÁS

Tanto los circuitos de entrada como de salida pueden presentar problemas eléctricos que dañen la electrónica o los elementos internos del PLC. En el capítulo, se muestran los circuitos sin protección frente a un cortocircuito, pero, en la realización de los esquemas reales y en el cableado real de los circuitos, deberán intercalarse fusibles de protección de un calibre adecuado (algo superior) a la intensidad admisible de los elementos del circuito según su especificación.

- f) El contacto de potencia de cada relé borna puede configurarse en el esquema de preactuadores como un común independiente, por lo que, sobre el papel, pueden configurarse tantos circuitos independientes como relés borna instalados haya.
- g) Se recomienda emplear esta activación indirecta con salidas a transistor. Puede utilizarse con dispositivos de salida de cualquier tipo (relé, triac o transistor) para proteger las salidas del PLC, pero tiene más sentido emplear salidas a transistor, pues son más económicas y tienen una vida (estado sólido) muy longeva.
- h) La activación indirecta presenta el inconveniente de perder la alta velocidad de conmutación de las salidas a transistor, pues la activación del preactuador requiere el tiempo de cierre del relé borna. Para los casos especiales en los que se requiera alta velocidad de conmutación, se emplearán directamente las salidas a transistor (respetando sus especificaciones) o salidas especiales.
- i) Es posible alimentar el circuito de salidas del PLC a relés borna con la misma fuente que alimenta al PLC y al circuito de entradas. La justificación es la siguiente:
 - Los relés borna tienen un solenoide de muy bajo consumo, que no debe perturbar a la alimentación del PLC ni a la lectura de las entradas.
 - Son todos iguales y, por tanto, todas las cargas son uniformes, exponiendo a la misma corriente a todas las salidas.
 - Al configurar este otro circuito independiente del circuito de preactuadores y actuadores, está a salvo de irregularidades debidas a excesiva intensidad o cortocircuitos. Los solenoides de válvulas y contactores, relés grandes, pilotos, etc., serán heterogéneos y con mayor calibre y consumo, además de estar más expuestos a problemas eléctricos por ser externos al cuadro. Este circuito de preactuadores podrá alimentarse según requieran estos en CC, incluso con un robusto transformador y puente de diodos rectificador.



RECURSO ELECTRÓNICO 4.6

En el anexo web 4.6, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, se recoge un esquema que aclara el conjunto de posibilidades de conexión del circuito de entradas y salidas en combinación con opciones de hardware.

4.3.7. Clasificación de las salidas según su funcionalidad

Hasta ahora, se han estudiado las salidas de propósito general, que son la mayoría, pero existen otras disponibles para aplicaciones especiales que se describen brevemente:

1. *Salidas digitales ON/OFF de propósito general*: son las estudiadas hasta ahora y su objetivo es el de la activación o desactivación de preactuadores y actuadores todo o nada (relés, contactores, pilotos, electroválvulas, etc.). Ya se han estudiado previamente:
 - a) *Para CC*: relé, triac y transistor (*sinking* o *sourcing*).
 - b) *Para CA o CC*: relé y triac.
2. *Salidas rápidas*: se caracterizan por tener una muy elevada velocidad de conmutación. Son dispositivos en estado sólido capaces de cambiar de estado miles de veces por segundo. Ofrecen dos funciones características:
 - a) *Tren de pulsos o de impulsos*: la salida de tren de impulsos o pulsos (PTO, del inglés *pulse train output*) es una señal en forma de onda cuadrada de tensión variando entre dos valores, donde la proporción porcentual de tiempo en la que la señal está en valor alto se denomina *factor de trabajo relativo*. En la figura 4.19, el factor de trabajo es del 50%, cambiando (porque así lo dicte el usuario) el tiempo de duración del ciclo y el número de impulsos emitido.

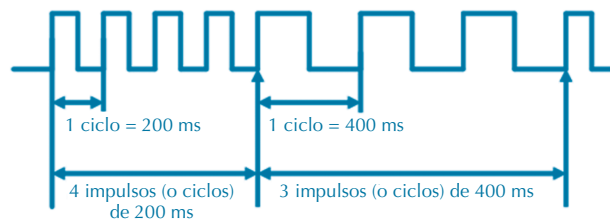


Figura 4.19
Tren de 4 impulsos de periodo 300 ms y de 3 impulsos de 400 ms.

Se utilizan para el control de velocidad de motores (aplicaciones de control de ejes) y de control de motores paso a paso. Una vez acordado entre emisor y receptor el tiempo de ciclo y factor de trabajo, el protagonismo en esta señal es para el número de pulsos.

- b) *Modulación por ancho de impulsos o pulsos (PWM, del inglés pulse width modulation)*. Es similar al previo, donde se emite una salida con un factor de trabajo relativo variable, por lo que el usuario puede controlar el tiempo de ciclo y el ancho de impulso (no el número de impulsos). Se emplea para transmitir información o para regular la cantidad de energía que se envía a una carga. Por ejemplo, la señal de posición de un servomotor, se envía mediante PWM, de modo que, según el factor de trabajo de dicha señal, una electrónica interna, junto con el motor, envían al eje a una posición determinada. Una vez acordado entre emisor y receptor el tiempo de ciclo, el protagonismo en esta señal es para el factor de trabajo.

3. *Salidas analógicas*: capaces de proporcionar un rango de tensiones o intensidades entre un máximo y un mínimo en el circuito configurado con la salida. Se emplean para convertir una variable numérica interna, contenida en la memoria del PLC, en un nivel de tensión o intensidad. Para ello, el PLC dispone de la electrónica para realizar una conversión digital analógica (D/A), dado que el autómatas es un dispositivo digital y, por tanto, internamente, solo trabaja con señales digitales y en binario.

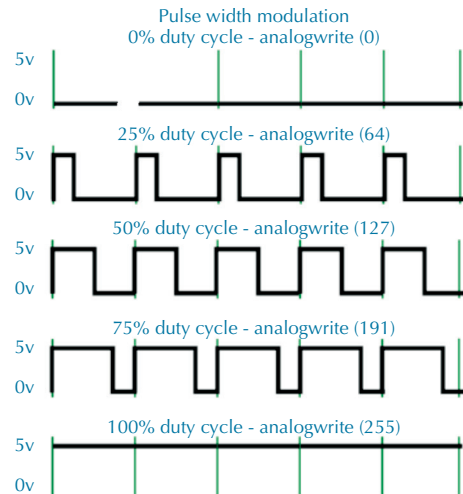


Figura 4.20
Señal PWM con diferentes ciclos de trabajo.

4.3.8. Tratamiento de la señal en entradas y salidas analógicas

Se ha explicado de forma básica lo que es una señal analógica y lo que es su digitalización (señal digital) y su discretización (señal digital discreta). También se ha explicado la existencia de entradas y salidas analógicas. Se desarrolla en este apartado cómo funcionan.

A) Digitalización de una señal analógica de entrada

Se realiza en cuatro etapas, que se explican seguidamente.

1. Señal proporcionada por dispositivos de entrada analógica

Desea medirse o leerse una magnitud determinada, relacionada con el proceso (temperatura, presión, intensidad lumínica, etc.). Esta magnitud es transformada por dispositivos de entrada analógica en un nivel variable y continuo de resistencia, nivel de tensión o un flujo de intensidad. Se trata de dispositivos como termorresistencias, termopares, sensores de presión, etc., que miden flujos, presiones, temperaturas, vibraciones, deformaciones, etc.

La magnitud captada en la entrada analógica suele ser, o intensidad, o tensión, y los valores empleados pueden tener los rangos siguientes:

Intensidad (CC o CA):

- De 0 a 20 mA.
- De 4 a 20 mA.

Tensión (CC):

- De 0 a 5V.
- De 0 a 10V.
- De -5 a +5V.
- De -10 a +10V.
- Menos habituales: de 0 a 1V o de 1 a 5V.

2. Adecuación de señal

El valor de nivel proporcionado tiene que adecuarse a una magnitud (tensión o intensidad) y valores de entrada aceptables para el PLC. Como acaba de indicarse, hay diversos rangos posibles y, si no coincide el proporcionado por el sensor con el aceptado por la entrada analógica del PLC, será necesario un módulo intermedio que adapte una señal a otra. Además algunos sensores tienen rangos de señal analógica no estándar. Por ejemplo, puede tenerse un termopar que aporte un nivel de tensión entre 0 y 20 mV, pero habrá que adecuar el rango a entre 0 y 10 V que acepta la entrada analógica del PLC.

La entrada analógica suele llevar optoacopladores de protección (al igual que las entradas digitales binarias de propósito general).

3. Conversión A/D

Una vez que se recibe el valor convertido al rango adecuado de intensidad o tensión en la entrada analógica del PLC, se convierte la señal a digital por parte de un dispositivo denominado *convertor analógico digital*. Es el que discretiza y digitaliza dicha señal.

Hay dos características fundamentales que caracterizan a un convertidor A/D (analógico/digital) de la entrada o D/A (digital/analógico) de salida:

- a) *Resolución*: dicha cantidad de distintos valores expresada en binario define la resolución con un número de bits. Un convertidor con una resolución de N bits puede distinguir $2N$ distintos valores analógicos (N bits disponibles para generar las divisiones posibles a realizar sobre el rango). Lo habitual es disponer de una resolución de entre 8 y 16 bits. No se corresponde exactamente con la precisión, pues hay otras características de los convertidores muy importantes, pero sí tiene mucho peso en ella.
- b) *Frecuencia de muestreo*: es la máxima frecuencia a la cual las lecturas analógicas pueden ser continuamente convertidas a valores discretos, o a la inversa. El periodo de muestreo indica cada cuánto tiempo se realiza una lectura o escritura de la señal, el tiempo transcurrido (periodo) entre dos valores de la conversión analógica-digital, o inversa. Es muy variable según las necesidades de la aplicación.

Al finalizar el paso 3, tienen lugar dos operaciones que vale la pena estudiar:

- a) *Normalizado*. Los valores de entrada analógica registrados en forma digitalizada no se ajustan a menudo al rango completo de valores disponibles (figura 4.21a). Por ejemplo, un termistor, una vez captada su señal, digitalizada y almacenada en valores, puede ofrecer un rango entre 400 y 1023, mientras que otro modelo puede dar valores entre 50 y 612. Para tener valores coherentes de las entradas analógicas entre diversos sensores, se realiza una conversión para que, en todos los casos, se obtenga un valor entre 0 y 1: 0 para el valor mínimo y 1 para el máximo. Eso es el normalizado.

$$\text{Valor normalizado} = (\text{valor de entrada} - \text{mínimo}) / (\text{máximo} - \text{mínimo})$$

Si desea trabajarse con la mayor exactitud posible, en la normalización, deben transformarse los valores al tipo de datos disponible en el PLC de mayor precisión (REAL) para minimizar los errores de redondeo.

- b) *Escalado*. Una vez que se dispone del valor normalizado (entre 0 y 1), es posible que se requiera trabajar igualmente con valores que estén dentro de un rango específico (figura 4.21b). Será conveniente convertir numéricamente este rango entre 0 y 1 a otro rango determinado entre un mínimo y un máximo.

$$\text{Valor de salida} = [\text{valor entrada (norm.)} \cdot (\text{máximo} - \text{mínimo})] + \text{mínimo}$$

Aunque las fórmulas para ambas operaciones son sencillas, los PLC suelen incorporar instrucciones directas para el normalizado y el escalado. Así, estas operaciones se realizan directamente y dan los datos en la entrada de la instrucción y el resultado normalizado o escalado en la salida de esta. A menudo, el proceso de normalizado y escalado conjunto se denomina *mapeado*.

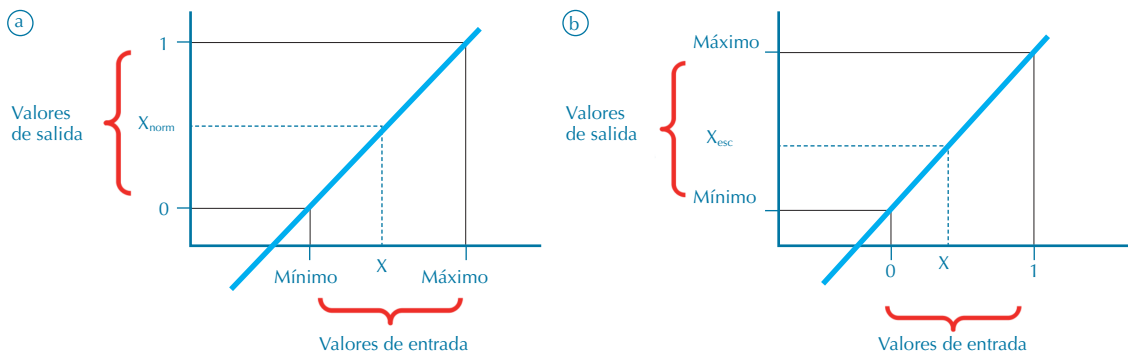


Figura 4.21
Normalizado (a) y escalado (b).

4. Utilización de los datos de la magnitud captada

Finalmente, el PLC dispone de la información almacenada para, a través del programa, emplearla para tomar las decisiones adecuadas y ejecutar, a través de las salidas, las acciones necesarias para el proceso.

B) Señal analógica de salida a partir de valores digitales

En cuanto a las salidas, el procedimiento es similar, pero a la inversa:

1. *Disposición de los datos para su utilización*. En la memoria del PLC, se dispone de datos que desean convertirse en una acción analógica.
2. *Conversión D/A*. El convertidor D/A (digital/analógico) leerá, de los datos disponibles, un conjunto de valores dentro de un rango y lo traducirá, por ejemplo, en una tensión en la salida analógica. La salida analógica no será tal (no será continua), pues el PLC es digital, pero el número de valores (resolución) e intervalo de tiempo de variación (muestreo) serán suficientes, como para que, a efectos prácticos, la señal sea igualmente válida que una analógica continua. Es decir, el PLC generará una señal escalonada (digital), imitando con suficiente resolución a una salida analógica.
3. *Adecuación de la señal al estímulo en el actuador*. Habitualmente, la tensión o intensidad variable ofrecida por la salida analógica sirve de referencia a actuadores que admitan

señal analógica y que transformen dicha referencia en una forma de potencia destinada al actuador adecuado. Por ejemplo, un emisor de luz variable requerirá un dispositivo que transforme los niveles de tensión de una salida analógica a niveles de tensión o intensidad de potencia adecuados en la fuente de luz. Otro ejemplo pueden ser válvulas proporcionales que regulen un caudal, variadores de velocidad, reguladores de temperatura, etc.

En definitiva, las entradas y salidas analógicas hacen la conversión entre valores variables de una señal eléctrica analógica y valores numéricos en el programa del PLC (con limitaciones de precisión en la conversión en ambos casos).

Este tipo de señales (captadores de temperatura, velocidad, etc., y actuadores progresivos para emisión de calor, regulación de velocidad etc.) y situaciones de control son característicos de control y regulación de procesos continuos.

4.4. Otros componentes del PLC

Tras estudiar las entradas y salidas del PLC, es interesante conocer otros elementos internos que también afectan a sus características y funcionalidad.

Internamente, disponen de muchos componentes, pero un esquema de aquellos más importantes, aparte de entradas y salidas, podría ser el siguiente (figura 4.22):

1. *Alimentación*: la entrada de potencia o alimentación eléctrica al PLC.
2. *CPU*: es el cerebro del PLC.
3. *Firmware*: el primer programa que se ejecuta en el encendido y que gobierna el primer funcionamiento del PLC.
4. *Reloj*: es el dispositivo que define la velocidad de operación de la CPU y, por tanto, se relaciona con su velocidad.
5. *Puertos de comunicación y expansión*: los primeros son puertos que permiten realizar la comunicación del PLC con otros PLC u otros dispositivos durante el control de los procesos. También conectan con el PC para su configuración programación. Los segundos son conectores a los que es posible acoplar elementos o módulos que amplían las capacidades o funcionalidad del PLC.
6. *Memoria*: espacio electrónico de almacenamiento. Incluye distintos tipos entre los que destacan:
 - a) *Random access memory*: memoria rápida volátil, empleada para almacenamiento en tiempos cortos que sirven al procesamiento de datos por la CPU.
 - b) *Memoria de programa*: almacena las líneas de programa.
 - c) *Memoria de datos y marcas y su organización*: almacena toda la información del proceso y de las variables del programa.
 - d) *Zonas de memoria y variación de designación según función*: es importante para cada PLC y fabricante conocer qué funcionalidad indica cada zona de memoria con una designación específica y la forma de organizar dichas zonas para poder direccionar, escribir y leer cualquier dato almacenado.

La arquitectura funcional de un PLC es internamente similar a la de cualquier ordenador.

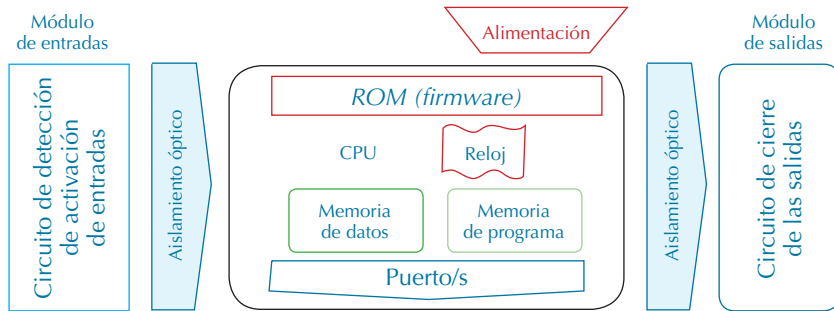


Figura 4.22
Estructura interna básica del PLC.



RECURSO ELECTRÓNICO 4.7

En el anexo 4.7, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, se desarrolla una explicación más detallada de los diferentes componentes mencionados en el apartado 4.4. Por su especial importancia, se explican aspectos particulares de la memoria de datos del PLC y su organización.

4.5. Modos de operación y ciclo de scan

4.5.1. Modos de operación

En el funcionamiento del PLC, necesariamente, debe existir un modo de trabajo con gobierno de la máquina controlada y otro modo de configuración, en el que se modifique el programa y, por tanto, no esté trabajando (son modos excluyentes). Según los fabricantes, hay algún modo más, pero los dos que se explican a continuación son muy habituales.

Los principales modos de operación se recogen en el cuadro 4.2.

CUADRO 4.2

Modos de operación

Modo stop/program	Modo run
<p>En este modo, no se ejecuta el programa de control. No se tienen en cuenta entradas ni se cierran las salidas. No se gobierna la máquina. Su objetivo es programar y modificar dicho programa, por lo que, lógicamente, es incompatible con su ejecución. Se empleará este modo para grabar el programa ejecutado en la memoria de programa del PLC transfiriéndolo desde el PC en el que se trabaja con la <i>suite</i> de software del fabricante.</p>	<p>En este modo, el programa de control está ejecutándose constantemente, salvo que se pase el PLC al modo <i>stop/program</i> o se pierda la alimentación y el equipo se apague. No es posible en modo <i>run</i> modificar el programa, aunque relacionado con este modo existe la posibilidad de activar la monitorización o de visualizar la ejecución de este línea a línea en un PC conectado, desde el software de programación y configuración. Esta opción es importante en las etapas iniciales de puesta a punto o en mejoras y modificación de programa, pues permite visualizar y entender qué sucede en el programa cuando hay comportamientos no deseados. En monitorización, en ocasiones, puede modificarse algún parámetro desde el software, como forzar marcas de la memoria, incluyendo entradas y salidas.</p>

4.5.2. Ciclo de scan

Cuando el autómatas se encuentra en modo *run*, la ejecución del programa de control se realiza cíclicamente siguiendo lo que se denomina *ciclo de scan*.

Un ciclo de *scan* es un brevísimo intervalo de tiempo en el que el PLC realiza un ciclo de trabajo que se repite constantemente y que consiste, básicamente, en ejecutar (en cada ciclo) las siguientes cuatro etapas (figura 4.23), que se desarrollan a continuación.

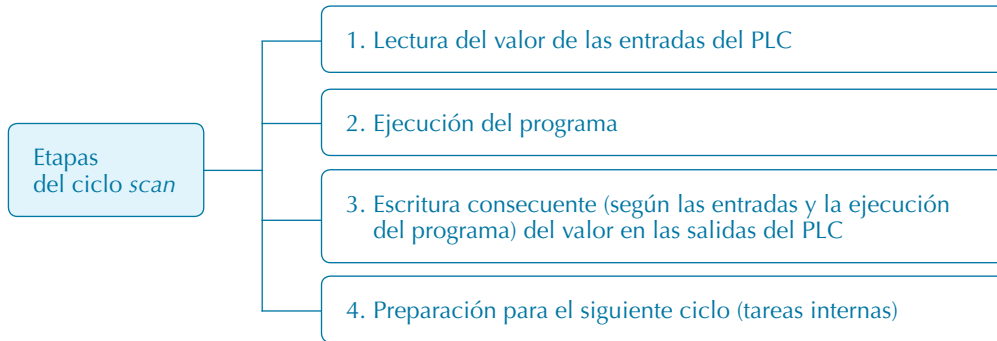


Figura 4.23
Etapas del ciclo de scan.

A) 1.ª Etapa: lectura de valor de entradas del PLC

Al iniciar cada ciclo de *scan*, el *firmware* del PLC comprueba el estado de todos los circuitos de la entrada. Esto equivale a evaluar la activación o no (según sean NA o NC) de todos los sensores y mandos (pulsadores, por ejemplo) conectados a estos circuitos. Si circula corriente en el circuito correspondiente a un sensor determinado (activado siendo NA o desactivado siendo NC), el PLC escribe un 1 en la posición de la memoria de entradas correspondiente al pin de entrada en el que está configurado el circuito. Si, por el contrario, ese circuito no está activado, entonces, el PLC escribe 0 en dicha posición de memoria de entradas. Si el sensor conectado es analógico, a un circuito con una entrada analógica, escribe en binario el valor numérico obtenido tras el discretizado y digitalizado obtenido del convertidor D/A, en la zona de memoria de entradas analógicas.

TOMA NOTA



Si una vez que ha comenzado a ejecutarse el programa de control y pasada esta etapa de lectura de las entradas, algún sensor del proceso cambia de valor. Este nuevo valor no se tiene en cuenta en la ejecución del programa y no cambiaría, por tanto, la entrada en dicha ejecución hasta la siguiente lectura de entradas. No se tendrían en cuenta estos cambios hasta el siguiente ciclo. Este funcionamiento permite evitar contradicciones en el programa, pues, si se necesita el valor de la entrada en etapas distintas del programa, tendría un valor al principio y otro distinto al final. Pero también tiene un inconveniente: si los cambios de dicha entrada son fundamentales para el proceso, esto debe tenerse en cuenta y procurar un tiempo de ciclo muy corto y otras soluciones (como, por ejemplo, emplear una entrada rápida o de interrupción).

Esta operación de lectura de las entradas requiere tiempo, que suele ser muy breve con respecto a la duración de la ejecución del programa de control, pero que deberá tenerse en cuenta para conocer el tiempo de ciclo de *scan*.

B) 2.ª Etapa: ejecución del programa

Una vez que la memoria de entradas ha sido actualizada con los valores de activación de sus circuitos, el PLC ejecuta el programa secuencialmente desde la primera instrucción, considerando los valores de dicha memoria de entradas.

La ejecución del programa es secuencial: instrucción a instrucción, línea a línea. Esto no significa que no pueda haber saltos de unos puntos a otros del programa o que no puedan ejecutarse interrupciones o subrutinas.

Si el programa no está bien realizado, es posible entrar en bucles de los que no hay salida y que paralizan la ejecución del programa en dicho bucle en torno a un grupo de líneas de programa. Este *bloqueo* siempre es indeseable, pero más aún si está controlándose un proceso industrial con toda la responsabilidad que ello conlleva, pues puede echar a perder producto, dañar la máquina o incluso resultar peligroso para las personas. El PLC puede detectar esta situación mediante una herramienta denominada *watchdog* y provocar la salida de este bucle. Un *watchdog* o temporizador de vigilancia es un temporizador que se restablece (pone a cero) periódicamente por el PLC y que, de lo contrario, acumula un tiempo de espera. Si, debido a un fallo de hardware o un error de programa, el PLC no restablece el *watchdog*, el temporizador alcanza su límite de tiempo y genera una señal para iniciar acciones correctivas: colocar el sistema en un estado seguro y restaurar el funcionamiento normal del sistema.

La ejecución del programa de control irá asignando valores a la memoria de datos del PLC que van modificándose a medida que se avanza. Dentro de esta memoria de datos, está el área de memoria de las salidas, que son fundamentales, pues cerrarán los circuitos que activen preactuadores y que, con los actuadores, realizarán las acciones sobre el proceso.

El tiempo de ejecución del programa dependerá de su longitud y su complejidad, así como de la velocidad de la CPU del PLC.

Cuando el programa es de un tamaño grande, hay que asegurarse de que, en el PLC, hay memoria suficiente disponible (aunque esto es una limitación más del pasado, pues ahora suele haber mucho espacio de memoria de programa).

C) 3.ª Etapa: escritura de los valores resultado del programa y las entradas en las salidas

Al finalizar la ejecución del programa de control, el PLC relaciona los dispositivos de cierre presentes en las salidas con los valores de su memoria de salidas. Si, en una posición de memoria correspondiente a un pin en el que hay configurado un preactuador, hay un valor de 1, realiza el cierre del dispositivo de cierre y, con una configuración correcta del circuito, se accionará dicho preactuador. Las señales analógicas de salida son datos, resultantes también de la ejecución del programa, que se convertirán en valores determinados de corriente y tensión por medio del convertidor D/A para generar alguna acción proporcional de control.

Igual que en el caso de lectura de entradas, la duración de esta etapa es corta comparada con el de la ejecución del programa de control.

D) 4.ª Etapa: preparación para el siguiente ciclo

Esta etapa, en ocasiones, no se considera tal, pues su duración es despreciable, pero, tras la realización de las tres previas, es necesario realizar algunas tareas internas. Por ejemplo, resetear el *watchdog*, guardar datos de algún error si se ha producido, poner a cero determinados valores, etc.

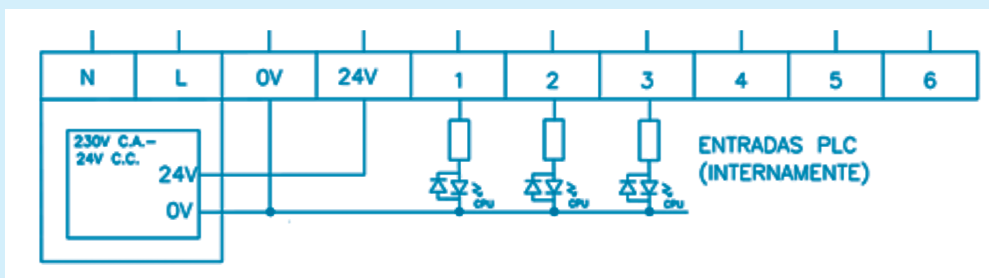
Resumen

- En este capítulo, se ha dado una introducción al dispositivo que, junto con los robots, puede considerarse el de mayor relevancia en la automatización industrial pasada y presente.
- En su introducción, se aporta una definición, la norma que lo regula, las características y hasta su ámbito de actuación.
- Posteriormente, se ha profundizado en su funcionamiento haciendo énfasis en su conexión con el exterior: las entradas como sentidos de lo que sucede en el proceso y las salidas como acciones sobre el proceso.
- Para ello, inicialmente, se han estudiado los tipos de señal para caracterizar claramente las más empleadas en los PLC: señales codificadas, de propósito general (en las entradas y salidas) y analógicas.
- Se ha continuado con el cableado de los circuitos, tanto de entradas como de salidas, con diferentes configuraciones y prestaciones en función de los dispositivos disponibles en los sensores y salidas del PLC. En cuanto a las salidas, se expone la activación indirecta de las salidas como solución a algunos problemas expuestos en la configuración y elección de las salidas.
- Finalmente, se explora el PLC estudiando brevemente otros componentes y haciendo hincapié en la memoria de datos y lo importante que es comprender que cada fabricante organiza y hace referencia a sus posiciones y también a sus modos de operación y el ciclo de *scan* que tiene lugar en la ejecución de programa o en el modo *run*.

Ejercicios propuestos



1. En la siguiente imagen de un bornero de entradas de PLC, dibuja en las entradas dos pulsadores, un contacto asociado a un relé y tres detectores a tres hilos en configuración NPN.



2. A partir de la siguiente imagen de un bornero de salidas de PLC, dibuja la alimentación del PLC y, mediante batería de relés, la conexión para la activación de tres solenoides de contactor accionados a 230 V en CA, 2 pilotos a 48 V en CC y 2 solenoides de electroválvulas accionadas a 24 V en CC, incluyendo las fuentes de alimentación, e indica qué tipo de dispositivo de cierre de salidas debería haber en el PLC para esta combinación de salidas (elige la configuración en las salidas del PLC).

1L	0.0	0.1	0.2	0.3	2L	0.4	0.5	0.6	3L	0.7	1.0	1.1	⏏	L1	AC
SALIDAS PLC															

3. Si la cuadrícula siguiente se corresponde con bytes de marcas de trabajo y comienza (byte superior) por el byte 3800, explica cómo designarías a los elementos marcados con colores en la figura.

1	0	1	0	1	1	1	0
0	1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	1	0	1	1
1	1	1	0	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	0	1	1	1
0	0	1	0	0	1	0	1

4. Una señal analógica de un sensor de temperatura proporciona una tensión en la entrada analógica del PLC que arroja lecturas con valores de entre 250 y 2014. Si quiere accionarse un regulador de un calefactor que se activa con valores en la salida entre 20 y 1023, señala para los siguientes valores los resultados de normalizado y el escalado para dicha salida: 255, 502, 774, 1020, 1758 y 2014.
5. En la siguiente imagen de un bornero de salidas de PLC, dibuja la conexión de tres solenoides de relé accionados a 24 V en CC, 2 solenoides de contactores a 48 V en CC y 2 solenoides de electroválvulas accionadas a 230 en CA, incluyendo las fuentes de alimentación, y establece qué tipo de dispositivo de cierre de salidas debería haber en el PLC para esta combinación de salidas.

SALIDAS PLC										
COM	100.0	COM1	100.1	COM2	100.2	COM3	100.3	COM4	100.4	100.5

Caso práctico

Desea automatizarse un proceso de una máquina clasificadora con el siguiente proceso secuencial. La máquina, tras conectar la alimentación con un seccionador, quedará en estado de encendido, pero en paro (no realizará ninguna acción hasta su puesta en marcha). Un pulsador PM enviará la señal al PLC para que el programa disponga a la máquina en estado de funcionamiento. El pulsado de un pulsador NC PP devolvería a la máquina al estado de paro. Tras la detección de la pieza en el alimentador y con la máquina en estado de puesta en marcha (habiendo pulsado PM), se elegirán, mediante varios pulsadores, las siguientes opciones de marcha: modo manual o ciclo único con pulsador CU, modo automático o continuo con pulsador CC y modo paso a paso con pulsador PP. También hay un botón RS para enviar al PLC la señal de reseteo, para que, en caso de una interrupción de alimentación, pueda encenderse la máquina de nuevo y llevar todos sus elementos a las posiciones iniciales requeridas para arrancar el proceso.

Un alimentador vertical contiene piezas que, tras detectar su presencia mediante un detector capacitivo y si son de naturaleza metálica con un detector inductivo, permiten el inicio del proceso. Este inicio tendrá lugar tras pulsar PM y, seguidamente, un modo de marcha (por ejemplo, CU). En ese instante, un cilindro 1 neumático de doble efecto con válvula 5/2 biestable y solenoides alimentados a 24 V en CC expulsa la pieza hacia la cinta 1. Cuando ha terminado su movimiento, al mismo tiempo, la cinta 1 se pone en marcha y el cilindro 1 comienza a retraerse. La pieza se mueve sobre la cinta hasta un sensor óptico de barrera (emisor y receptor cableados independientemente) situado sobre ella. A esta altura, se encuentra

otro cilindro 2 de doble efecto con válvula 5/2 monoestable dispuesto horizontalmente de forma perpendicular a la cinta 1. En caso de ser metálica, al llegar al sensor óptico mencionado, la cinta 1 se detendrá y el cilindro 2 empujará a la pieza hacia la cinta 2 dispuesta en paralelo y de forma adyacente. Una vez allí, la cinta 2 se pondrá en marcha 6 s y el cilindro 2 se recogerá. Si la pieza no es metálica, la cinta 1 no se detendrá, sino que continuará (contabilizando un total de 7 s desde su salida del alimentador) y el cilindro 2 no realizará acción alguna.

Desea realizarse el control de temperatura de los dos motores eléctricos de las cintas mediante sensores analógicos. Una de las temperaturas quiere monitorizarse visualmente a través del PLC con un indicador analógico. Dichos motores funcionarán con arranque directo a través de dos contactores KM1 y KM2 con solenoides alimentados a 230 V en CA.

La máquina dispondrá de 3 pilotos de señalización alimentados a 24 V en CC.

Los sensores de entrada son de tipo PNP y desea adquirirse un PLC con salidas a transistor de tipo *sourcing* y activación indirecta de las salidas empleando una batería de relés borna.

1. Realiza un listado con entradas y salidas requeridas. Contrasta las entradas y salidas digitales con las disponibles en los borneros mostrados.
2. En caso de que el PLC dispusiera únicamente de una entrada analógica y ni siquiera de una salida analógica, ¿de qué puertos debería disponer el PLC y qué módulos crees que podrías adquirir?
3. Prescindiendo de las protecciones, dibuja de forma simplificada

la alimentación (PNP) y conexión de las entradas digitales en el bornero mostrado a continuación.

4. Prescindiendo de las protecciones, dibuja de forma simplificada

la alimentación (para transistor *sourcing*) y conexión de las salidas digitales a través de batería de relés, con el bornero mostrado a continuación.

Entrada

COM	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	1.00	1.01
ENTRADAS PLC														

Salida

SALIDAS PLC																	
COM	100.00	COM	100.01	COM	100.02	COM	100.03	COM	100.04	100.05	100.06	100.07	COM	101.00	101.01	101.02	101.03

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

- ¿Cuál de las siguientes no es una característica básica de un PLC?
 - a) Robustez por diseño para funcionar en entorno industrial.
 - b) Fiabilidad de operación, flexibilidad, versatilidad de configuración y funcionamiento para integrarse en cualquier proceso y adaptarse a los cambios.
 - c) Precio competitivo frente a relés programables y ordenadores industriales gracias a la fabricación con componentes estándar informáticos.
 - d) Compacidad para su inserción en cuadros eléctricos sobre carril DIN.
- ¿Qué es la IEC 61131?
 - a) Es una norma internacional que estandariza a los autómatas programables.
 - b) Es un estándar de comunicación empleado muy a menudo por los autómatas programables.
 - c) Es un estándar que define la organización de la zona de memoria de datos de los autómatas programables.
 - d) Es una norma internacional que estandariza a los ordenadores industriales.
- ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
 - a) Una señal codificada es capaz de portar datos como, por ejemplo, un mensaje de texto.
 - b) Una señal discreta es una señal compuesta por un conjunto de puntos separados en tiempo y magnitud que pueden tomar cualquier valor en amplitud.
 - c) Una señal discreta-digital es una señal compuesta por un conjunto de puntos separados en tiempo y magnitud que pueden tomar cualquier valor en amplitud.
 - d) Una señal analógica es aquella que varía a lo largo del tiempo sin saltos, de forma continua, pasando por todos los valores intermedios.

4. ¿Cuál de las siguientes opciones es verdadera?
- a) Una señal discreta con un periodo de muestreo menor implica siempre menor precisión que aquella con un periodo de muestreo mayor.
 - b) Una señal analógica requerirá un periodo de muestreo acorde con su resolución.
 - c) Una señal discreta-digital binaria tendrá habitualmente una resolución de 8 bits (255 sin contar el 0).
 - d) Una señal discreta con un periodo de muestreo muy pequeño y una muy alta resolución se asemejará a una señal analógica.
5. ¿Cómo funciona un circuito de entradas con configuración PNP?
- a) Las entradas pueden funcionar en corriente continua o alterna y el común de las entradas del PLC se conecta al positivo o al terminal neutro.
 - b) Las entradas funcionan en corriente continua y el conector común de las entradas del PLC se conecta al negativo.
 - c) Las entradas funcionan en corriente alterna y la alimentación de los sensores y mandos se conecta al terminal neutro de alimentación.
 - d) Las entradas funcionan en corriente continua y la alimentación de los sensores y mandos se conecta al negativo.
6. ¿Cómo se alimentará y funcionará un detector NPN?
- a) A tres hilos NA cuando no está detectando, se alimentará a 24 V en corriente continua por el cable marrón, 0 V por el cable azul y, en el cable negro, ofrecerá 0 V.
 - b) A tres hilos NA cuando no está detectando, se alimentará a 0 V en corriente continua por el cable marrón, 24 V por el cable azul y, en el cable negro, ofrecerá 0 V.
 - c) A tres hilos NA cuando está detectando, se alimentará a 24 V en corriente continua por el cable marrón, 0 V por el cable azul y, en el cable negro, ofrecerá 0 V.
 - d) A tres hilos NC cuando no está detectando, se alimentará a 24 V en corriente continua por el cable marrón, 0 V por el cable azul y, en el cable negro, ofrecerá 24 V.
7. Respecto a los dispositivos de cierre de las salidas, ¿cuál de las siguientes oraciones es falsa?
- a) En las salidas a transistor *sinking*, pueden conectarse salidas que trabajen a 24 V en continua con los comunes conectados al negativo de la fuente de alimentación de salidas.
 - b) En las salidas a triac, pueden conectarse salidas que trabajen a 230 V en alterna.
 - c) En las salidas a relé, pueden conectarse salidas que trabajen a 230 V en alterna.
 - d) En las salidas a transistor *sourcing*, pueden conectarse salidas que trabajen a 24 V en continua con los comunes conectados al negativo de la fuente de alimentación de salida.

8. Con relación a la activación indirecta de preactuadores mediante batería de relés borna, ¿cuál de las siguientes frases es falsa?
- a) Los relés son fácilmente sustituibles de forma individual si se averían por anomalías o uso.
 - b) Los relés son económicos.
 - c) Los relés están inmediatamente disponibles, pues son un componente muy común.
 - d) La velocidad de conmutación de los relés es tan elevada como la de una salida a transistor y, por tanto, no se resiente el tiempo de respuesta.
9. ¿Cuál de las siguientes opciones es falsa respecto a otros componentes del PLC?
- a) El *firmware* es el primer programa que se ejecuta en el encendido y que gobierna el primer funcionamiento del PLC.
 - b) Los puertos de comunicación permiten realizar la comunicación del PLC con otros PLC u otros dispositivos
 - c) Conocer la organización de la zona de memoria de datos de cada PLC no es importante, pues es igual en todos los fabricantes.
 - d) El reloj es el dispositivo que define la velocidad de operación de la CPU y, por tanto, se relaciona con su velocidad.
10. ¿Qué es correcto afirmar sobre el ciclo de *scan*?
- a) Sus etapas son lectura de entradas, ejecución del programa, escritura de salidas y borrado de todo.
 - b) Sus etapas son ejecución del programa, lectura de entradas, escritura de salidas y preparación para el siguiente ciclo.
 - c) El estudio de tiempo de ciclo es importante para procesos que requieran tiempos de respuesta muy rápidos.
 - d) Un programa muy largo no hará más largo el tiempo de ciclo.

SOLUCIONES:

1. a b c d

5. a b c d

2. a b c d

6. a b c d

9. a b c d

3. a b c d

7. a b c d

10. a b c d

4. a b c d

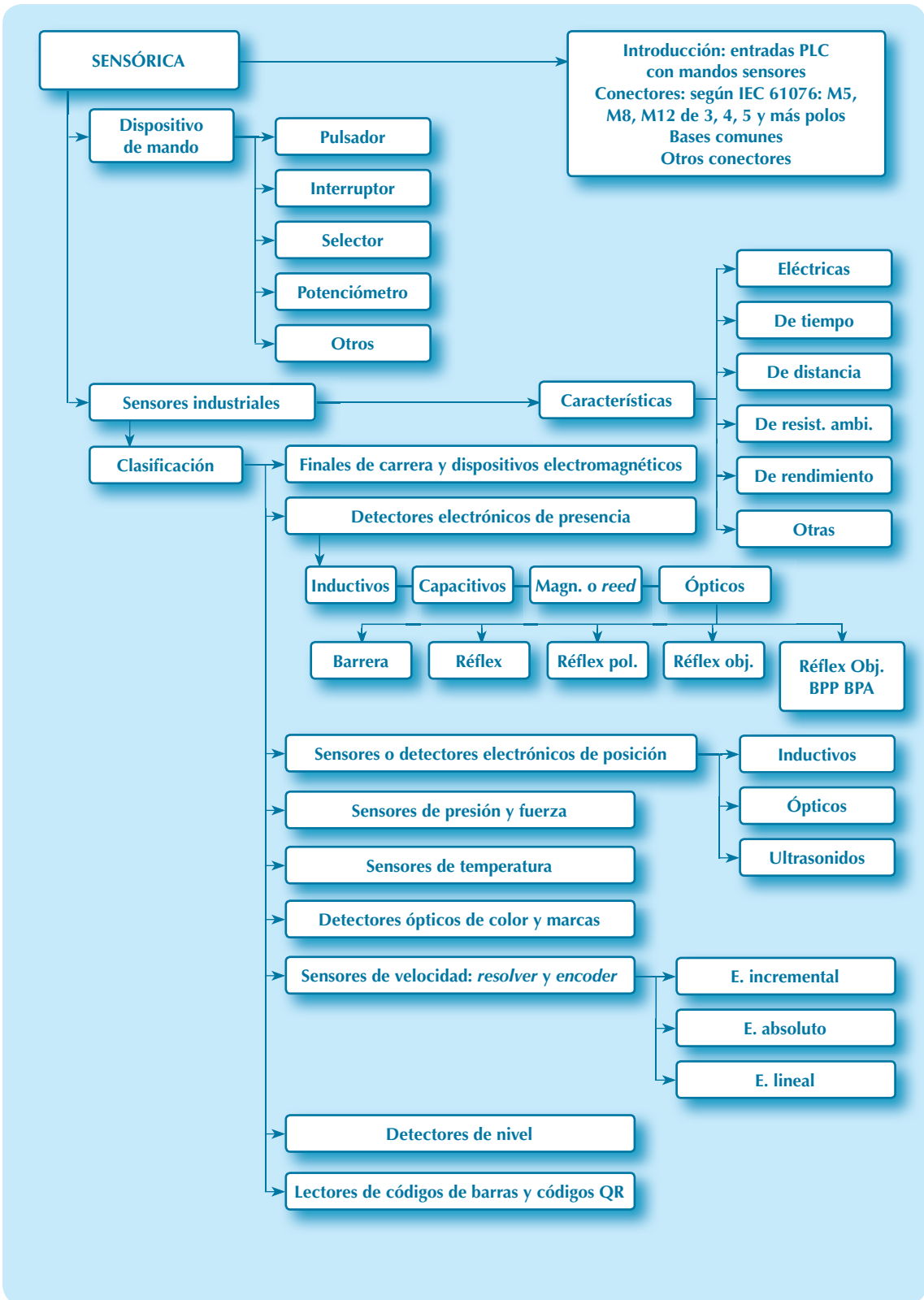
8. a b c d

Sensórica

Objetivos

- ✓ Conocer un catálogo de los principales sensores, así como de sus características, prestaciones y configuración básicas.
- ✓ Adquirir la capacidad de plantear la configuración de un automatismo sencillo en la parte de entrada, de sensórica y mando en automatización industrial.

Mapa conceptual



Glosario

Detector de proximidad capacitivo. Dispositivo de entrada electrónico capaz de detectar cualquier material mediante la perturbación por este de un campo eléctrico que el propio detector emite.

Detector de proximidad inductivo. Dispositivo de entrada electrónico capaz de detectar metales mediante la perturbación por estos de un campo magnético que el propio detector emite.

Detector de proximidad magnético. Dispositivo electrónico capaz de detectar imanes mediante la captación del campo magnético permanente emitido por estos.

Detector de proximidad óptico. Dispositivo electrónico capaz de detectar materiales, mediante la emisión de un haz lumínico y la detección de la reflexión en dichos materiales.

Dispositivo de entrada. Elemento del automatismo utilizado para obtener datos del proceso y señales de control y proporcionarlos de forma cableada (mayoritariamente) al sistema para el control del proceso.

Encoder. Sensor rotativo o lineal que, mediante un diseño interno, puede enviar pulsos eléctricos indicando el ángulo girado y la posición dentro del giro o desplazamiento.

Galga extensiométrica. Hilo conductor o semiconductor de diseño perfectamente conocido adherido a un material que, al deformarse ambos, cambia de longitud y sección, con lo que, a partir del cambio de su resistencia eléctrica, puede inferir la deformación producida.

Luz polarizada. La polarización de la luz es la emisión específica con una orientación geométrica de las oscilaciones de la onda. Un filtro para luz polarizada en una dirección específica solo permitirá el paso de la luz polarizada en dicha dirección.

Pulsador. Dispositivo electromecánico que realiza el cambio de posición de sus contactos por la fuerza ejercida al ser pulsado contra un muelle.

Rebotes eléctricos. Cuando se produce una activación o desactivación brusca de un sensor electromecánico con retorno por muelle, dicho mecanismo de muelle de los contactos eléctricos, debido a su vibración en el cierre, puede generar conexiones y desconexiones múltiples en un espacio de tiempo muy pequeño.

Termistancia o termistor. Sensor de temperatura basado en semiconductores cuya resistencia varía con la variación de temperatura.

Termostato. Dispositivo con un sensor límite de temperatura que tiene la capacidad de abrir o cerrar un circuito eléctrico al alcanzar una temperatura umbral.

5.1. Introducción y conectores

En el estudio de la automatización de procesos, se ha indicado ya el conjunto de elementos básicos necesarios. Dos bloques fundamentales son los extremos del sistema de automatización: las entradas y salidas, conectadas respectivamente a sensores y actuadores. Es fácil deducir

lo importante que resulta conocer ambos para poder configurar correctamente un proceso automatizado, pero no solo sus características o prestaciones, sino sus limitaciones y detalles de configuración, así como su compatibilidad con el PLC, que recibirá la información de los sensores y proporcionará los comandos de activación a los actuadores. De todos modos, el abanico de sensores y actuadores disponible es proporcional a todas aquellas necesidades que el mercado exija: enorme. Por ello, en este capítulo, solo se recorren aquellos sensores que se estiman más empleados.

En el planteamiento de automatización de un proceso, será necesario estudiar todos los dispositivos de entrada, incluyendo mandos y sensores. Para una sustitución, habrá que estudiar el elemento por reponer. En el caso de los sensores, su elección dependerá de:

1. *Prestaciones requeridas de todo tipo (incluyendo sus capacidades de detección)*: según sea el proceso, ambiente y exigencia del proyecto (durabilidad, fiabilidad, etc.).
2. *Compatibilidad eléctrica con las entradas del PLC o dispositivo de control*: nivel y tipo de alimentación (por ejemplo, será 24V en CC pero ¿PNP o NPN?).
3. *Factor de forma del sensor y cableado*: morfología y conectividad compatible entre todos ellos y con el PLC para todo el cableado de entradas planteado, incluyendo inmunidad de las señales al ruido eléctrico y resistencia de aislamiento (características del cable apantallado, cubierta, etc.). Su morfología puede no influir en la función, pero, para poder instalarse, debe ser compatible con su ubicación.
4. *Otros factores*: precio, disponibilidad, compatibilidad con elementos ya instalados, etc.

Aparte de la entrada de información que pueda provenir de otros PLC o dispositivos de automatización, como elementos de entrada, habrá elementos de mando y sensores.

Se propone la clasificación de mandos y sensores recogida en el cuadro 5.1.

CUADRO 5.1

Clasificación de mandos y sensores

Mandos	Sensores
<ul style="list-style-type: none"> ● Pulsadores. ● Interruptores. ● Selectores. ● Potenciómetros. ● Otros. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Finales de carrera y dispositivos electromecánicos. ● Detectores de proximidad electrónicos (inductivos, magnéticos, capacitivos y ópticos). ● Sensores ópticos de color y marcas. ● Sensores de presión. ● Sensores de fuerza. ● Sensores de temperatura. ● Sensores de posición (ópticos, ultrasónicos e inductivos). ● Sensores de velocidad (encoder y <i>resolver</i>). ● Detectores de nivel. ● Lectores de códigos de barras y códigos QR. ● Visión artificial.

La visión artificial se estudia en el capítulo 11, por lo que no forma parte de los contenidos de este capítulo. En los siguientes apartados, se describe de forma básica la clasificación y características de mandos y sensores principales.



Hay tres bloques principales de elementos de entrada:

1. *Dispositivos de mando*: para la recepción de señales emitidas por un humano con el objetivo de controlar la máquina.
2. *Dispositivos sensores*: para la recepción de señales del proceso que permitan su control automático.
3. *Comunicaciones con otros dispositivos*: en el control, puede ser necesario recibir información mediante los puertos de comunicación de otros dispositivos, como otros PLC, como preactuadores o controladores informando de sus acciones, etc.

5.1.1. Conectores

Para una integración correcta de los sensores en la máquina, la conectividad es fundamental y debe ser segura, rápida y uniforme. Existen de nuevo muchos tipos de conectores y tantos como necesarios según exija la señal por transmitir. Por ejemplo, para un sensor complejo, capaz de emitir señal codificada por un bus de comunicaciones, su conector ha de ser compatible con dicho bus y no será el mismo que el de un sencillo final de carrera electromecánico a dos hilos. Igualmente, no tiene por qué ser el mismo conector para un sensor que requiera 8 cables que para otro que solo requiera 2.

Del mismo modo, los conectores normalizados o estandarizados han evolucionado a lo largo del tiempo, por lo que, en maquinaria antigua, pueden encontrarse tipos no utilizados actualmente.

Como siempre, intenta mencionarse aquello que más presencia tiene actualmente.

A) Conectores según la IEC 61076

Un formato de conector muy extendido actualmente sigue esta norma. Se trata de conectores redondos con conexión asegurada por rosca, que disponen de macho y hembra con un diseño mecánico (ranura y forma de conectores) *poka yoke* que impide una conexión errónea. Su denominación principal responde al tamaño de su rosca. Hay varios tamaños fundamentales:

- *M5*: IEC 61076-2-105, con 3 y 4 polos (para conexión con tres o cuatro cables).
- *M8*: IEC 61076-2-104, con 3, 4, 5, 6 y 8 polos.
- *M12*: IEC 61076-2-101, con 4, 5 y 8 polos (figura 5.1).



Poka yoke es un término japonés que, literalmente, significa “a prueba de errores” y que se refiere a una técnica de calidad que consiste en aplicar un diseño que, por su naturaleza, impide realizar una operación de forma errónea. Por ejemplo, con un diseño específico de un montaje que exija físicamente una orientación determinada para que se garantice su montaje correcto.

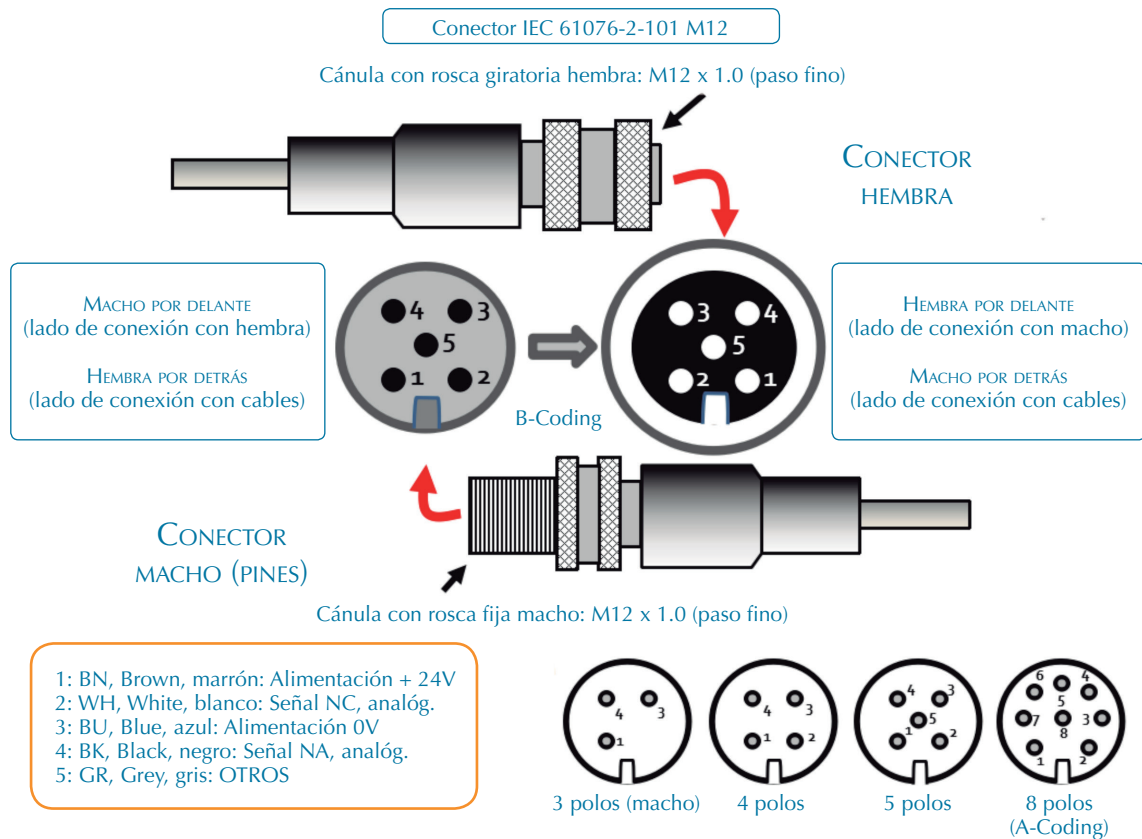


Figura 5.1
Conectores IEC 61076-2-101 M12.

Además, el diseño de *poka yoke* puede ser de más de un tipo (para M12, A-CODING, B-CODING, C-CODING, D-CODING, P-CODING, etc.).

La conexión con 3 y 4 polos se emplea con los sensores más sencillos y cada pin se corresponde con una función y color de cable (figura 5.1.). Marrón y azul alimentación (+24 V y 0 V habitualmente) y el negro es la señal. La señal puede ser señal todo o nada o también analógica. El cuarto polo corresponde al color blanco y puede ser una salida analógica adicional o la opción NC de salida todo o nada para aquellos sensores que la ofrezcan. También es posible encontrar sensores que admitan ambas configuraciones de conexión NPN y PNP, donde negro y blanco son conectores NA y NC o NC y NA, respectivamente, según el tipo de configuración empleada.



Figura 5.2
Conectores IEC 61076-2-101.

B) Bases de conexión

Disponibles con los tipos de conexión indicados, pueden encontrarse en el mercado bases de conexión que agrupan 4, 6, 8 o más cables de detectores, para agrupar todas las señales pos-

teriormente en un único cable multiconductor o incluso preparado para convertir las señales eléctricas de los sensores en señales codificadas para envío por bus (figura 5.3). Tienen el mismo sistema de conexión *poka yoke* con rosca y permiten un cableado mucho más sencillo, además de que, a menudo, incorporan un led indicando la activación del sensor, lo que puede ser útil para comprobar su funcionamiento.



Figura 5.3
Base para conectores IEC 61076 y salida a bus CANopen (a) y base para sensores de seguridad con conectores IEC 61076 (b).

5.2. Sensores y mandos

Los elementos que conforman la sensórica son los elementos de entrada. Habitualmente, el PLC *lee* las señales de estas entradas por un cambio de tensión en las conexiones del sensor que produce circulación de intensidad en el circuito de la entrada. En configuración normalmente abierta, lo más habitual con la configuración PNP que se ha estudiado, es que el sensor ofrezca en su terminal conectado al PLC nula o muy poca diferencia de tensión si no está detectando y hasta 24V si está detectando (o al revés en configuración normalmente cerrada).

5.2.1. Características generales

Para la selección de sensores o mandos (según requisitos del sistema e instalación) resulta necesario conocer las siguientes características.

A) Características eléctricas

La mayoría de los sensores modernos son electrónicos, por lo que muchas de estas características se refieren a dispositivos de este tipo.

1. *Nivel y tipo de tensión de alimentación*: rango de tensiones válido de alimentación y tipo de esta (típicamente, en torno a 24V en CC entre el cable marrón y el azul).

2. *Protecciones frente a polaridad inversa y cortocircuito:* el sensor puede incorporar protección frente a inversión de la polaridad (evita que se estropee el sensor en caso de conectar la alimentación con la polaridad invertida) e incluso frente a cortocircuito (en caso de que haya un pico de cortocircuito en el circuito de señal, el sensor no se dañará).
3. *Factor de rizado para CC:* en la calidad de la señal de alimentación, se incluye una exigencia de rizado máximo. Se trata de la fluctuación total que puede tener la tensión de alimentación en torno al valor fijo en CC y se expresa en porcentaje sobre dicho valor (suele ser aceptable hasta un 10%).
4. *Tensión residual:* tensión medida en la conexión de señal del sensor cuando no está activado (cuando no está detectando). Dada la naturaleza electrónica de la mayoría de sensores, en su terminal de señal (cable negro), existe esta tensión residual.
5. *Intensidad o corriente de fuga:* es la corriente que fluye por el terminal de señal del detector en estado de no detección (el sensor está inactivo, está conectado, pero no detectando), con su tensión máxima admisible de alimentación. Es más acusada en detectores electrónicos a dos hilos, que necesariamente fugarán cierta intensidad de consumo de su electrónica. En cualquier caso, no debe provocar la activación de la entrada en su circuito. Esto puede tener importancia si se conectan sensores en paralelo a una misma entrada, sumando pequeñas intensidades que pudieran (aun estando dichos sensores sin detectar) activarla en falso (debe consultarse en la ficha del sensor y ser la suma inferior al umbral de activación de entrada que indique el fabricante del PLC).
6. *Caída de tensión:* diferencia de tensión entre la tensión en el cable de señal (negro) cuando el sensor está activo y la que tiene en su alimentación.

Actividad resuelta 5.1



Representa la asociación en paralelo de tres detectores a tres hilos PNP alimentados a 24 V en CC.

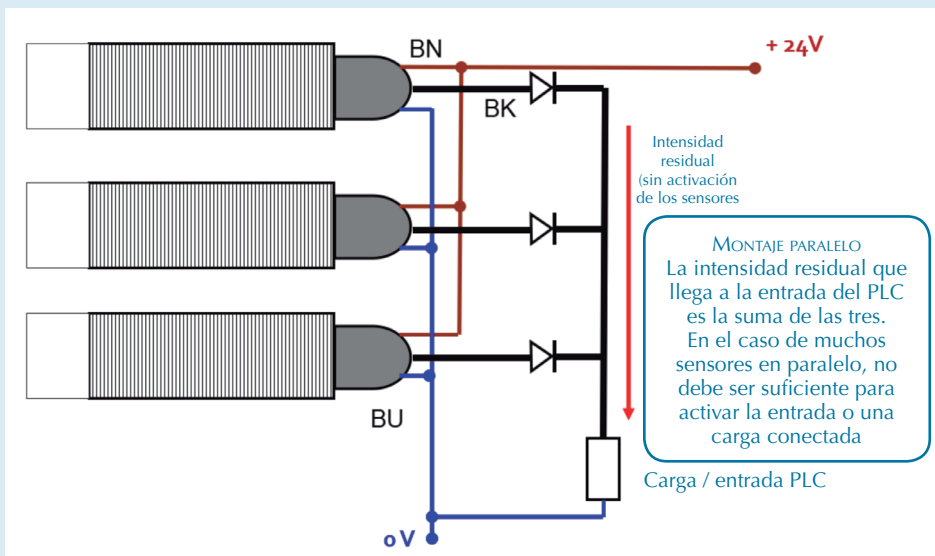


Figura 5.4
Montaje de sensores en paralelo.

En la figura 5.4, se montan diodos antirretorno en cada salida de la señal.

TOMA NOTA



El dato de la caída de tensión puede ser importante si desean encadenarse detectores en serie en una sola entrada, pues esta disposición acumulará las caídas de tensión de los detectores enseriados y no debe resultar excesiva. El cable de señal (negro) de un sensor alimenta (cable marrón) al siguiente. Si cada vez, por el cable de señal, se pierde una cantidad importante de tensión (el cable negro proporciona, por ejemplo, 21 V en lugar de los 24 V de alimentación), el sensor alimentado aguas abajo puede no funcionar correctamente o incluso el nivel de tensión en el último cable de señal conectado a la entrada puede no proporcionar tensión suficiente para su funcionamiento.

7. *Corriente máxima de conmutación*: cantidad de corriente continua permitida a través del sensor sin que le cause daño. Puede expresarse en potencia (vatios) igualmente como capacidad máxima de conmutación.
8. *Corriente mínima de conmutación*: valor mínimo de corriente que debe fluir a través del sensor para garantizar el funcionamiento.
9. *Corriente máxima de pico*: intensidad pico máxima que el sensor puede soportar en un periodo de tiempo limitado (corto).
10. *Corriente de activación (inrush current)*: cuando se activa la alimentación del circuito de un detector electrónico, este tiene un pico de consumo de intensidad inicial muy alto, pero también muy corto, que debe tenerse en cuenta. Puede alcanzar valores de entre 4 y 8 A durante 10 o 20 ms.
11. *Intensidad nominal (máxima de funcionamiento continuo)*: corriente máxima que puede circular en el circuito de la entrada sin que resulte dañado el sensor en condiciones indicadas por el fabricante. Debe contrastarse con la intensidad máxima admisible por entrada del PLC. Las entradas del PLC incorporan una impedancia interna limitadora de intensidad aparte del optoacoplamiento para proteger su electrónica, pero debe consultarse el máximo flujo de corriente posible. Un circuito correctamente configurado en la entrada del PLC nunca debería dañar a un sensor, pero este dato es interesante cuando desea conectarse directamente una carga a un sensor. Por ejemplo, algún solenoide de activación de un actuador o un piloto de señalización pueden presentar un consumo de intensidad que comprometa la electrónica del sensor si supera su intensidad máxima admisible.
12. *Tipo de sensor PNP, NPN*: depende de la configuración eléctrica respecto a la circulación de corriente del circuito de entradas. Los finales de carrera o mandos electromecánicos a dos hilos no presentan inconveniente, únicamente hay que tener en cuenta la polaridad de la conexión según el sentido del flujo de corriente escogido.
13. *Tipo de comportamiento del sensor frente a la activación*: normalmente abierto (NA/NO) o normalmente cerrado (NC/NC).

B) Características de tiempo

1. *Frecuencia máxima de conmutación*: número máximo de veces que el sensor puede activarse y desactivarse dando señal durante un segundo. Esto puede ser crítico en muchas aplicaciones donde la frecuencia de detección sea alta,

2. *Retraso en la activación (time delay before availability)*: es el tiempo de espera hasta la disponibilidad de funcionamiento del sensor a partir de su alimentación. Los valores máximos en dispositivos electrónicos no suelen ser superiores a 300 ms.
3. *Vida estimada*: cantidad de ciclos ON/OFF de funcionamiento. También puede expresarse en horas MTBF, del inglés *mean time between failures*, (tiempo medio entre fallos). En un detector electromecánico, serán unos pocos millones de ciclos. Con una configuración adecuada (características del detector acordes a su uso), un detector electrónico tiene una vida muy superior.

C) Características de distancia en detección de proximidad

1. *Distancia de conmutación en detección de presencia o proximidad*: aquella en la cual una pieza que se aproxime al sensor genera un cambio de señal.
2. *Histéresis*: cuando el sensor dispone de histéresis, la activación y desactivación del sensor de proximidad no se produce siempre a la misma distancia, pues hay una banda estrecha de espacio en la que permanece activo en el alejamiento e inactivo en el acercamiento (sentido de detección).

© FUNDAMENTAL

La histéresis es la distancia entre el punto de activación en el acercamiento y desactivación en el alejamiento. Su razón de ser es que, si hubiera una distancia fija de detección, en una situación en la que el objeto detectado se moviera justo en el entorno preciso de esa distancia, la señal generada sería de una altísima conmutación (activación y desactivación cada vez que se rebasa la frontera de dicha distancia), algo poco práctico en muchas situaciones.

D) Características de resistencia ambiental

1. *Estanqueidad IP o grado de protección frente a la penetración externa*: consta de dos dígitos, el primero (1-7) indica la protección frente a intrusión de elementos y polvo y el segundo (1-9), la protección frente a la penetración de agua. Regulado por la norma internacional IEC 60529 y complementada por la DIN 40050-92.
2. *Resistencia a choques IK*: indicado por la norma internacional IEC 68-2-7 o su equivalente UNE-EN 60068-2-7. Este índice indica el grado de protección mecánica que la envolvente de un dispositivo proporciona frente a impactos externos. El código IK se forma por las letras IK más dos cifras de 00 a 10, que indican la resistencia a una energía de impacto por ensayo con bola de acero que la envolvente soporta sin sufrir deformaciones que resulten peligrosas (fundamentalmente, frente a elementos internos en tensión).
3. *Resistencia a las vibraciones o impacto*: la resistencia a las vibraciones se expresa a partir de un ensayo como valores alternados de un múltiplo de g (aceleración de la gravedad de la tierra) con una frecuencia. Por ejemplo, una vibración de 2 kHz con valor máximo de

aceleración de 20 g y variación senoidal durante 30 min. La resistencia al impacto puede expresarse simplemente como un valor máximo de aceleración que puede soportar el dispositivo (por ejemplo, 30 g).

4. *Temperatura y humedad ambiente*: valores límite dentro de los cuales el dispositivo trabaja correctamente. Aparte de la estanqueidad indicada por la categoría IP del sensor, es posible que, en condiciones de condensación o humedad excesiva, un detector no funcione correctamente. Algunos sensores electrónicos indican variaciones de prestaciones en función de la temperatura ambiente.

E) Características de rendimiento

En los sensores de tipo electrónico, la respuesta a menudo depende de las circunstancias y, en el caso de detectores de proximidad, del material del elemento a detectar. Por ejemplo, un detector inductivo no tiene el mismo rendimiento detectando hierro que aluminio y, por tanto, su distancia de detección será distinta. Para ello, en la ficha técnica del sensor, se proporcionan tablas o gráficas como las del ejemplo de la figura 5.5, de modo que el usuario puede seleccionar y configurar el montaje correctamente según la aplicación.

Material	Factor de reducción que debe aplicarse sobre la máxima distancia de detección
Acero dulce	1,0
Acero inoxidable	0,85
Níquel-cromo	0,80
Latón	0,55
Aluminio	0,42
Cobre	0,32
Plomo	0,3

Figura 5.5

Ejemplo de tabla de la ficha técnica de un sensor.

Con los datos de la figura 5.5, si el material detectado es aluminio y el sensor ofrece una distancia máxima de detección de 12 mm, la distancia de detección, en este caso, será $0,42 \cdot 12 \text{ mm} = 5,04 \text{ mm}$. Esta misma corrección puede conseguirse con gráficas que también tienen en cuenta el tamaño de la superficie frontal del objeto detectado.

RECURSO ELECTRÓNICO 5.1



En el anexo web 5.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas y material adicional para complementar los contenidos de este apartado.

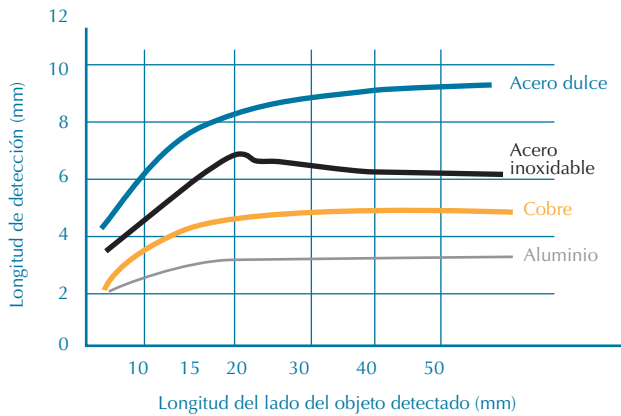


Figura 5.6
Gráfica para el cálculo de la distancia efectiva de un sensor inductivo en función del metal detectado.

Actividad propuesta 5.1



Se dispone de un detector capacitivo con una distancia máxima de detección de 11 mm y la siguiente tabla para la corrección de dicha distancia según los materiales.

Material	Factor de reducción
Cualquier metal	1,0
Agua	1,0
Vidrio	0,4
Plástico	0,45
Cartón	0,45
Madera (seca)	0,4
Aceite	0,2

Indica la distancia máxima a la que, en condiciones óptimas, podría montarse el detector para garantizar la detección con los siguientes materiales: madera, aluminio y cartón.

F) Otras características

Otros aspectos que han de tenerse en cuenta son los constructivos y de diseño: morfología, dimensiones y peso; así como materiales, características del cableado, conector, etc.

Hay muchas otras características, y muy importantes según los requerimientos de la aplicación deseada, que pueden consultarse en las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes de cada sensor.



Figura 5.7
Detector de proximidad inductivo M4.

En los detectores electrónicos, especialmente de proximidad (muy empleados), se emplean habitualmente los detectores de tipo cilíndrico roscado, preparados para ser fijados por inserción en un agujero pasante o roscado y con tuercas de fijación a cada lado del orificio. La métrica es ISO con paso de rosca fino, variando desde M4 (figura 5.7) hasta M30 (los valores habituales son M4, M5, M8, M12, M18 y M30).

RECUERDA

- ✓ La selección adecuada de las características específicas de los detectores es fundamental para el éxito de un proyecto de automatización o para una sustitución correcta dentro de un mantenimiento. Una atmósfera muy húmeda, vibraciones, frecuencia alta de trabajo, impactos, intensidad eléctrica nominal, morfología inadecuada para la instalación, etc., pueden arruinar el funcionamiento fiable de una maquina debido a una mala elección.

5.2.2. Dispositivos de mando

A continuación, se describen los dispositivos de mando esenciales.

A) Pulsador

Es un dispositivo electromecánico que realiza el cambio de posición de sus contactos por la fuerza ejercida al ser pulsado contra un muelle. Cuando cesa la fuerza, los contactos vuelven a su posición de reposo por la acción del muelle. Pueden tener un contacto común y otros dos, uno NC y otro NA, para utilizar según convenga. Otros únicamente tienen NC o NA y, según la aplicación, habrá que seleccionar el tipo.

B) Interruptor

Se trata también de un dispositivo electromecánico que realiza el cambio de posición de sus contactos por la fuerza ejercida al ser pulsado o desplazado si es de palanca, pero, en este caso, presenta un enclavamiento mecánico que lo mantiene en la posición de cambio tras su accionamiento. Para volver a la posición original, debe ser pulsado o desplazado de nuevo.

C) Selector

Consiste en un dispositivo electromecánico con un mando giratorio que realiza una conmutación, uniendo el polo de un colector con otros contactos con el cambio de posición rotatoria. De este modo, el usuario elige entre diversas posiciones. El diseño del selector es tal que debe quedar siempre en una de las posiciones de conexión (no en posiciones intermedias).



Figura 5.8
 Consola de mando (a)
 y selector (b).

D) Potenciómetro

Se trata de una resistencia variable en la que los conectores extremos se conectan a una diferencia de tensión y el conector intermedio, denominado *vector*, es un punto de conexión intermedia a lo largo de una resistencia. La posición de dicho punto de conexión está determinada por el giro de un mando rotatorio, o desplazamiento lineal de una palanca, que abarca en los extremos del giro entre un mínimo de resistencia y un máximo de resistencia (entre conector inicial y conector vector). Alimentando los extremos y proporcionando una referencia común a un dispositivo de entrada, es un elemento empleado como mando analógico. Se emplea para establecer manualmente algún nivel variable, de emisión de calor, de temperatura, de velocidad de un motor, etc.

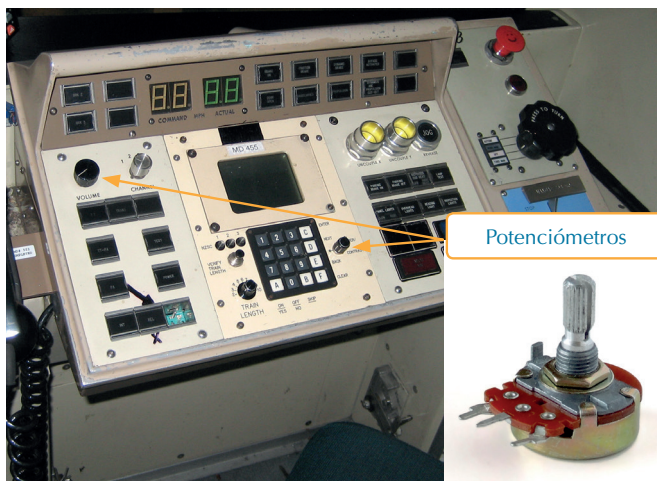


Figura 5.9
 Consola de mando
 de un tren
 con potenciómetros.

E) Otros

La variedad de dispositivos de mando que pueden considerarse es muy amplia y no se han enumerados todos.

Existen dispositivos similares a los descritos, pero con otros tipos de accionamientos (como palancas, pedales, cables, mandos deslizantes, etc.).

También hay otros dispositivos que gestionan el mando con otras energías (de tipo neumático o hidráulico, por ejemplo).

Por último, pueden considerarse dispositivos de mando otros mucho más completos, como pantallas táctiles HMI (*human-machine interface*) y SCADA, acrónimo de *supervisory control and*

data acquisition (supervisión, control y adquisición de datos). Su funcionalidad y complejidad es mayor y no se estudian en este capítulo.

5.2.3. Finales de carrera y dispositivos electromecánicos

Son interruptores que se accionan por una parte móvil, es decir, que sufren un empuje externo mecánico por el que se cierran los contactos internos para cerrar un circuito del que forman parte y así proporcionar una señal eléctrica, o incluso una alimentación de potencia. Se trata de los finales de carrera.

Habitualmente, son detectores a dos hilos que abren o cierran el circuito que los conecta a las entradas del PLC o controlador, pero también se encuentran accionando potencia en automatismos sencillos donde un final de carrera puede, por ejemplo, accionar un motor.

A) Rebotos eléctricos

Respecto a su comportamiento y las señales que proporcionan a un PLC en las entradas, hay que considerar los rebotes eléctricos. Cuando se produce una activación o desactivación brusca del final de carrera, el mecanismo de muelle de los contactos eléctricos, por su vibración, puede generar conexiones y desconexiones múltiples en un muy pequeño espacio de tiempo. Esto puede ser interpretado como una cadena de muchas señales por parte del PLC (pues su velocidad de lectura es muy elevada), por lo que habrá que prevenir un comportamiento no deseado en la programación. Por ejemplo, si un final de carrera que detecta la llegada de un carro de máquina es la condición de paso de diversas etapas, los rebotes pueden hacer creer al PLC que dicho final de carrera se ha accionado varias veces, avanzando varias etapas en el proceso, cuando, en realidad, lo que ha tenido lugar es una única llegada del carro.

B) Precauciones en el montaje

Su funcionamiento, al recibir un contacto externo mecánico, depende muchísimo de su posicionamiento en el montaje. Para una correcta precisión, hay que tener presente lo siguiente:

1. Distancia adecuada entre el sensor y el objeto detectado en el proceso.
2. Rigidez en los anclajes del sensor.
3. Considerar partes móviles que pudieran, de forma no deseada, activar o dañar el sensor.



Figura 5.10
Finales de carrera electromecánico de roldana.

El punto diseñado para el contacto externo o accionamiento de los finales de carrera tiene diseños muy variados, con topes retráctiles, roldanas simples, roldanas con articulación, bigotes, etc. (figura 5.10).

5.2.4. Detectores electrónicos de proximidad

Los sensores electrónicos más ampliamente utilizados en la automatización de procesos para la detección de proximidad o presencia son los sensores magnéticos, inductivos, capacitivos y ópticos. Existen más tipos de sensores electrónicos, pero estos cuatro son los más empleados. Su funcionamiento requiere circuitería electrónica que sea capaz de interpretar la presencia de un objeto en función de una energía o señal emitida. Mayoritariamente, son detectores a tres hilos (marrón y azul de alimentación y negro de señal), pero también los hay a dos hilos. Suelen denominarse también *detectores de posición*, aunque estos detectores de proximidad no determinan el valor de la distancia sino un umbral que es sobrepasado.

Presentan ventajas respecto de los finales de carrera mecánicos:

- No existe contacto físico y, por lo tanto, no hay desgaste mecánico (vida muy superior).
- Permiten diferenciar entre materiales metálicos y no metálicos.
- Pueden trabajar en condiciones de temperatura y humedad más extremas (seleccionando el modelo adecuado).

Salvo para los ópticos, la distancia de detección máxima de los más habituales se sitúa en torno a los 10 mm.

Otro aspecto destacable es que, para detectores inductivos y capacitivos, hay dos tipos según montaje, aquellos que pueden montarse enrasados con la superficie en la que van encastrados (están diseñados para que dicha superficie no les afecte) y los que no (figura 5.11), siempre respetando distancias mínimas entre sensores:

1. *Sensores para montaje no enrasado*: mayor distancia de detección en general (también frontal), pero influenciados por el entorno lateral, por lo que debe montarse sobresaliendo una cierta distancia de la superficie de montaje. Por tener que sobresalir, también están más expuestos a daños.
2. *Sensores para montaje enrasado*: el campo de detección se emite solo frontalmente y no detectarán los laterales con los que quedan enrasados. Con este montaje, están protegidos en zonas de detección donde pasan material o piezas que pudieran dañar un detector no enrasado. Presentan menor distancia de detección frontal.

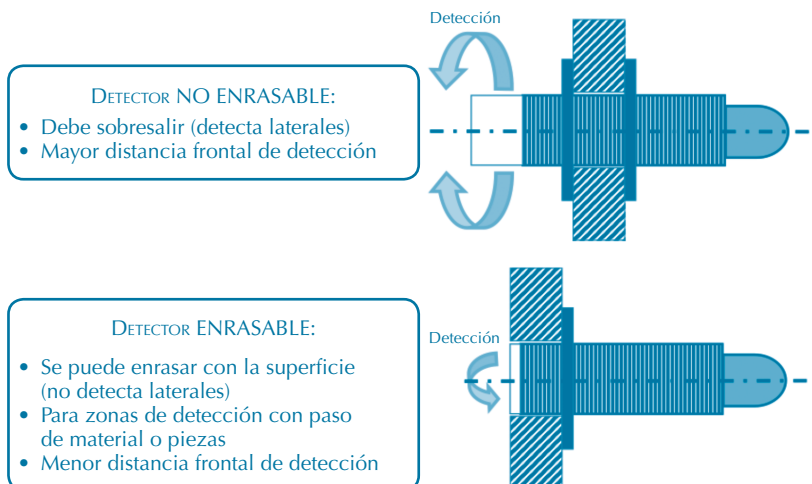


Figura 5.11
Detectores enrasables y no enrasables.

La aplicación a la que vayan destinados también condiciona su morfología, aspecto por el que pueden encontrarse detectores de diversos tamaños, cilíndricos de rosca métrica con fijación por tuerca, de anillo, cuadrados y otras (figura 5.12).



Figura 5.12
Distintas morfologías de detectores.

En algunos casos, disponen en su lateral de una pequeña muesca conectada a una regulación que sirve para regular la amplitud del campo y, con ello, la distancia de detección.

También incorporan un led testigo de la detección en algunas ocasiones.

Una característica particular de los detectores de proximidad es la distancia mínima a la que pueden montarse varios detectores sin influir sobre el funcionamiento entre sí. Si se montan demasiado cerca, un detector puede confundir al detector vecino haciendo que indique presencia cuando realmente no la hay. Cuando los detectores son enrasables y pequeños (M4 y M5), a menudo pueden montarse prácticamente pegados. Para tamaños mayores y no enrasables, hay que respetar distancias habitualmente superiores a 8 mm, mayores al incrementarse el tamaño del detector.

Existe una norma española y europea, la UNE-EN 60947-5-2:2008 “Aparatura de baja tensión. Parte 5-2: Aparatos y elementos de conmutación para circuitos de mando. Detectores de proximidad”, que regula a estos detectores.

INTERESANTE

Siempre que es posible, para la detección de proximidad o presencia, se emplean detectores electrónicos sin contacto frente a finales de carrera electromecánicos, pues los primeros no interactúan con las piezas físicamente y los últimos están más expuestos a desperfectos mecánicos al trabajar por contacto fí-

sico. En los finales de carrera, sus contactos eléctricos también tienden a un desgaste con los ciclos de trabajo. La ventaja que presentan los electromecánicos es su alta capacidad de cierre y apertura, gracias a la cual pueden manejar cargas de mayor tamaño.

A) Detectores de proximidad magnéticos y detectores reed

Un detector magnético puede captar un campo magnético generado por un imán y se utilizan mucho para detectar movimientos de partes móviles en máquinas, cierre de puertas, etc.

Un tipo especialmente utilizados en neumática son los detectores *reed*, empleados para detectar la posición del émbolo de cilindros o pistones neumáticos.

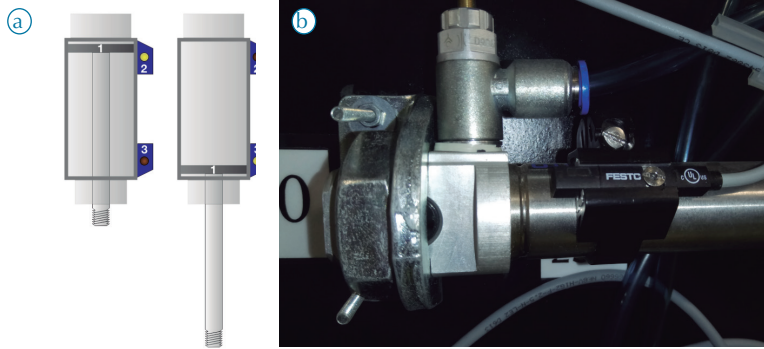


Figura 5.13
Activación de detectores reed para control de posición de cilindros (a) y detector reed Omron con soporte anular (b).

Se montan sobre las camisas de pistones que no sean de material ferromagnético (plástico, aluminio, latón, etc.) y en cuyo émbolo interno se monta un imán permanente. Al acercarse el imán al detector, el campo magnético es captado y se produce el cierre del contacto. Habitualmente, son proporcionados en el conjunto por el fabricante al adquirir el cilindro, pues, para fijarlo en él, se requiere un diseño común.

CUADRO 5.2

Ventajas y desventajas de los detectores de proximidad magnéticos y los reed

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ● Larga duración. ● Poco sensibles a la suciedad, aunque sí les afectan los efectos magnéticos de otros materiales. ● Muy compactos. ● Los fabricantes ofrecen diseños cilindro-sensor con facilidad de montaje y sin necesidad de elementos auxiliares para su colocación. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Se controla la posición del émbolo, pero no estrictamente la del vástago en movimiento (en manipulado por ventosa, si esta se soltara o rompiera, no se tendría control real de si la carga permanece adherida). ● Cada fabricante presenta un tipo específico de sensor, que no permite montarse en cilindros de otros fabricantes. ● El campo magnético externo de máquinas, en caso de ser muy fuerte o de otros cilindros cercanos, puede afectar al sensor. ● Hay que tener en consideración en su montaje una distancia mínima entre los diferentes pistones y sensores para evitar accionamientos de los sensores por émbolos que no correspondan a su cilindro.

B) Detectores inductivos de proximidad

Detectan la perturbación del campo magnético que ha generado el captador en su proximidad.

Tienen la limitación de poder detectar solo materiales magnéticos y conductores de la electricidad, la distancia de detección depende del sensor y del material que haya que detectar. Son insensibles a la suciedad en su funcionamiento, salvo que haya polvo metálico en el ambiente. Tiene limitaciones para detectar de canto chapa metálica de pequeño espesor.

Según el material que deba detectarse, hay que aplicar correcciones sobre la distancia, pues no todos afectan por igual al campo magnético.



Figura 5.14
Detector inductivo Omron con cable incorporado.

C) Detectores capacitivos

Detectan la perturbación por la presencia de un objeto, metálico o no metálico, del campo eléctrico que ha generado el captador en su proximidad. Detectan todo tipo de materiales, aunque, igual que en el caso de los inductivos, con diferente sensibilidad (son más sensibles a los materiales metálicos y al agua).

Habría, por tanto, que consultar la ficha técnica y verificar la distancia efectiva de detección en función del material que haya que detectar y la dimensión del elemento detectado.

Como desventaja, puede citarse que son sensibles a la suciedad y a la humedad y que, cuando el espesor de un plástico es muy pequeño (en torno al milímetro), puede fallar la detección.



Figura 5.15

Detector capacitivo Pepperl+Fuchs.



Actividad propuesta 5.2

Indica qué problemas puede haber en las siguientes situaciones:

- En una máquina plegadora neumática, se emplean detectores *reed* para el control de posición de los cilindros. Se observan dos cilindros neumáticos en paralelo a muy poca distancia (apenas unos milímetros).
- En un aserradero, en una zona de corte donde se genera gran cantidad de serrín, se ha sustituido un detector electromecánico de roldana por un detector capacitivo.
- Se dispone de una máquina que procesa piezas de aluminio y la posición de estas se controla con detectores de proximidad electrónicos inductivos a tres hilos. En una prueba, se han sustituido las piezas de aluminio por piezas de poliamida.
- Hay una plataforma metálica por la que deslizan cajas de cartón. En unos orificios, se encuentran encastrados unos detectores capacitivos para detectar su paso. Un técnico sustituye los detectores por unos disponibles no enrasables al hacer un mantenimiento preventivo.

D) Sensores ópticos

Se basan en la emisión de un haz lumínico que, tras ser reflejado o interrumpido, se recibe o no en el receptor, lo que permite interpretar la existencia o no de pieza. El haz puede ser de distinta naturaleza y el efecto que dicha emisión tiene sobre la zona de actuación del sensor (reflexión, interrupción, etc.) es captado por un receptor. Constan, por tanto, de emisor y receptor, que pueden estar integrados en el mismo dispositivo o estar físicamente separados (figura 5.16).

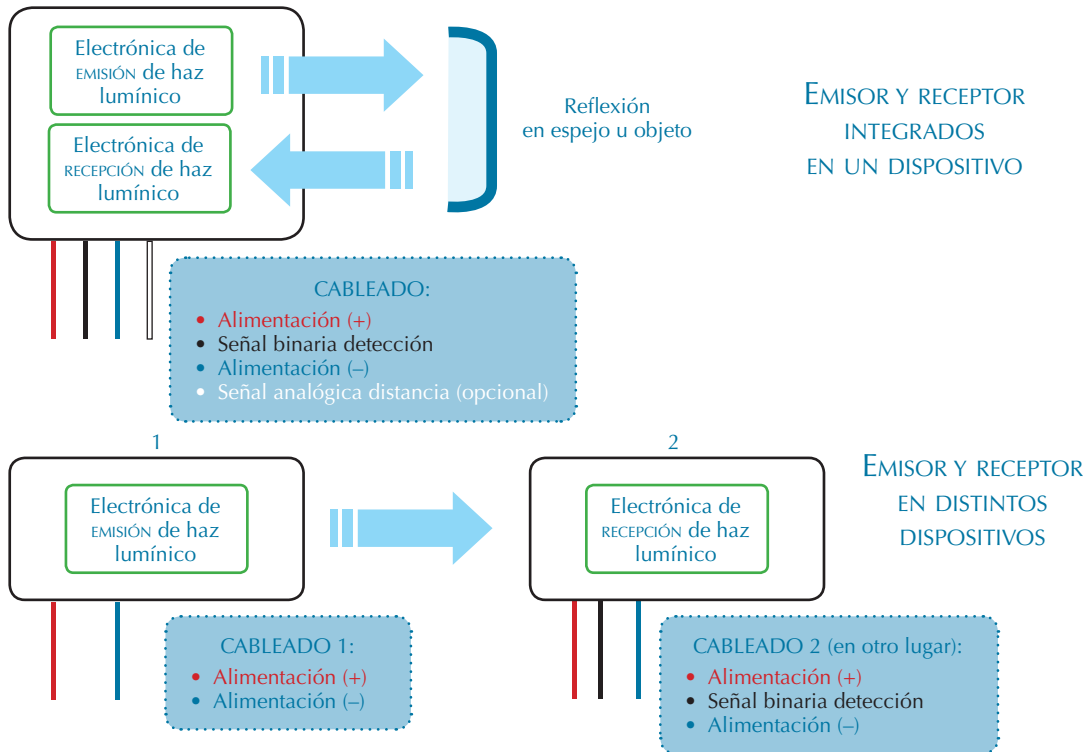


Figura 5.16
Detectores ópticos con emisor y receptor en un dispositivo o en dos.

Por ejemplo, un haz puede ser reflejado por una pieza y, según su recepción o no, determinar el sensor la existencia de pieza. También puede ser reflejado por un elemento reflector situado por detrás de la trayectoria de la pieza, de modo que, si el haz se interrumpe, se interpreta que hay pieza. En el caso de que emisor y receptor se encuentren separados, la suciedad y humedad en el ambiente afectan menos que en los casos de reflexión, pues el camino que recorre el haz es directo, no de ida y vuelta, y, además, sin reflexión.

Algunos detectores de reflexión sobre objeto no son únicamente detectores de proximidad, sino que, adicionalmente, son capaces de determinar la distancia y proporcionan un cuarto cable con una señal analógica de salida.

La naturaleza del haz emitido determina su aplicación. Un haz infrarrojo es invisible y menos sensible a la luz artificial. Un haz rojo o verde es más sensible a la luz ambiente, pero, al ser visible, permite alinear el dispositivo. Un haz láser tiene largo alcance y es capaz de detectar elementos muy pequeños, pero protección ocular. Adicionalmente, para discriminar de otras fuentes que puedan perturbar la detección, el haz se emite polarizado o a pulsos con determinada frecuencia.

También se caracterizan por poder realizar mediciones en lugares muy estrechos si son sensores que pueden montarse con fibra óptica. Por ejemplo, un pequeño cable de fibra óptica podrá discurrir por trayectos sinuosos y situarse su final en ranuras o agujeros muy estrechos. En el mismo cable, puede incluir tanto la vía de emisión de luz como la de su captación.

Se distinguen dos configuraciones:

1. *Modo de operación con luz:* se activa cuando el receptor recibe el haz del emisor y se emplea en reflexión sobre el objeto detectado.

2. *Modo de operación en oscuridad:* activación si se interrumpe el haz de luz, el receptor no recibe luz. Barrera y réflex sobre espejo.

Los sensores ópticos de proximidad se clasifican en:

1. Sistemas de barrera.
2. Sistemas réflex sobre espejo (réflex sobre espejo y réflex sobre espejo con luz polarizada).
3. Reflexión sobre objetos.
4. Reflexión sobre objetos con borrado de plano anterior o posterior

E) Sistemas de barrera

Se detecta la pieza cuando se sitúa entre emisor y receptor, bloqueando el haz emitido por el emisor, por lo que el receptor, situado justo en frente, no puede captarlo.

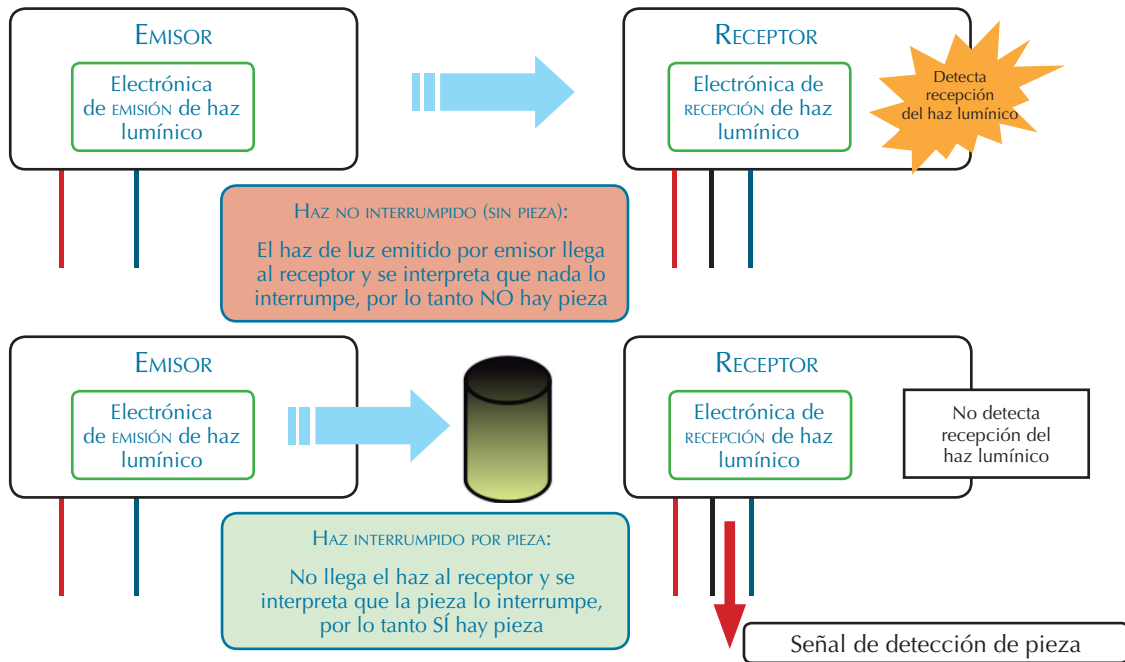


Figura 5.17
Sistema de barrera.

Se caracterizan por:

1. Proporcionan hasta 50 m de alcance.
2. La detección es muy precisa.
3. Tienen resistencia a ambientes sucios y con ruido lumínico.
4. No detectan objetos transparentes.
5. Requieren un montaje del emisor y el receptor opuesto y alineados entre sí.

El sistema de barrera típico consiste en un emisor y un receptor opuesto.

Para la detección de piezas con distancias muy pequeñas, también existen detectores de barrera de horquilla, en los que, en un mismo cuerpo (y cableado unificado) con forma de horquilla, el emisor y el receptor se integran en ambos extremos de esta.

Por seguridad, para la detección de un acceso no autorizado a zonas de máquinas consideradas peligrosas, existen sistemas de columna en el mercado, que consisten en varios emisores en una de las columnas y los receptores correspondientes en otra columna. Cualquier interrupción de algún haz a lo largo de la altura de las columnas significará una intrusión y deberá activarse la rutina de seguridad.

F) Sistemas réflex

Se basa en la detección del haz de luz por su reflexión. Se compone de una unidad de emisor y receptor y un reflector o espejo (alineado con dicha unidad). El emisor emite el haz que refleja el reflector hacia el receptor. Suelen incorporar una emisión de haz visible rojo para alinear en el montaje. El reflector es especial (de triedros trirrectángulos) y proporciona una reflexión devolviendo en la misma dirección todo haz luminoso incidente.

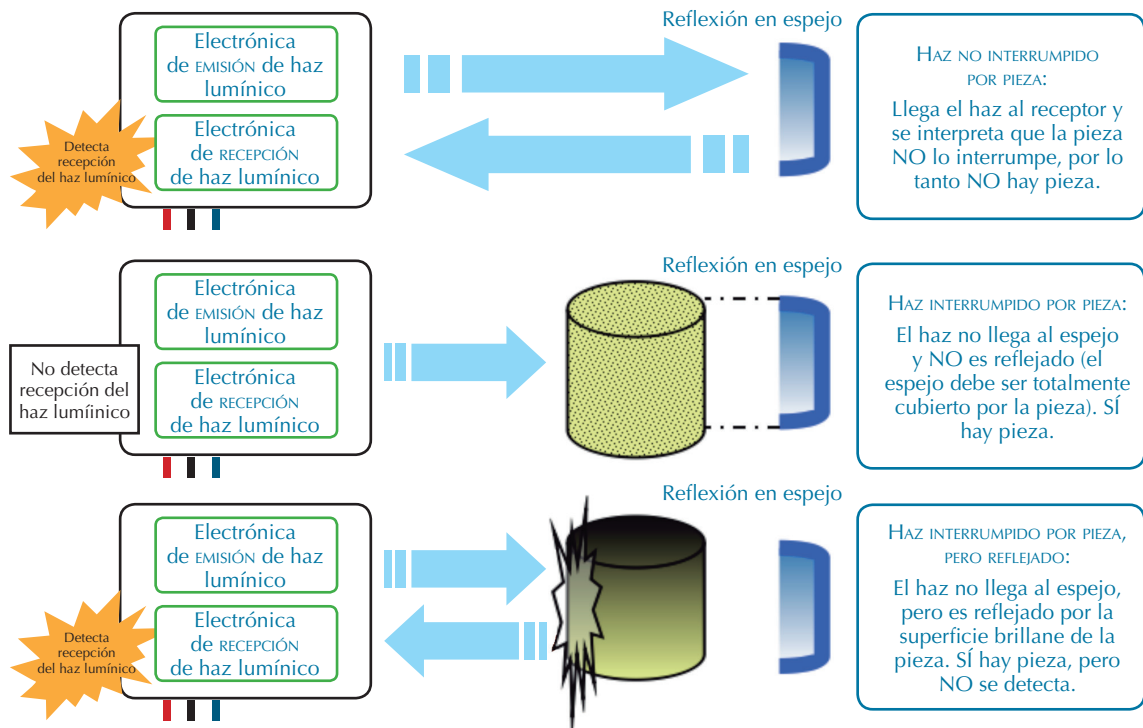


Figura 5.18
Sistema réflex.

Se caracterizan por:

1. Alcance en torno a los 15 m (debe recorrer la distancia de ida y vuelta).
2. Solo es necesario un elemento cableado en un lateral del montaje.
3. Detectan objetos opacos, pero también pueden detectar objetos transparentes con detectores específicos. Sin embargo, presentan problemas con los objetos brillantes

que reflejan el haz, pues el detector confunde esta reflexión con la del espejo. Al recibir el haz como si fuera reflejado por el espejo, no puede detectar la presencia de la pieza.

4. Deben emplearse en ambientes limpios.
5. Como inconveniente, el reflector o espejo debe ser más pequeño que el objeto detectado, para garantizar que el propio objeto tape completamente la posible reflexión.

G) Sistemas réflex con luz polarizada

Se basa en la detección del haz de luz emitido con filtros de polarización en su emisión y tras su reflexión. Su funcionamiento y características son similares a los réflex, pero emplea ingeniosamente la emisión y reflexión especial de un haz de luz polarizada. Se instala un filtro polarizador sobre el emisor para emitir rayos en el plano vertical y otro filtro sobre el receptor, que solo le permite detectar los rayos recibidos en un plano horizontal. El espejo que es especial despolariza este haz, devolviendo el haz con rayos en el plano vertical y horizontal. Esto permite que el receptor también detecte rayos del haz (reflejado en el espejo) en el plano horizontal. Cuando hay un objeto brillante, este refleja el haz del emisor polarizado manteniendo los rayos en el plano vertical y, por tanto, no será detectado por el receptor (con un filtro para detectar solo los rayos en el plano horizontal).

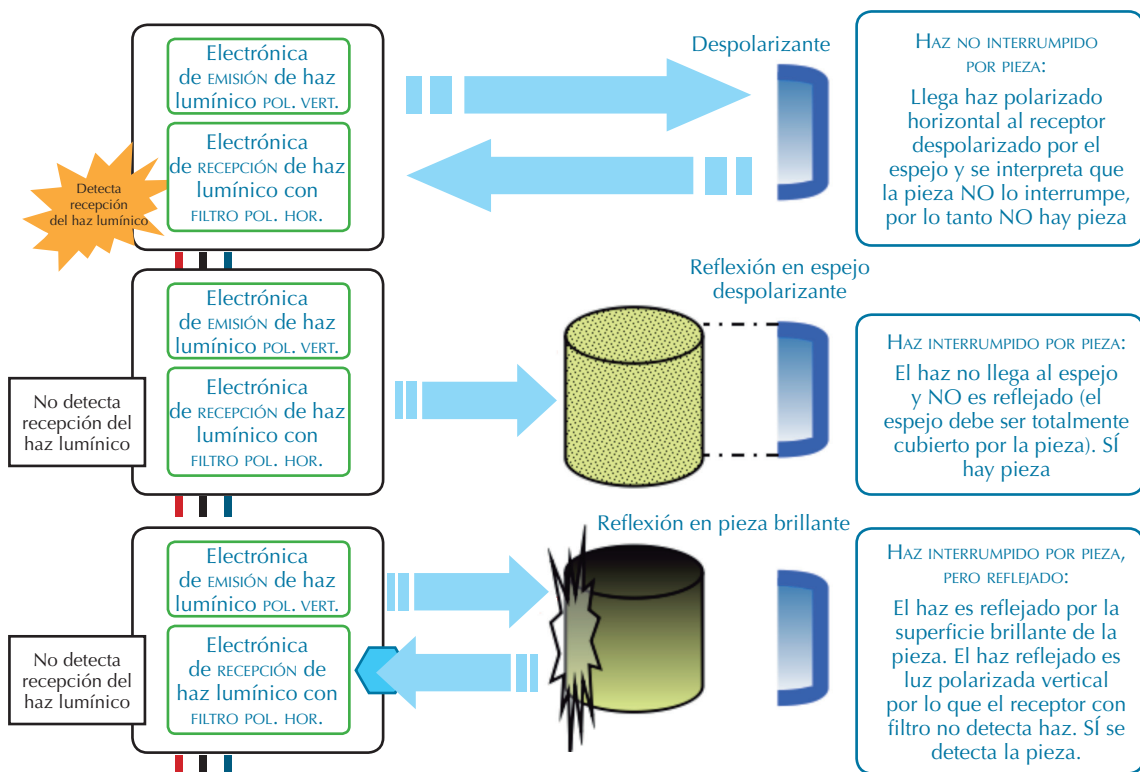


Figura 5.19
Sistema réflex con luz polarizada.

Por lo tanto, como característica diferenciadora frente al sistema réflex normal, puede destacarse que detecta objetos opacos, transparentes y brillantes.

H) Reflexión sobre objetos

El principio de funcionamiento es el mismo que el de los sistemas réflex, pero, en este caso, el propio objeto debe hacer de espejo. De nuevo, se montará una unidad de emisor y receptor alineado con la perpendicular de la superficie que haya que detectar, que debe reflejar el haz emitido por emisor hacia el receptor.

- Alcances inferiores, de hasta aproximadamente 1000 mm, según las características del objeto detectado: color y poder reflectante.
- Solo es necesario un elemento cableado en un lateral del montaje.
- Deben emplearse en ambientes aún más limpios que los sistemas réflex y las piezas deben estar limpias en su cara de detección.
- Detecta opacos, brillantes y transparentes (con detectores específicos).

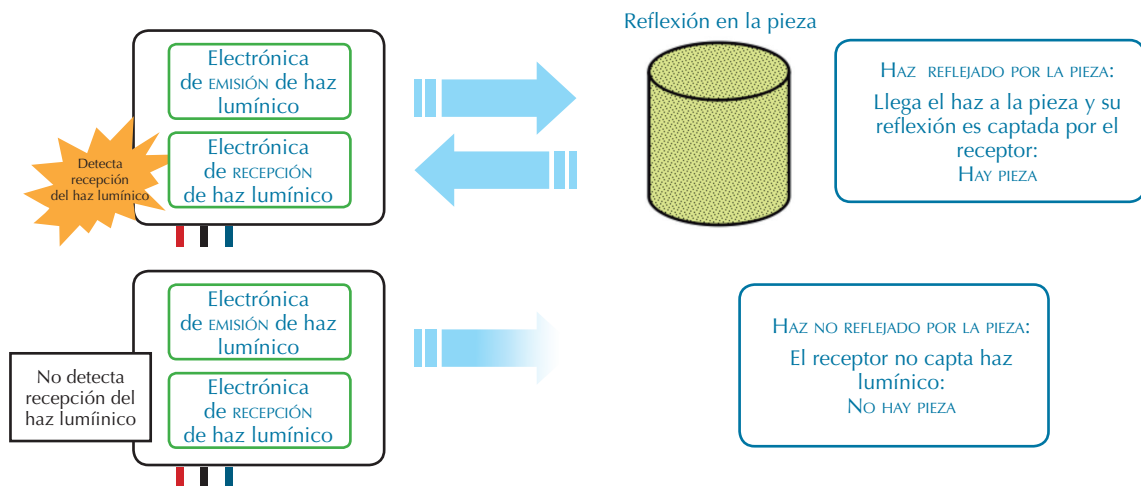


Figura 5.20
Sistema réflex sobre objeto.

I) Reflexión sobre objetos con borrado de plano posterior o anterior (BPP, BPA)

Cuando es necesario situar al detector en una zona con poco espacio, a menudo el haz se encuentra con un fondo que está situado detrás de la pieza que ha de detectarse, pero que puede dar una detección falsa al captar dicho fondo en lugar de la pieza.

Estos detectores se basan en la detección del haz de luz emitido tras su reflexión en el propio objeto detectado, pero siendo capaces de ignorar la reflexión del plano posterior. En su construcción interna, dispone de dos receptores: uno para detectar el tipo de reflexión del objeto y otro para detectar el tipo de reflexión del fondo y ser capaz de descartar el segundo.

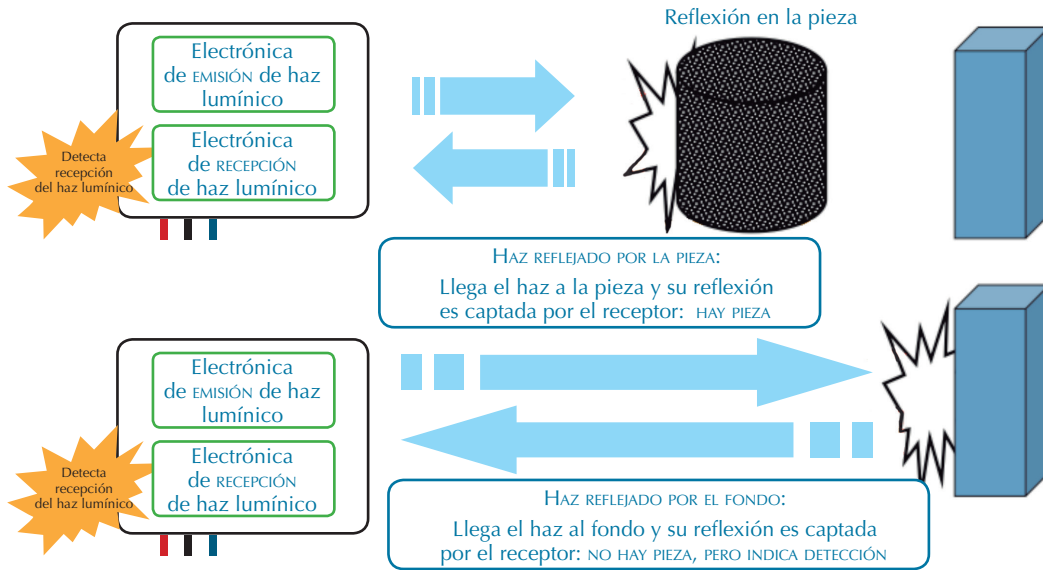


Figura 5.21

Falsa detección por presencia de fondo.

En el caso de que la falsa detección pudiera ser ocasionada por la base o algún elemento situado antes de la pieza, los detectores con borrado de plano anterior, análogamente a los previos, pueden detectar el haz reflejado por el objeto y también detectar e ignorar la reflexión del plano anterior (zona que pueda presentar elementos reflectantes).

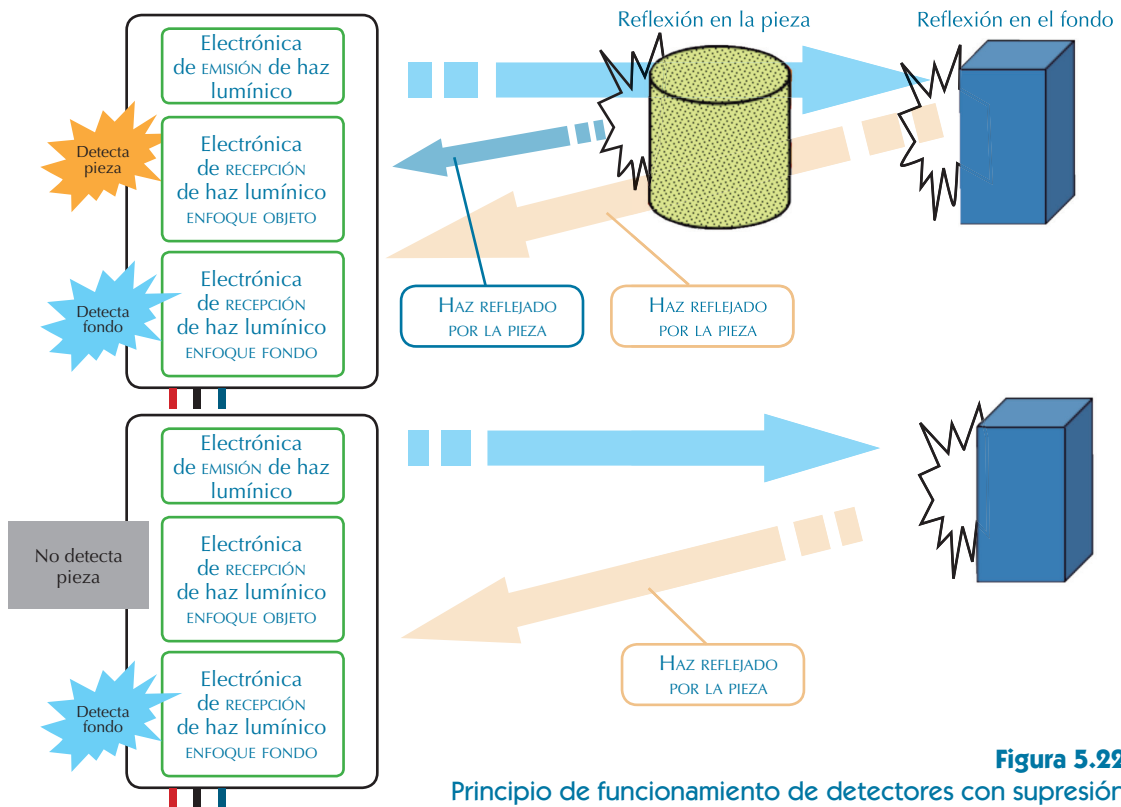


Figura 5.22

Principio de funcionamiento de detectores con supresión o borrado de plano posterior (BPP).

Se trata de la detección por reflexión sobre objetos, por lo que sus características son las mismas, además de que son insensibles a la naturaleza del plano anterior o posterior (aunque sea más reflectante que el objeto detectado) y que su distancia de detección se reduce hasta los 300 mm.

5.2.5. Sensores o detectores electrónicos de posición

Estos sensores, también denominados *detectores de distancia*, son capaces de ofrecer una salida analógica relacionada con la distancia entre el sensor y el objeto detectado. También suelen incorporar una salida todo o nada para ejercer de detector de proximidad si se configura como tal y el habitual ajuste de sensibilidad para dicha salida. Al incorporar alimentación (cables marrón y azul), salida digital binaria (cable negro) y salida analógica (cable blanco o amarillo) serán detectores con cuatro hilos.

A) Detectores de posición inductivos

Están basados en el mismo principio de funcionamiento que los detectores de proximidad, según la perturbación del campo magnético percibida, son capaces de calcular la distancia a la que se encuentra el objeto y ofrecer una salida analógica relacionada.

B) Detectores de posición ópticos

Están basados en la emisión de un haz de luz que puede variar, láser u otros mediante led y la medida del tiempo entre emisión y retorno tras la reflexión en el objeto.

Sus características son similares a las de los detectores ópticos de presencia, aunque aporta precisiones elevadas en la lectura de las distancias.

A menudo, incorporan un *display* que indica la distancia detectada.

C) Detectores de posición por ultrasonidos

La emisión de ondas de sonido permite detectar sin contacto la distancia entre objeto y detector midiendo el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de la onda tras rebotar en el objeto. El sensor conoce la velocidad de la onda en el sonido, con lo que, sabiendo dicho tiempo, es capaz de calcular la distancia.

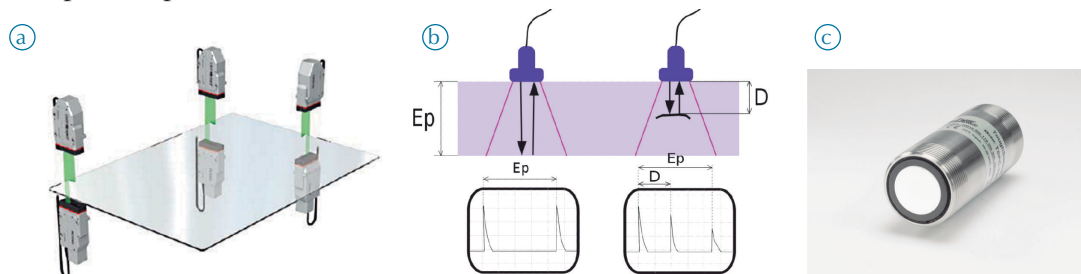


Figura 5.23

Detectores de posición ópticos láser para nivelado de vidrio (a), principio de detección de posición por ultrasonidos (b) y sensor ultrasonido industrial Senix (c).

Son capaces de realizar una supresión de ruido de fondo y de discriminar materiales extraños del entorno. Dado que las ondas de sonido viajan por el aire, si este circula muy violentamente o hay muchísima contaminación acústica, las lecturas pueden verse perturbadas y puede ser una limitación.

Sus características son las siguientes:

- a) Capaces de funcionar con polvo, suciedad y niebla en el ambiente.
- b) Su morfología es variada, similar a la que presentan detectores inductivos o capacitivos.
- c) Alcances según los modelos de hasta 8 m.
- d) Tamaños compactos.
- e) Medición fiable con independencia de la textura, color, transparencia y brillo del material, así como de la luz ambiental.
- f) Detección de distintos tipos de materiales como, por ejemplo, cristal y láminas transparentes o líquidos.
- g) Pueden tener la opción de calibrado con un botón de aprendizaje de detección del objeto para proporcionar la supresión de fondo y poder distinguirlo.



Actividad propuesta 5.3

Señala qué detectores ópticos seleccionarías en las siguientes situaciones:

- a) Un tren de laminado de chapa metálica en la que hay una zona peligrosa muy amplia de 8 m de largo y 2 m de alto, que no puede cerrarse físicamente, pues es la zona de acceso para la carga por carro de las bobinas en bruto, pero a la que hay que restringir cualquier posible acceso durante el funcionamiento de la máquina.
- b) En una empresa de áridos, desea detectarse el paso de piedras de tamaño pequeño. Su tamaño es muy variable, igual que su geometría.
- c) Quieren instalarse sensores para medir la distancia de una máquina de tampografía a láminas de cristal transparente.
- d) Una línea de producción de tazas esmaltadas requiere instalar un detector situado en el lateral de la cinta transportadora con un ancho de 20 cm.

5.2.6. Detectores ópticos de color y marcas

Se basan en la capacidad de emitir de forma diferenciada haces de distinto color y de detectar selectivamente su reflexión por parte del objeto o superficie que ha de leerse:

- a) Detectan el color, la longitud de onda de la luz reflejada en el objeto (marca o fondo).
- b) La luz roja emitida permite mayor alcance, pero menos sensibilidad al color de la superficie.
- c) La luz verde emitida permite menor alcance, pero mayor sensibilidad al color de la superficie.
- d) El emisor envía luz compuesta con una proporción de los tres colores fundamentales RGB (*red*, *green* y *blue*) y el receptor es capaz de distinguir los niveles que le retornan reflejados de cada uno de ellos para hacer una lectura del color de la superficie reflectante.

- e) Se emplean para detectar colores de la superficie o si existe en la pieza una marca de determinado color.
- f) Son sensibles a las condiciones de luz en la zona de detección.
- g) Requieren calibración.

5.2.7. Sensores de presión y fuerza

Muchos de estos detectores son de tipo analógico y ofrecen una señal con un rango de tensiones o intensidades. Para convertir estas señales en otras que puedan conectarse eléctricamente a una entrada analógica del PLC (típicamente 0-10V, 4-20 mA), se requiere un convertidor de señal específico para cada sensor.

A) Presostato

Funciona como interruptor todo o nada a partir de un umbral de presión, cerrando o abriendo los contactos de un circuito eléctrico en función de la lectura de presión de un fluido. Los contactos pueden ser de cierta potencia para, directamente, activar o desactivar actuadores. La lectura se consigue con un conducto conectado a la cámara en la que se controla la presión. Existen diversos principios de funcionamiento, pero uno de ellos es que dicho fluido ejerce presión sobre un pistón interno moviéndolo para arrastrar dos contactos que se unen cerrando un circuito. Si la presión baja, un muelle empuja al pistón hacia la posición original y los contactos se separan.

B) Sensores de presión

Se basan en el empuje de presión sobre dispositivos como tubos con fluido a presión calibrada, diafragmas o fuelles que actúan sobre un indicador y circuito de señal: manómetro en U, tubo de Bourdon, sensores de diafragma, sensores de fuelle, etc. El indicador puede basarse en un dispositivo mecánico, inductivo (solenoides) o capacitivo (variación de capacidad de un condensador según deformación). Estos sensores pueden actuar como presostato con señal de mando digital binaria y también pueden incorporar una salida analógica y *display* gráfico.

C) Sensores de fuerza

En general, se basan en la deformación del material sobre el que se encuentra un hilo conductor o semiconductor (denominado *galga extensiométrica*) adherido. La deformación de ambos produce una variación de longitud del hilo conductor y de su resistencia que es medible.

Un ejemplo de este tipo de sensores son las denominadas *células de carga*, que consisten en galgas extensiométricas montadas sobre un elemento mecánico con un diseño particular (en forma de U o de horquilla) para deformarse de forma conocida frente a un tipo específico de esfuerzo (flexión, torsión, etc.).

**Figura 5.24**

Sensor de presión WIKA PSD-30 (a), Galgas extensiométricas (b) y célula de carga 100 kN (c).

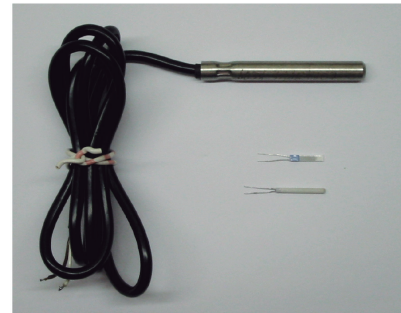
D) Sensores de fuerza por efecto piezoeléctrico

Estos detectores generan, por las propiedades piezoeléctricas de los cristales de cuarzo, diferencias de tensión eléctrica con la deformación del material. La deformación, por tanto, produce una variación de tensión medible y transformable en una medida de la fuerza aplicada.

5.2.8. Sensores de temperatura

A) Sondas de temperatura

Son muy empleadas y se basan en la variación de resistencia de un conductor dentro del sensor que se introduce en la zona de la que desea medirse la temperatura. La PT100 es muy conocida en la medida industrial de temperaturas.

**Figura 5.25**

Sonda con sensor de temperatura PT100.

B) Termistores o termistancias

El principio de funcionamiento es similar al de la sonda de resistencia, pero detectando la variación de resistencia de un semiconductor. Hay de dos tipos según varía la resistencia con el aumento de temperatura:

1. PTC (*positive temperature coefficient*): la resistencia aumenta proporcionalmente con la temperatura. Tienen una curva resistencia-temperatura muy poco lineal y, por tanto, solo sirven en un rango estrecho de temperaturas. En un circuito de señal analógica, la tensión analógica en la señal de entrada que mida la caída de tensión en la PTC aumentará con la temperatura (al incrementarse la resistencia, se incrementará la caída de tensión).
2. NTC (*negative temperature coefficient*): la resistencia disminuye con el aumento de temperatura. Tienen una curva resistencia-temperatura bastante lineal. En un circuito analógico...

gico de tensión, la tensión analógica en la señal de entrada que mida la caída de tensión en la NTC disminuirá con la temperatura (al disminuir la resistencia, también lo hará la caída de tensión).

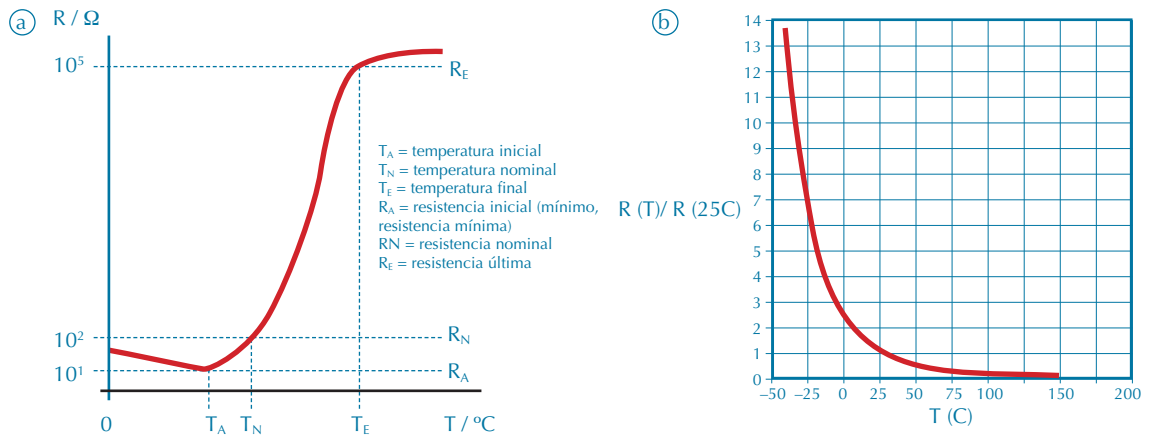
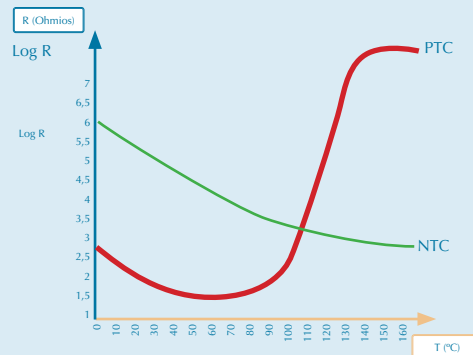


Figura 5.26
Termistor PTC (a) y termistor NTC (b).

Actividad propuesta 5.4



Según la gráfica adjunta, determina qué resistencias en ohmios tendrán dos termistancias PTC y NTC cuyo comportamiento se representa a 20 y 73 °C.



C) Termopares

Se basan en el fenómeno por el cual se produce una variación de tensión en los extremos de un circuito formado por la unión de dos metales a distinta temperatura.

Se caracterizan por:

1. Ser los más utilizados.
2. Tener un rango de medida muy amplio (entre °C -270 y 300 °C).
3. Poseer mucha flexibilidad (adaptable a procesos con diversas temperaturas) a precio contenido.
4. Presentar alta fiabilidad y robustez.
5. La señal del sensor es lineal (proporcional) con la diferencia de temperaturas, pero es en mV, por lo que, habitualmente, requiere acondicionamiento de la señal.

6. No requieren alimentación.
7. El extremo frío requiere estar en contacto con un elemento que mantenga una temperatura de referencia. Si esto no es posible, hay que realizar una corrección.

D) Termostato

Es una denominación genérica de un sensor todo o nada que abre o cierra sus contactos según se alcance una temperatura determinada (sensor similar en concepto al presostato). Puede trabajar basándose en distintos modos de funcionamiento. Pueden funcionar por la unión mecánica de dos materiales de distinto coeficiente térmico de dilatación (por ejemplo, bimetales) o con termorresistencias o termopares. Puede tener contactos de potencia para accionar directamente a un actuador.

E) Otros sensores de temperatura

- *Basados en semiconductores*: son limitados en su rango de temperatura de trabajo, pero económicos; requieren alimentación eléctrica para su funcionamiento; a menudo tienen un encapsulado frágil (no preparado para aplicaciones industriales en contacto directo con el ambiente o materiales), y son muy lineales. Por ejemplo, el sensor LM35.



Figura 5.27
Termopar (a) y sensor electrónico LM35 (b).

- *Pirómetros de radiación*: basados en la radiación total emitida por el cuerpo, se emplean en procesos que resulta adecuado medir a distancia, pues, por ejemplo, no puede medirse por contacto dado el movimiento existente o por ser muy altas las temperaturas en el proceso
- *Sensores bimetálicos*: dos metales unidos en una lámina con diferente coeficiente de dilatación hacen que esta se deforme en arco. Puede traducirse la medida de la deformación o la fuerza ejercida a un valor de temperatura.

5.2.9. Sensores de velocidad: *encoder* y *resolver*

Un encoder es un sensor rotativo o lineal que, mediante un diseño interno, puede enviar pulsos eléctricos indicando el ángulo girado y la posición dentro del giro o desplazamiento.

El más empleado es el rotativo, donde una luz se emite por un lado de un disco perforado solidario con el eje puesto en paralelo con otro disco fijo también perforado. En función del giro y el diseño de la posición de los agujeros pasantes, la luz de los emisores alcanza a los fotorreceptores o no, situados al otro lado de los discos. Según sea la señal recibida, teniendo en cuenta dicho diseño, se determina el giro o la posición angular.

Hay dos tipos de encoders: el encoder incremental y el encoder absoluto.

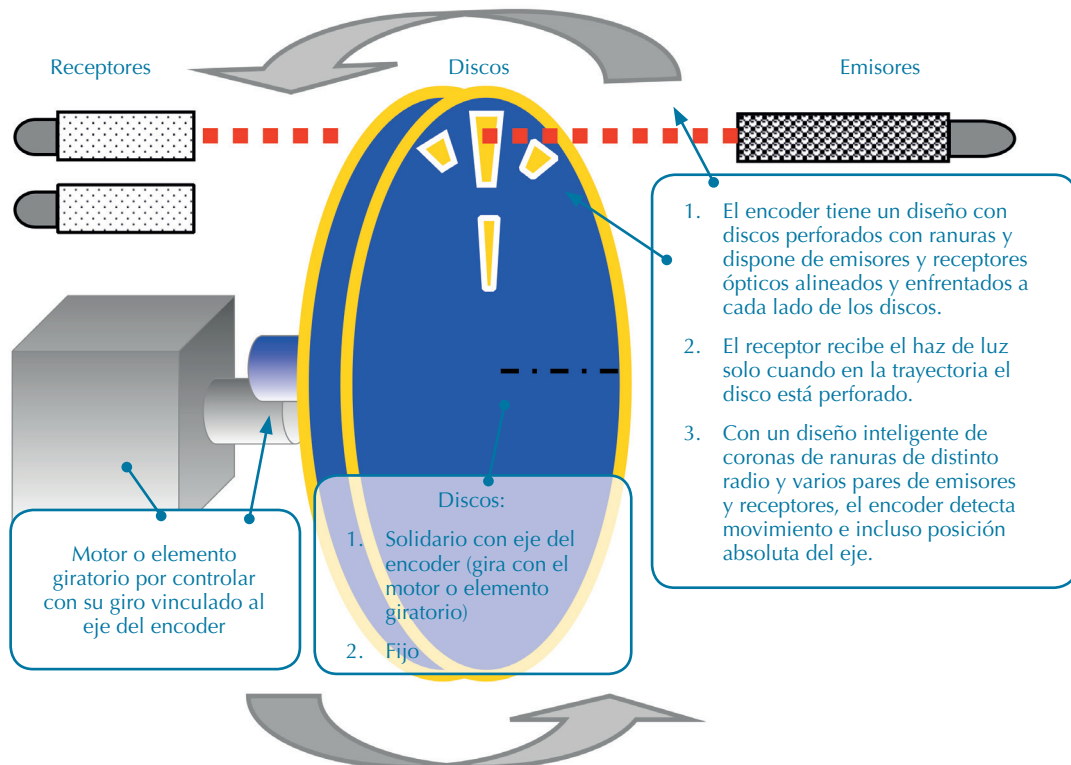


Figura 5.28
Principio de funcionamiento de un *encoder* rotativo.

A) *Encoder incremental*

No dispone de una referencia de la posición angular en la que se encuentra en el momento de la medición. Solo envía pulsos de forma proporcional al ángulo avanzado.

El desplazamiento debe contarse desde un origen y se determinará con el conteo de los impulsos que emitirá el encoder. El encoder puede llevar una referencia de origen para contar a partir de ella y determinar giros completos (pero no posición angular sin pasar previamente por dicha referencia).

Con dos pares de emisor y receptor situados en una posición determinada, puede conocerse el sentido de giro según qué sensor proporciona primero un flanco de subida. Un tercer sensor y una muesca u orificio único pueden facilitar una señal de inicio u origen de giro.

La conexión más sencilla de un encoder incremental a un PLC, por ejemplo, consistirá en dos líneas de alimentación (positivo y negativo en CC) y, por lo menos, un cable para los pulsos (señal). Puede haber módulos intermedios para adecuar tensiones o para garantizar un

transporte de la señal fiable. Deberán consultarse los manuales tanto del encoder como del PLC empleados.

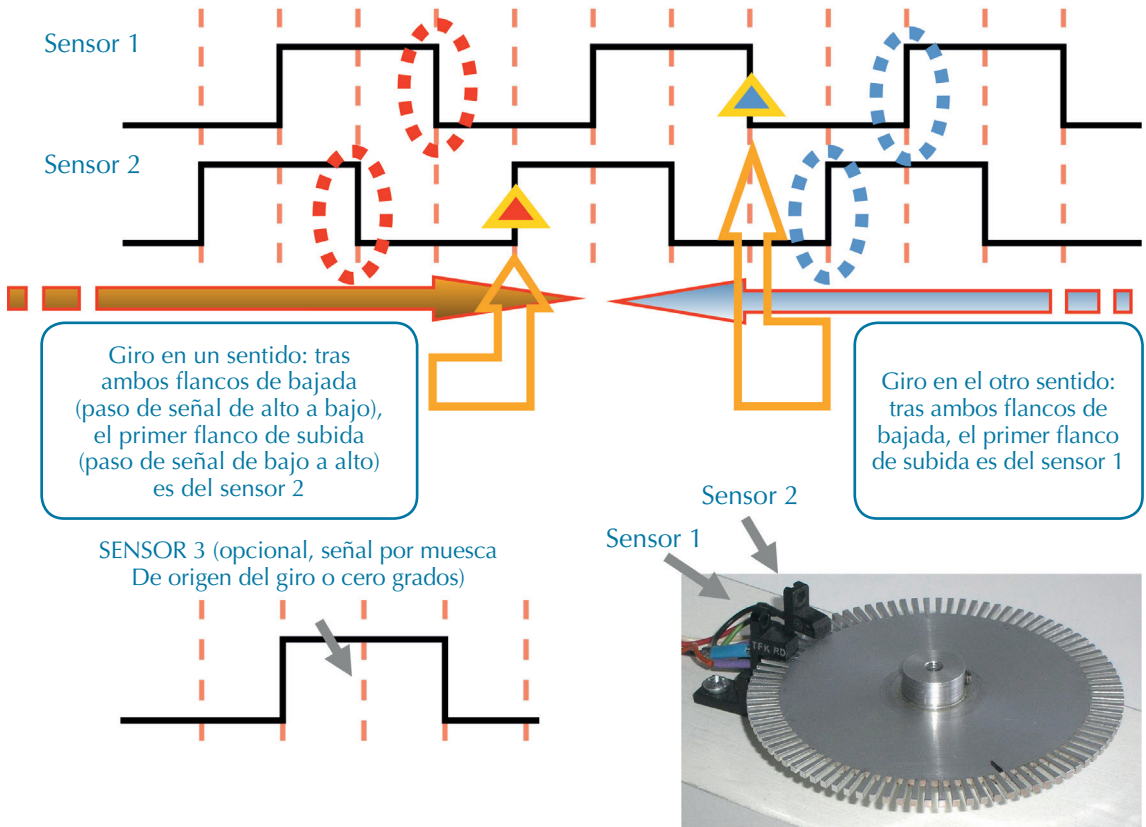


Figura 5.29
Detección de sentido de giro y origen con disco de encoder incremental.

B) Encoder absoluto

Dispone de una referencia de posición y también envía pulsos para proporcionar información sobre el ángulo avanzado. El disco móvil dispone de pistas concéntricas con zonas opacas y transparentes diferentes a lo largo del radio, que se combinan de modo que, al hacer la lectura de las posiciones radiales con los sensores, cada posición angular del encoder proporciona un binario distinto que puede asociarse a un ángulo.

La codificación empleada en encoders absolutos es el denominado *código Gray*, desarrollado por el investigador Frank Gray. En los discos diseñados en el código Gray, un cambio de posición angular supondrá un solo cambio en el código binario, es decir, solo producen un cambio de bit dentro del código radial en cada paso. El incremento con código binario estándar presenta un problema para la transmisión de datos, ya que algunos pasos implican cambios en más de un bit (dígito). Por ejemplo, en el cambio del paso 3 al 4, el código binario cambia de 0011 a 0100, con tres bits cambiando el estado. Debido a la rapidez de lectura de dispositivos digitales, es imposible que los agujeros estén alineados de modo absolutamente perfecto y que por lo tanto los bits cambien exactamente al mismo tiempo y, en esos instantes, pueden generarse lecturas falsas del valor de posición. El código Gray evita este problema cambiando solo un bit en cada paso.

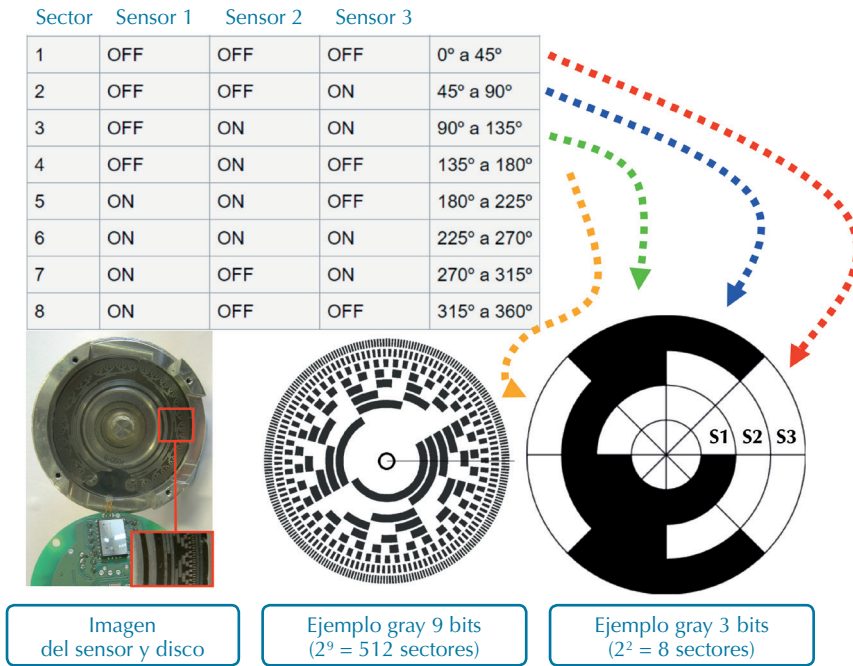


Figura 5.30
Encoder absoluto y código Gray.



SABÍAS QUE...

El cableado de un encoder absoluto puede ser en paralelo, tomando la señal de salida pin a pin o empleando conversores digitales para transformar el código Gray de salida en una señal portadora de datos que sea interpretada por el receptor, por ejemplo un PLC. En este segundo caso, serán interfaces que adecuan el mensaje a un protocolo serie o de bus y que pueden acondicionar la señal para el transporte (niveles de tensión, etc.).

C) Encoder lineal

Es un codificador de posición lineal, también se conoce como *transductor lineal*, y consta de una cabeza lectora deslizante sobre una regla para identificar la posición en una traslación (trayectoria recta). El sensor lee la escala de la regla con el fin de convertir la posición en una señal analógica o digital.

Igual que con el rotatorio, el codificador puede ser incremental o absoluto. La tecnología de lectura es diversa y está basada en sensores ópticos, magnéticos, inductivos, capacitivos, etc., pero el más habitual es el sistema óptico con lectura directa sobre regla graduada.

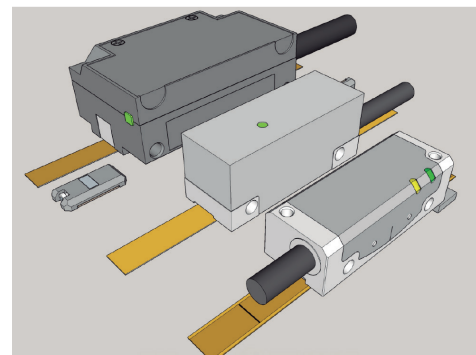


Figura 5.31
Encoder lineal.

D) Resolver

El encoder de cualquier tipo es, por tanto, un dispositivo digital, ya que la posición y el movimiento se dan mediante pulsos.

El predecesor del encoder, el resolver, es un sensor analógico de posición de giro. Se basa en un transformador eléctrico con unos bobinados en el eje giratorio y otros en la parte estática, de modo que producen un juego de ondas senoidales analógicas de las que puede deducirse una posición absoluta dentro de la revolución. Aunque se considera un dispositivo analógico,.. dispositivo analógico, pueden ir acompañados de convertidores de convertidores electrónicos que ofrecen una señal digital.



Actividad propuesta 5.5

Las zonas oscuras son los orificios del disco mostrado correspondiente a un *encoder* absoluto. Construye la tabla de valores recibidos en una tabla completa si el giro solidario con el eje controlado es en sentido horario, tal como se observa, y la primera lectura es 000 (posición de la línea de sensores). Razona si se obtiene el código Gray y si sucedería lo mismo en sentido antihorario.

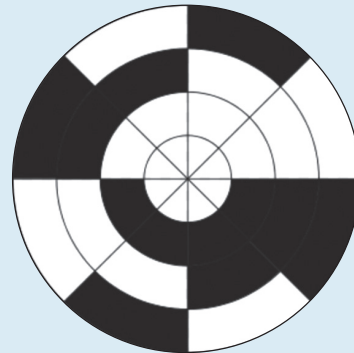


Figura 5.32
Disco encoder de 3 bits.

5.2.10. Detectores de nivel

Una aplicación fundamental en la industria es la determinación del nivel de un depósito o silo. Hay dos tipos de medición:

1. *Medición de niveles límite*: se sitúan sensores a distintos niveles y cada uno de ellos dará una señal todo o nada, indicando si se ha alcanzado su nivel o no.
2. *Medición en continuo*: son sistemas o sensores capaces de aportar un dato o lectura que puede relacionarse con el nivel del depósito.

También habrá que seleccionar el sistema en función del material que el depósito aloje (líquidos o materiales en grano o polvo).

La oferta de sensores en función del material y la lectura deseada es muy amplia. Pueden clasificarse por su principio de funcionamiento y aplicaciones (figura 5.33 y cuadro 5.3).

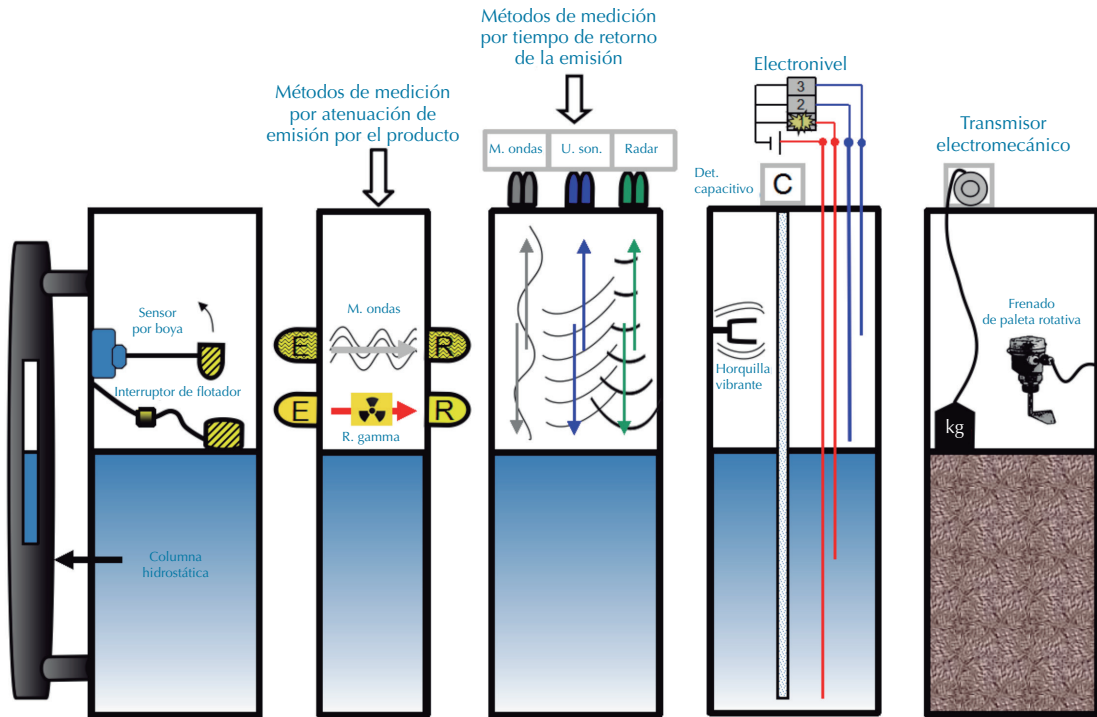


Figura 5.33
Detectores de nivel.

CUADRO 5.3
Clasificación de los detectores de nivel

<p>Sensor por boya o interruptor de flotador</p>	<p>Es simple y económico y válido para líquidos. Corresponde la medición de niveles límite. La flotación de una boya al ser alcanzada por el líquido cerrará un interruptor para dar señal del nivel alcanzado. Al disminuir el nivel y dejar de flotar, cambiará también la señal. Se emplea mucho como nivel límite en balsas, como en las plantas de tratamiento de aguas residuales. También puede encontrarse con forma de flotadores alargados que tienen la capacidad de detectar su inclinación progresiva al ser alcanzados por el líquido y de proporcionar una señal analógica para la zona de nivel coincidente con el flotador.</p>
<p>Por frenado de motor o paleta rotativa</p>	<p>Se utiliza para niveles límite y producto granulado. La medición se basa en el giro de la paleta y diferencia del par que registra entre el aire y el producto cuando el sensor es alcanzado.</p>
<p>Emisor y receptor de microondas</p>	<p>Se emplea para niveles límite y cuando no se desea el contacto con el producto del sensor. Un emisor y un receptor de microondas se sitúan enfrentados en el nivel de control deseado. Cuando el producto entra en la zona de microondas entre emisor y receptor, la señal de las microondas se atenúa y el receptor detecta que solo le llega una parte de la radiación emitida.</p>

[.../...]

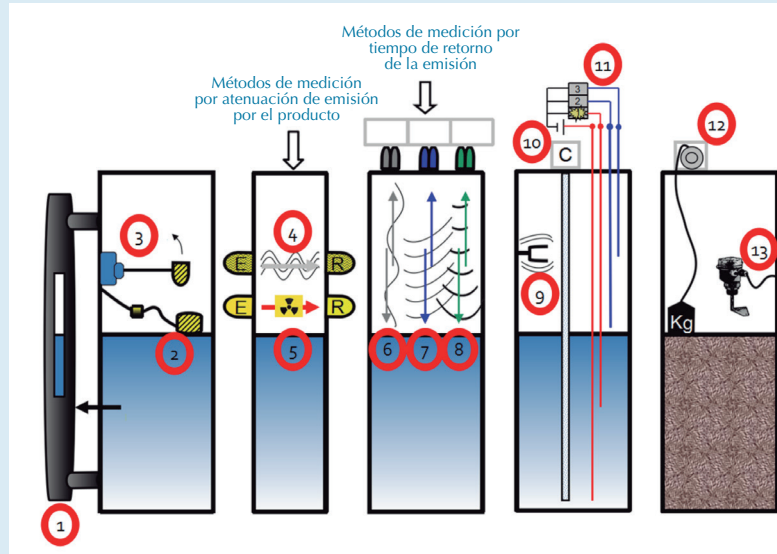
CUADRO 5.3 (CONT.)

Radiométrica o por absorción de rayos gamma	Para el nivel límite y de nivel, se emplea cuando otros métodos fallan y ofrece mucha fiabilidad en las mediciones. Su principio de funcionamiento es similar al del emisor y receptor de microondas. Una fuente de rayos gamma emite radiación, que se atenúa al pasar a través del producto. En el lateral opuesto (al emisor) del depósito, se instala un receptor que ofrece una señal según la radiación captada, cuya intensidad depende de las características y presencia del producto.
Métodos de medición por tiempo de retorno de la emisión: impulsos de radar, ultrasonidos o microondas guiadas	Sirve para la medición de nivel. Un emisor emite impulsos de radar, ultrasonidos o microondas guiadas que se reflejan en la superficie del producto y son leídos por un sensor en su regreso. Se registra el tiempo total de ida y retorno, lo que permite determinar la distancia entre el emisor y la superficie del producto. Son sensores robustos (sin partes móviles), con alta precisión e independientes en su funcionamiento del producto presente en el depósito o silo.
Medición de nivel capacitiva	Una varilla o cable y las paredes del depósito constituyen un condensador cuya capacidad dependerá del nivel de producto; vacío dará baja capacidad y lleno, alta. Por lo tanto, el valor de capacidad medido es proporcional al nivel de producto (medición de nivel).
Medición de nivel por transmisor electromecánico	Un motor con encoder hace descender una cuerda con un peso en su extremo hasta que, al contactar con el producto dentro del depósito, el peso se deposita y la cuerda deja de ejercer fuerza. El número de vueltas medido por el encoder hasta que el peso toca el material permite conocer la distancia entre el sensor y el nivel del depósito.
Medición de nivel por diferencia de presión entre la parte superior e inferior o columna hidrostática	Se emplea para líquidos, incluso pastas o fangos. Se basa en la determinación de la diferencia de presión hidrostática entre dos puntos, debida al peso de una columna de fluido.
Medición de niveles límite por horquilla vibrante	Se basa en la atenuación de la oscilación de una horquilla vibrante en contacto con un producto granulado o en la variación de la frecuencia de resonancia de la horquilla cuando entra en contacto con un líquido. Es un sensor robusto y fiable.
Detección del nivel límite por conductividad en fluidos conductores o electronivel	Un electrodo común proporciona diferencia de potencial frente a otros electrodos situados en distintos niveles, por los que solo circula corriente cuando el fluido (conductor, para poder cerrar el circuito) los alcanza. El principio de medición por conductividad ofrece un método de detección de un valor límite sencillo y seguro en líquidos. También puede emplearse la pared metálica del depósito como electrodo. Se trata de una detección o medición de nivel límite, pero, disponiendo de varias varillas electrodo, se detectan varios niveles.



Actividad propuesta 5.6

Indica la denominación del tipo de cada uno de los sensores de la imagen siguiente y también qué tipo de señal será capaz de proporcionar (límite o de nivel).



5.2.11. Lectores de códigos de barras y códigos QR

Los códigos de barras y QR están formado por una serie de agrupaciones de barras o cuadrados que codifican números binarios. Por ejemplo, en un código de barras, las barras anchas son un 1 y las estrechas un 0. Después, cada número binario se traduce en un carácter: número, letra o cualquier otro.

Pueden servir para diversos cometidos, pero, principalmente, se emplea para etiquetar de piezas o producto para su posterior identificación en:

- Control de inventario en almacenes.
- El proceso de producción.
- La automatización de almacenes.
- Los controles de calidad, distinguiendo automáticamente entre productos.
- El control de inventario en recepción y expedición de pedidos.
- El control de acceso en áreas restringidas.

Resumen

- En este capítulo, han intentado describirse los dispositivos principales de entrada que pueden conectarse al control del sistema que desea automatizarse. De entrada, se refiere a la entrada de información sobre el proceso y se estudian solo aquellos elementos más sencillos y comúnmente empleados.
- Inicialmente, se han nombrado algunas características comunes que es necesario conocer a la hora de incorporar o sustituir un detector. Tras citar brevemente los elementos de mando principales, se expone un catálogo de sensores de distinto tipo para diferentes propósitos y con distintas prestaciones.

- Destacan los detectores o sensores de proximidad, que son protagonistas en automatización sencilla y permiten, con la selección correcta, detectar cualquier movimiento físico de los elementos de la máquina y de las piezas que por ella discurren: ópticos, capacitivos, inductivos y magnéticos *reed*.
- También se estudian otros detectores capaces de detectar distancias, temperaturas, presiones, posición, velocidad, etc., incidiendo, cuando se estima interesante para el aprendizaje y su comprensión, en su tecnología y configuración.
- Finalmente, se dedican apartados a lectores de códigos (QR y de barras) y a detectores de nivel que estarán presentes en cualquier depósito o silo industrial.

Ejercicios propuestos



1. Desea reemplazarse un detector inductivo que medía el giro de un engranaje de dientes rectos, pero que ha dejado de funcionar. El engranaje tiene 71 dientes y el eje gira a 845 r. p. m. Se ha preseleccionado un detector con una frecuencia máxima de conmutación de 500 Hz. Indica si es adecuado y, si no lo es, propón cual sería la frecuencia mínima adecuada.
2. Un tren de lavado de camiones requiere la sustitución de un detector capacitivo. Al parecer, se ha estropeado por estar expuesto a fuertes chorros de agua. Investiga las tablas de estanqueidad IP y propón un grado IP para el detector que debería adquirirse.
3. El sensor Honeywell GLLA01A2B indica en su ficha técnica 5 millones de ciclos de vida estimada. Es un sensor que está montado como indicador de fin de ascensión en un montacargas de transferencia de piezas de una planta industrial. El montacargas realiza un ciclo por minuto. Ha habido paros de mantenimiento y modificación de líneas, pero, habitualmente, la fábrica trabaja 24 horas, 7 días a la semana, 365 días al año. Por ello, está implantándose un mantenimiento preventivo. Si el montacargas se instaló hace 7 años, determina cuándo debe realizarse su sustitución.
4. Se tiene una aplicación en la que, para distinguir piezas metálicas de no metálicas, se ha propuesto una disposición en serie de un final de carrera electromecánico con un detector inductivo. Cuando el inductivo no indique pieza metálica, se expulsará la pieza a una cinta y, cuando lo haga, a otra. Cualquier retardo es una penalización al tiempo de ciclo en el proceso. Argumenta tu opinión sobre esta propuesta.
5. Para el control de temperatura de un horno en el que una pieza metálica pasa de -20 a 110 °C y es necesario controlar los tiempos de paso por cada temperatura, si únicamente se dispone de termistores PTC y NTC, explica cuál seleccionarías. Justifica tu respuesta.

Caso práctico

Selecciona los dispositivos de entrada de una máquina sencilla: una cortadora de listones de madera.

La máquina dispondrá de una puesta en marcha y tres modos de marcha activables (ciclo único, ciclo continuo y paso a paso).

La pieza será colocada por el operario en la zona de trabajo y, posteriormente, cerrará una compuerta que la aísla de cualquier riesgo mecánico y que debe estar cerrada para que la máquina continúe trabajando. Un sensor en la entrada de la máquina detectará si hay listón y otro, si la longitud es correcta. Un cilindro neumático empujador se activará deslizando el listón sobre una mesa de bolas hasta un tope de sujeción. Allí, otro sensor hará

la detección de la posición correcta de corte. En ese momento, otro cilindro neumático de fijación se activará e inmovilizará la pieza para que pueda realizarse el posterior corte. Una vez que el listón se mantenga fijo por este cilindro, el cilindro empujador se retraerá.

Transcurridos unos segundos, se pondrá en marcha el motor de la sierra hasta alcanzar una velocidad determinada. Un tercer cilindro neumático (lineal) se activará arrastrando el conjunto del motor y la sierra y realizando el corte del listón con un movimiento suficiente.

Una vez realizado el desplazamiento hasta la posición final de corte, el motor de la sierra se apagará, por lo que la sierra no funcionará en el retroceso.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

- ¿Qué dispositivo de entrada es el más adecuado para comunicar a la máquina tres posibles programas distintos de funcionamiento, de modo que el operario sepa en cuál está y que solo pueda darse uno de ellos al mismo tiempo?
 - a) Pulsador.
 - b) Selector.
 - c) Interruptor.
 - d) Potenciómetro.
- Suponiendo una máquina en la que, para ejecutar un ciclo, es necesario que el operario indique que todo es correcto, ¿cuál de los siguientes dispositivos de entrada es el más adecuado?
 - a) Pulsador.
 - b) Selector.
 - c) Interruptor.
 - d) Potenciómetro.

3. ¿Cuál es el dispositivo de entrada más adecuado cuando quiere indicarse a un PLC un tiempo de espera que debe ser regulable en cualquier valor entre 5 y 17 s?
- a) Pulsador.
 - b) Selector.
 - c) Interruptor.
 - d) Potenciómetro.
4. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso?
- a) Una base de conexión para sensores electrónicos no será compatible con detectores a dos hilos.
 - b) La corriente de fuga en un sensor electrónico puede ser un problema para montajes en paralelo.
 - c) La caída de tensión en un sensor electrónico puede ser un problema para montajes en serie.
 - d) Los valores de MTBF son una forma de indicar la vida estimada de un detector electrónico.
5. Respecto a los detectores inductivos, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
- a) Solo detectan materiales metálicos.
 - b) Su distancia de detección es menor que la de un sensor de barrera.
 - c) Son muy sensibles a la suciedad.
 - d) Se basan en la perturbación de un campo magnético.
6. En relación con los detectores capacitivos, ¿cuál de las siguientes oraciones es falsa?
- a) Se basan en la perturbación de un campo eléctrico.
 - b) Su distancia de detección es menor que la de un sensor de barrera.
 - c) Solo detectan materiales no conductores de la electricidad.
 - d) Son sensibles a la suciedad.
7. Hablando de los detectores reed en un cilindro neumático, ¿cuál de las siguientes opciones es verdadera?
- a) Sirven para detectar su posición.
 - b) Su funcionamiento depende de la construcción interna del cilindro.
 - c) Suelen ser a tres hilos.
 - d) Todas las opciones anteriores son verdaderas.
8. ¿Cuál de las siguientes frases está relacionada con un detector réflex?
- a) Tiene una distancia mayor de detección que un detector de barrera.
 - b) Requiere el montaje y cableado separado de emisor y receptor.
 - c) Detecta piezas brillantes.
 - d) Debe emplearse en ambientes limpios.
9. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) Un sensor de distancia por ultrasonidos tiene un alcance inferior a 1 m.
 - b) Un sensor de distancia por ultrasonidos presenta dificultades para detectar materiales transparentes.

- c) Los detectores de colores y marcas son sensibles a las condiciones de luz en la zona de detección.
- d) Las galgas extensiométricas varían su resistencia en función de la temperatura.

10. ¿Cuál de las siguientes proposiciones es falsa?

- a) Un termistor PTC tiene una linealidad temperatura-resistencia muy inferior a la de un termistor NTC.
- b) La variación de tensión en los extremos de un circuito formado por la unión de dos metales a distinta temperatura es el principio de funcionamiento de un termopar.
- c) Un encoder incremental proporciona un valor de posición angular, mientras que un encoder absoluto solo proporciona información de cambios o movimiento angular.
- d) Un sensor de electronivel es un sensor de medición de nivel límite.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

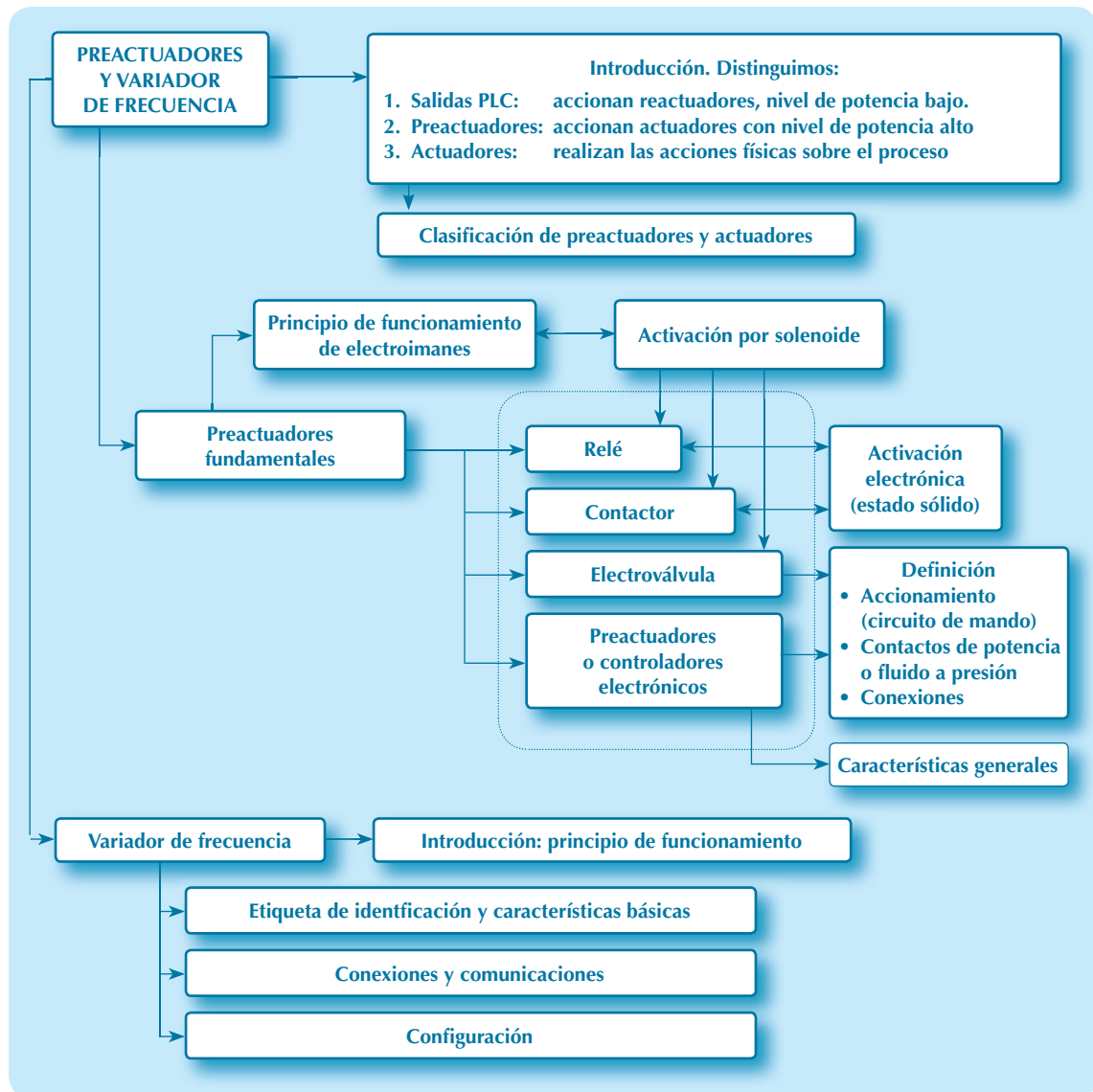
10. a b c d

Preactuadores y variador de frecuencia

Objetivos

- ✓ Estudiar con detalle los preactuadores fundamentales, así como sus características, prestaciones y configuración básicas para su control desde el PLC.
- ✓ Conocer la existencia de otros preactuadores menos habituales, así como de los actuadores principales.
- ✓ Aprender los fundamentos y configuración básica de un dispositivo que podría considerarse como un preactuador complejo o controlador y que tiene una gran importancia por acompañar a los motores trifásicos asíncronos industriales: el variador de frecuencia.
- ✓ Adquirir la capacidad de plantear la configuración de un automatismo sencillo en su salida, con los preactuadores más habituales en la automatización industrial.

Mapa conceptual



Glosario

Actuador o accionador. Elemento que realiza la acción física directa sobre el proceso, como motores eléctricos, cilindros, etc.

Contactor. Dispositivo que, cuando circula corriente por el circuito de mando en el que su electroimán o terminales de accionamiento están conectados, cierra un juego de contactos para conexión trifásica y, a veces, otros contactos auxiliares eléctricamente independientes con el objetivo de permitir la circulación de corriente en el circuito de potencia trifásico y en otros circuitos (de potencia o también de mando o señalización).

Electroimán. Dispositivo que consiste en un núcleo de hierro o acero que es magnetizado por el campo magnético que genera la corriente eléctrica circulante por una bobina que lo rodea.

Electrónica de potencia. Aplicación de electrónica de estado sólido para el control y la conversión de energía eléctrica.

Electroválvula todo o nada. Dispositivo electromecánico, diseñado para mover una corredera dentro de un cuerpo de modo que el acople de ambos permita o impida el paso integral (no variable) de un fluido a través de unos conductos.

Preactuador. Dispositivo compatible en su circuito de activación con las salidas del PLC de baja potencia que está diseñado para ser capaz de gestionar la potencia y energías necesarias en otro circuito independiente para la activación y control de un actuador.

Relé. Dispositivo que, cuando circula corriente por el circuito de mando cuyos electroimán o terminales de accionamiento están conectados, abre o cierra otros contactos eléctricamente independientes con el objetivo de permitir la circulación de corriente en otros circuitos (de potencia o también de mando o señalización).

Variador de frecuencia. Sistema electrónico de potencia para el control del par y de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna manipulando en su alimentación el nivel de tensión, las intensidades circulantes y la frecuencia de la onda de tensión de alimentación suministrada al motor.

6.1. Preactuadores y actuadores

En el capítulo anterior, ya se ha indicado lo fundamental de comprender los extremos del sistema de automatización: las entradas y salidas, conectadas respectivamente a sensores y actuadores. En este capítulo, se analiza el extremo de salida, donde, igual que sucedía con sensores, el abanico disponible es tan grande que hace imposible abarcarlo. Incluso si pretendiera realizarse un catálogo exhaustivo, todos y especialmente aquellos que tienen una funcionalidad más avanzada, requieren siempre el estudio de su manual particular para su configuración y puesta en marcha. Por todo ello, a continuación, solo se describen los preactuadores considerados fundamentales.

En la parte de salida de un automatismo, se hace obligatorio establecer la distinción entre preactuadores y actuadores industriales (o también denominados *preaccionadores* y *accionadores industriales*) (cuadro 6.1). La conexión de los preactuadores al sistema de control o PLC va a ser directa y, por ello, es importante su conocimiento, mientras que los actuadores irán conectados a los preactuadores.

CUADRO 6.1
Clasificación de los preactuadores y actuadores

Preactuadores	<i>Todo o nada</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Relés. ● Contactores. ● Electroválvulas neumáticas o hidráulicas todo o nada.
	<i>Controladores electrónicos</i>	<ul style="list-style-type: none"> ● Drivers de potencia para aplicaciones varias (hornos de fusión, vidrio o metales) y de alta temperatura, procesamiento de alimentos, calentamiento por inducción y otras. ● Controladores de velocidad de motores eléctricos trifásicos asíncronos convencionales: variador de frecuencia. ● Drivers controladores de velocidad y posición de otros motores (como servomotores en CA). ● Electroválvulas hidráulicas proporcionales y servoválvulas. ● Otros.
Actuadores	Motores eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> ● Motor de corriente continua. ● Motor de corriente alterna. ● Motor universal. ● Motor paso a paso. ● Servomotores.
	Fluídicos	<ul style="list-style-type: none"> ● Neumáticos. ● Hidráulicos.

La funcionalidad de los detectores es similar y, por ello, los conectores pueden ser más uniformes. En el caso de los preactuadores, la conexión varía mucho según el preactuador, pues su funcionalidad varía. Por ello y contando con la ventaja de conocer previamente cada uno de ellos, se explican las conexiones, junto con cada preactuador, en los apartados siguientes.

Lo mismo sucede con las características generales. Algunas son comunes, pero otras resultan muy particulares de cada preactuador y es recomendable conocerlos previamente, por lo que el apartado de estas características se sitúa tras la explicación de los propios preactuadores.

6.1.1. Preactuadores o preaccionadores

A menudo, entre el elemento tecnológico que realiza la acción física en el proceso (como, por ejemplo, motores eléctricos, cilindros neumáticos e hidráulicos, etc.) y la orden de mando emitida por el PLC o controlador, no puede haber una conexión directa. El motivo es que la potencia disponible en el circuito de mando no es válida o suficiente para alimentar a un actuador, por lo que se acciona un dispositivo (preactuador) de baja potencia insertable en el circuito de mando. Este preactuador gobierna, entonces, la activación de un circuito de potencia, con niveles de energía adecuados para el actuador y siendo capaz de activarlo. Es decir, se instala un elemento intermedio, denominado *preactuador*, que realiza el acople o amplificación entre dicha orden de mando y el tipo y cuantía de energía o conexión requerida por el actuador final (ya sea eléctrica, de presión neumática o hidráulica, etc.).

Son, por ejemplo, preactuadores los relés, contactores, válvulas electroneumáticas e hidráulicas que transforman una señal de mando desde las salidas del PLC en la ejecución de acciones por parte de motores y cilindros neumáticos e hidráulicos.

RECUERDA

- ✓ Los niveles de potencia o las energías requeridas para la activación de los actuadores no son habitualmente soportados por las salidas del PLC ni por los puertos de comunicación. Por ello, se realiza su activación indirecta mediante preactuadores, que son unos dispositivos comandados eléctricamente en el circuito de las salidas del PLC o que reciben información de control de los puertos y que, conectados también a los actuadores, están diseñados para gestionar la potencia y energías necesarias para la activación de estos.

En el apartado 6.2, se describen de forma básica las características de los preactuadores principales.

6.1.2. Actuadores o accionadores

Los actuadores son los elementos que realizan la acción física directa sobre el proceso, como motores eléctricos, cilindros, etc. Como ya se ha mencionado, son conectados o accionados por preaccionadores que, a su vez, han recibido alguna señal del controlador (PLC u ordenador industrial, por ejemplo).

Los actuadores presentan tanta variedad como la necesaria para cualquier acción requerida en una máquina. Para cada actuador que exista en el mercado, hay un preactuador adecuado, así que su variedad es igualmente enorme. Por ello, en este texto, se analizan los preactuadores básicos. Para servir a un actuador específico, habrá que buscar el preactuador adecuado en catálogos y fichas técnicas.

Puede, en algún caso, haber conexión directa del actuador al controlador: en situaciones donde las salidas del controlador (el PLC) tienen una intensidad nominal admisible elevada (principalmente, en salidas a relé o triac), es posible encontrar actuadores de muy baja potencia conectados directamente a la salida (algún elemento de señalización lumínica o acústica, lámpara de iluminación o pequeños ventiladores, etc.).

TOMA NOTA



Las electroválvulas hidráulicas proporcionales, al contrario que las todo o nada, son capaces de regular el movimiento de la corredera en un rango de posiciones de forma variable para aplicaciones hidráulicas y obtener así un control de flujo y velocidad en el actuador (cilindro hidráulico). El control de posición de la corredera será electrónico y más complejo que un simple solenoide de empuje de corredera en una válvula todo o nada.

Las servoválvulas cumplen con la función de una válvula proporcional, pero trabajan con mayor precisión, muy alta repetibilidad y un comportamiento muy uniforme en ambos sentidos (mayor o menor flujo). Son, por ello, aún más complejas (y caras) que las válvulas proporcionales.

En cuanto a los actuadores, aparte de su variedad, son elementos que corresponden al diseño de la máquina y se consideran en un área tecnológica fuera del ámbito estricto de la automatización, por lo que no se realiza aquí su estudio, ni tampoco los circuitos de potencia, sino que, simplemente, se mencionan en este apartado introductorio. En la figura 6.1, se expone una posible clasificación.

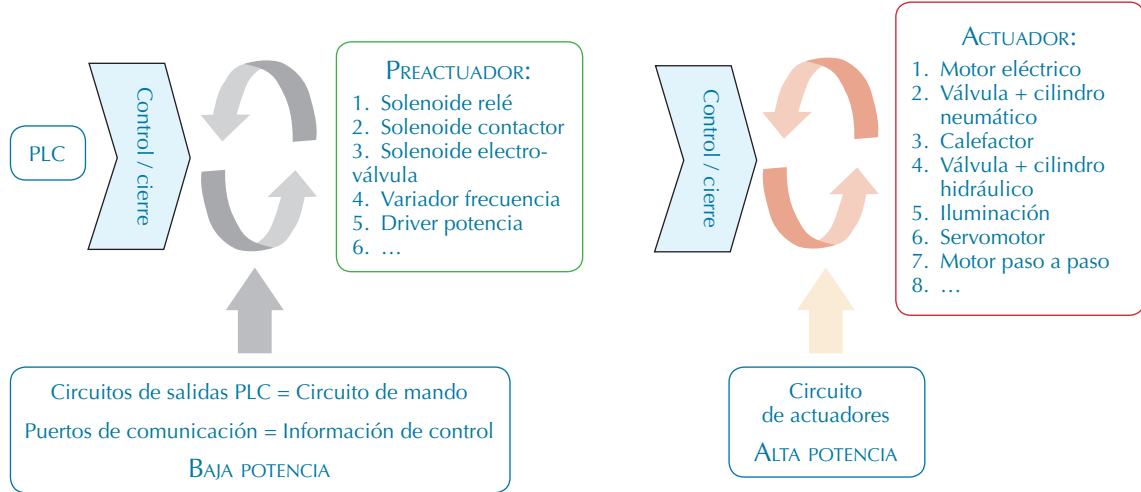


Figura 6.1
Activación indirecta de actuadores mediante preactuadores.

Los actuadores mecánicos suelen ser de dos tipos: actuadores motores eléctricos y actuadores fluidicos, como se recoge en el cuadro 6.1 y se detalla seguidamente.

A) Actuadores eléctricos

Son muy utilizados en la industria, pues transforman la energía eléctrica que está disponible en casi cualquier lugar, gracias a las redes de distribución, en energía mecánica. Adicionalmente, ayudados por cajas reductoras en el eje de salida, tienen buenas prestaciones de velocidad, par y posibilidades altas de regulación mediante dispositivos electrónicos. Además, son fiables, compactos y fáciles de mantener. Su principio de funcionamiento tiene muchas variaciones, pero responde siempre a la misma idea:

1. Un eje giratorio respecto a una carcasa fija.
2. Se generan campos magnéticos en los devanados de cable conductor (ya sea por alimentación de estos o porque se inducen al estar dentro de otro campo magnético) o por imanes permanentes.
3. Los campos magnéticos constituyen polos magnéticos en la parte fija y en el eje móvil.
4. Un diseño inteligente de la disposición de los polos en parte fija y móvil y de la alimentación

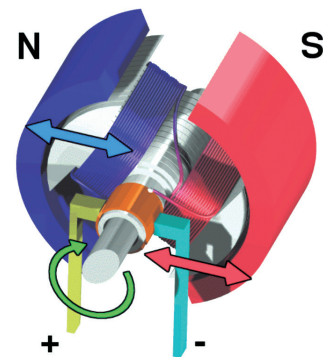


Figura 6.2
Fundamentos del motor eléctrico.

de los devanados hace que los polos sean atraídos o repelidos generando un trabajo mecánico en el eje giratorio.

La variedad de tipos según su tecnología de funcionamiento es tal que es difícil establecer una clasificación definitiva, pero se propone la que se muestra a continuación.

1. Motores de corriente continua

Sin entrar en más detalles, suelen clasificarse según el diseño de los bobinados:

1. *Motor de excitación independiente*: el bobinado inducido y el inductor se alimentan de fuentes que son independientes.
2. *Motor en serie, ambos devanados (el inducido y el inductor)*: están conectados en serie.
3. *Motor shunt, ambos devanados (el inducido y el inductor)*: están conectados en paralelo.
4. *Motor compound*: hay dos devanados inductores, uno conectado en serie y otro en paralelo, ambos con el inducido.
5. *De imán permanente*: el estátor externo se compone de imanes permanentes y la polaridad del bobinado que se encuentra en el eje se modifica para conseguir el giro, con un diseño de anillo seccionado y escobillas. En los motores *brushless*, el bobinado alimentado está en el estátor externo (al eje) y la modificación de su polaridad se consigue mediante el control con microcontrolador y electrónica.

2. Motores de corriente alterna

Son los mayoritarios en máquinas industriales que no requieran un especial control de posición. Especialmente cuando van unidos a cajas reductoras, que permiten sacrificar velocidad, pero conseguir el par requerido para mover la mayoría de máquinas. A partir de muy poca potencia, son trifásicos.

Al ser este tipo de motores los más empleados, otorgan gran protagonismo a sus controladores (que se estudian en el apartado 6.3): los variadores de frecuencia. Mediante su empleo, se tiene un control elevado de par y potencia en los arranques, así como de multivelocidad, velocidad final, frenado e incluso control variable de velocidad frente a cargas.

Dentro de los motores de corriente alterna, cabe destacar los siguientes subtipos:

- a) *Asíncrono o de inducción*: se induce en el rotor (eje) un campo magnético sin necesidad de conexiones, pero su giro tiene una velocidad algo menor que aquella que tiene el

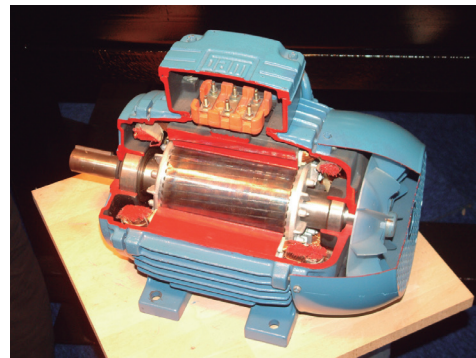


Figura 6.3
Motor eléctrico de corriente alterna.

giro del campo magnético en estátor. Por ello, es importante conocer dicho diferencial de velocidad, denominado *deslizamiento*.

- b) *Motor síncrono*: el rotor sigue sin deslizamiento al campo magnético giratorio en el estátor.
- c) *Motor lineal*: se trata de un motor asíncrono que trabaja por los mismos principios generales que otros motores de la inducción, pero su bobinado está desenrollado (por tanto, es finito, al revés que en un motor giratorio) y la parte móvil no gira, sino que se traslada.

3. Motor universal

Es un motor con una configuración interna similar a un motor en CC serie, pero con un diseño que le permite mover su eje tanto cuando se alimenta con corriente de alimentación continua como cuando la corriente alterna es monofásica, mediante el uso de escobillas. Se encuentra, por ejemplo, en herramienta eléctrica portátil con elevado par de arranque y alta velocidad de giro. Es capaz de funcionar en CC y en CA.

4. Motor paso a paso

Su diseño genera giros en pequeños pasos según el diseño y la excitación de sus bobinados para un preciso control de giro en aplicaciones de pequeñas cargas.

5. Servomotores

Suelen ser motores unidos a cajas reductoras, con un control electrónico de la posición del eje en giro y velocidad. Su variedad de tamaños y capacidades es amplia, variando desde los empleados en radio control a servomotores empleados en maquinaria industrial y brazos robóticos. Pueden ser con o sin escobillas y en CC o CA.



INTERESANTE

En muchos casos, los fabricantes ofrecen actuador y preactuador integrados. El dispositivo acepta órdenes de mando (baja energía) en un módulo que realiza las funciones de preactuador y, al mismo tiempo, dispone de un circuito de ali-

mentación de potencia para la activación del actuador integrado en el mismo producto. Por ejemplo, conjuntos de bomba con controlador de su motor eléctrico o actuadores hidráulicos lineales con control de posición.

B) Actuadores fluídicos

Los actuadores fluídicos se dividen en los siguientes tipos:

1. *Neumáticos*: la energía se obtiene de aire comprimido, de modo que la presión diferencial frente a la atmosférica genera sobre las superficies fuerzas que se emplearán en los procesos.

2. *Hidráulicos*: la diferencia de presión se traslada a un circuito cerrado con fluido incompresible, con presiones muy superiores que permiten esfuerzos mayores y, por la incompresibilidad, una regulación de posición precisa.

En ambos casos, destacan:

1. *Pistones*: se llena una cámara u otra dentro de una camisa en la que un émbolo intermedio a ambas cámaras y unido a un vástago se desplaza en función de la diferencia de presiones.
2. *Motores*: con un diseño destinado a aprovechar la presión del aire o el bombeo de aceite a presión para generar un giro en el eje. Hay distintos principios de funcionamiento, con paletas, pistones, turbina, etc.



Actividad resuelta 6.1

Indica cinco pares de preactuador y actuador que puedan encontrarse en un automatismo gobernado por un PLC en el que el preactuador se conecta directamente a la salida de este.

1. Salida PLC-relé-extractor monofásico.
2. Salida PLC-contactor-motor trifásico (arranque directo).
3. Salida PLC-solenoides electroválvula-cilindro neumático.
4. Salida PLC-variador frecuencia-motor trifásico (arranque con variador).
5. Salida PLC-controlador de servomotor-servomotor.

6.2. Preactuadores fundamentales

Relés, contactores y electroválvulas son los principales protagonistas de este capítulo, junto con los variadores de frecuencia. Se mencionan también otros preactuadores complejos que son en sí mismos controladores con funciones avanzadas.

Los preactuadores que han sido considerados los mayores protagonistas del accionamiento de maquinaria industrial hasta hoy son relés, contactores y solenoides de válvulas (neumáticas o hidráulicas). La mayoría tienen algo en común: un accionamiento muy sencillo con el funcionamiento de un electroimán, que se explica a continuación. Con la electrónica de potencia, también se dispone de relés y contactores en estado sólido, cuyo funcionamiento también se explica más adelante.

6.2.1. Principio de funcionamiento de electroimanes

El elemento que se denomina *solenoides* es fundamental en los tres preaccionadores básicos mencionados. Se trata básicamente de un electroimán y su funcionamiento es bastante simple. Consiste en un hilo conductor, normalmente de cobre, enrollado formando un solenoide alrededor de una pieza de material ferromagnético. Cuando una corriente eléctrica circula por el cable que conforma el solenoide, se crea un campo magnético alrededor de este. El campo magnético fluye por el material ferromagnético, magnetizando el metal como si fuera un imán permanente.

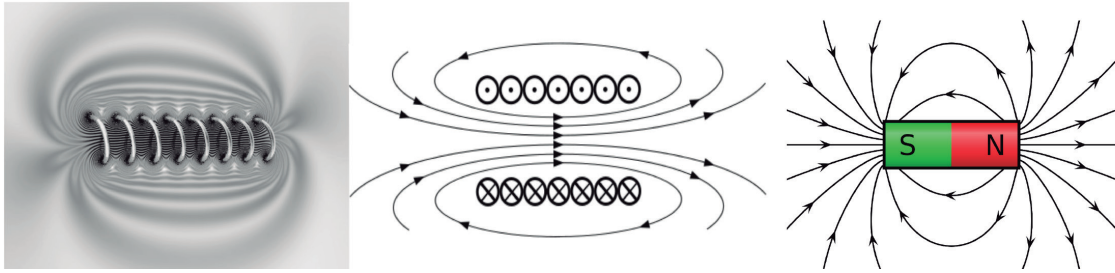


Figura 6.4
Líneas de flujo de campo magnético por electroimán.

Su funcionamiento tiene la conveniencia de que puede activarse y desactivarse el imán y sus efectos, alimentando o interrumpiendo el circuito que alimenta al solenoide respectivamente.

Al comportarse como un imán permanente en activación, será capaz de atraer a un metal férreo ejerciendo una acción mecánica que se empleará para cerrar o abrir contactos o para desplazar de posición la corredera interna de una válvula de fluido (salvo para relés y contactores en estado sólido).

El electroimán constituye la carga del circuito de mando. La unión mecánica con otro elemento realiza el cierre o apertura de elementos en otro circuito independiente. Estos elementos serán contactos de potencia (o mando) eléctricos de relés y contactores o vías de aire o fluido a presión en circuitos fluidicos.

En relés, los contactos del circuito de potencia también pueden aprovecharse para ejecutar operaciones de mando o señalización. A menudo, los contactores disponen de contactos auxiliares (aparte de los de potencia trifásica) también para este uso.

6.2.2. Principio de funcionamiento de relés y contactores en estado sólido

Los contactos de potencia de un relé (o contactor) en estado sólido se basan en dispositivos electrónicos de potencia. Estos dispositivos suelen ser:

1. *Mosfet (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) o transistor de potencia.* Se disponen en paralelo y un sentido para una operación en CC y añadiendo otro conjunto en el otro sentido para una operación en -CA (para sentido bidireccional de corriente). Hay de distintos tipos, pero eso corresponde a la operación interna del relé o contactor y elección del fabricante.
2. *Triac (triode for alternating current).* Para corriente alterna, también pueden basarse en otro dispositivo electrónico de potencia denominado *triac*.

Su denominación de catálogo en inglés suele ser: SSR, del inglés *solid state relays*.

En ellos, el circuito de mando proporciona una intensidad que acciona la activación de los dispo-

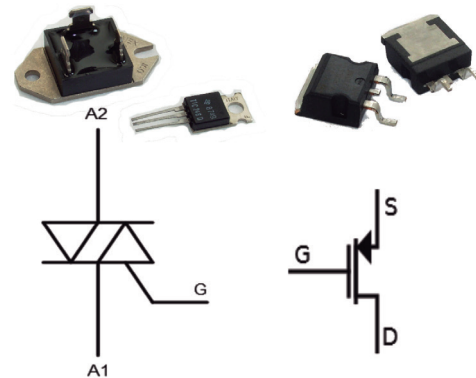


Figura 6.5
Triac y mosfet.

sitivos electrónicos de potencia (análogo a la activación de un solenoide en relés o contactores convencionales) que están a cargo en su interior del cierre del circuito de potencia.

Ofrecen una altísima velocidad de conmutación frente a los relés y contactores convencionales, La velocidad de apertura y cierre se ve comprometida (igual que con los contactos convencionales) conforme aumenta la potencia de la carga.

Al no tener partes móviles ni contactos eléctricos con desgaste por arcos de establecimiento y corte de corriente, su duración (operando en valores nominales de intensidad y tensión) es muy superior a los dispositivos electromecánicos (algunos fabricantes indican que infinita). Sin embargo, son más costosos, disipan más energía (se calientan más) que los relés y contactores de contactos convencionales y presentan corriente de fuga.

6.2.3. Relé

Dispositivo que, cuando circula corriente por el circuito de mando en el que su electroimán o terminales de accionamiento (mando) están conectados, abre o cierra otros contactos eléctricamente independientes con el objetivo de permitir la circulación de corriente en otros circuitos (de potencia o también de mando o señalización).

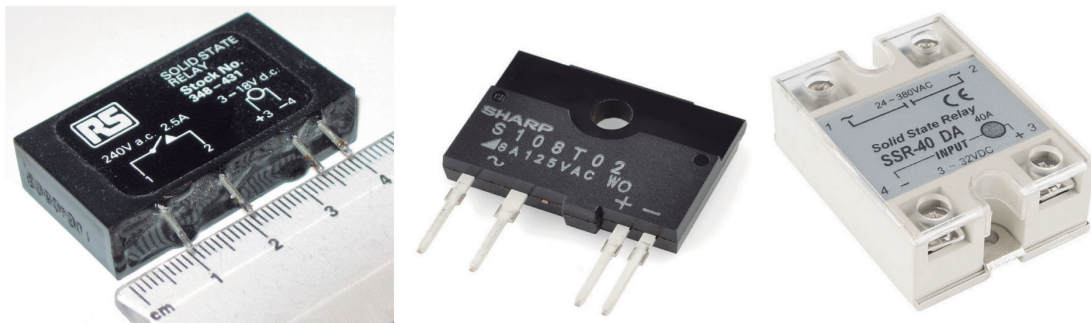


Figura 6.6
Relés en estado sólido.

Hay que indicar que el término *relé*, se utiliza de forma muy amplia. En el mercado, se comercializan dispositivos de corte para determinadas protecciones o funciones automáticas adicionales, que se denominan también *relé*, pero que no se corresponden exactamente con el concepto de relé aquí expuesto. Por ejemplo, relés de mínima y máxima intensidad (Para proteger máquinas y conductores contra sobrecarga y mínima intensidad), relés automáticos para carga de baterías (que activan la carga cuando la batería baja de determinado voltaje), relés de supervisión de temperatura para una conexión al termistor, etc. Incluso puede encontrarse la denominación de *relé de protección frente a sobrecargas de motores* a un interruptor térmico regulable o guardamotor.

A) Accionamiento

El cierre y abertura de los contactos del circuito de potencia, como ya se ha explicado, puede ser de dos tipos en función de la tecnología en la que esté basado:

1. Electromecánico con contactos eléctricos metálicos, solidarios con un elemento que se desplaza por la activación del electroimán y provoca su cierre o abertura (figura 6.7).
2. Electrónico con dispositivos en estado sólido (figura 6.8).

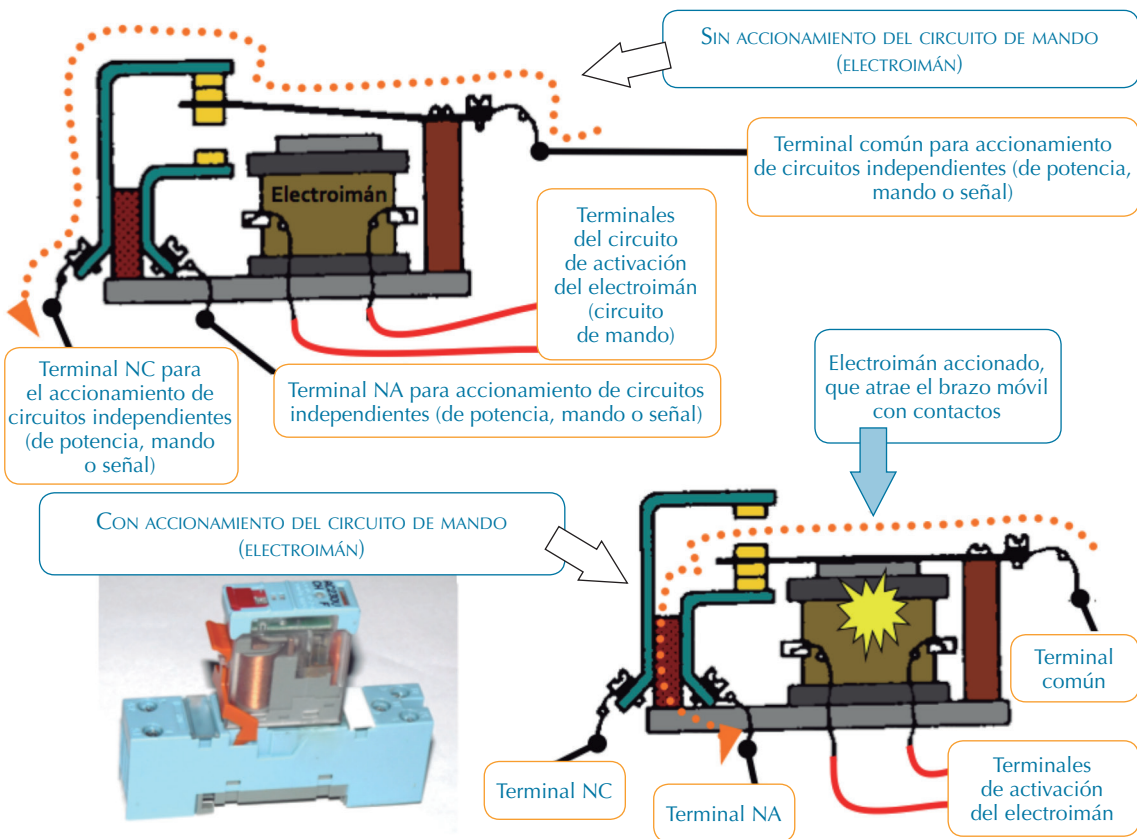


Figura 6.7
Relé con accionamiento electromecánico.

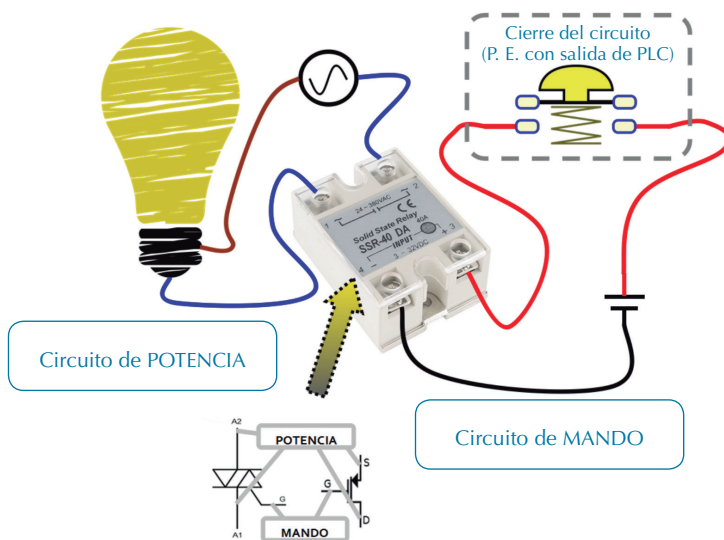


Figura 6.8
Circuito de accionamiento y potencia de relé en estado sólido.



Actividad propuesta 6.1

Dibuja las conexiones del siguiente relé para activar un motor monofásico a partir de un pulsador.

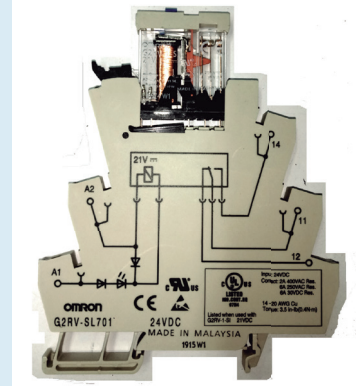


Figura 6.9
Relé borna.

B) Contactos de potencia

Suelen disponer de varios contactos de potencia válidos para CA asociados al mismo relé, normalmente, al menos un conmutado para una fase con valores mínimos de intensidad nominal de 6 A para relés electromecánicos y 2 A para relés en estado sólido.

Los valores máximos de intensidad admisible en los contactos de potencia (intensidad nominal) disponibles son varios y llegan a valores altos, por encima de 50 A, tanto para electromecánicos como para estado sólido.

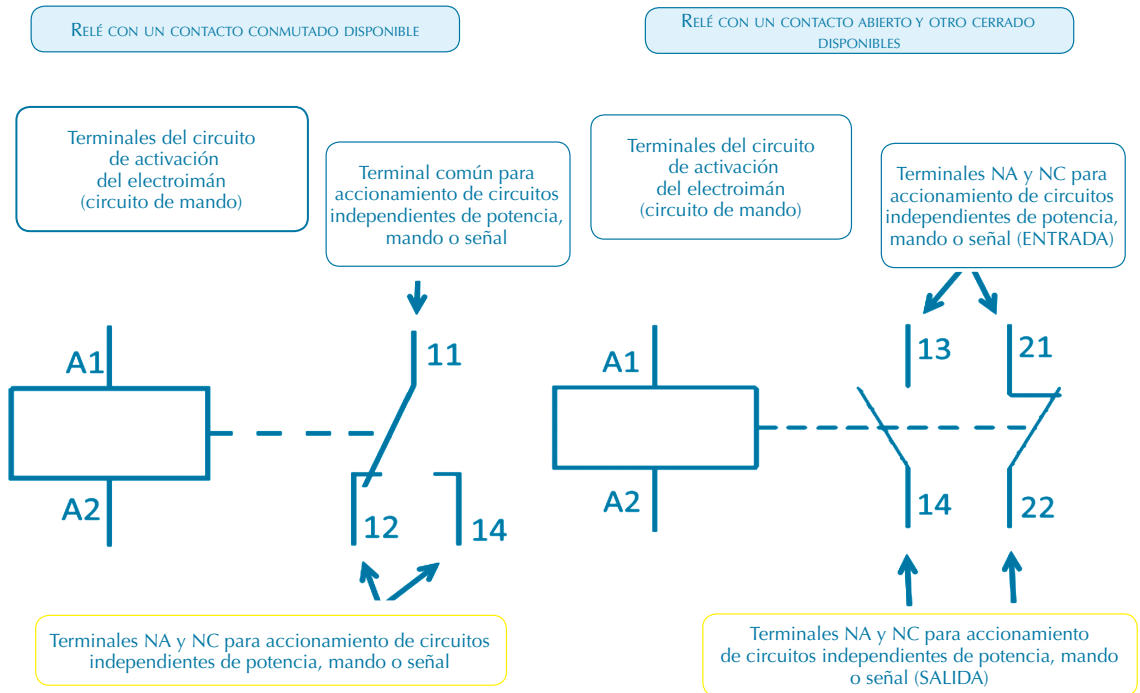


Figura 6.10
Representación de relés con distintos contactos asociados.

C) Conexiones

A continuación, se exponen los tipos de conexiones más habituales en los relés:

1. *Conexión por presión con tornillo* (figura 6.11): se trata de un sistema prácticamente universal de conexión en muchos dispositivos eléctricos. Se presenta de distintas formas, pero con el mismo principio. Un tornillo insertado en una hembra, al ser atornillado, arrastra una placa que presiona la terminación del cable (rígido o flexible con terminación en terminal de puntera), con lo que se garantiza la continuidad eléctrica. Todos los elementos son conductores y la parte fija (donde se encuentra la hembra del tornillo) es el punto de conexión hacia el interior del dispositivo. En la mayoría de relés para uso en automatización industrial, se encuentra esta conexión, en diferentes tamaños según el calibre del relé.



Figura 6.11
Conexiones
de contactores
por sistema de tornillo
y presión.

2. *Relés con base de conexión desmontable* (figura 6.12): en muchas ocasiones, los relés se comercializan con dos componentes desmontables —una base con las conexiones por presión con tornillo y el cabezal donde está toda la parte funcional: solenoide y mecanismo con contactos eléctricos. La conexión eléctrica de este cabezal con la base se realiza mediante la inserción de conectores machos en las hembras del cabezal dispuestos correspondientemente en la base. La forma de estos conectores base-cabezal es va-

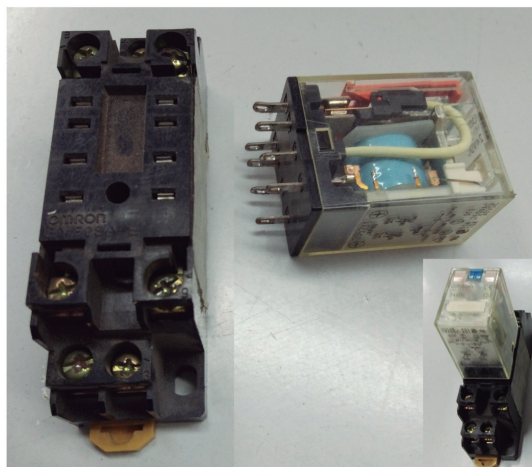


Figura 6.12
Relé con base desmontable:
conexión con palas a la base
y conexiones con tornillo
en la base.

riada y, a menudo, su diseño y disposición varían con el fabricante. Pueden ser pines, conectores de pala tipo *faston* u otros.

3. *Conexión mediante terminales faston*: existen relés en estado sólido que presentan machos para conexión del cableado, tanto de mando como de potencia, mediante terminales *faston*.
4. *Conexión mediante terminales de arandela u horquilla* (figura 6.13): es menos habitual. Pueden encontrarse conectores similares al de tornillo y presión, con un tornillo y la base con rosca hembra conectada internamente, pero en los que no existe la placa o elemento de presión. En estas conexiones, es necesario incorporar al final del cable un terminal de arandela o de horquilla, que quedará fijado y en contacto eléctrico mediante la presión del tornillo sobre la base.
5. *Conexión con pines para soldadura con estaño en PCB* (figura 6.14): en relés de pequeño tamaño y baja potencia, se venden con un formato específico para inserción en placas de circuitería electrónica y soldadura con estaño. No forman parte de los montajes de automatización industrial, sino del diseño electrónico. Como mantenimiento podría darse una sustitución de un relé dañado integrado en alguna placa electrónica.



Figura 6.13
Relé en estado sólido preparado para una conexión con terminales de arandela u horquilla.

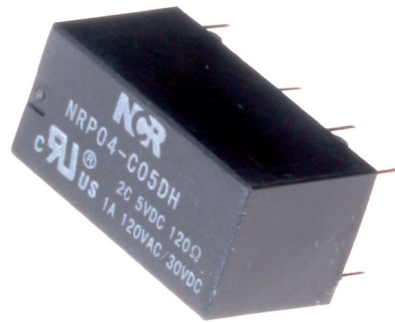


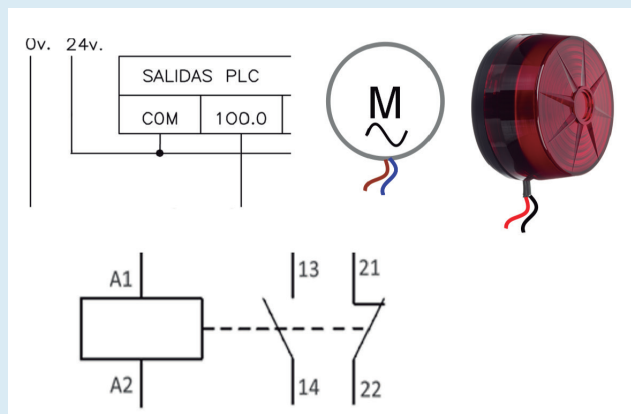
Figura 6.14
Relé para soldadura en placa electrónica.



Actividad propuesta 6.2

Dibuja las conexiones del siguiente relé para activarlo con una salida de PLC en modo *sourcing* para que, ...*sourcing* para que, a su activación, un piloto a 24 V en CC se apague y un ventilador con motor monofásico de baja potencia a 230 V en CA se active.

Figura 6.15
Conexión de circuito de relé.



6.2.4. Contactor

Dispositivo que, cuando circula corriente por el circuito de mando en el que su electroimán o terminales de accionamiento (mandos) están conectados, cierra un juego de contactos para conexión trifásica y, a veces, otros contactos auxiliares eléctricamente independientes con el objetivo de permitir la circulación de corriente en el circuito de potencia trifásico y en otros circuitos (de potencia o también de mando o señalización).

A) Accionamiento

El principio de accionamiento de un contactor ordinario es totalmente análogo al de un relé (tanto con solenoide como en estado sólido).

B) Contactos de potencia

Como puede verse en la definición, el contactor es como un relé con un juego de contactos para circuitos de potencia trifásicos. Por ser para sistemas trifásicos, suelen ser más robustos y estar preparados para corrientes nominales de empleo altas y para abrir y cerrar circuitos con cargas considerables..cargas considerables (corrientes máximas de corte y cierre respectivamente). Por ello, también son más grandes y sus solenoides de activación de electroimán de mayor potencia.



Figura 6.16
Contactores
electromecánicos.

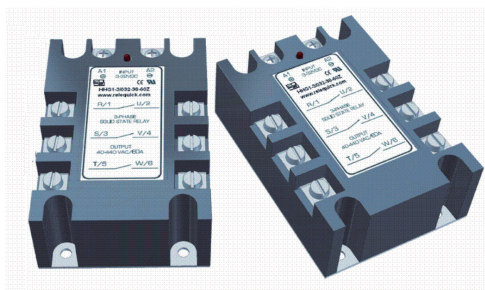


Figura 6.17
Contactor con contactos
trifásicos en estado sólido
para montaje en superficie.

Pueden disponer de tres o cuatro contactos de potencia para conexión trifásica y, además de los contactos de potencia trifásicos, pueden incorporar contactos auxiliares adicionales para otros circuitos de potencia monofásicos o para mando o señalización.

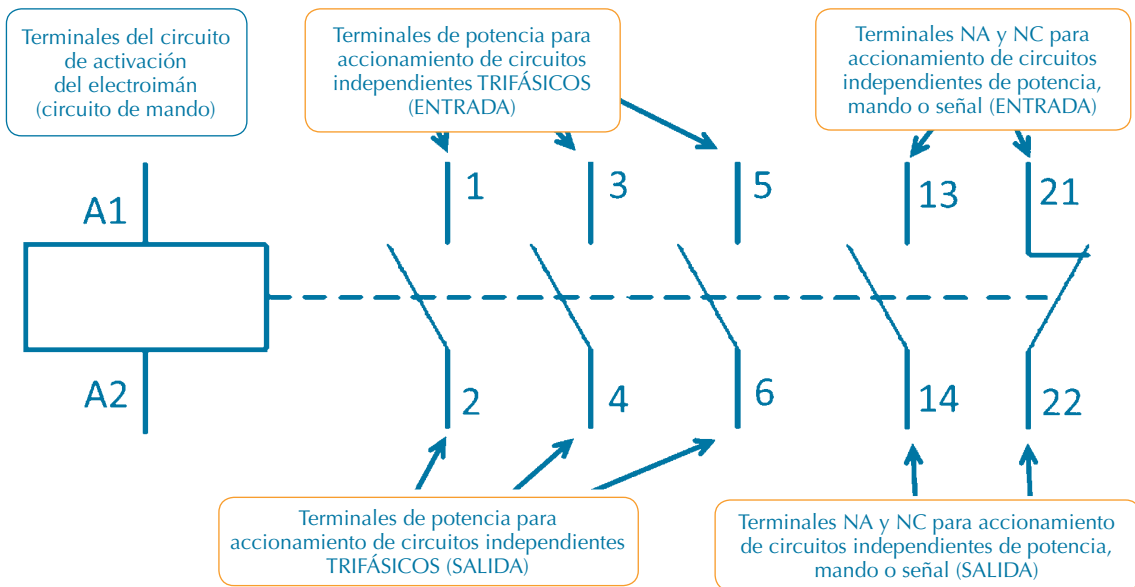


Figura 6.18

Contactor con contactos trifásicos de potencia y contacto abierto y otro cerrado disponibles.

C) Conexiones

Las conexiones son similares a las de los relés y existen los siguientes tipos:

1. *Conexión por presión con tornillo*: conexión mediante mecanismo de presión y tornillo, tanto para circuito eléctrico de mando como para circuito eléctrico de potencia, para la introducción de cable rígido o flexible con terminal de puntera.
2. *Contactores modulares*: pueden encontrarse contactores con la opción de montar contactos adicionales a los disponibles en el bloque principal. Habitualmente, se tratará de contactos auxiliares (no de potencia trifásica) o de módulos con otra funcionalidad (como protección). La conexión de los módulos con el bloque principal suele ser igual que en relés mediante la inserción, en el módulo en hembras, de conectores machos con forma de pin, dispuestos correspondientemente en el bloque.
3. *Conexión mediante terminales faston o mediante terminales de arandela u horquilla*: es menos habitual, pero igual que con los relés en estado sólido, pueden encontrarse conexiones de tipo macho *faston* (pala) o similares al de tornillo y presión, pero para conectar el cable con un terminal de arandela o de horquilla.



Actividad propuesta 6.3

A partir de las figuras previas, dibuja un embarrado trifásico con neutro en la parte superior, el accionamiento de un contactor con una salida de PLC (configuración *sourcing*) y conexión directa de un motor trifásico al embarrado mediante el contactor, así como la señalización del paro del motor con un piloto funcionando a 230 V en CA (contacto auxiliar NC del contactor) y la indicación a las entradas de un PLC (configuración PNP) de la activación del motor (contacto auxiliar NA del contactor).

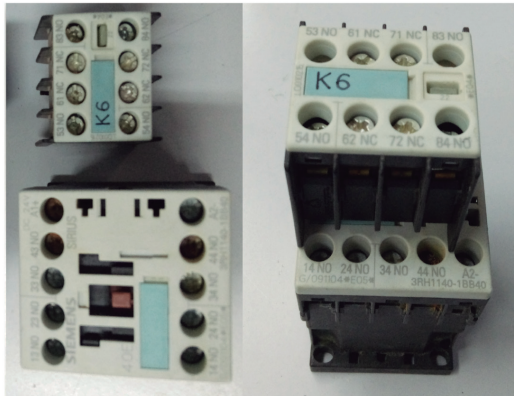


Figura 6.19
Contactor modular con contactos auxiliares desmontables.

6.2.5. Electroválvulas de distribución de flujo todo o nada

Una electroválvula todo o nada es un dispositivo electromecánico, diseñado para mover una corredera dentro de un cuerpo de modo que el acople de ambos permita o impida el paso integral (no variable) de un fluido a través de unos conductos.

A) Accionamiento

El principio de accionamiento del solenoide de una electroválvula es análogo al de un relé o contactor. Se consigue con la estimulación de un electroimán capaz de mover por atracción magnética un percutor que, a su vez, acciona la corredera para una conducción de flujo todo o nada.

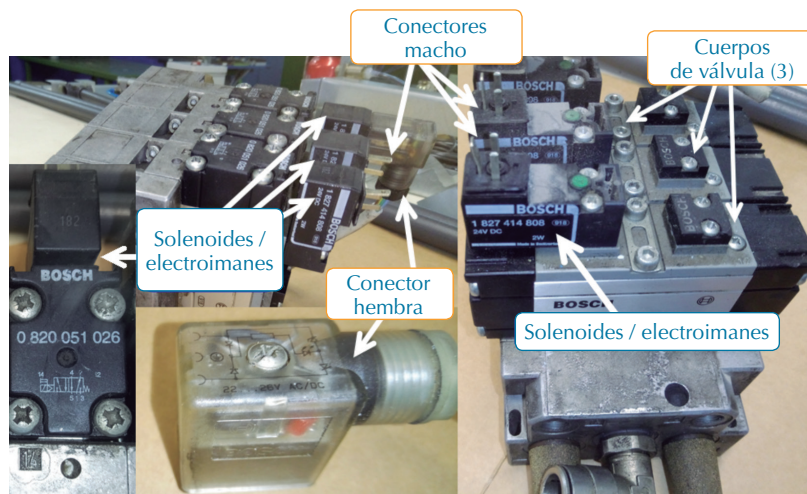


Figura 6.20
Cuerpo de tres válvulas monoestables con tres solenoides.

En algunos casos, el movimiento de la corredera es íntegramente responsabilidad del percutor y, por tanto, del electroimán. Por tanto, el solenoide es de mayor potencia. En algunas ocasiones, se consigue el accionamiento con solenoides pequeños mediante un diseño interno inteligente que permite el movimiento interno de la válvula a partir de la acción del solenoide con la ayuda de la fuerza del propio fluido (acción indirecta o asistida).

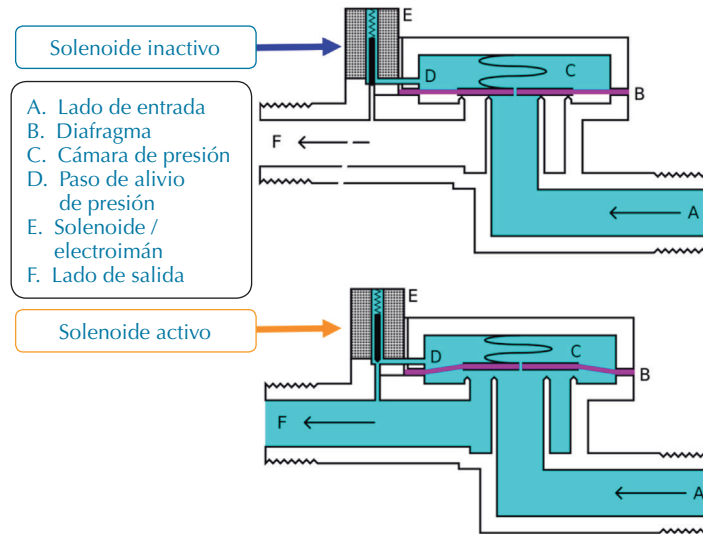


Figura 6.21
Válvula accionada con un solenoide con acción indirecta.

B) Circuitos de fluido a presión

En este caso, el lado correspondiente a los actuadores no son contactos eléctricos de potencia, sino de conectores para tubos de flujo neumático o hidráulico. Estos conectores van a explicarse más adelante, pues corresponden más a la tecnología de actuadores que a la de automatización.

Sí debe entenderse que los fluidos (aire y aceite o fluido hidráulico), así como las presiones (10 bar y cientos de bares), son muy diferentes entre la neumática y la hidráulica. Las fuerzas de los actuadores son igual de dispares que las presiones manejadas y también suelen ser elementos mucho más robustos en el caso de la hidráulica.

Por tanto, aunque compartan principio de funcionamiento, el diseño, la robustez y la seguridad de las válvulas y otros elementos serán muy distintos.

C) Conexiones

Existen múltiples tipos de conexiones en el circuito eléctrico de mando al solenoide.

En los circuitos de fluido a presión, predominan las conexiones rápidas neumáticas o hidráulicas (ya se ha indicado que estas últimas no se estudiarán por utilizarse para la conexión con el actuador y, por tanto, no ser estrictamente correspondientes al área de automatización).

Al estudiar los sensores, se ha indicado que, aun con distintas opciones de conexión, los conectores conforme a la norma IEC o ISO 61076 están muy extendidos. Esta norma se emplea también en conectores de preactuadores, incluyendo electroválvulas, en el circuito de mando (señal eléctrica). Sin embargo, al contrario que en los sensores, existen otros tipos de conexión muy empleados conforme a otras normas.

También se comercializan estos tipos de conectores con certificación para atmósferas explosivas.

Una característica común, dado que son elementos que se montan en máquinas, es que suelen contar con protección IP 65 o 67, según la EN 60529.

CUADRO 6.2

Conectores en el circuito eléctrico de mando al solenoide

Conectores redondos M12 y M8 según la ISO 61076-2-101 y la ISO 61076-2-104	Es, en este caso, un estándar de conexión también muy empleado.
Conectores cuadrados según la norma EN 175301-803 (DIN 43650) con cuatro o tres polos y fijación con tornillo	Hay tres tipos: A (ISO 4400), B (ISO 6952) o C (tamaño pequeño). Existen dos subtipos en los tipos B y C con diferencias en la separación de los polos de señal y retorno (activación del solenoide). Con cuatro polos, pueden ser dos polos de señal, otro de retorno y otro de puesta a tierra o, con tres polos (el tipo B es el más empleado), uno de señal, otro de retorno y otro de tierra. En estos conectores, los fabricantes ofrecen diversas opciones adicionales como conector desmontable o con cable moldeado (no desmontable), protección contra sobretensiones, indicador LED de activación o suministro de tensión y otras. Se comercializan adaptadores de este tipo al conector ISO 61076-2-101, al que se conectará el cable de señal. Cuando el portahembra es cuadrado, puede girarse (90°) en el capuchón según convenga. La polaridad suele poder invertirse (será necesario consultar la ficha técnica de la válvula o solenoide).
Conectores de fabricantes específicos extendidos en la industria	El fabricante de válvulas puede ofrecer conectores de otros fabricantes que considere válidos. Son ejemplos el Deutsch DT04-2P o el tipo AMP Junior-Timer de la empresa TE Connectivity.
Conector de diseño propio del fabricante	El fabricante de las válvulas proporciona también el conector de diseño propio compatible con su propio diseño.



RECURSO ELECTRÓNICO 6.1

En el anexo web 6.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes ver algunos conectores rápidos hidráulicos y neumáticos para válvulas y cilindros. Además, en este anexo, podrás consultar una imagen de los conectores EN 175301-803 para solenoides electroválvulas.

Actividad resuelta 6.2



Dibuja el accionamiento directo con una salida de PLC de una válvula alimentada a 24 V en CC (configuración sourcing) y el accionamiento mediante una válvula 5/2 de un cilindro neumático de doble efecto. Explica cómo sucede la activación del cilindro.

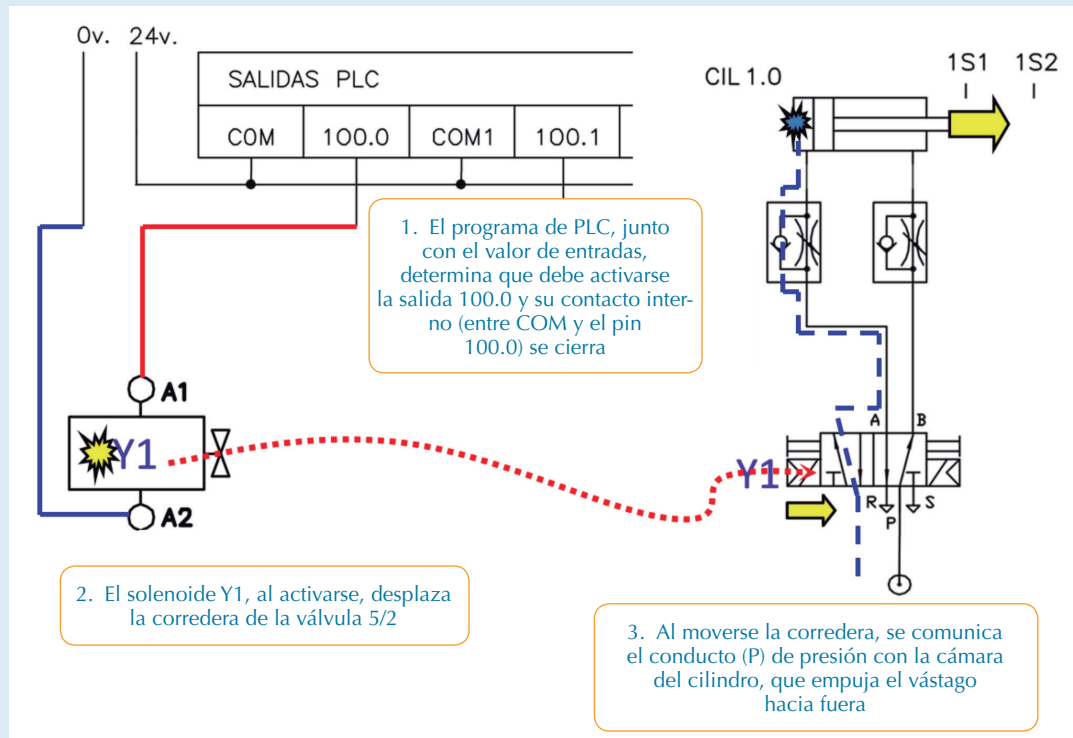


Figura 6.22

Activación de un preactuador electroválvula y actuador de un cilindro neumático con salida de PLC.

6.2.6. Preactuadores o controladores electrónicos

A continuación, se describen los principales tipos de preactuadores o controladores electrónicos:

1. *Drivers de potencia*: basados en el control avanzado de electrónica de potencia (a partir de elementos de cierre y apertura de circuitos en estado sólido), permiten manipular las ondas de potencia (tensión e intensidad) descomponiendo las ondas senoidales de su alimentación y componiendo ondas hacia la carga para controlar el tipo y cantidad de potencia suministrada a maquinaria diversa. Por ejemplo, generar senoidales a partir de continua como en el caso de los inversores de energía solar.
2. *Controladores de velocidad de motores eléctricos trifásicos asíncronos convencionales: variador de frecuencia*: son un caso particular del anterior, pues se alimentan con un tipo de onda senoidal y, mediante electrónica de potencia, hacen la composición requerida de otra con tensión, intensidad y, fundamentalmente, frecuencia requeridas para controlar estos motores. Se explican en el apartado siguiente.
3. *Drivers controladores de velocidad y posición de otros motores*: tienen las capacidades de los *drivers* de potencia, pero añadiendo la tecnología necesaria para el control de posición en motores que así lo requieren: motores paso a paso o servomotores.

4. *Otros: drivers* para válvulas proporcionales (controlan la posición de abertura de la válvula hidráulica para el control de flujo y velocidad del cilindro), electrónica para control de servoválvulas (igual que las válvulas proporcionales, pero con prestaciones más precisas) y servocilindros hidráulicos (se trata de un preaccionador + accionador), entre otros.



Figura 6.23
Inverter para conversión de continua a partir de paneles solares (a)
y drivers para servomotores conectados mediante un cable de bus de campo (b).

En definitiva, cuando la tecnología de un actuador específico lo requiera, el fabricante proporcionará una interfaz capaz de transformar la orden de mando del sistema de control en las señales con la potencia requerida por el actuador.

● Conexiones de preactuadores complejos y controladores

Para preactuadores complejos o controladores, las conexiones de mando y potencia son muy variadas. Para las conexiones de mando, pueden ser similares a las de relés y contactores, o conexiones a borneras de conexión rápida o con conectores específicos, o con conectores correspondientes a puertos de comunicación cuando esta se hace por ellos. A menudo, se requieren más polos o pines de conexión y, por tanto, más variedad de conectores que para preactuadores sencillos.

Igual que en apartados previos, pueden ofrecerse conectores aptos para atmósferas explosivas y la protección frente a la penetración de agua será IP 65 o IP 67.

Se exponen algunos de los conectores empleados:

1. *Bornero convencional con sistema de tornillo y presión o inserción rápida*: se trata de filas de conectores con pines etiquetados, en los que pueden cablearse pin a pin cables para indicar acciones al controlador o para realizar comunicaciones. Es estándar en variadores de frecuencia y muy habitual en muchos otros dispositivos. En el apartado 6.3, se explica con más detalle.
2. *Conector redondo M12 multipín según la ISO 61076-2-101 y M8 según la ISO 61076-2-104*: también puede encontrarse en controladores complejos, pues, además, dispone de versiones de más de 4 pines para cuando sea necesario.
3. *Conectores multipín según la MIL-DTL-5015*: se trata de una especificación militar de los EE. UU., con una filosofía constructiva similar a la de la ISO 61076, con conectores cilíndricos asegurados con rosca externa. Se emplean en circuitos eléctricos, electrónicos y de control, en el área militar y se han extendido al uso civil e industrial (figura 6.24).

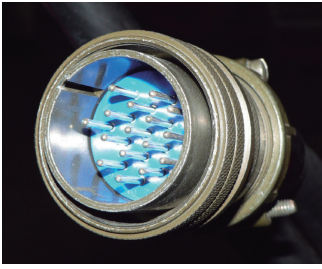


Figura 6.24
Conector según norma MIL
del fabricante Amphenol.



Figura 6.25
Conectores RJ-45.

4. Conectores multipín según la DIN 43651-2 (antigua).
5. Conectores multipín según la DIN EN 175201-804.
6. Conectores de puertos de comunicación: en preactuadores complejos o controladores, pueden encontrarse diferentes conectores para, a su vez, diferentes protocolos de comunicación. A veces, se encuentran integrados en el dispositivo y, otras veces, se adquiere una tarjeta específica de comunicaciones para el protocolo adecuado que se conecta a él. Pueden mencionarse como más habituales y, por tanto, destacados a los siguientes conectores de puertos de comunicación:
 - a) *Conector RJ-45*: clavija estándar según la norma ANSI/TIA/EIA-568, empleada universalmente para redes Ethernet y, en algunos casos, para telefonía. Se encuentra como puerto de comunicaciones de diversos controladores (como variadores de frecuencia) y se emplea en estos para protocolos Ethernet y también de bus industrial (figura 6.25).
 - b) *Conectores DB25 o DB9*: aunque, en desuso, aún es posible encontrar puertos con conectores para protocolo serie según la Electronics Industry Association (EIA) en las normas EIA-RS232, EIA-RS422 y EIA-RS485. Estos conectores también se emplean para protocolos de bus industrial diversos, sobre todo el DB9 (figura 6.26).
 - c) *USB*: universal serial bus, este puerto también puede encontrarse para el uso con convertidores de la serie RS232 o para la comunicación directa con ordenadores.

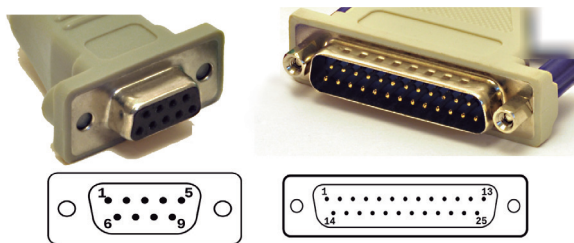


Figura 6.26
Conectores DB9 y DB25.

En el capítulo 10, se nombran los protocolos de comunicación industrial más importantes, pero la lista es larga: PROFIBUS, EtherNet/IP, Modbus RTU (*remote terminal unit*), CANbus, DeviceNet, EtherCAT, CANopen, Modbus TCP/IP, CC-Link, InterBus, etc.

En definitiva, el fabricante utiliza un protocolo de comunicaciones para integrar su controlador en el sistema, y el conector y los cables, simplemente, tienen que ser compatibles, pues, con la electrónica interna, gestionarán las señales por los pines de conectores a conveniencia. El usuario, a la hora de integrar un elemento, deberá comprobar en su adquisición la compatibilidad de protocolos y conectores.

Actividad propuesta 6.4



La empresa ha decidido emplear un variador de frecuencia que había en el almacén. Antes de conseguir el manual y hacer la consulta, identifica el puerto de comunicaciones para una conexión serie.

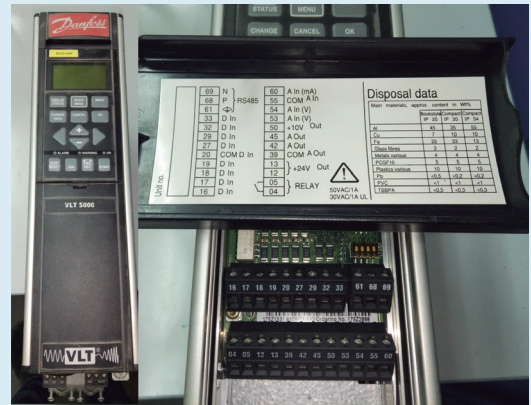


Figura 6.27
Variador de frecuencia
Danfoss VLT 5000.

Actividad resuelta 6.3



Estando en prácticas en una empresa, un compañero te pregunta por los siguientes elementos de una línea de fabricación recién adquirida con diferentes automatismos y conexiones. Nombra los elementos señalados en cada caso.



1. Miniconector de dos pines a válvula.
2. Conectores rápidos neumáticos para tubo flexible de poliuretano, reductor y racor de conexión a válvula.
3. Conector según ISO 61076-2-101 o ISO 61076-2-104 (M12 o M8).
4. Puerto USB.
- 5 y 9: Puerto RJ-45.
6. Manguera hidráulica con conector rápido.
7. Conectores neumáticos por cánula y rosca para tubo flexible a válvula neumática.
8. Conector EN 175301-803 tipo B (10).

6.2.7. Características generales de los preactuadores

Para la selección de preactuadores (según los requisitos del sistema e instalación), es interesante conocer las siguientes características. Cuando el preactuador se encuentra fuera del cuadro eléctrico (electroválvulas), está más expuesto al ambiente y es preciso tener este aspecto en cuenta.

En relés y contactores, existe disponibilidad de activación electrónica de los contactos (estado sólido) para aplicaciones que requieren mayor velocidad y precisión de cierre y apertura de contactos. Esta tecnología prescinde de solenoides y sus especificaciones de activación, por tanto, difieren. Habrá siempre que consultar los datos técnicos del fabricante para conocerlas.

En este apartado, desarrollar cada característica presenta mayor dificultad que en el caso de la sensorica, pues, como se ha comentado ya, existen diferencias entre ellos en sus funciones básicas en comparación con los sensores. Solo en el caso de los contactores hay una gran variedad y, además, existen dispositivos con funcionalidad varia, que pueden, por ejemplo, incluir la de un relé y también funciones de protección. Por todo ello, no es posible aislar limpiamente a un conjunto de dispositivos con la etiqueta de *preactuadores* y será necesario ceñirse a los básicos.

Para las características particulares de un elemento, de nuevo, será necesaria la consulta de los datos en la documentación del fabricante, aunque sí existen ciertas características comunes que se explican a continuación.

A) Características eléctricas en el circuito de mando o activación

En este apartado, habrá que comprobar la compatibilidad de la configuración elegida en el circuito de salidas y, en caso de conexión directa a las salidas del PLC, la compatibilidad con ellas. Hay que recordar que, en caso de montar un circuito de salidas con mando indirecto (empleando una batería de relés borna), la compatibilidad está prácticamente garantizada, pues cada contacto de potencia de relé se constituye como un común independiente, dichos contactos admiten alta intensidad (6 A) y, además, permiten prácticamente cualquier tipo de corriente (CC o CA) y nivel de tensión.

1. Nivel y tipo de tensión de alimentación del solenoide o mando

Tensión (o rango) válida de alimentación y su tipo (CC o CA). Como se ha indicado, si desea insertarse el preactuador directamente en el circuito de las salidas del PLC, sus características eléctricas deben ser acordes a la configuración de dicho circuito. En cuanto al tipo y nivel de tensión, las posibilidades son mayores que para los sensores. Con aquellos se tenía un predominio de la CC, pero, en el caso de los preactuadores sencillos, pueden encontrarse multitud de configuraciones posibles. Cuando se habla de preactuadores sencillos, se hace referencia a relés, contactores y electroválvulas cuyo elemento de accionamiento es un solenoide. Muchos solenoides admiten alimentación tanto en CC como en CA, otros solo en una de ellas. El tipo de corriente de alimentación, junto con los niveles de tensión, genera muchísimas posibilidades. Habitualmente, los fabricantes ofrecen (sobre todo en contactores, pero también en relés y electroválvulas) una muy amplia variedad de tensiones para servir a las necesidades del cliente. Por ejemplo:

- CC: 5, 12, 20, 24, 36, 42, 48, 60, 72, 110–125 y 220–250 V, siendo 24 V la más habitual.

- *CA*: 24, 36, 42, 48, 110-127, 200-220, 220-240, 256, 277, 380-400, 400, 440, 480, 500 y 55V. Es muy habitual la alimentación del solenoide del contactor con la misma tensión de suministro del circuito de potencia.
- *CC o CA*: 24, 48 y 100-240V. Cuando la alimentación es en *CA*, el diseño suele admitir 50 o 60 Hz (frecuencia de red en Europa y los EE. UU. respectivamente).

A menudo, se proporciona una tensión con una tolerancia en porcentaje dentro de la cual el solenoide debería funcionar correctamente. Cuando los dispositivos aumentan de tamaño (mayor potencia de activación del solenoide), las tensiones bajas de mando implican cierta intensidad requerida, lo que, para longitudes elevadas de cableado, de mando puede no ser lo más adecuado (excesiva caída de tensión).

2. Corriente de activación (inrush current) en el solenoide

Cuando se activa la alimentación del circuito del preactuador en *CA*, el solenoide puede presentar un pico de consumo de intensidad inicial alto, pero también muy corto. Habitualmente, al ser de baja duración, no debe ser un problema para conexión directa a las salidas del PLC o controlador, pero debe tenerse en cuenta si es un solenoide de gran tamaño.

3. Corriente de mantenimiento del solenoide en activación (holding current)

La corriente de mantenimiento es la intensidad que consume el solenoide cuando está activa su alimentación y está manteniendo su posición en activación. Su valor depende de la potencia del solenoide y, a veces, se expresa como tal (potencia), pues, según la tensión de alimentación, la corriente varía mucho.



RECURSO ELECTRÓNICO 6.2

En el anexo web 6.2, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás información adicional sobre la corriente de mantenimiento.

4. Tensión de activación (pick-up voltage)

Nivel de tensión a partir de la cual el solenoide se activa. Puede expresarse de dos modos:

- *Como un valor de tensión*: por ejemplo, 16V para un solenoide alimentado a 24V en *CC*.
- *Como una fracción de su tensión nominal de alimentación*: por ejemplo, 0,85 del mismo contactor será $0,85 \cdot 24 = 20,4\text{V}$ en *CC*.

Esto debe tenerse en cuenta para el nivel de tensión de la fuente que alimente las salidas y por posibles caídas de tensión si los preactuadores están lejos de ella (en el caso de electroválvulas, que pueden estar alejadas del cuadro eléctrico).

5. Tensión de desactivación (dropout voltage)

Nivel de tensión a partir de la cual el solenoide se desactiva. Es inferior al de activación y se expresa igual que esta. Por ejemplo, como 11 V o, equivalentemente, como 0,46 (proporción sobre tensión de alimentación).

6. Factor de rizado para CC

En la calidad de la señal de alimentación, se incluye una exigencia de rizado máximo. Se trata de la fluctuación total que puede tener la tensión de alimentación para la activación del solenoide en torno al valor fijo en CC y se expresa en porcentaje sobre dicho valor (suele ser aceptable hasta un 10%).

7. Otras características eléctricas para preactuadores complejos o controladores

En el mando de otros controladores como variadores de frecuencia, controladores de potencia o de servomotores etc., en su manual de instalación y uso, se indicará qué tipo de señal requiere para realizar la comunicación. Esta puede llevarse a cabo cerrando un circuito entre dos de sus pines en un bornero del propio controlador o mediante conexión del controlador a una red o incluso a través de un bus industrial de comunicaciones. Los niveles de tensión, tipo de protocolo de comunicaciones, conector, etc., estarán indicados en el manual y, conforme a este, deberá establecerse la conexión.



Actividad resuelta 6.4

En la ficha de un modelo de contactor, se lee lo siguiente:

- DC pick-up [\times US].
 - 0,8... 1, 1.
 - 0,7... 1,25⁽¹⁾.
- Dropout [\times US].
 - 0,6.

⁽¹⁾ For 9, 12, 24, and 110V DC coils.

Indica para un contactor alimentado a 24 V en CC y otro a 48 V en CC los valores adecuados a los que alimentarlos.

Tensiones de activación:

- Contactor 24 V en CC: mínima: $0,7 \cdot 24 = 16,8$ V en CC y máxima: $1,25 \cdot 24 = 30$ V en CC.
- Contactor 48 V en CC: mínima: $0,8 \cdot 24 = 19,2$ V en CC y máxima: $1,1 \cdot 24 = 26,4$ V en CC.

Tensiones de desactivación:

- Contactor 24 V en CC y también 48 V en CC: máxima: $0,6 \cdot 24 = 14,4$ V en CC.



RECURSO ELECTRÓNICO 6.3

En el anexo web 6.3, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar las características eléctricas en el circuito en potencia, así como las características de flujo y presión en electroválvulas.

B) Características de tiempo

1. Tiempo de cierre en contactores y relés

Tiempo en milisegundos que relés y contactores tardan tras la activación del circuito de mando en cerrar sus contactos de potencia. En su caso, un valor típico es en torno a 20 ms. Si los contactos de potencia son NC, el tiempo de cierre será realmente de apertura de sus contactos.

2. Tiempo de apertura en contactores y relés

Tiempo en milisegundos que relés y contactores tardan tras la activación del circuito de mando en abrir sus contactos de potencia. Es algo inferior al de cierre, pues juega en su favor la acción del muelle que mantiene en su posición original a los contactos. De nuevo: si los contactos de potencia son NC, el tiempo de apertura será realmente de cierre de sus contactos.

3. Tiempo de activación y desactivación de electroválvulas (switching time ON/OFF o response time)

Se trata del tiempo efectivo en milisegundos que la corredera emplea en cambiar de posición tras la activación del solenoide. Si la válvula es monoestable, el tiempo a ON no es el mismo que a OFF. También estos tiempos dependen del tamaño: en pequeñas válvulas electro-neumáticas, en torno a 15 ms, mientras que, en válvulas mayores o hidráulicas, pueden estar por encima de los 100 ms.

A veces, se encuentra el valor de activación de la válvula con la denominación de *tiempo de cambio* o *changeover time*.

RECUERDA

- ✓ Las electroválvulas, a menudo, utilizan la energía de presión disponible en el fluido para desplazar la corredera, por lo que hay que recordar que este tiempo está sujeto a un *valor mínimo de presión del fluido* (tanto en neumática como en hidráulica). Con presiones menores, los tiempos serán mayores y, con valores inferiores al mínimo, no se garantiza la operación.

4. Máxima frecuencia de conmutación

Se trata de la frecuencia máxima efectiva a la que el dispositivo realiza ciclos completos de activación y desactivación. En el caso de relés y contactores, implica establecer e interrumpir la

corriente de un circuito de potencia. En el caso de una válvula, será establecer o interrumpir el flujo del fluido.

Es un valor que, en el caso de contactores y relés basados en solenoide y contactos mecánicos, no puede ser elevado. El motivo es que, si participan en maniobras de muchas operaciones por hora, su vida será muy corta. La capacidad de frecuencia mecánica de accionamiento no es el factor limitante, pero el cierre y apertura eléctricos de contactos en carga genera arcos y calentamientos que limitan mucho la frecuencia máxima de conmutación. Según las categorías del contactor, pueden tenerse frecuencias tan contenidas como 150-300 ciclos por hora. Un pequeño relé borna admite hasta 1800 ciclos por hora.

Para aplicaciones con muchos ciclos de maniobra, se escogerán dispositivos en estado sólido para los que si son posibles frecuencias más altas (indicadas en Hz), dependientes de la potencia de la carga.

En el caso de las electroválvulas, no es un valor habitual ofrecido, pues se cuenta con el tiempo de activación. Este suele ser muy corto y la limitación práctica suele encontrarse en el tiempo que el cilindro tarda en realizar su movimiento, más que en el tiempo de activación de la válvula.

5. Vida estimada

Cantidad de ciclos de funcionamiento. Como ya se ha indicado para los sensores, puede indicarse la vida del dispositivo con el valor MTBF (o posiblemente MTTF) en años o directamente en millones de ciclos de accionamiento. Para relés y contactores con tecnología de solenoide y contactos mecánicos, depende mucho de la carga accionada, pues, cuanto mayor sea esta, menor será la vida en los contactos eléctricos. Un mismo contactor tiene vidas de más de 2 millones de ciclos o de 70 000 con una carga de 1 o 20 A respectivamente. La vida típica para un pequeño relé borna será de 100 000 ciclos para un contacto NA y algo menos para un contacto NC. En condiciones óptimas de funcionamiento, los dispositivos relés y contactores en estado sólido tienen una vida infinita.

Las condiciones ambientales de temperatura, humedad y atmósfera (limpieza), así como de los fluidos en el caso de las válvulas, afectan de forma importante a la vida de todos los preactuadores.

A menudo, en las fichas técnicas de válvulas, no se encuentra un compromiso de durabilidad. Su naturaleza mecánica y la estanqueidad con sellos elastoméricos hacen que su vida dependa mucho, tal como se ha dicho, de las condiciones de trabajo y limpieza del fluido conducido.

C) Características de resistencia ambiental

Se trata de las mismas características normalizadas de estanqueidad IP, resistencia a impactos IK y resistencia a la temperatura y humedad ambiente descritas en el capítulo 5.

D) Otras características

Dimensiones y peso, materiales, características de cableado, conector, etc. Hay muchas otras características, y muy importantes según los requerimientos de la aplicación deseada, que pueden consultarse en las fichas técnicas proporcionadas por los fabricantes de cada preactuador.

© FUNDAMENTAL

En las etiquetas de características de preactuadores de cualquier tipo e incluso, a menudo, en su documentación (sean fichas técnicas o manuales), los datos técnicos estarán en inglés. Por ello, es importante conocer las equivalencias fundamentales de la terminología técnica de electricidad y automatización en inglés.

6.3. El variador de frecuencia

Un variador de frecuencia es un sistema electrónico de potencia que sirve para el control del par y de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna manipulando en su alimentación el nivel de tensión, intensidades circulantes y la frecuencia de la onda de tensión de alimentación suministrada al motor. Con el control electrónico de tensiones, se obtienen diversas posibilidades de par para cada velocidad.

La velocidad de giro de un motor eléctrico asíncrono de corriente alterna, depende del número de polos de su bobinado (que es algo fijo, de la constitución interna del motor) y la frecuencia:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p}$$

Donde n_s es la velocidad de sincronismo en revoluciones por minuto, f es la frecuencia en hercios de la senoidal de alimentación (50 Hz en Europa) y p es el número de pares de polos (2, 4, 6 y 8 en total es lo habitual).

Teniendo en cuenta que el rotor no es capaz de seguir totalmente la velocidad de sincronismo, se establece un factor de corrección que depende del deslizamiento s en tanto por uno (será 0 en motores síncronos y menor al 5% habitualmente en asíncronos):

$$n = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p} \cdot (1 - s)$$

Donde n es la velocidad del motor en revoluciones por minuto teniendo en cuenta el deslizamiento.

Viendo la fórmula previa, se deduce que puede gobernarse la velocidad del motor manipulando la frecuencia de la onda senoidal eléctrica de alimentación. El par del motor depende en gran medida de la tensión de alimentación.



TOMA NOTA

La razón del protagonismo del variador de frecuencia, en realidad, proviene del protagonismo de los motores eléctricos en la industria. La gran mayoría de máquinas industriales que realizan trabajo mecánico se mueven con motorreductores que montan motores del tipo gobernable con un variador. Antiguamente, los motores se arrancaban directamente o con otros métodos secuenciales o incorporados en el motor (estrella-triángulo, con autotransformador, doble bobinado, etc.). Sin embargo, actualmente, dada la funcionalidad y reducción del coste de los variadores, resulta difícil no justificar su uso junto a cualquier motor eléctrico.

Allí donde haya una máquina con un motor eléctrico que requiera cierto control, habrá también un variador de frecuencia: ventiladores, bombas hidráulicas, compresores, molinos, cintas transportadoras, elevadores, extrusoras, prensas mecánicas, bobinadoras, trenes laminadores, maquinaria de elevación, transmisiones por cadena o correa, carros *transfer*, etc.

Frente a un arranque directo y funcionamiento sin control, las ventajas son enormes, entre las que cabe destacar las recogidas en la figura 6.28.

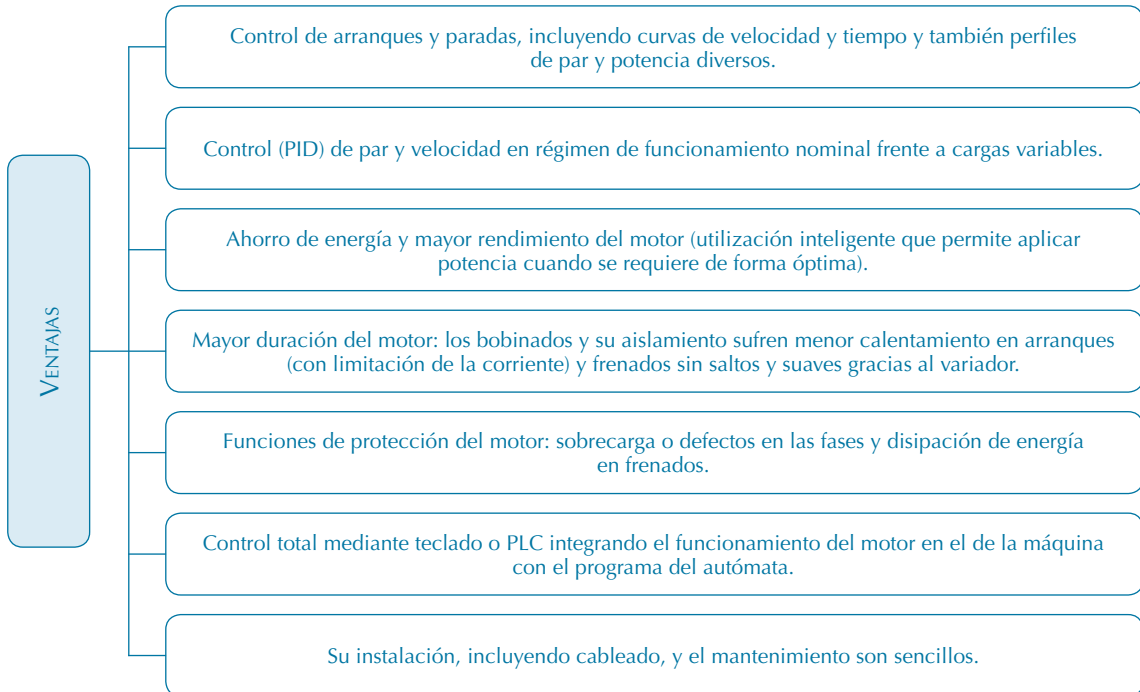


Figura 6.28
Ventajas del accionamiento y control de un motor industrial al emplear un variador de frecuencia frente a un arranque directo.

Igual que con cualquier equipo industrial, existen diversos fabricantes de variadores y, dentro de cada fabricante, multitud de modelos para distintas necesidades. Sin embargo, la funcionalidad de este dispositivo hace que haya muchas características y prestaciones comunes entre fabricantes. Ahora se exponen todos los apartados que se consideran de interés para poder configurar un variador de frecuencia y poner en marcha un motor incluyendo las operaciones básicas.



Actividad resuelta 6.5

Se supone un motorreductor con motor eléctrico trifásico de 2 pares de polos y un deslizamiento del 3%. En la placa del reductor, se lee $i = n_e/n_s = 50$ (n_e/n_s = velocidad de entrada/velocidad de salida). Indica la velocidad de salida en el eje de salida del motor y del reductor.

Además, se instala un variador de frecuencia. Determina la frecuencia a la que deberá regularse la alimentación del motor en el variador si se desea una velocidad de salida en el eje del reductor de 20 r. p. m.

Teniendo en cuenta que en Europa la red tiene una frecuencia de 50 Hz y que el deslizamiento del 3% en tanto por uno será 0,03, se aplica la fórmula y se obtiene:

$$n_{\text{motor}} = [(120 \cdot 50)/(2 \cdot 2)] \cdot (1 - 0,03) = 1500 \cdot 0,97 = 1455 \text{ r. p. m.}$$

Teniendo en cuenta que la salida del motor es la entrada del reductor, debe dividirse entre 50 para obtener la salida en el eje del reductor. El resultado es:

$$n_{\text{reductor}} = 1455 \text{ r. p. m.}/50 = 29,1 \text{ r. p. m.}$$

Si, en el eje de salida del reductor, hubiera una velocidad de 20 r. p. m., en el eje del motor, habrá 50 veces este valor: $n_{\text{motor}} = 50 \cdot n_{\text{reductor}} = 50 \cdot 20 = 1000 \text{ r. p. m.}$

Empleando la fórmula:

$$n = \frac{120 \cdot f}{2 \cdot p} \cdot (1 - s)$$

Se despeja f , siendo $n = n_{\text{motor}}$ y los valores previos de polos y deslizamiento.

El resultado es: $f = 1000 \cdot 2 \cdot 2/(120 \cdot 0,97) = 34,36 \text{ Hz.}$

6.3.1. Principio de funcionamiento

El variador emplea elementos de electrónica de potencia (dispositivos con altísima velocidad de conmutación y capacidad para considerable intensidad) para convertir la tensión alterna de alimentación (ya sean en monofásica o trifásica) en continua. Posteriormente, con la energía eléctrica en forma de corriente continua, construye, también con electrónica de potencia, la onda trifásica con los parámetros (senoidal, nivel de tensión y frecuencia) que convenga.

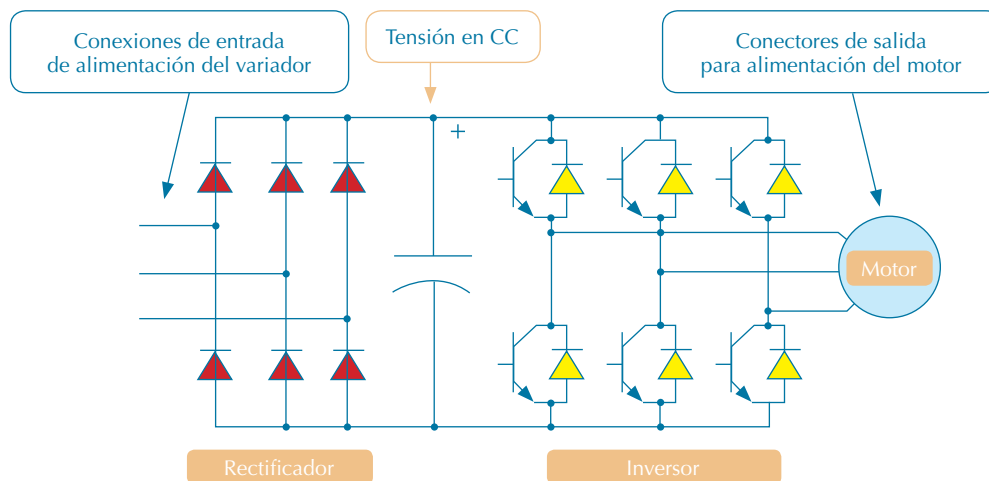


Figura 6.29
Principio de funcionamiento de un variador de frecuencia.

6.3.2. Etiqueta de identificación y características básicas

Es evidente que, en el caso de adquirir un variador de frecuencia en el mercado, es preciso conocer muy bien sus características tras estudiar fichas técnicas y manuales para poder escoger el más adecuado a la aplicación. Pero, en el caso de abordar un variador ya montado en máquina, el nombre del modelo y las características que los fabricantes incluyen en la etiqueta identificativa permitirán conocer aspectos fundamentales y acudir al manual para consultar todos los detalles.

El nombre del variador en la placa se construye con un código en el que letras y números suelen tener un significado, que indica el fabricante en su manual.

Pero, en la placa, habitualmente, ya se presentan algunas características interesantes:

a) *Alimentación (input):*

- Rango de tensión de alimentación.
- Rango de intensidades de alimentación (por fase en trifásica).
- Tipo de alimentación (mono o trifásica).
- Frecuencias admitidas de alimentación.

b) *Salida a motor (output):*

- Rango de frecuencias posibles.
- Rango de tensiones de salida a motor (trifásica).
- Rango de intensidades de salida a motor (por fase).



Figura 6.30
Etiqueta identificativa del variador Omron MX2.

También se incluye en la placa otra información, como la fecha de fabricación, el número de serie del producto, datos referentes al modelo o lote de fabricación, etc.

6.3.3. Conexiones y comunicaciones

Lo primero que se observa en el variador será un frontal con puertos un *display* digital junto a unas teclas o un teclado de mando y configuración y una o varias tapas ocultando los siguientes elementos:

1. *Bornero de pines de entrada y salida de comandos del variador:* este bornero se explica más adelante.
2. *Bornero de potencia:*
 - a) *Bornas de alimentación del variador:* para monofásica o trifásica.
 - b) *Bornas de PE:* toma de tierra.
 - c) *Bornas de salida al motor:* salida trifásica a 230 o 400 V.
3. *Puertos de comunicación.*



Figura 6.31
Variador Altivar 28, frontal, borneros de potencia y comandos y puerto de comunicaciones con conector RJ45.



INTERESANTE

Comando JOG: en muchas máquinas, se requiere una determinada posición de inicio o una velocidad de giro que otorgue cierta inercia a la máquina sin llevar al motor a la velocidad final de funcionamiento, pero que le permita estar más preparada para él. Es un comando que se da a un variador de frecuencia para que ponga el motor a funcionar a

una velocidad fija y un sentido de giro determinado ofreciendo un posicionamiento de un eje de la máquina antes de ir al régimen de trabajo. Puede ser una orden corta enviada al motor (que puede usarse repetidamente) para llevar el eje a la posición y conseguir el posicionamiento deseado del rotor con respecto a algún punto angular de referencia.

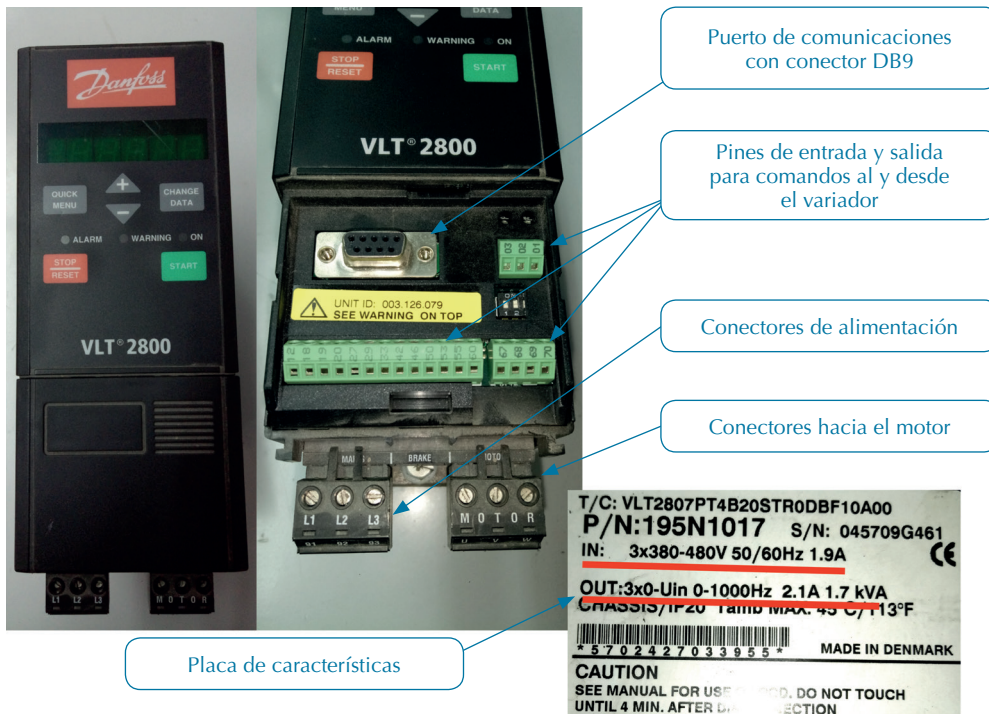


Figura 6.32
Variador Danfoss VLT 2800, frontal, borneros de potencia y comandos y puerto de comunicaciones con conector DB9.

A) Conexiones de potencia

Las conexiones de entrada de alimentación y salida al motor se explican por sí mismas. En la alimentación de entrada del variador, suele instalarse un filtro antiarmónicos.

El variador también suele contar con dos conectores de potencia adicional con la etiqueta de *brake* (freno). En ellos, pueden conectarse los dos extremos de una resistencia para el freno del motor que tiene la función de disipar la energía que, durante el frenado eléctrico, el motor genera y el variador necesita disipar.

Las salidas U, V y W, en algunos variadores alimentados monofásicamente a 230 V en CA, se producen con trifásica de tensión compuesta a 230 V en CA, por lo que habrá que conectar los devanados del motor en triángulo. Otros modelos disponibles, sin embargo, se alimentan a 230 V en CA, pero sirven al motor trifásico de tensión compuesta a 400 V en CA, por lo que la conexión adecuada será en estrella.

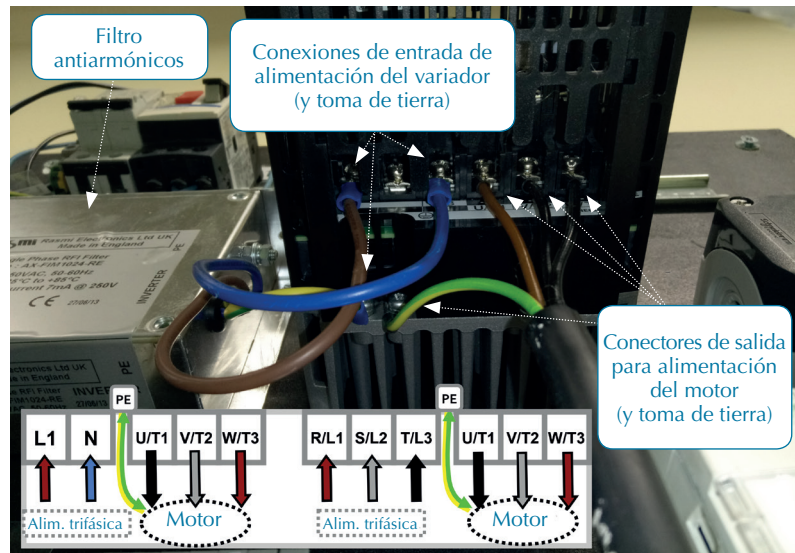


Figura 6.33
Conexiones de potencia
del variador de frecuencia
Omron MX2.



Los dispositivos de los que, internamente, consta el variador como rectificadores, inversores, y, por tanto, los propios variadores, así como otras cargas, consumen la intensidad de forma no continua en el tiempo (unas veces sí, otras no, otras más, otras menos). Esto genera que, en la senoidal de la alimentación, no solo la onda senoidal no es perfecta, sino deformada. Esto es porque dichos dispositivos generan señales superpuestas no senoidales de frecuencia estándar a 50 o 60 Hz y también otras con frecuencias múltiplo de esta denominadas *armónicos*. Al sumarse a la original, la deforman. Esto produce multitud de problemas, calentamientos en los conductores, disparos injustificados de interruptores automáticos y diferenciales y muchos otros por los que es conveniente instalar un filtro de aguas arriba que elimine los armónicos.

B) Conexiones para comandos de entrada y salida

El variador es, como se ha comentado, un controlador avanzado. Para su funcionamiento, empleará los siguientes flujos de información:

1. *Comandos de entrada para el mando del motor.* Pueden realizarse a través de:
 - a) Bornero de E/S y sus pines de entrada para comandos de entrada.
 - b) Puerto o puertos de comunicaciones.
2. *Información de salida.* Sobre el funcionamiento, una vez en marcha, el variador es capaz de proporcionar información. Puede ser:
 - a) *Información de sus propias órdenes y del proceso:* frecuencias de funcionamiento, intensidades consumidas, etc.
 - b) *Errores en parámetros de alimentación u otros del motor:* si hay caídas o cortes de alimentación (en una fase) del variador o si, según las condiciones del proceso, el variador detecta sobrecarga en el motor u otra anomalía grave, realizará el paro del motor y las acciones pertinentes. Aparte de ello, el variador es capaz de comunicar estas anomalías.

Estas dos posibles informaciones de salida se emiten por el variador de diversas formas no excluyentes:

- a) A través del bornero de pines de salida para señales de salida.
 - b) A través del puerto o los puertos de comunicaciones.
 - c) Visualmente, en el *display* del variador con determinados códigos de error.
3. *Parámetros configurados en el variador:* es necesario configurar parámetros internos que se almacenan en la memoria del propio variador. Por ejemplo, será necesario decidir y configurar en el variador los tiempos y el perfil del arranque y la parada (rampas), la velocidad objetivo, la velocidad JOG y otros. Este flujo de información se producirá:
 - a) A través del puerto de comunicaciones mediante el uso de un software específico del fabricante desde un ordenador
 - b) Directamente, configurándolo al navegar por el menú del variador con sus teclas y su pequeño *display*.

A continuación, se describen pines de entrada y salida para comandos de entrada e información de salida con bornero E/S del variador, indicando su configuración con entradas y salidas del PLC, y se menciona la comunicación mediante puerto de comunicaciones.

1. Pines de entrada del bornero de E/S

El bornero de E/S incluye los pines de entrada, un conjunto de conexiones para pequeños cables de señal donde se dispone de pines de dos tipos:

- a) *Pines de entrada digital*: igual que si fueran entradas de un PLC, con estos pines, puede comandarse de forma sencilla al variador para, por ejemplo, la puesta en marcha en ambos sentidos (FW-*forward* y RV-*reverse*). Para ello, habrá que configurar un circuito de modo que el variador detecte el pin activo, igual que se hacía con el PLC.
- b) *Pines de entrada analógica*: igual que si fuera una entrada de un PLC, existen pines para la entrada analógica de tensión o de intensidad. En el pin de señal analógica, hay una señal que servirá para algún parámetro con valor variable que desee comunicarse al variador (igual que se hacía con el PLC), como la velocidad (frecuencia) objetivo. Por ejemplo, para conectar un potenciómetro, debe respetarse el valor de resistencia y potencia (capacidad máxima para disipar calor sin que se quemé) que indique el manual del variador.

Cada pin tiene un comando o función asociada (FW, RV, freno, JOG, etc.), pero, en algunos modelos, es posible que el fabricante permita asignar a cada pin cualquier función a conveniencia del usuario. Es decir, que las entradas pueden ser configurables de modo que, por ejemplo, si el pin n.º 1, por defecto, es para el comando FW, puede programarse para que tenga la función RV (u otra función de las disponibles según convenga).

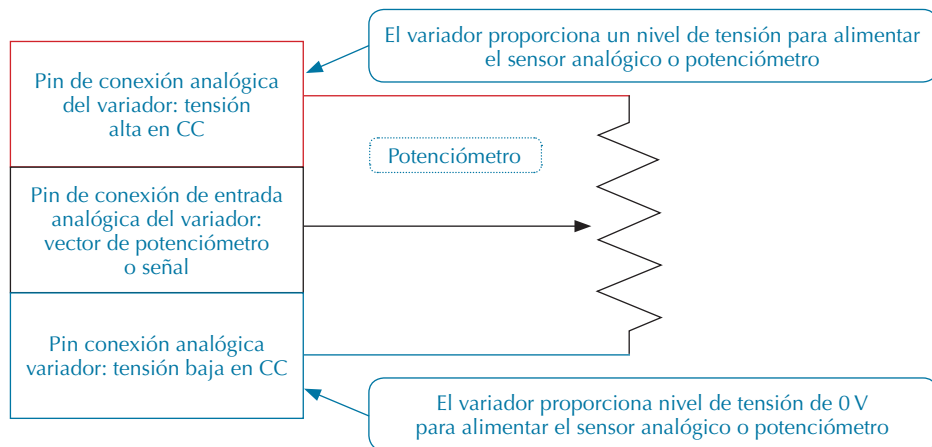


Figura 6.34

Conexión de un potenciómetro en la entrada analógica del variador.

Habitualmente, el variador proporciona una diferencia de tensión internamente entre un pin común y el resto de pines de entrada. Cuando se conecta este pin común a otro correspondiente a las entradas del variador, se establece corriente y el variador detecta que dicho pin está activo. Mientras esto suceda (pin activo), el variador ejecutará el comando o función correspondiente a dicho pin.

Existe un comando del variador con señales en sus pines de entrada, cerrando las salidas del PLC: para controlar las señales de entrada, se interpone un contacto entre el pin común (en el que el variador proporciona tensión) y el de entrada que interese, de modo que se detecte señal cuando se establezca continuidad en un circuito. La continuidad entre el pin común y el pin de entrada con el comando deseado puede conseguirse con un simple

interruptor, pero es más interesante estudiar cómo comandar el variador de forma sencilla desde el PLC.

Se explicará con la configuración de salidas de PLC más ventajosa, que es la de mando indirecto desde las salidas del PLC (las salidas de PLC comandan relés borna y los contactos de estos comandan preactuadores o, en este caso, cierran la entrada del variador).

Supóngase que, simplemente, desea ponerse en marcha el motor en un sentido (comando FW). En el variador, el pin n.º 1 es el que tiene asignada la función de FW. El comando del motor desde el PLC tiene lugar con las siguientes etapas:

- Según el programa y las entradas, el PLC activa el contacto de la salida que debe activar el motor.
- El circuito de esta salida se cierra activando, por tanto, el solenoide del relé KA10.
- La activación del relé KA10 conlleva el cierre de su contacto asociado NA. Los extremos de este contacto NA se habrán conectado uno al pin común de los pines de entrada del variador y el otro al pin n.º 1 de FW también de los pines de entrada del variador.
- Por el pin de entrada n.º 1 del variador, circula corriente y, por tanto, el variador detecta la señal de FW que ejecuta, estableciendo la alimentación en los contactos de potencia conectados al motor.

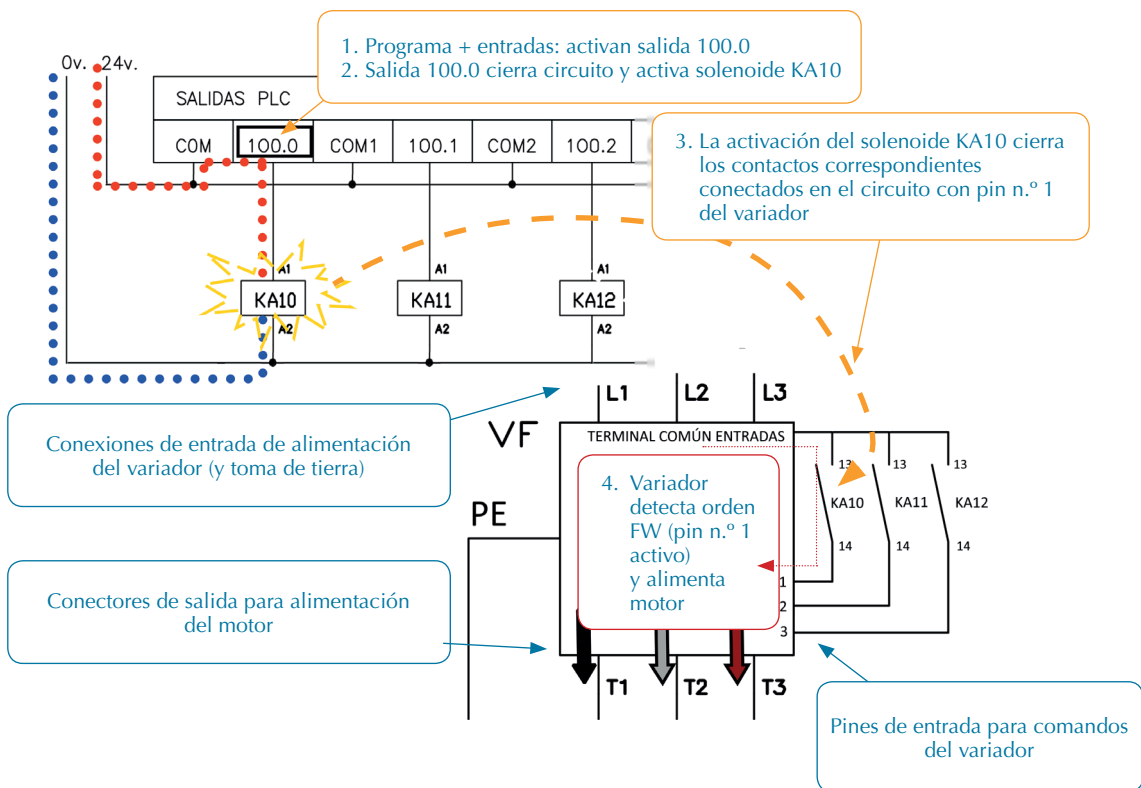


Figura 6.35

Comando emitido en pines de entrada del variador desde el PLC.

Para mantener el motor en marcha, el pin de entrada n.º 1 del variador deberá mantenerse activo. Cuando deje de estar activa la salida correspondiente, dejará de alimentarse el solenoide de KA10, por lo tanto, se abrirán sus contactos, dejará de activarse el circuito del pin de entrada n.º 1 y el variador lo verá inactivo y detendrá el motor.

2. Pines de salida del bornero de E/S

El bornero de salidas, igual que el de entradas, es un conjunto de pines de conexiones para pequeños cables de señal, donde se dispone de pines de dos tipos:

- a) *Pines de salida digital.* Igual que si fueran salidas de un PLC, con estos pines, se obtienen señales todo o nada que proporcionan información del funcionamiento del variador, como, por ejemplo, velocidades (frecuencias) alcanzadas, errores, etc. Además, el funcionamiento es totalmente análogo al de las salidas del PLC: habrá un pin común o colector que se conectará con los pines de salida mediante dispositivos de cierre basados en transistor (o relé o incluso ambas opciones). En una automatización sencilla, será útil configurar un circuito de modo que el cierre de la salida del variador sea una entrada del PLC.
- b) *Pines de salidas analógicas.* Son salidas que, con su conexión a un dispositivo de lectura analógica, permiten obtener información diversa. Por ejemplo, para controlar la velocidad del motor, un PLC puede necesitar conocer la frecuencia a la que trabaja el variador, recibiendo una señal de tensión o de corriente variables desde esta salida). También puede servir para monitorizar la operación del variador desde una ubicación remota o desde el panel frontal mediante un indicador visual compatible con la señal analógica.

Cada pin de salida tiene por defecto un significado o señal asociada, pero también es posible que sean configurables a gusto del usuario. Cuando el variador detecta que se cumple un parámetro asociado a uno de los pines, cierra eléctricamente el contacto entre este pin y el pin común o colector. Por ejemplo, si la primera salida es el pin 7 y tiene asignada la señal de 50 Hz de frecuencia alcanzados, cuando el motor alcance esta velocidad, se cerrará el contacto entre el común o colector y dicho pin 7.

Para recibir las señales de salida del variador, se configura un circuito de modo que la salida del variador se comporta como un pulsador en el circuito de entradas del PLC. Supóngase que, simplemente, desea conocerse cuándo el variador ha alcanzado 0 Hz y el pin de salida del variador que tiene asignada esta señal es el 8. Se alimentará el colector o común de las salidas con la fuente de alimentación de las entradas. Podrá hacerse con el positivo o con el negativo (ambos sentidos de circulación de corriente) si lo permite el variador según indique su manual y siendo compatible con la configuración de entradas del PLC. El pin 8 se conectará entonces a una de las entradas del PLC, de forma que el cierre eléctrico interno entre común o colector y el pin 8 del variador provoca la activación de la entrada del PLC.

La salida de señal desde el variador hacia el PLC tiene lugar con las siguientes etapas:

- El variador alcanza la parada de motor (frecuencia 0 Hz) y cierra eléctricamente el contacto entre el pin 8 y el colector.
- Dado que el colector tiene la misma alimentación de entradas, cuando se produce el cierre del colector pin 8, se cierra el circuito a través de la entrada 8 y esta se activa en el PLC.

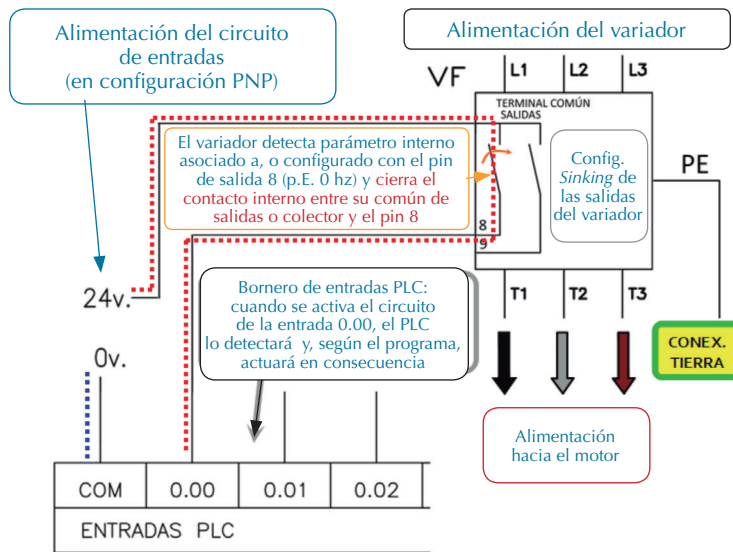


Figura 6.36
Conexión para la recepción de señal en las entradas del PLC desde las salidas del variador.

3. Gobierno y comunicaciones en el variador de frecuencia a través del puerto de comunicaciones

Toda la información que puede entrar o salir con los pines digitales de E/S del variador y mucha más podrá gestionarse a través del puerto de comunicaciones con dispositivos que sean compatibles y empleen el mismo protocolo de comunicación.

6.3.4. Modos de funcionamiento

El variador tiene, fundamentalmente, dos modos de operación:

1. Stop/program: el motor conectado está detenido y, en este modo, puede entrarse en el menú del variador navegando con las teclas o con el software de configuración y el *display* para modificar todos los aspectos internos configurables.
2. Run: el motor se encuentra funcionando y el variador realiza su control, por lo que pueden visualizarse distintos valores de monitorización. Reaccionará a los comandos recibidos de funcionamiento, como velocidad de referencia, puesta en marcha, parada, multivelocidad, etc., pero sin poder cambiarse los parámetros de configuración.

6.3.5. Configuración

El variador siempre contiene una pantalla o *display* sencillo y, al menos, las siguientes teclas: arriba, abajo, *enter*, *return*, *run* y *stop*.

Para su configuración manual y para visualizar parámetros durante la marcha, el fabricante agrupa las funciones del variador en categorías y, con las teclas *arriba*, *abajo*, *entrar* y *volver* (*up*, *down*, *enter* y *return*), puede navegarse por ellas y modificar parámetros. Las categorías pueden ser las siguientes: funciones básicas, funciones estándar, funciones avanzadas, configuración de función de pines E/S de borneros, parámetros de motor, monitorización en *display*, alarmas, comunicaciones, etc.

Al encender el variador y pulsar los botones de *arriba* o *abajo*, se navega por cada bloque de función. Pulsando *entrar* sobre la categoría deseada, se accede al listado de funciones disponibles. Análogamente, con *arriba* y *abajo*, se visualiza cada función y, con *entrar*, se accede a los parámetros disponibles para cada función. Entrando en el parámetro en cuestión, se visualizará el valor establecido y podrá modificarse. Para grabar el nuevo valor, se realiza con *entrar*. Si desea subirse un nivel en la navegación (de grabar parámetro a listado de parámetros de función, de parámetros de función a listado de funciones o de listado de funciones a listado de categorías), se pulsará *volver*.

La configuración del variador de frecuencia puede realizarse de dos modos:

1. Manualmente navegando por funciones y sus parámetros con las teclas y el *display* digital.
2. Mediante conexión a un PC con el puerto de comunicaciones y empleando el software de configuración que el fabricante proporciona para el modelo adquirido de variador de frecuencia.

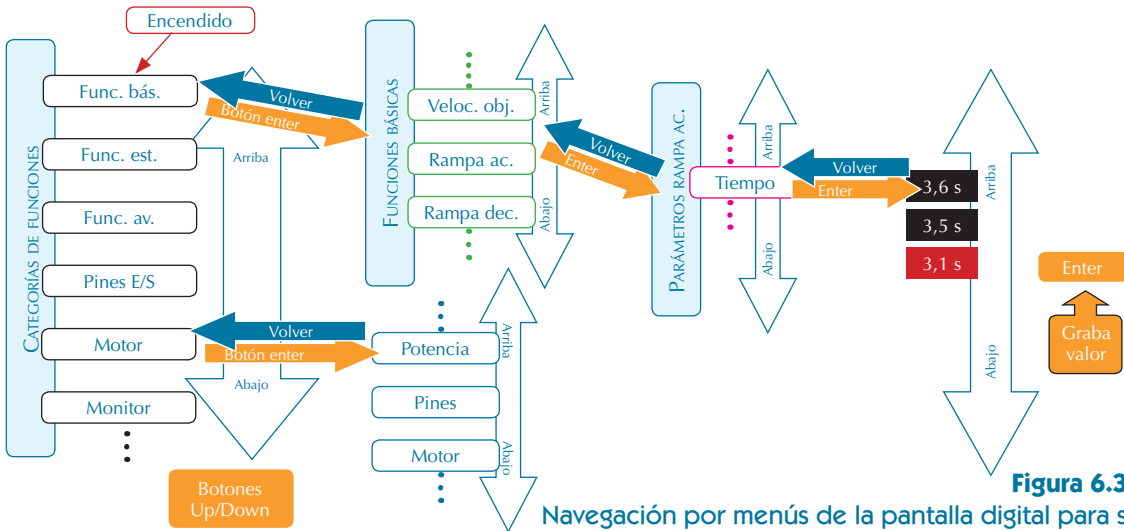


Figura 6.37
Navegación por menús de la pantalla digital para su configuración.

De este modo, podrá accederse a multitud de parámetros, algunos de ellos pueden ser los recogidos en el cuadro 6.3.

CUADRO 6.3
Parámetros básicos de configuración del variador de frecuencia

Origen de puesta en marcha

Se trata de indicar al variador de dónde debe leer el comando de puesta en marcha. Para comandar la puesta en marcha del motor, hay diversas opciones:

- a) Directamente con la tecla *run* disponible en el frontal.
- b) Con comando FW o RV de los pines de entrada.
- c) A través del puerto de comunicaciones.
- d) Otros.

[.../...]

CUADRO 6.3 (CONT.)

Referencia de velocidad	Otra de las primeras cosas que es necesario configurar es cuál va a ser su referencia de velocidad o frecuencia. La referencia puede almacenarse en la memoria del variador (siguiente opción) o ser suministrada por un potenciómetro, por una entrada analógica, por un tren de pulsos, por el puerto de velocidad u otros medios.
Valor de velocidad objetivo	Cuando la referencia de velocidad se configura para que se tome el valor interno, en este parámetro, habrá que indicar la velocidad de trabajo del motor.
Otras velocidades	<p>a) <i>Frecuencia base</i>: en un arranque estándar, se inicia desde frecuencia 0 hasta que esa frecuencia, aumentando de forma lineal (o con otra curva) la tensión hasta el máximo.</p> <p>b) <i>Frecuencia máxima</i>: superada la frecuencia base y buscando la referencia de velocidad, el variador la incrementará pero nunca debe rebasarse este valor, que define el máximo alcanzable.</p>
Protección termoeléctrica	Existen parámetros de protección de modo que se elige una curva de arranque y valores máximos de funcionamiento para que, si se supera la intensidad o potencia máxima que marcan las curvas, el variador detenga el motor.
Tiempo de aceleración hasta la velocidad objetivo	Define el tiempo que debe invertir el variador para pasar de 0 Hz hasta la velocidad objetivo.
Tiempo de deceleración hasta la velocidad 0	Define el tiempo que debe invertir el variador para pasar de velocidad objetivo hasta velocidad 0.
Tipo de detención de motor	Giro libre o frenado por parte del variador.
Curvas de arranque y frenado velocidad-tiempo	La aceleración o deceleración no tiene por qué ser lineal. El variador ofrece diversos perfiles de velocidad-tiempo no lineales que pueden seleccionarse para el arranque y la parada según convenga al funcionamiento de la máquina.
Multivelocidad	Es posible grabar en la memoria del variador múltiples velocidades convenientes para el funcionamiento del proceso, para que, indicadas mediante, por ejemplo, los pines de entrada, el variador lleve al motor a dichas velocidades.
Parámetros de segundo motor	Puede indicarse (asignando a esta función un pin de entrada) que el variador trabaje con un segundo conjunto de parámetros, destinados a un segundo motor. Cuando este comando se active, el variador ignorará los parámetros estándar (primer motor) y empleará este segundo set de parámetros.
Parámetros de control PID de velocidad del motor	El variador puede incluir funciones de control en continuo de la velocidad del motor mediante un control proporcional-integral-derivativo. Los parámetros de este control deberán configurarse.
Otros	Parámetros relativos al motor para control en lazo abierto, comportamiento en la parada cuando hay pérdida de alimentación, parámetros de comportamiento tras el reinicio de alimentación, monitores y alarmas, reseteo a valores de fábrica, etc.

[.../...]

CUADRO 6.3 (CONT.)

Velocidad JOG	Configuración de la frecuencia de velocidad JOG deseada.
Asignación de funciones a pines de entrada y de señales a pines de salida	Cuando el dispositivo lo permite, puede modificarse la asignación de la función de cada pin de entrada o salida indicando pin a pin cuál es la función que debe cumplir.

Resumen

- Se ha analizado el extremo de salida de un sistema automatizado: las acciones sobre el proceso.
- Las acciones sobre el proceso no se alimentan directamente desde el dispositivo de control, habitualmente un PLC. Lo hacen en dos etapas: el PLC activa los preactuadores y estos activan los actuadores. Por tanto, uno de los primeros aspectos estudiados ha sido esta distinción.
- Se ha expuesto una clasificación de preactuadores y actuadores para, posteriormente, estudiar los preactuadores fundamentales y sus funciones y características. El relé, el contactor, la electroválvula y los controladores electrónicos se han elegido como protagonistas.
- En el caso del relé, el contactor y la electroválvula, funcionan mayoritariamente con un solenoide y un electroimán que ejercen un trabajo mecánico para su accionamiento y, por tanto, se explica su función.
- Finalmente, se desarrolla lo que es un variador de frecuencia por ser un preaccionador complejo de gran protagonismo al gobernar motorreductores presentes mayoritariamente en la industria.

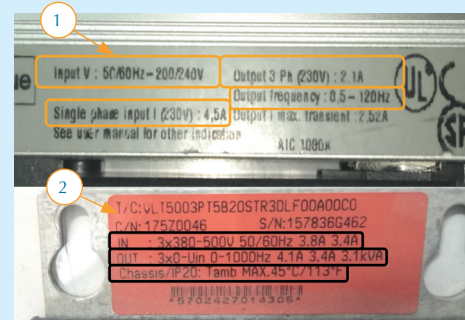
Ejercicios propuestos



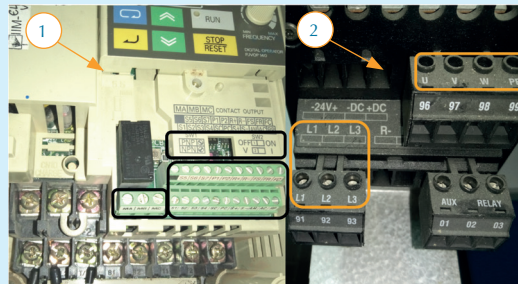
1. Comenta si las situaciones siguientes son correctas o no y explica por qué y qué solución aportarías.
 - Un PLC con salidas a transistor *sourcing*. Su especificación de intensidad máxima es de 300 mA. Desea conectarse unas electroválvulas en las que, en el lateral del solenoide, indica "24 V CA".
 - Un PLC con salidas a relé. La especificación de intensidad máxima en las salidas es de 2A a 250 V con $\cos \phi = 1$. Desea conectarse directamente a una salida un motor de un ventilador monofásico cuya placa de características indica 500 W.

- Un PLC con salidas a transistor triac. Su especificación de intensidad máxima es de 800 mA. Desea conectarse un contactor en cuyo lateral indica "24 V CC/24 W".
- Una salida de PLC de tipo relé debe accionar, a su vez, un relé que acciona un motor de 1000 W 10 veces por minuto. El manual indica una vida estimada de la salida del PLC de 100 000 ciclos para cargas resistivas y 48 000 para cargas inductivas.

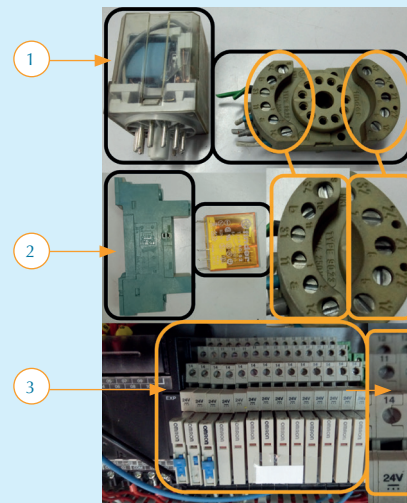
2. Indica qué son los elementos que se muestran en las imágenes siguientes, así como todo lo que sepas sobre ellos:



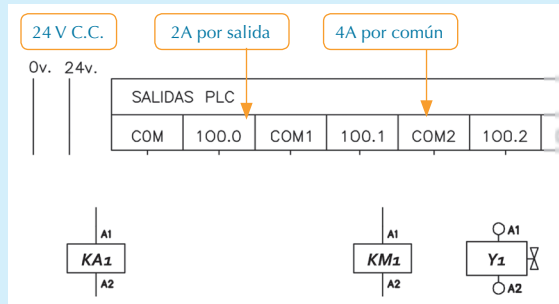
3. Señala qué son los elementos que se presentan en las imágenes siguientes, así como todo lo que sepas sobre ellos:



4. Identifica los elementos que aparecen en las siguientes imágenes y explica todo lo que sepas sobre ellos:



5. El siguiente bornero de salidas corresponde a un PLC cuyo manual indica un máximo de 2 A por salida y 4 A por común. Se alimenta con 24 V en CC y desea activarse al relé KA1 con la salida 100.0, al contactor KM1 con la salida 100.1 y a la electroválvula Y1 con la salida 100.2. El relé KA1 tiene un solenoide de potencia 2 VA. El problema es que el contactor indica en su ficha de especificaciones que requiere 50 VA y la electroválvula, 68 VA. Dibuja los elementos y conexiones que faltan para poder cumplir con lo deseado.



Caso práctico

En la figura que se presenta más adelante, se muestran los siguientes elementos:

1. Bornero de entradas de un PLC.
2. Bornero de salidas de un PLC con salidas a relé.
3. Bornero de E/S de un variador (con la etiqueta guía de conexiones)

En la tarjeta de control del manual del variador, se indica lo siguiente:

- Entradas digitales:
- Número de entradas digitales programables: 8.
- Número de terminales de entrada: 16, 17, 18, 19, 27, 29, 32 y 33.
- Nivel de tensión en las entradas: 0-24 V CC (lógica positiva PNP).
- Nivel de tensión para obtención de un cero lógico < 5 V CC.
- Nivel de tensión para obtención de un uno lógico > 10 V CC.
- Tensión máxima en entradas: 28 V CC.

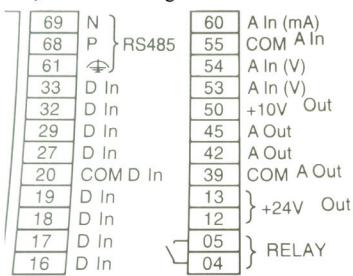
- Resistencia de entrada: $R_i = 2 \text{ k}\Omega$.
- Tiempo de exploración por entrada: 3 ms.

Salidas de relé:

- Número de salidas de relé programables: 1.
- Número de terminal, tarjeta de control: 4-5 (NA).
- Carga máx. (CA) en terminales 4-5, tarjeta de control: 50 V CA, 1 A y 50 VA.
- Carga máx. del terminal (DC-1 [IEC 947]) en tarjeta de control 4-5: 75 V CC, 1 A y 30 W.
- Carga máxima del terminal (DC-1) en tarjeta de control 4-5 para aplicaciones UL/cUL: 30 V CA, 1 A/42,5 V CC y 1 A.

En la tapa de E/S del variador, se muestra la siguiente información:

La entrada de puesta en marcha a partir de la alimentación que proporciona el variador



(donde indique +24 V) para FW 18 ON, Motor ON, y viceversa). En el manual, también se

indica que, para la puesta en marcha del motor, es necesario dar señal al terminal 27. La interrupción de señal en la entrada 27 sirve para realizar un frenado con lógica negativa (entrada lógica 18 ON, frenado OFF; entrada lógica 18 OFF, freno ON).

En cuanto al bornero de salidas del PLC, en su manual, se señala un máximo de 2 A por salida y 4 A por común. Se desea, en la medida de lo posible, conectar los preactuadores directamente a las salidas del PLC.

Indica los siguientes datos y completa la información con un dibujo esquemático:

1. El significado de lo que indica el manual en la tarjeta de control.
2. La alimentación del circuito de salidas del PLC.

3. La alimentación del circuito de entradas del PLC.
4. La conexión directa de la salida 10.00 (10 CH) a la entrada del variador indicada para que se active el motor en marcha FW.
5. ¿Cómo puede garantizarse con un pulsador NC la marcha del motor con la entrada 27 y qué debe pasar para ello (cuándo debe activarse o desactivarse)?
6. La conexión de los siguientes elementos con otras salidas para que se activen según indique el programa introducido en el PLC para el funcionamiento del automatismo:
 - a) Dos contactores KM1, KM2 activados a 230 V en CA de potencia de solenoide 40 VA cada uno (indica en la foto la conexión).
 - b) Dos electroválvulas Y1, Y2, activadas a 24 V en CC de potencia de solenoide 60 W cada una.
7. La conexión de la salida a relé del variador a la entrada 0.0 (0 CH) del PLC para que el variador indique algún parámetro a este (velocidad alcanzada, sobrecarga, etc.).



Entradas y salidas PLC



Entradas y salidas variador



ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. En relación con un preactuador, ¿cuál de las siguientes opciones es verdadera?
 - a) Siempre es necesario para gobernar un actuador a partir de las salidas de un PLC.
 - b) Solo amplifica la señal proporcionada por la salida del controlador a la potencia adecuada del actuador.

- c) Solo admite señales digitales todo o nada.
 - d) Ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
2. Hablando sobre los preactuadores fundamentales con tecnología en estado sólido, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) Son relés, contactores y electroválvulas.
 - b) Tienen una duración similar a los accionados por solenoide.
 - c) Tienen una velocidad de respuesta menor que los accionados por solenoide.
 - d) Ninguna de las afirmaciones anteriores es verdadera.
3. ¿Cuál de las siguientes frases es falsa?
- a) Un relé tiene uno o varios contactos unipolares de potencia para monofásica o señalización y automatización.
 - b) Los contactos de un relé solo admitirán hasta 10 A de intensidad nominal.
 - c) Un contactor tiene contactos de potencia trifásicos (tres o cuatro) y, a veces, contactos auxiliares unipolares de potencia para monofásica o señalización y automatización.
 - d) Al ser los contactores elementos más grandes y con contactos más robustos, su solenoide suele requerir mayor potencia de accionamiento que el de los relés.
4. ¿Cuál de las siguientes oraciones es verdadera?
- a) Una electroválvula todo o nada neumática tiene un diseño y robustez similar al de una electroválvula hidráulica.
 - b) El accionamiento de una electroválvula depende siempre completamente de la fuerza que proporciona el sistema de electroimán en el solenoide.
 - c) Normalmente, una electroválvula estará más expuesta al ambiente que los contactores y relés, pues estará fuera del cuadro eléctrico y cerca de los actuadores.
 - d) El solenoide de una electroválvula hidráulica suele requerir menor potencia que el de una electroválvula neumática.
5. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso?
- a) Los conectores, según la ISO 61076, que se empleaban en sensores no se emplean en preactuadores.
 - b) Los conectores para electroválvulas suelen presentar protección IP 65 o 67.
 - c) La conexión más habitual en contactores y relés es con sistema de presión con tornillo.
 - d) Los conectores cuadrados según la EN 175301-803 se emplean mayoritariamente para solenoides de electroválvulas.
6. ¿Con cuál de las siguientes afirmaciones no estás de acuerdo?
- a) Los preactuadores complejos o controladores suelen requerir más pines en sus conectores.
 - b) Es habitual que los preactuadores complejos o controladores dispongan de puertos de comunicación y se comuniquen según protocolos de comunicación industrial.
 - c) El conector RJ45 suele emplearse para un protocolo serie.
 - d) El conector DB9 se empleaba comúnmente como puerto de comunicaciones y aún se encuentra en muchos controladores.

7. Respecto a las características de contactos de potencia de contactores, ¿cuál de las siguientes proposiciones es verdadera?
- a) La clasificación que hacen las normas de los contactores solo depende de la intensidad nominal admisible en los contactos de potencia.
 - b) La intensidad nominal de los contactos de potencia no suele exceder de 40 A.
 - c) Su vida en ciclos es independiente de la potencia de la carga manejada.
 - d) En condiciones de uso nominales, a igualdad de intensidad nominal y tipo de uso, un contactor con contactos de potencia con tecnología en estado sólido tendrá una vida superior.
8. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero?
- a) La velocidad de un motor síncrono dependerá de la frecuencia de la onda de alimentación y el número de polos.
 - b) La velocidad de un motor asíncrono dependerá de la frecuencia de la onda de alimentación y el número de polos.
 - c) La velocidad de un motor síncrono dependerá de la frecuencia de la onda de alimentación, el número de polos y el deslizamiento.
 - d) La velocidad de un motor asíncrono dependerá de la frecuencia de la onda de alimentación, el número de polos y el deslizamiento.
9. ¿Cuál de las siguientes opciones está relacionada con un variador de frecuencia?
- a) No suele encontrarse la posibilidad de controlarlo mediante un puerto de comunicación.
 - b) Los conectores de alimentación del variador son siempre trifásicos.
 - c) Es habitual conectar aguas arriba un filtro antiarmónicos.
 - d) Es imposible gobernar la velocidad con un potenciómetro.
10. ¿Con cuál de las siguientes afirmaciones sobre un variador de frecuencia no estás de acuerdo?
- a) Será necesario entrar en su menú para la configuración de diversos parámetros.
 - b) Cualquier variador de frecuencia servirá para cualquier motor.
 - c) Se encuentran muchas funciones para el control avanzado del motor.
 - d) Es posible establecer una comunicación básica con el PLC a través la recepción y emisión de señales ON/OFF en sus entradas y salidas digitales.

SOLUCIONES:

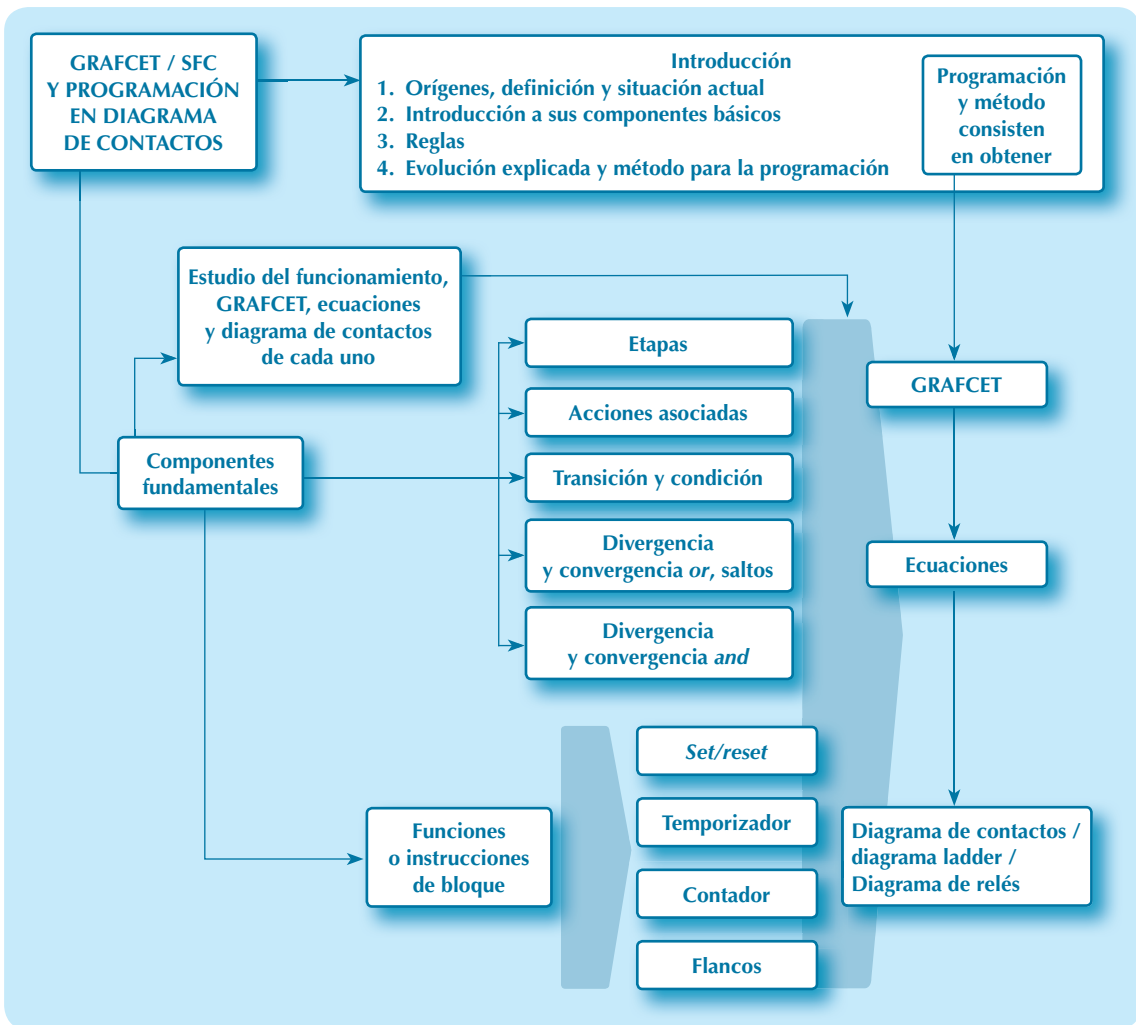
- | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| 1. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d | 5. <input checked="" type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 9. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input checked="" type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d |
| 2. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d | 6. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input checked="" type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 10. <input type="checkbox"/> a | <input checked="" type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d |
| 3. <input type="checkbox"/> a | <input checked="" type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 7. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d | | | | |
| 4. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input checked="" type="checkbox"/> c | <input type="checkbox"/> d | 8. <input type="checkbox"/> a | <input type="checkbox"/> b | <input type="checkbox"/> c | <input checked="" type="checkbox"/> d | | | | |

Programación básica a partir de GRAFCET-SFC

Objetivos

- ✓ Definir qué es el GRAFCET y sus reglas.
- ✓ Identificar las entradas, etapas y salidas o acciones de un proceso secuencial y relacionar estos elementos con los componentes de un GRAFCET.
- ✓ Definir todas las estructuras básicas del GRAFCET y cómo traducirlas a un conjunto de líneas de circuitos de contactos eléctricos cuyo comportamiento sea fiel al que describe el GRAFCET: la programación básica en el diagrama de contactos.
- ✓ Introducirse en las instrucciones básicas, como temporizadores y contadores, que se integran en el diagrama de contactos a partir del GRAFCET para generar el programa completo de un automatismo secuencial en el diagrama de contactos.
- ✓ Establecer un paralelismo entre el concepto de *proceso secuencial* y su programación a partir del GRAFCET y el método para dicha programación.
- ✓ Saber programar en el diagrama de contactos de automatismos básicos a partir del diseño de GRAFCET.

Mapa conceptual



Glosario

Acciones asociadas. Aquellas temporalmente ligadas (asociadas) a determinadas etapas.

Condición o función lógica asociada a la transición. Condición entre etapas del GRAFCET que, en función del valor de sus variables, resultará (la receptividad será) verdadera o falsa.

Contador. Función capaz de contar pulsos de un estímulo en la entrada y que, según dicho conteo, dispone de un contacto asociado que cerrará para su uso a conveniencia en la programación.

Ecuaciones de las salidas. Aquellas que describen el funcionamiento de las salidas a partir de sus etapas asociadas en GRAFCET.

Ecuaciones de transición. Aquellas que describen el funcionamiento de las etapas.

Enclavamiento. Mecanismo o interruptor que, una vez pulsado o activado con una señal de pulso (que puede ser de duración muy corta), modifica su estado y permanece en la posición o valor cambiados hasta que vuelva a ser manipulado.

Etapas de GRAFCET. Espacios en el tiempo en los que se desencadena una acción o un conjunto de ellas al unísono o que es fácilmente discernible de otros espacios temporales similares anteriores o posteriores, separados entre sí por condiciones que deben cumplirse para avanzar de unas a otras.

Flanco ascendente o descendente de un bit. Se trata de un pulso de muy corta duración que tiene lugar cuando el bit cambia de 0 a 1 (ascendente) o de 1 a 0 (descendente).

Proceso secuencial. Aquel que es divisible en etapas completamente independientes y para las que algún hito o hecho del proceso significa su finalización e inicio de la siguiente.

Temporizador. Función capaz de contar tiempo a partir de un estímulo en la entrada y que, según este conteo, dispone de un contacto asociado que cerrará para su uso a conveniencia en la programación.

Transición de GRAFCET. Representa la barrera de paso entre etapas consecutivas. La transición debe ser cierta para que, estando activa la etapa precedente, se active la posterior y se desactive la primera (la precedente).

7.1. Introducción

En los inicios de la automatización industrial, el control se conseguía con lógica cableada de circuitos eléctricos con relés y de circuitos neumáticos. Actualmente, se combina la energía neumática, hidráulica y eléctrica para los actuadores, con señales de mando eléctricas y control electrónico y lógica programable para conseguir el mejor compromiso.

El mando y control con lógica cableada con relés o neumáticamente están en desuso. En contraste, las ventajas de utilizar controladores o autómatas programables con señales eléctricas u ópticas son las siguientes:

- a) Velocidad de transmisión de señales frente al mando o control neumático mucho más elevada (además, en control neumático, estaba muy limitada la distancia debido a las pérdidas de carga y la baja velocidad de transmisión de las señales).
- b) Simplicidad frente a la complejidad de los circuitos cableados (muy complicados al aumentar el número de actuadores o pasos de la secuencia, ya sea con relés o neumática).
- c) Su programabilidad. La flexibilidad es infinitamente superior con la lógica programada, en lugar de con la cableada (eléctrica o neumáticamente), para la modificación de las secuencias de trabajo o programa de control.

Por todo ello y como ya se ha estudiado en capítulos anteriores, en el área de automatización industrial, hoy en día, es de gran trascendencia el PLC y su programación, una de sus ventajas fundamentales.

En los siguientes apartados, se inicia el camino de su programación estudiando una técnica para la representación y diseño de automatismos y que se traduce fácilmente en el diagrama de contactos, lenguaje de programación universal para PLC. Se trata del GRAFCET o, en su última versión, SFC en inglés.

Pero, además, en el capítulo 4, ya se ha indicado que el PLC puede programarse de formas diversas y que, aunque el lenguaje más tradicional es el diagrama de contactos, el SFC se incluyó ya en la norma actual IEC 61131 directamente como lenguaje de programación. Esto hace que conocer y dominar tanto el GRAFCET como el SFC resulte aún más atractivo, pues los fabricantes ofrecen ya esta opción en el software de programación.

En este capítulo, no se introducen todos los elementos del GRAFCET, ya que es preferible hacerlo de forma progresiva conforme avance el aprendizaje. Sin embargo, sí son suficientes elementos para poder representar muchas secuencias y que sirva como base para la programación de estas en el diagrama de contactos.

© FUNDAMENTAL

A partir de este punto, se empleará el término *GRAFCET*, ya que, aunque se acepta que puede haber equivalencias con el término *SFC* anglosajón –pues son representaciones muy similares–, sin embargo, no son lo mismo:

- GRAFCET es un método gráfico de representación de automatismos secuenciales, originado en décadas pasadas que, en sus últimas versiones, resulta muy similar al SFC. Puede ser más específico o más general y, al ser un método evolucionado con el tiempo, hay cierta flexibilidad de representación de sus elementos. Por sí mismo, puede no ser capaz de definir el programa del PLC o automatismo (no es un lenguaje de programación, sino un potente método gráfico de representación del automatismo secuencial).
- SFC se interpreta como la última versión del método gráfico con suficiente potencia para ser considerado lenguaje de programación en la IEC 61131-3, donde se define de forma estricta su representación y ámbitos específicos. Cualquier SFC, como programa del automatismo, portará toda la información operativa necesaria para el programa del sistema de control (por ejemplo, PLC).

7.1.1. Orígenes y evolución

No será necesario extenderse mucho, pero puede decirse que su origen y evolución son paralelos a la automatización secuencial a partir de los años sesenta. La Asociación Francesa para la Cibernética Económica y Técnica (AFCET) creó un equipo de trabajo para generar un método que fuera

capaz de elaborar una representación de los automatismos de la época. A partir de los métodos existentes, surgió la primera versión del GRAFCET. Posteriormente, la Agencia Nacional para el Desarrollo de la Producción Automatizada (ADEPA) se encargó de difundirlo y consolidarlo. A partir de este momento, es incluido a lo largo del tiempo en distintas normas (francesa NFC, CEI, etc.), que van añadiendo conceptos y definiendo el método, pasando por:

- IEC 848: 1988 “Preparation of function charts for control systems”.
- IEC 60848: 2013 “GRAFCET specification language for sequential function charts”.
- IEC 61131-3:2013 “Programmable controllers—Part. 3: Programming languages”. Esta norma establece la estandarización actual en la programación del control industrial con SFC y los otros lenguajes.

En este libro, no va a seguirse la definición ni la representación normativa actual, sino una representación simplificada clásica del GRAFCET. Esta exposición se estima más adecuada para los estudios a los que va destinado esta obra y para la comprensión e implementación del método y obtención de la programación con diagrama de contactos de automatismos secuenciales sencillos.

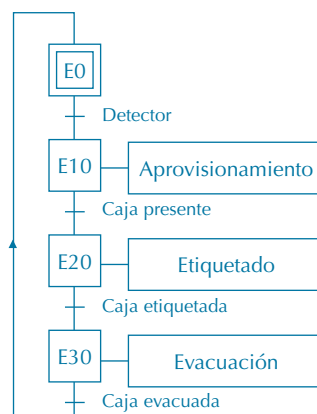


Figura 7.1
GRAFCET.

RECUERDA

- ✓ Trabajar conforme a la normativa exigirá la adquisición de las normas y su estudio por menorizado o formación respecto a ellas.

7.1.2. Proceso secuencial

Un proceso secuencial es aquel que es divisible en etapas completamente independientes y para las que algún hito o hecho del proceso significa su finalización e inicio de la siguiente. Por ejemplo, un cilindro neumático que sale y, cuando ha llegado al final, vuelve hasta recogerse totalmente podría tener las siguientes etapas (figura 7.2):

- Estimular la electroválvula Y1 que llenará la cámara de extensión del cilindro. Esto hace que el cilindro salga. ¿Ha alcanzado el final de su recorrido de extensión (toca final de carrera 1S2)? Si la respuesta es sí, paso a la siguiente etapa.
- Estimular la electroválvula Y2 que llenará la cámara de retracción del cilindro. Esto hace que el cilindro retorne. ¿Ha alcanzado el final de su recorrido de retracción (toca final de carrera 1S1)? Si la respuesta es sí, paso a la siguiente etapa.

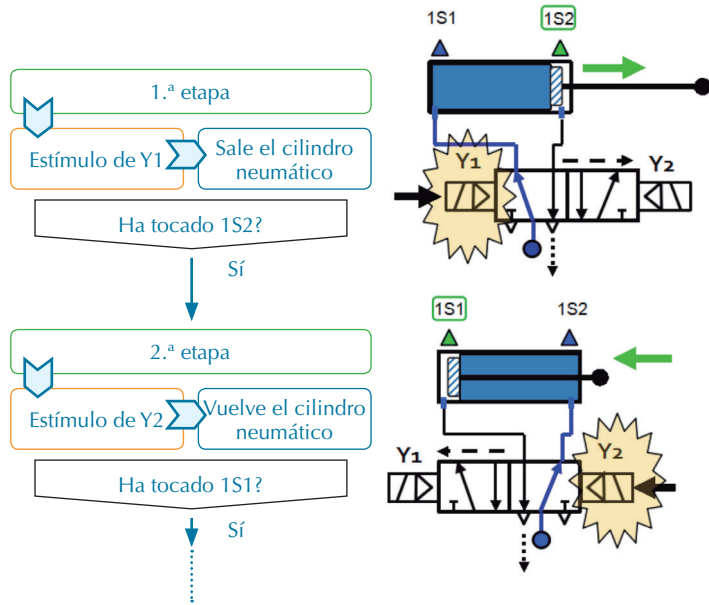


Figura 7.2
Proceso secuencial,
con excitación de solenoides
y movimiento de cilindro
neumático.

Actividad propuesta 7.1



Una estación de transporte debe realizar las siguientes operaciones. Hay un alimentador vertical con piezas apiladas y un cilindro sale empujando una pieza hacia una cinta transportadora. En cuanto el cilindro ha salido, se pone en marcha la cinta transportadora y, al mismo tiempo, el cilindro vuelve. Tras volver el cilindro, la máquina espera 12 s y, entonces, detiene la cinta transportadora. Un segundo cilindro empuja lateralmente la pieza hacia una rampa de rodillos y, posteriormente, se recoge.

Sabiendo que son cilindros de doble efecto comandados por válvulas biestables, propón una secuencia con etapas y las condiciones que las separan.

7.1.3. Definición de GRAFCET

El gráfico funcional de control de etapas y transiciones (GRAFCET) es un diagrama lógico en el que puede expresarse de forma completa la evolución secuencial de un proceso y las condiciones que determinan los cambios de etapa y los posibles comportamientos del automatismo frente a ellas, así como las acciones asociadas a cada etapa que se ejecutarán en el proceso.

Con la funcionalidad que indica su definición, sirve como método de diseño gráfico para automatismos de carácter secuencial, muy frecuentes en la industria. Presenta la ventaja de mostrar, de una forma muy simple, las acciones, los procesos y la activación de los elementos que los controlan. Además, una vez generado, facilita el modo de obtener el programa en el diagrama de contactos siguiendo unos pasos simples y mecánicos.

Los procesos secuenciales en la industria suelen ser cíclicos (no se ejecutan una única vez), con incontables repeticiones. Por ello, el GRAFCET suele tener carácter cíclico y la última etapa del proceso está seguida de la primera y la primera, precedida de la última.

TOMA NOTA



Aunque el GRAFCET se concibió, inicialmente, como un modo de representar un automatismo, se estudiará aquí como la herramienta que sirve de base para la obtención del programa en el diagrama de contactos. Además el SFC se define ya actualmente como uno de los lenguajes de programación incluidos en la norma IEC 61131-3 que regula los aspectos relativos a la programación del PLC. Esto implica que los fabricantes ya permiten la programación directamente en SFC sin emplear el método aquí expuesto de transcripción a diagrama de contactos.

Actualmente, los lenguajes normativos (IEC 61131-3) de programación son los siguientes:

1. Textuales:
 - a) IL, del inglés *instruction list* (lista de instrucciones).
 - b) ST, del inglés *structured text* (texto estructurado).
2. Gráficos:
 - a) LD, del inglés *ladder diagram* (diagrama de contactos).
 - b) FBD, del inglés *function block diagram* (diagrama de bloques de función).
 - c) SFC, del inglés *sequential function chart* (gráfico funcional secuencial: GRAFCET).



INTERESANTE

La programación en el diagrama de contactos, con esta metodología, está al alcance de cualquiera y no requiere conocimientos informáticos como otros lenguajes (por ejemplo, los lenguajes estructurados).

7.1.4. Elementos del GRAFCET

Para continuar con el estudio del GRAFCET, se hace necesario conocer los elementos básicos que lo constituyen. El capítulo está estructurado de modo que cada uno de ellos se analiza con detalle más adelante, pero es interesante conocer inicialmente su introducción. Se indica, además, cuál es su representación habitual. Posteriormente, se introducirán nuevos elementos, pero, con el conjunto siguiente, ya pueden generarse automatismos secuenciales interesantes.

A) Etapas

Son espacios en el tiempo en los que se desencadena una acción o un conjunto de ellas al unísono o que es fácilmente discernible de otros espacios temporales similares anteriores o posteriores, separados entre sí por condiciones que deben cumplirse para poder avanzar de unas a otras. Inicialmente, se exponen dos tipos:

1. *Etapa inicial*: es singular, pues su activación no depende solo de otras etapas, sino que se activa también en el encendido de la máquina o inicio del automatismo.
2. *Etapa*: depende para su activación de otras etapas.

1. Representación e identificación

Se representan con un cuadrado. En la etapa inicial, su cuadrado se representa con doble línea, aunque también es posible encontrarla representada con un perímetro de línea sencilla y doble línea solo en los laterales del cuadrado.

En las etapas normales, su cuadrado se representa con línea sencilla.

Las etapas se unen entre sí mediante líneas verticales u horizontales que parten o llegan desde la parte inferior y hasta la parte superior del cuadrado respectivamente.

2. Variables binarias

Cada etapa será una variable binaria donde tomará valor 1 cuando esté activada y valor 0 cuando no lo esté.

3. Identificación

Suelen indexarse con un número. El número de índice de la etapa inicial suele ser un 0 o un 1, pero también puede ser cualquier otro.

Para tratarlas posteriormente como variables binarias, se considera interesante incluir una E u otra letra previa a un número para distinguir las etapas (suele también emplearse la letra X). Para trasladar la identificación de las etapas a la programación, será necesario comprobar qué denominación de variables admite el software de programación o PLC empleado.

Aunque no tiene por qué (no es obligatorio), puede buscarse que el incremento de la numeración guarde, en la medida de lo posible, relación con el orden de las etapas en el GRAFCET o proceso. Si se elige trabajar de este modo, para poder modificar el GRAFCET e introducir nuevas etapas intermedias, a menudo, es buena práctica no emplear números consecutivos, sino hacerlo de 5 en 5 o de 10 en 10. El único problema con esta práctica se produce cuando el GRAFCET tiene tantas etapas que se generan números de etapa muy largos. Si se trabaja con numeración de etapas independiente absolutamente del orden del proceso, esto no es necesario.

Dentro de las etapas no iniciales, existen otras etapas singulares como las etapas fuente o sumidero, entradas de macroetapa, etc., que se estudian más adelante.

Habitualmente, cada etapa llevará asociada una o más acciones asociadas, aunque también puede haber etapas sin acción asociada alguna.

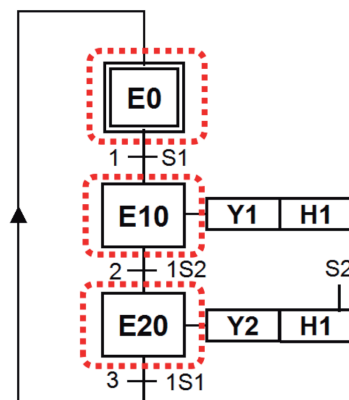


Figura 7.3
Etapas.

B) Transición y su condición o función lógica asociada

La transición representa la barrera de paso entre etapas consecutivas. Debe ser cierta para que, estando activa la etapa precedente, se active la posterior y se desactive la primera (la precedente).

La condición o función lógica asociada a la transición es una función que, según el valor de sus variables, tendrá dos resultados posibles (variable binaria):

- 1: se cumple, es cierta. Se rebasa la transición.
- 0: no se cumple, no es cierta. No se rebasa la transición.

Por el hecho de que la etapa previa esté activa, se dice que la transición está *validada* (pero no que sea franqueable). La función lógica asociada a la transición se denomina *receptividad*.

Cuando la transición esté validada la receptividad valga 1, podrá franquearse la transición.

Es posible que la receptividad o función lógica de la transición tenga el valor de constante binaria 1. Cuando tiene este valor, se dice que la transición o receptividad es verdadera siempre (no depende del resultado de la función lógica). Es interesante notar que el resultado es binario, pero el origen no tiene por qué serlo. Es decir, si la condición es la activación de un final de carrera 1S1, efectivamente, el contenido de la condición de transición es binario, pues 1S1 o está activo o no lo está. Sin embargo, la condición también puede ser una comparación entre dos números no binarios.

Existen unas transiciones singulares, se trata de las transiciones fuente y sumidero, sin etapa previa o posterior, respectivamente, que se estudian más adelante.

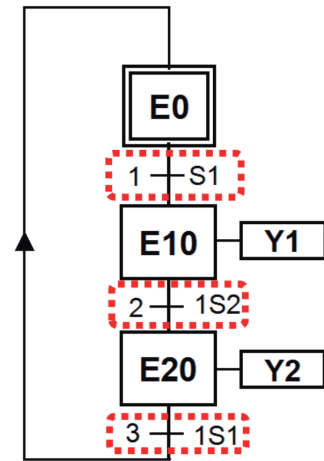


Figura 7.4
Transiciones.

1. Representación

La transición se representa como un corto trazo horizontal perpendicular a la línea que une las etapas.

2. Identificación

Puede representarse numerada para indexarse, aunque, a menudo, se omite esta numeración. La función lógica se escribirá a la derecha de esta.

C) Acciones asociadas

Son las acciones que van temporalmente ligadas (asociadas) a determinadas etapas. Esto significa que tendrán lugar a partir de la activación de la etapa. Hay de dos tipos:

1. *Acción asociada no condicionada*: implica la activación del elemento vinculado a la acción cuando se activa la etapa a la que está asociada.

2. *Acción asociada condicionada*: implica la activación del elemento vinculado a la acción cuando se activa la etapa a la que está asociada y, además, se cumple una condición adicional. Si no se cumple la acción adicional, aunque la etapa esté activa, no se activará el elemento en el interior de la acción.

1. Representación

Se representan con rectángulos agrupados horizontalmente en el lateral de la etapa unidos a ella por una línea horizontal entre la etapa y el primer rectángulo.

En la acción asociada condicionada, se añade la representación de la condición con un trazo vertical unido la condición (función lógica). También puede encontrarse representada con un trazo vertical y otro cruzado horizontal.

Un caso particular de acción asociada es la activación directa de otra etapa. Puede ser el inicio de una subrutina, u otra etapa o de otro GRAFCET.

2. Identificación

Pueden identificarse con la etiqueta del elemento tecnológico que se activa o con el nombre de la propia variable del programa. Por ejemplo, si implica la activación del solenoide de la primera electroválvula del primer cilindro neumático, se identificará como *Y1*.

3. Variables binarias

Las acciones también son variables binarias. Si la acción está activa, su valor será 1 y, si no lo está, será 0. Lo que la acción ejecute puede o no ser una activación binaria. Es decir, si la acción es la activación de *Y1*, la acción es binaria, pues *Y1*, o está activo, o no lo está. Sin embargo, la acción también puede ser el funcionamiento de un temporizador, conteo de un contador, escritura de un dato en memoria, etc.

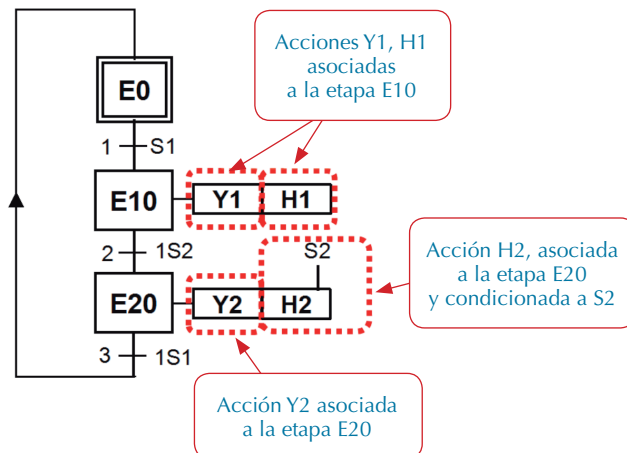


Figura 7.5
Acciones y acciones asociadas asociadas.

D) Estructuras lógicas y saltos

Son los posibles caminos que pueden producirse desde unas etapas hasta otras. Hay distintos tipos:

1. *Divergencia OR*: se trata de una bifurcación en la que el foco o la actividad del proceso (etapas activas) discurrirán por un ramal u otro de los disponibles en función de la transición que sea verdadera en primer lugar.
2. *Convergencia OR*: es una agrupación de caminos del GRAFCET, de modo que el foco del proceso llegará unas veces por un camino y otras por otro (según haya discurrido el automatismo) y seguirá por el ramal tras la agrupación de este.

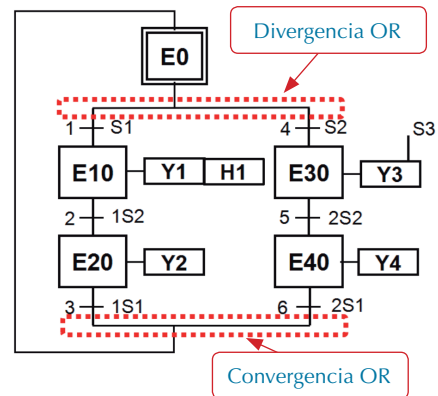


Figura 7.6
Convergencia y divergencia OR.

Un caso particular de divergencia y convergencia OR con solo dos caminos es la salida hacia y llegada a otras etapas anteriores o posteriores:

- a) *Salida y llegada a etapas anteriores*: salto o lazo ascendente. Se trata de que el foco asciende de nuevo a etapas previas si se cumple una transición determinada. Esto es útil cuando, en función de la condición que define la transición, el proceso requiere repetir un grupo de acciones.
- b) *Salida y llegada a etapas posteriores*: salto o lazo descendente. Se trata de que el foco desciende a etapas posteriores, saltándose un grupo de ellas, si se cumple una transición determinada. Esto es útil cuando, en función de la condición que define la transición, el proceso requiere omitir un grupo de acciones.

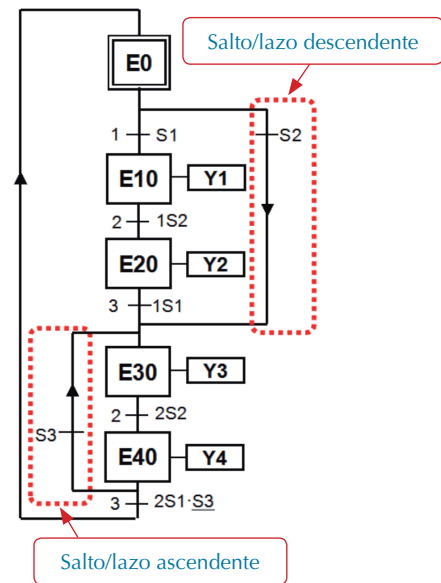


Figura 7.7
Saltos ascendente y descendente.

3. *Divergencia AND*: se trata de una bifurcación en la que el foco del proceso o etapas activas se duplica forzosamente y discurre, por tanto, por dos o más ramales. Para ello, habrá una única condición de transición previa a la divergencia, que, al cumplirse, activará todas las etapas por debajo de ella.
4. *Convergencia AND*: se trata de una agrupación de caminos que exige que las etapas previas a ella estén todas activas para que, cuando se cumpla una condición de transición por debajo de la convergencia, se active la siguiente etapa.

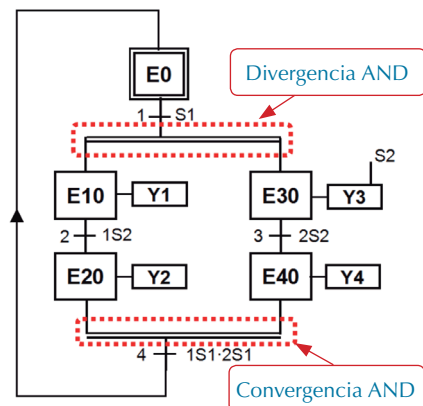


Figura 7.8
Convergencia y divergencia AND.

4. Flechas de direccionamiento

Se trata de puntas de flecha que sirven para indicar el sentido de avance del proceso o GRAFCET entre etapas.

Si no acaban de entenderse o visualizarse estos conceptos iniciales, sin duda, más adelante, se conseguirá con el desarrollo completo elemento a elemento de esta introducción.

RECUERDA

- ✓ La variable binaria negada suele representarse con una línea horizontal encima de ellas (suprarrayado). Por conveniencia tipográfica, se presentarán en el texto con subrayado sencillo.

7.1.5. Valores de las variables en GRAFCET

Los componentes del GRAFCET son etapas, condiciones de transición, salidas, etc. Pero ¿qué valores pueden tomar? No van a repasarse o explicarse lógica booleana ni variables binarias de nuevo, pero, en este capítulo, sí van a emplearse estos conceptos. Todos estos elementos son variables que tomarán valores de 0 (inactivo) o 1 (activo), por tanto, son variables lógicas binarias. Además, pueden representarse como negadas, teniendo entonces el valor opuesto al que posee la variable sin negar. Si una variable se representa negada en una condición (función lógica asociada a la transición) del GRAFCET y está inactiva (por ejemplo, un final de carrera), el valor de la variable es 0, pero su negada (lo que está representado) representada en el GRAFCET, tiene su valor contrario, que es 1. Es álgebra de Boole.

También se verá algo más adelante que, en el GRAFCET, puede haber otros elementos con otra información no binaria, como valores de tiempo de un temporizador o de conteo de un contador.

Adicionalmente, para las ecuaciones de transición y divergencias y convergencias, que se explican en los siguientes apartados, es importante recordar la siguiente regla del álgebra de Boole:

1. La negada de un producto es la suma de las negadas o suma de negadas equivale a la negada de su producto: $\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$.
2. La negada de una suma es el producto de las negadas o producto de negadas equivale a la negada de su suma: $\overline{A + B} = \overline{A} \cdot \overline{B}$.

7.1.6. Tipos o niveles de GRAFCET

A lo largo del diseño de un automatismo secuencial y según la especificidad de la información de la que se disponga, este puede representarse con distintos tipos de GRAFCET (figura 7.9). Dichos niveles son:

1. *GRAFCET funcional o de nivel 1*. En una etapa preliminar o en un estado donde no se conocen aún los detalles de cómo va a ejecutarse el automatismo, pero sí las acciones. El GRAFCET realiza una descripción funcional y coloquial del automatismo que permite comprender rápidamente su función, pero sin detalles que indiquen cómo se realiza.

No contiene referencia a los elementos o tecnología empleada, sino simplemente una descripción de lo que sucede. Por ejemplo, se indica que la pieza es sujeta en una etapa y que, en la siguiente, es liberada, pero no cómo se consigue (si es con un actuador neumático, hidráulico, eléctrico, etc.).

2. *GRAFCET tecnológico o de nivel 2*. En un estado más avanzado o de mayor concreción, este GRAFCET introduce datos adicionales de los elementos tecnológicos del automatismo que se emplean, describiendo las tecnologías utilizadas para cada función y citando los nombres de las variables empleadas en la programación, aunque aún sin detalles que permitan implementarlo. Por ejemplo, se señala que un cilindro sale (la pieza es sujeta por el cilindro) indicando la activación de Y1, que es una variable que hace referencia al solenoide de un cilindro neumático, en una etapa y que, en la siguiente, se retrae (igualmente con acción asociada de Y2).
3. *GRAFCET operativo o de nivel 3*. Hay una descripción operativa, con una definición concreta de los elementos empleados hasta el detalle que permitiría implementar la programación de la secuencia. Por ejemplo, con información de las direcciones empleadas por el PLC o automatismo. Si el gráfico se define como SFC-lenguaje de programación, estará siempre en el nivel operativo.

La información de cada nivel de GRAFCET completa al anterior y es posible encontrar combinada la información de los tres niveles en uno solo.

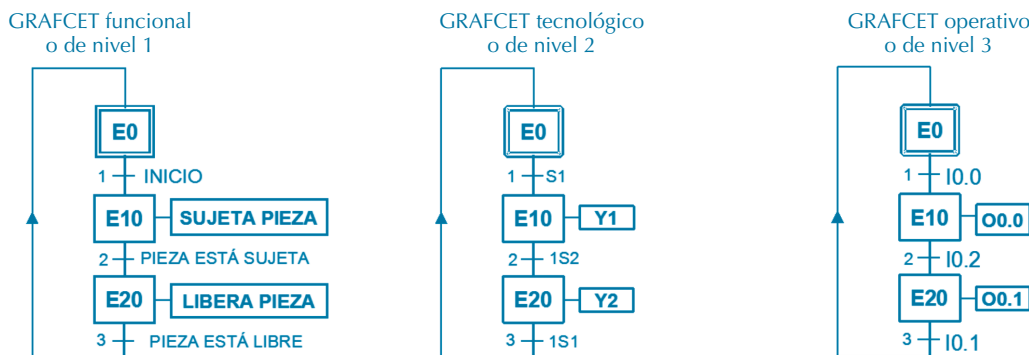


Figura 7.9
Tipos o niveles de GRAFCET.

FUNDAMENTAL

El ejercicio de la representación gráfica del automatismo mediante un GRAFCET correctamente elaborado, estableciendo etapas y sus acciones y, entre ellas, las condiciones de transición para la secuencia, es un ejercicio que permite resolver prácticamente el automatismo:

1. Determina las etapas.
2. Determina las acciones sobre preactuadores en cada etapa y, por tanto, preactuadores necesarios.
3. Determina condiciones de transición que, normalmente, serán elementos de mando o sensores requeridos por el automatismo.

7.1.7. Reglas de evolución del GRAFCET

Existen cinco reglas que definen la evolución de los sistemas secuenciales diseñados con esta herramienta y, por tanto, de la evolución del propio GRAFCET:

1. En la conexión del automatismo, las etapas iniciales se activan de forma incondicional y el resto están inactivas.
2. Una etapa puede activarse si su transición precedente es válida, es decir, tiene que haber una transición precedente con resultado verdadero de su función lógica o receptividad (salvo para etapas iniciales o fuente).
3. El franqueamiento de una transición implica la activación de las etapas posteriores y la desactivación de las antecedentes (salvo para transiciones fuente o sumidero y etapas sumidero).
4. Las transiciones conectadas en paralelo franqueables se franquean de forma simultánea si se cumplen las condiciones para ello.
5. Si, durante su funcionamiento, una misma etapa es de forma simultánea activada y desactivada, deberá mantenerse activa.

Estas dos últimas reglas no van a ayudar especialmente en la confección del GRAFCET, pero una norma derivada de la segunda que ayuda a no cometer errores es que nunca puede haber dos etapas o transiciones consecutivas, siempre debe haber una alternancia entre ambas.

7.1.8. Tablas de variables y evolución del GRAFCET

Ya va perfilándose la idea de lo que es el GRAFCET, pero su evolución se verá más claramente con un ejemplo muy sencillo. Se trata de una secuencia de salida y entrada de un cilindro neumático comandado por una válvula biestable, que se activa con un pulsador.

A) Tablas de variables o símbolos

Para la evolución, van a analizarse en cada momento los valores de todas las variables. Para ello, se distingue entre las siguientes categorías de variables en el GRAFCET:

1. *Variables de entrada*: sensores y pulsadores.
2. *Variables internas*: etapas, contactos asociados a temporizadores, contadores, marcas, etc.
3. *Variables de salida*: preactuadores, solenoides de relés, contactores y válvulas, pilotos, señales a variadores u otros controladores.
4. *Otras variables*: valores de temporizadores, valores de conteo, valores analógicos y valores de cálculo del proceso, entre otros.

En este caso, las variables serán:

- *V. de entrada*: pulsador S1 y finales de carrera 1S1 y 1S2. La posición del cilindro se verifica con estos finales de carrera (cilindro retraído y extendido respectivamente).

- *V. internas:* en este caso, se define un bit de condiciones iniciales CI, como un bit resultado de una función lógica que englobe todo aquello que deba cumplirse para salir de la etapa inicial y comenzar la secuencia. En este caso, simplemente, $CI = 1S1$. Además, se definen marcas correspondientes a las etapas del ciclo: E0, E10 y E20.
- *V. de salida:* señales a solenoides Y1, Y2 de la válvula biestable que gobierna el movimiento del cilindro. Señal a un piloto de señalización H1.

Como puede observarse, la tabla de variables tiene relación con lo estudiado para entradas y salidas del PLC y es la primera mirada que se realiza a la programación, pues dichas variables formarán parte del programa.

B) Evolución del GRAFCET

El funcionamiento por etapas del GRAFCET o automatismo se desarrolla como sigue:

1. *Encendido del automatismo:* se activa la etapa inicial ($E0 = 1$) y queda pendiente de que la función lógica de la transición hacia la siguiente etapa ($S1 \cdot CI$) sea verdadera (valga 1). El cilindro está inicialmente retraído, por lo que $1S1 = CI = 1$.
2. *Pulsado de S1:* al pulsar S1, se dan las condiciones para que el GRAFCET evolucione de E0 a E10. Tras pulsar S1, se liberará el pulsador.
3. *Activación de E10:* se activan las acciones asociadas Y1 y H1. La activación de Y1 producirá el inicio del movimiento del cilindro. El inicio del movimiento hará que 1S1 deje de estar activo y, al final de este, se activará 1S2.
4. *Activación de 1S2:* al finalizar el movimiento de salida del cilindro, tras desactivarse 1S1, se activa 1S2, por lo que la condición de transición es cierta para la evolución de E10 a E20.
5. *Activación de E20:* la activación de esta etapa conlleva la activación de su acción asociada Y2. Este solenoide es responsable del movimiento de la electroválvula en retracción, por lo que lo siguiente será el inicio del retorno del cilindro y dejará de estar activo 1S2.
6. *Activación de 1S1, evolución de E20 a E0 y fin del ciclo:* la activación del final de carrera correspondiente a la posición inicial del cilindro (retraído) hace que la condición de transición para la evolución de E20 a E0 sea cierta, llevando a la activación de E0 y desactivación de E20 (recuerda que la activación de cada etapa implica siempre la desactivación de la precedente). Esta situación será la inicial y se habrá completado el ciclo del GRAFCET.

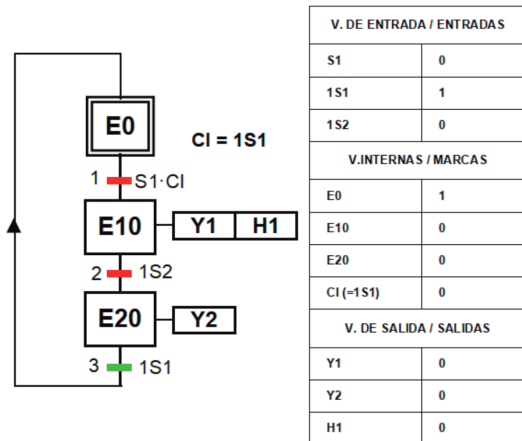


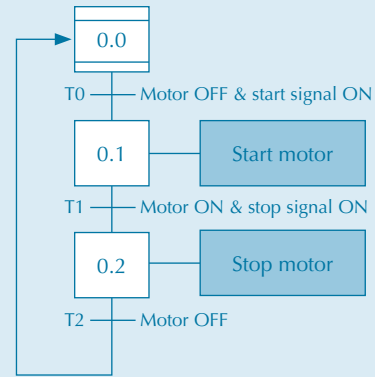
Figura 7.10
GRAFCET y estado inicial de las variables.

Para las variables de entrada, salida o etapas, se emplean las palabras *activación*, *verdadera* y *valor 1*. Son todas equivalentes e implican que la variable binaria toma el valor de 1. Términos como *desactivación*, *falsa* o *valor 0* implican el valor nulo de la variable binaria.

Actividades propuestas



- 7.2.** Identifica en el GRAFCET de la derecha todos los elementos e indica de qué nivel tecnológico se trata.
- 7.3.** Suponiendo un GRAFCET con 7 etapas, dos cilindros neumáticos con válvulas monoestables, un contactor y dos relés. Hay un sensor de velocidad de régimen alcanzada por el motor, finales de carrera de los cilindros (sensores reed) y un pulsador de puesta en marcha. Identifica variables de entrada, salida e internas del automatismo.



Actividad resuelta 7.1



Un automatismo de accionamiento neumático se pone en marcha con un pulsador S1 y realiza la secuencia (cilindros 1 y 2): 2 sale, 1 sale, 1 vuelve, 2 vuelve.

- a) Dibuja el GRAFCET.
- b) Haz una propuesta para la tabla de variables de entradas, salidas y marcas internas.
- c) Justo tras volver 1, indica cómo está evolucionando el GRAFCET y las variables en la tabla.

V. DE ENTRADA / ENTRADAS	
S1	0
1S1	1
1S2	0
2S1	0
2S2	1
V. INTERNAS / MARCAS	
E0	0
E10	0
E20	0
E30	0
E40	1
CI (=1S1)	0
V. DE SALIDA / SALIDAS	
Y1	0
Y2	0
Y3	1
Y4	1

Justo al recoger el cilindro 1, habrá activado 1S1, permitiendo la transición hacia E40, activándola junto con Y4 y desactivándose E30 y por tanto también Y2. En este instante estará recogido el cilindro 1 (1S1 activo) y extendido (comenzará su retracción) el cilindro 2



En el anexo web 7.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás la representación gráfica de la evolución del GRAFCET para cada una de las etapas mencionadas en este apartado.

7.1.9. Etapas del método para llegar a la programación desde el GRAFCET

1. Generar el GRAFCET a partir de la formulación del problema de automatización SECUENCIAL que sea necesario resolver. En esta etapa, es fundamental identificar las entradas, las salidas y las etapas. Todos estos elementos son variables binarias y debe asignárseles una denominación compatible con las denominaciones posibles en el software de programación.
2. A partir del GRAFCET completo, se generan las ecuaciones en álgebra de Boole que son fieles al comportamiento de este. Se trata de las ecuaciones de transición (o de etapas) y de las salidas.
3. A partir de las ecuaciones, se genera el diagrama de contactos como se hacía con una función lógica en el estudio del álgebra de Boole. El funcionamiento del diagrama de contactos es el mismo que un diagrama de automatización eléctrico, aunque su disposición es horizontal y los símbolos son distintos (símbolos que ya se estudiaron en el capítulo 3).
4. El diagrama de contactos se escribe en el software de programación de PLC. En esta etapa, será necesario asignar direcciones compatibles con el PLC a las variables de las entradas, etapas, salidas y otras marcas internas que se requieran para la programación.

Tras estas fases, solo quedará transferir el programa al PLC y simular y probar su funcionamiento en el automatismo.

RECUERDA

- ✓ Las ecuaciones de las etapas se denominan *ecuaciones de transición*, mientras que las ecuaciones de las salidas se conocen como *ecuaciones de salida*.

7.2. Comportamiento, diagrama de contactos y ecuaciones de cada elemento del GRAFCET

Como ya se ha visto, en el GRAFCET, existe una serie de elementos y estructuras lógicas que lo componen y se han explicado brevemente, pero, en los apartados siguientes, se desarrolla dicha explicación con la siguiente organización:

1. Se describe el trocito de GRAFCET-SFC que corresponde al problema que ha de automatizarse.
2. Se explican cuáles son sus ecuaciones en álgebra de Boole.
3. Se indica cómo las ecuaciones en álgebra de Boole se transforman directamente a un diagrama de contactos.

7.2.1. Etapas

Se han estudiado, principalmente, dos tipos de etapas diferentes, por una parte, la etapa inicial, la cual se activa o se considera activa al encender el automatismo, y, por otra parte, las etapas del proceso (numeradas o no de forma correlativa), es decir, los diferentes pasos en los que se divide la secuencia de operaciones.

A) Construcción de las ecuaciones de transición (etapas)

Las ecuaciones de las etapas se denominan *ecuaciones de transición* y se construyen para que se cumpla la regla fundamental de funcionamiento del GRAFCET:

Una etapa está activa si:

1. Está también activa la etapa anterior y se cumple la condición de transición
2. Ya está activa, pero la posterior no (cuando se activa una etapa posterior, se desactiva la previa).

La actividad del automatismo en cada momento (automatismo secuencial) está representada por cada una de las etapas del GRAFCET-SFC, que van sucediéndose unas detrás de otras. Puede reformularse como ecuación diciendo que:

Una etapa está activa (vale 1) cuando:

1. Estando activa la etapa anterior (la anterior etapa vale 1)
... y (producto and)...
2. Se satisface la condición de transición previa (su función lógica vale 1)
... o (suma or)...
3. Permanece activa cuando ya estaba activa
... y (producto and)...
4. La siguiente aún no está activa (no se ha pasado a la siguiente etapa negada).

Expresándolo como una ecuación, quedaría:

$$\text{Etapa} = \text{Etapa Anterior (1)} \cdot \text{Condición Transición Anterior (2)} + \text{Etapa (3)} \cdot \text{Etapa Post (4)}$$

Y el diagrama de contactos:

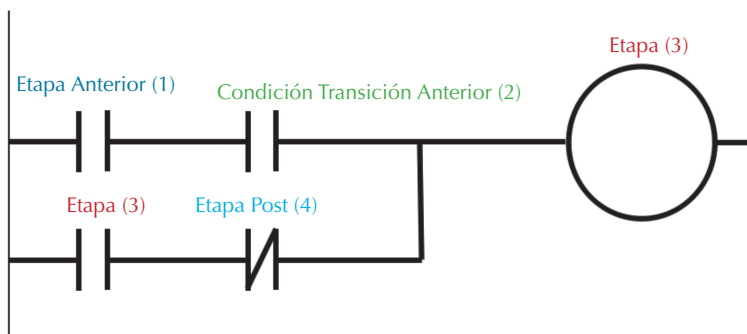


Figura 7.11
Diagrama de contactos
de la ecuación
de transición.

Se expone la función de cada sumando:

1. Etapa Anterior (1) · Condición Transición Anterior (2):
 - Activación de la etapa.
2. Etapa (3) · Etapa Post (4):
 - Realimentación (enclavamiento) de la etapa. Al activarse con el sumando anterior y no estar activa la etapa siguiente, este sumando tiene valor 1 (etapa ON · etapa posterior (OFF) negada = 1 · 1).
 - Fin del enclavamiento: cuando se activa la etapa siguiente, la etapa posterior (ON) negada vale 0 y se rompe el enclavamiento.

La etapa inicial es algo particular, pues se activa E0 automáticamente con el encendido del PLC. Para representar este encendido, se introduce un bit, el bit de START o inicio, que se sabe que es 1 solo (una sola vez durante un ciclo de *scan*) al encender la máquina. En la siguiente expresión, X indica la condición de transición (su función lógica).

$$E0 = \text{START} + E_{\text{última}} \cdot X_{\text{última}} + E0 \cdot \underline{E10}$$

También es posible activar la etapa inicial simplemente cuando el resto están apagadas (hecho que se cumple nada más encender la máquina también). En la siguiente expresión, el término $\underline{E10} \cdot \underline{E20} \cdot \dots \cdot \underline{E_{\text{última}}}$ será 1 a la activación del automatismo (producto de ceros negados) ejerciendo de bit de START.

$$E0 = \underline{E10} \cdot \underline{E20} \cdot \dots \cdot \underline{E_{\text{última}}} + E_{\text{última}} \cdot X_{\text{última}} + E0 \cdot \underline{E10}$$

A partir de E0 (o la etapa inicial con la numeración que tenga), es una opción numerar las etapas de 10 en 10 para facilitar, a lo largo de la confección del GRAFCET-SFC, la introducción de etapas intermedias de corrección o modificación del automatismo.

Estas ecuaciones suelen etiquetarse como *de prioridad a la marcha* (cumpliendo reglas formuladas de evolución del GRAFCET), pues, aunque una etapa no pueda quedar realimentada cuando la etapa posterior está activa (paro, contacto NC vale 0), mientras la etapa previa y la transición valgan 1, la etapa estará activa (EtapaAnterior · CondiciónTransiciónAnterior = 1 · 1 = 1).



Actividad resuelta 7.2

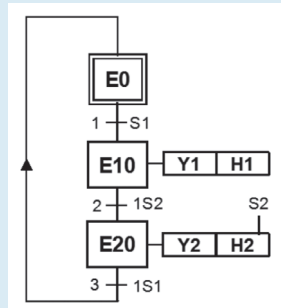
Para el ejemplo GRAFCET de la derecha, escribe las ecuaciones de las tres etapas:

Ecuaciones de transición (etapas):

$$E0 = \text{START} + E20 \cdot 1S1 + E0 \cdot \underline{E10}$$

$$E10 = E0 \cdot S1 + E10 \cdot \underline{E20}$$

$$E20 = E10 \cdot 1S2 + E20 \cdot \underline{E0}$$



B) Diagrama de contactos de las ecuaciones de transición

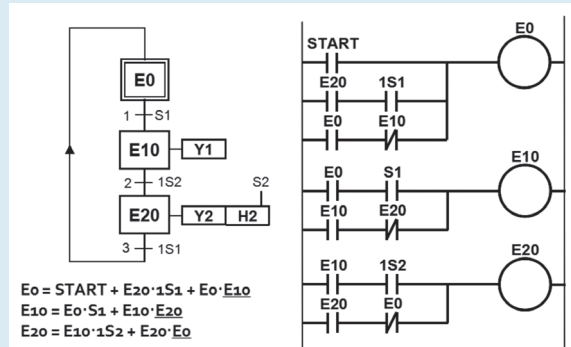
Es un diagrama de contactos eléctricos, pero en disposición horizontal. El nivel alto de tensión se representa por una línea vertical a la izquierda y el nivel bajo de tensión, por otra línea vertical a la derecha. Entre ellas, se disponen líneas de programa que son circuitos eléctricos.

Actividad resuelta 7.3



Representa el diagrama de contactos de las tres ecuaciones de transición de la actividad resuelta 7.2.

Por ejemplo, E10 es una bobina que se activará cuando alguno de los dos ramales en paralelo (es una suma OR o conduce uno u otro) conduzca. La multiplicación equivale a dos contactos en serie (por ejemplo, para E10 también, E0 y S1 o E10 y E20 negado) en serie.



En estos circuitos, las bobinas (de relés o válvulas o contactores) son círculos y se sitúan a la derecha, mientras que los contactos normalmente abiertos y contactos normalmente cerrados se representan como ya se ha visto y se sitúan a la izquierda. No hay que olvidar algunas ideas importantes:

- Un contacto NA dejará pasar la corriente cuando tenga valor 1 (contacto que, al activarse, se cierra). Los contactos NA son variables sin negar.
- Un contacto NC dejará pasar la corriente cuando tenga valor 0 (contacto que no está activo y, al ser NC, está cerrado). Los contactos NC son variables negadas. Sin activarse, tienen valor 1 y, cuando están activos, valen 0.
- Un producto en álgebra de Boole de dos variables equivale a sus dos contactos en serie.
- Una suma en álgebra de Boole de dos variables equivale a sus dos contactos en paralelo.
- La propiedad conmutativa se cumple en suma y producto (el orden de los contactos en serie o en paralelo no afecta al resultado) y la asociativa con suma y producto también.

7.2.2. Acciones asociadas

Las acciones son las salidas del dispositivo de control que, con la configuración adecuada, consiguen la activación de las diferentes válvulas y los distintos relés o contactores para, a su vez, activar motores u otros actuadores.

Se ha visto que las acciones pueden ser simples o condicionadas, es decir, la acción se realizará siempre o solo si se cumple, además, la condición adicional.

• Ecuaciones

Son las señales de salida a los preactuadores, por lo que sus ecuaciones son las *ecuaciones de salida*. Al estar asociadas a las etapas, sus ecuaciones no pueden ser más sencillas: simplemente, se igualan a la variable de la etapa a la que están asociadas.

FUNDAMENTAL

El hecho de que las acciones estén asociadas a una etapa hace que, cuando se activa la etapa y pasa a valer 1, la ejecución de dichas acciones asociadas también pase a valer 1.

Aparte de las ecuaciones de transición donde los contactos activaban las etapas, también deben escribirse las ecuaciones de salida donde las etapas activan a las salidas.



Actividad resuelta 7.4

Retomando el ejemplo de las actividades resueltas 7.2 y 7.3, escribe las ecuaciones de las salidas.

Ecuaciones de salida:

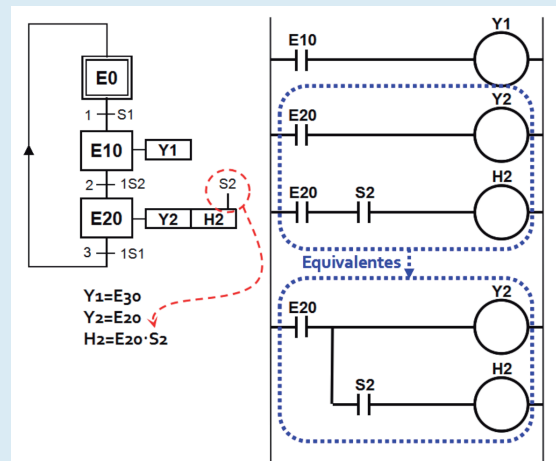
$$Y1 = E10$$

$$Y2 = E20$$

$$H2 = E20 \cdot S2$$

Es interesante incidir en cómo es la ecuación de la acción condicionada. Se activará si se activa la etapa correspondiente y, además, se cumple la condición que la determina: solo valdrá 1 cuando lo valga su etapa y, además, la condición sea también 1.

Cuando la acción está asociada a más de una etapa a lo largo del GRAFCET-SFC, hay que indicar que se activará cada vez que aquellas se activen. Para ello, se iguala la salida a la suma de las etapas a la que la acción está asociada (por ejemplo, puede activarse en la etapa E30 o (suma) en la etapa E50 o (suma) en la etapa..., y así sucesivamente).



7.2.3. Transición y condición de transición (función lógica)

Es la puerta que debe estar abierta para el paso de una etapa a la siguiente. Para que se produzca el cambio de una etapa a la siguiente, debe cumplirse la condición de transición y, por tanto, la receptividad debe ser verdadera (con la etapa anterior activa).

A) Ecuaciones

En las ecuaciones, las transiciones aparecen con su función lógica en la ecuación de transición de la etapa multiplicando a la etapa precedente. En el ejemplo visto hasta ahora:

$$E0 = \text{START} + E20 \cdot \text{1S1} + E0 \cdot \text{E10}$$

$$E10 = E0 \cdot \text{S1} + E10 \cdot \text{E20}$$

$$E20 = E10 \cdot \text{1S2} + E20 \cdot \text{E0}$$

B) Diagrama de contactos

Igualmente, en el diagrama de contactos, se incorporan las transiciones como contactos en las líneas (de diagrama de contactos) correspondientes a las ecuaciones de transición.

Actividad propuesta 7.4



Para la siguiente secuencia: cilindro 1 fuera (+), cilindro 3 dentro (-) y cilindro 2 fuera (+) al mismo tiempo, cilindro 2 dentro (-) y cilindro 3 fuera (+) al mismo tiempo y, finalmente, cilindro 1 dentro, escribe el GRAFCET, las ecuaciones y el diagrama de contactos de las etapas recalcando cuáles son las condiciones de transición en cada uno de ellos.

7.2.4. Divergencia y convergencia OR

A) Divergencia OR

En este caso, se tiene una etapa y varias posteriores posibles con transiciones para cada una. La primera de las que se cumpla marca el camino que seguirá el automatismo. Se utiliza para tomar secuencias alternativas dependiendo de una condición determinada, pero solo activando una de ellas.



PARA SABER MÁS

En una divergencia OR, para eliminar la incertidumbre del camino tomado si todas las condiciones de transición se dieran a la vez, se multiplica cada una de ellas por las negadas del resto. De este modo, se consigue exclusividad (no puede transcurrir por un camino mientras también sea posible hacerlo por otro). Si alguna de las transiciones no está multiplicada por las negadas del resto, en caso de darse simultáneamente, esta tendrá prioridad y el GRAFCET discurrirá por ella.

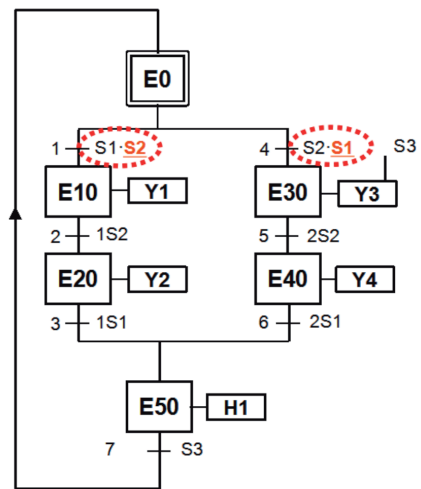
1. Ecuaciones

En las ecuaciones, se manifiesta al escribir las ecuaciones de las etapas anteriores a la divergencia, pues, posteriormente, pues ahora, tras la misma, puede haber varias etapas posibles (unas U otras, OR, suma). Al escribir la ecuación, se decía "... más ella misma por la siguiente negada". En este caso, "la siguiente" ahora es una suma de las posibles en la divergencia, dado que hay varias opciones. Habrá que negar la suma completa y, dado que negada de suma es producto de negadas, finalmente, quedará la propia etapa por las posteriores negadas.

Las etapas posteriores generan también las ecuaciones correspondientes.

Ejemplo

Se observa un GRAFCET con divergencia y convergencia OR y exclusividad aplicada en la divergencia. Se obtendrán las ecuaciones, pero, adicionalmente, se plantea la siguiente pregunta: ¿qué hará el GRAFCET si S1 y S2 se activan de forma simultánea? No se sabe si discurrirá por un ramal o por otro, hay una indeterminación. Por ello, cuando esto es posible, conviene generar las condiciones de transición posteriores a la divergencia de forma exclusiva, como se muestra. Tras aplicar la exclusividad, con una divergencia OR, la etapa anterior a la divergencia OR será E0 y las etapas posteriores, E10 o E30. Las ecuaciones se muestran a continuación:



Etapas anteriores:

$$E0 = E50 \cdot S3 + E0 \cdot (E10 + E30)$$

$$E0 = E50 \cdot S3 + E0 \cdot \underline{E10} \cdot \underline{E30}$$

Etapas posteriores:

$$E10 = E0 \cdot S1 \cdot S2 + E10 \cdot \underline{E20}$$

$$E30 = E0 \cdot S2 \cdot S1 + E30 \cdot \underline{E40}$$

2. Diagrama de contactos

Se traslada directamente la expresión de las ecuaciones al diagrama de contactos.

B) Convergencia OR

En la convergencia, se tiene una única etapa posterior y varias anteriores posibles con transiciones para cada una.

1. Ecuaciones

El foco del GRAFCET vendrá por uno de los ramales, pero puede ser cualquiera. Por ello, se define la parte de la ecuación "etapa anterior por la condición de transición" con tantos tér-

menos sumandos “etapa previa por condición de transición” de este tipo como ramales tenga la convergencia. La etapa siguiente se activará en el momento en el que se encuentre activa alguna o cualquiera de las etapas anteriores y las correspondientes transiciones.

2. Diagrama de contactos:

Se traslada directamente la expresión de las ecuaciones al diagrama de contactos.

3. Saltos o lazos ascendentes o descendentes

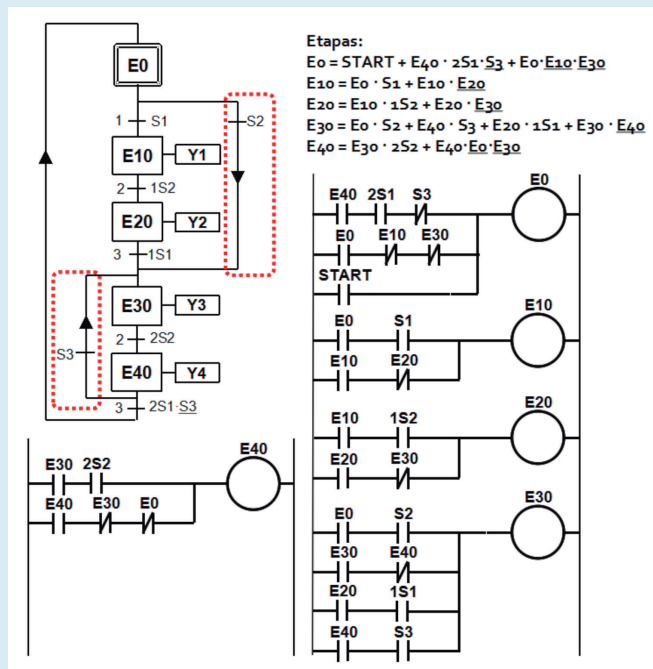
Son saltos de etapas, tanto ascendentes como descendentes en el GRAFCET-SFC. En realidad, se trata de un caso de divergencia OR a la salida del lazo y una convergencia OR al retorno, donde el automatismo sigue el camino seleccionado o posible en cada momento.

¿Cuál es ascendente y cuál descendente? En caso de no haber un cursor que indique el sentido, es fácil saber si es ascendente o descendente, pues no puede haber dos etapas ni dos condiciones de transición seguidas (por las reglas del GRAFCET). El lazo ascendente se emplea de forma recurrente con contadores para repetir una secuencia del GRAFCET, por lo que es importante entenderlo correctamente.

Actividad resuelta 7.5



En la figura siguiente, se muestra un GRAFCET con un lazo ascendente y otro descendente. Identifícalos y escribe todas las ecuaciones de transición, así como su diagrama de contactos. Explica cada ecuación con sus singularidades debidas a un lazo o salto.



Etapas:

$$E0 = \text{START} + E40 \cdot 2S1 \cdot \underline{S3} + \underline{E0} \cdot \underline{E10} \cdot \underline{E30}$$

En esta etapa inicial E0, tras ella, se obtiene una divergencia OR. En la ecuación, el término del bit de START, etapa anterior por condición de transición ($E40 \cdot 2S1 \cdot \underline{S3}$) y el término de “ella misma por la siguiente negada” es E0 multiplicada por la negada de ($E10 + E30$), puesto que la etapa siguiente puede ser E10 o E30 (suma). La negada de la suma es producto de negadas, por lo que queda, finalmente, $E0 \cdot \underline{E10} \cdot \underline{E30}$.

$$E10 = E0 \cdot S1 + E10 \cdot \underline{E20}$$

$$E20 = E10 \cdot 1S2 + E20 \cdot \underline{E30}$$

$$E30 = E0 \cdot S2 + E40 \cdot S3 + E20 \cdot 1S1 + E30 \cdot \underline{E40}$$

En este caso, antes de E30, está la convergencia OR, tanto del lazo descendente desde E0 como del ascendente desde E40. La particularidad es para el término “etapa anterior por condición de transición”, ya que puede llegarse a E30 desde $E20 \cdot 1S1$, desde $E40 \cdot S3$ y también desde $E0 \cdot S2$, por lo que se incluyen los tres términos.

$$E40 = E30 \cdot 2S2 + E40 \cdot \underline{E0} \cdot \underline{E30}$$

Para E40, la particularidad para el término “ella misma por la siguiente negada” es E40 multiplicada por la negada de ($E0 + E30$), puesto que la etapa siguiente puede ser E0 o E30 (suma). La negada de la suma es producto de negadas, por lo que queda finalmente $E40 \cdot \underline{E0} \cdot \underline{E30}$.



Actividades propuestas

- 7.5.** Corrige la actividad resuelta 7.5 aplicando exclusividad en los lazos en el GRAFCET.
- 7.6.** Un proceso de marcado por impacto exige el golpeo de una matriz en el lateral de las piezas. Para ello, se dispone de una secuencia en la que un cilindro 1 sale (+) para sujetar a la pieza y un cilindro 2 sale fuera (+) golpeando y, seguidamente, vuelve (-). El golpeo del cilindro solo se detendrá cuando la señal de un sistema de visión indique que el diseño es visible. Mientras no llegue esta señal, el cilindro 2 debe repetir el golpeo, saliendo y entrando para ello. Una vez recibida la señal, cesará la repetición y, finalmente, el cilindro 1 volverá liberando a la pieza. Diseña el GRAFCET con un lazo para que se cumplan las condiciones descritas. La secuencia se iniciará con un pulsador S1 y el sensor del sistema de visión será V1.

7.2.5. Divergencia y convergencia AND

A) Divergencia AND

En este caso, cuando la etapa anterior se encuentre activa y se cumpla la única transición previa a la divergencia, se activarán obligatoriamente las etapas posteriores a la divergencia AND.

1. Ecuaciones

El término “etapa por etapa posterior negada” en este caso podría decirse “etapa por producto de etapas posteriores negado”, puesto que se exige que todas las etapas posteriores se activen (operador Y/AND de todas ellas negado), sin olvidar que negada de producto es suma de negadas.

2. Diagrama de contactos

Como siempre, se traslada directamente la expresión de las ecuaciones al diagrama de contactos.

B) Convergencia AND

La etapa siguiente solo se activará si las dos etapas precedentes se encuentran activas y se cumple la transición posterior a la convergencia.

1. Ecuaciones

El término “etapa anterior por condición de transición” en este caso se podría decir “producto de etapas anteriores por condición de transición”, puesto que se exige que todas las etapas previas estén activas (operador Y/AND) y solo hay una condición de transición.

2. Diagrama de contactos

Como siempre, se traslada directamente la expresión de las ecuaciones al diagrama de contactos.

Ejemplo

Las ecuaciones de las etapas con la divergencia y convergencia AND mostradas y el diagrama de contactos son los siguientes:

$$E0 = E50 \cdot S3 + E0 \cdot (E10 \cdot E30) = E50 \cdot S3 + E0 \cdot (E10 + E30)$$

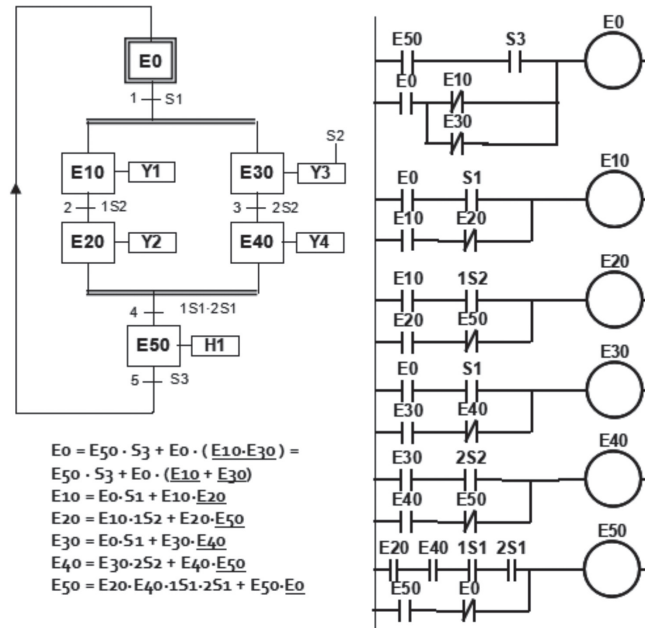
$$E10 = E0 \cdot S1 + E10 \cdot E20$$

$$E20 = E10 \cdot 1S2 + E20 \cdot E50$$

$$E30 = E0 \cdot S1 + E30 \cdot E40$$

$$E40 = E30 \cdot 2S2 + E40 \cdot E50$$

$$E50 = E20 \cdot E40 \cdot 1S1 \cdot 2S1 + E50 \cdot E0$$



7.3. Funciones o instrucciones de bloque

Hasta ahora, se ha estudiado el diagrama de contactos con bobinas, contactos NA y NC y asociaciones de estos elementos en serie y paralelo. Con estos componentes, pueden programarse secuencias muy básicas, pero, sin duda, se necesitan más herramientas para generar programas que dispongan de una mínima funcionalidad. Para avanzar en el estudio de la programación de un PLC, es preciso introducir el concepto de *función o instrucción de bloque*.

7.3.1. Definición de función o instrucción de bloque

En programación, en el diagrama de contactos, pueden insertarse funciones o instrucciones en forma de caja, con conectores de entrada y salida. Estas funciones ofrecen un comportamiento determinado sobre unas salidas cuando son alimentados por sus ramales o conectores del diagrama de contactos por parte de las señales conectadas. Las entradas y salidas pueden ser marcas binarias, variables numéricas o simplemente recibir o proporcionar tensión en el diagrama de contactos. El comportamiento puede ser sencillo o realizar operaciones complejas como movimiento de datos, comparaciones, operaciones matemáticas, etc.

Conforme vayan introduciéndose instrucciones, esta definición quedará mucho más clara, pero no debe confundirse con los bloques de función que se estudian más adelante.

Cuando esté diseñándose el automatismo, las funciones aparecerán vinculadas en el GRAFCET a las etapas y, en las ecuaciones, se indicará de forma literal esta asociación (no como ecuación). En ocasiones, en la programación, se emplearán funciones que no se muestran expresamente en el GRAFCET y habrá que indicarlo y mostrarlas si desea especificarse el programa completo.

7.3.2. Comportamiento eléctrico de las funciones o instrucciones de bloque

El comportamiento eléctrico de las funciones o instrucciones de bloque dentro del diagrama de contactos puede ser doble:

- Como una carga (igual que una bobina) en el diagrama de contactos, absorbiendo la tensión entre buses izquierdo (tensión alta, 24V en CC) y derecho (tensión baja, 0V en CC). A su derecha, no habrá ningún elemento.
- Como un interruptor (igual que un contacto) en el diagrama de contactos, sin absorber tensión y simplemente dejando pasar la alimentación. A su derecha, puede haber otros elementos como más contactos o cargas (bobinas u otras funciones).

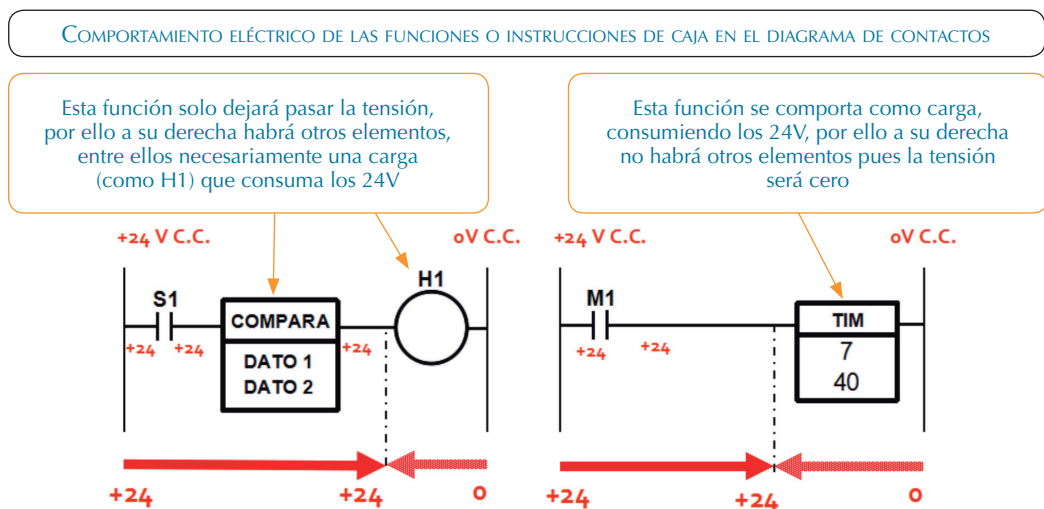


Figura 7.12

Comportamiento eléctrico de las funciones o instrucciones de bloque como *bypass* o como carga.

7.3.3. Variaciones en las funciones o instrucciones de bloque según el fabricante

Aunque la funcionalidad fundamental sea la misma, según el fabricante, difieren significativamente los siguientes aspectos:

- Funcionamiento.
- Aspecto.
- Cantidad y tipo de conectores (entradas, salidas y datos) para ofrecer tensión a la salida o proporcionar datos de la función.

En muchos manuales, se refieren a una función o instrucción de bloque simplemente como *instrucción*.

Estas diferencias deberán ser tenidas en cuenta para todas las funciones y fabricantes.



Se pierde a partir de este punto cierta *universalidad* del diagrama de contactos, pues las funciones o instrucciones de bloque son algo distintas para cada fabricante, aunque las fundamentales o básicas serán similares. El acogimiento a la norma IEC 1131-3 y posteriormente a la IEC 61131-3 ha disminuido esta diversidad, pues estas normas definen funciones o instrucciones de bloque

fundamentales (como, por ejemplo, los temporizadores TON con retardo a la conexión, TOF con retardo a la desconexión, TP de pulso y TONR con retardo a la conexión con memoria que se estudian más adelante). Sin embargo, el hecho de acogerse a esta norma también ha establecido cambios frente a versiones previas de software del mismo fabricante.

7.3.4. Enclavamientos en GRAFCET-SFC y diagrama de contactos: SET, RESET

A) Concepto de enclavamiento

Se entiende por *enclavamiento* a algún mecanismo o interruptor que, una vez pulsado o activado con una señal de pulso (que puede ser de duración muy corta), modifica su estado y permanece en la posición o valor cambiados hasta que vuelva a ser manipulado.

Por ejemplo, en la activación de una luz por un pulsador, no hay enclavamiento mecánico, mientras que la misma activación con un interruptor sí que dispone de enclavamiento mecánico.

El enclavamiento es un concepto importante en la automatización, especialmente de procesos secuenciales.

Por ejemplo, con las etapas para pasar de una etapa a otra en la secuencia, es necesario que esté activa la etapa previa y se cumpla la condición de transición durante un instante. Cuando se produzca el paso a la siguiente etapa, esta etapa recién activada debe permanecer activa, aunque cesen de estarlo la etapa previa y la condición de transición. Es decir, al activarse una etapa, debe desactivarse la previa, y esta ha de mantenerse activa y, por tanto, también sus acciones de proceso asociadas.

Igualmente, se verá más adelante que existen muchas situaciones donde el enclavamiento es algo fundamental.

Pues bien, en realidad, ya ha estado haciéndose enclavamiento en las ecuaciones y el diagrama de contactos de las etapas. El hecho es que, cuando una etapa está activa y se cumple la condición de transición que la sigue, para que se cumpla el funcionamiento del GRAFCET, es preciso que se active la etapa posterior y se desactive la anterior.

El diagrama de contactos (o también denominado *diagrama de relés*) funciona con la misma dinámica de un circuito de mando, gobernado por las leyes de la conducción de electricidad y composición de circuitos eléctricos para la transmisión mediante contactos de la tensión y la circulación de corriente a través de una carga (y su activación) con el cierre del circuito. Las bobinas son los solenoides de relés y los contactos son contactos asociados a ellos o contactos de mando o sensórica.

De hecho, las bobinas de las etapas son las que luego, a través de un contacto asociado, mandan a las de las salidas.

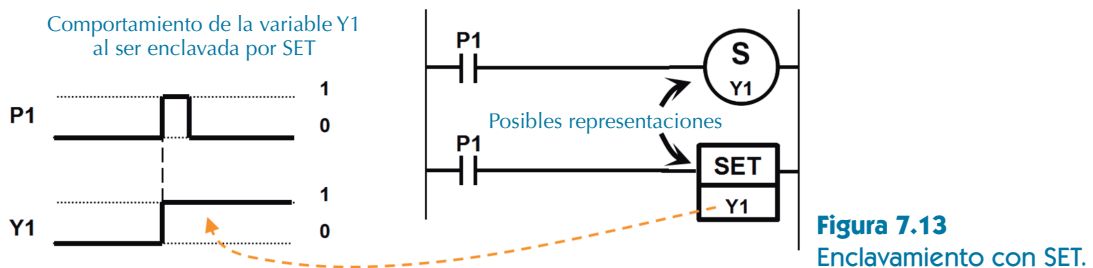


RECURSO ELECTRÓNICO 7.2

En el anexo web 7.2, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás un ejemplo de enclavamiento eléctrico en un circuito eléctrico de mando y otro de enclavamiento eléctrico en el diagrama de contactos.

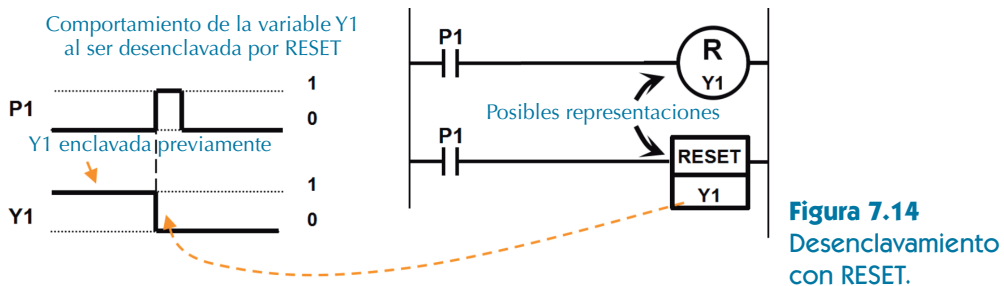
B) Función SET

Se trata de una función que, al recibir tensión por la izquierda, realiza el enclavamiento de la variable binaria con la que se configura, pasando esta variable a valer 1. Puede representarse con forma de círculo o de caja. La variable quedará enclavada hasta que una instrucción de desenclavamiento, o mediante otro método, haga que de nuevo vuelva a valer 0.



C) Función RESET

Se trata de una función que, al recibir tensión por la izquierda, realiza el desenclavamiento de la variable binaria con la que se configura, pasando esta variable a valer 0. Suele representarse igual que la función SET, pues son complementarias y normalmente, tras un *set*, existe un *reset*.



Se emplearán ambas más adelante SET y RESET para programar el enclavamiento de las etapas (programación en SET-RESET), pero, en este nivel básico, su uso más habitual es para mantener la señal en una salida a lo largo de múltiples etapas.

Por ejemplo, si una válvula es monoestable y debe mantenerse activo su solenoide durante varias etapas, puede optarse por:

1. Repetir la acción asociada del solenoide en todas las etapas en las que deba estar activo.
2. Enclavar con SET el solenoide en la primera etapa en la que deba estar activo y desenclavarlo tras la última con RESET.

Para indicar tanto SET como RESET, junto con las ecuaciones, basta con indicar qué marca o variable activa la función (conecta por la izquierda) y la marca o variable a la que enclava. Por ejemplo, “SET de KM1 en E110”.

A veces, es posible encontrar estas dos funciones SET y RESET unificadas en una, con una única caja o bloque en el que hay dos entradas por la izquierda, una realiza el enclavamiento y otra, el desenclavamiento, y, en su interior, se indica la marca enclavada o desenclavada. La ventaja es emplear una única línea de diagrama de contactos. Según el fabricante, esta función unificada se denominará KEEP, SR (de SET-RESET), etc.

7.3.5. Temporizador básico con retardo a la conexión

Es una función TIMER, o TIMER ON, capaz de contar tiempo a partir de un estímulo en la entrada. Con un comportamiento en función de un tiempo configurado, el temporizador dispone de un contacto asociado que cerrará para su uso a conveniencia en la programación.

El temporizador más habitual y básico es un temporizador con retardo a la conexión: cuando se activa la señal en su entrada, el temporizador comienza a contar el tiempo y, cuando pasa el tiempo con el que ha sido configurado, entonces cierra sus contactos.

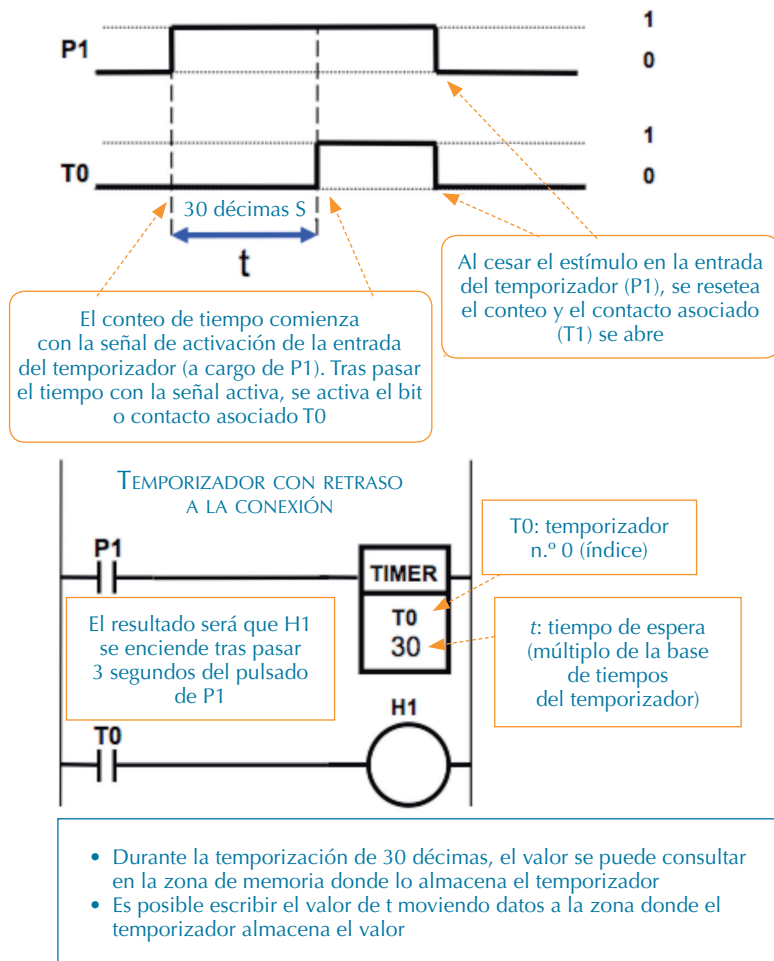


Figura 7.15
Temporizador con retardo a la conexión.

En caso de cesar la señal en la entrada, se desactiva el contacto. Si cesa la señal en la entrada antes de que se consuma el tiempo para la activación de su contacto asociado, el tiempo se re-setea (no se recuerda el tiempo en el que la señal ha permanecido activa).



RECURSO ELECTRÓNICO 7.3

En el anexo web 7.3, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, se ilustra que es fundamental conocer para su correcto uso los detalles que de una función igual o similar hace cada fabricante.

Un posible uso es para forzar una espera de tiempo en una etapa de la siguiente forma:

1. Se asocia el temporizador como una acción a la etapa en la que desea realizarse la espera.
2. La etapa, cuando se activa, estimula al temporizador, que cuenta, por tanto, a partir de que dicha etapa esté activa.
3. En la condición de transición hacia la siguiente etapa, se incluye el contacto asociado al temporizador. De este modo, el contacto asociado del temporizador estará incluido en la condición de transición hacia la siguiente etapa (multiplicando a los otros elementos de la función lógica). El resultado es que se detiene la secuencia en su etapa hasta que pasa el tiempo configurado en el temporizador (con retardo a la conexión).
4. Cuando se consume el tiempo del temporizador, su contacto se cierra y, entonces, la receptividad es verdadera y da paso a la siguiente etapa.

En el GRAFCET, al incluir el temporizador, debe indicarse su índice, pero también es conveniente indicar el tiempo para el que está configurado con el valor de tiempo o con el múltiplo de su base de tiempo. La base de tiempo, a menudo, depende del rango de número de temporizador escogido (por ejemplo, del 0 al 100, una base de tiempo y, del 101 al 150, otra, etc.) o directamente son funciones distintas para distintas bases.

Para programación más avanzada, el valor de tiempo configurado puede emplearse mientras transcurre accediendo a la zona de memoria donde el temporizador la almacena. También puede modificarse el tiempo del temporizador realizando una escritura en la zona de memoria en la que guarda este valor o estableciendo una variable numérica (no binaria) como valor de temporización y, posteriormente, modificando el valor de la variable.

Actividad propuesta 7.7



Dentro del funcionamiento de una máquina, la gestión de dos motores debe gestionarse por un PLC de la siguiente forma: tras iniciar la secuencia con un pulsador S1, se activa KM1 durante 7 s. Pasado este tiempo, se desactiva KM1 y se activa KM2 durante 5 s. En esta etapa, se producirá la espera de 5 s, pero KM2 se activará únicamente si un sensor de temperatura T1 no está activado. Tras esta segunda espera, comienza el ciclo de nuevo. Diseña el GRAFCET, las ecuaciones y el diagrama de contactos completo.

7.3.6. Contador básico

Es una función capaz de contar pulsos de un estímulo en la entrada. Con un comportamiento en función de una cantidad de pulsos, el contador dispone de un contacto asociado que se cerrará al cumplirse el conteo para su uso a conveniencia en la programación.

El contador más estándar, cuando recibe un pulso, incrementa o decreuenta su conteo desde un valor determinado. Al alcanzar o consumir el valor de conteo determinado, entonces, cierra su contacto. Dispondrá de una entrada para hacer *reset* del valor de conteo, abriendo (desactivando) su contacto asociado.

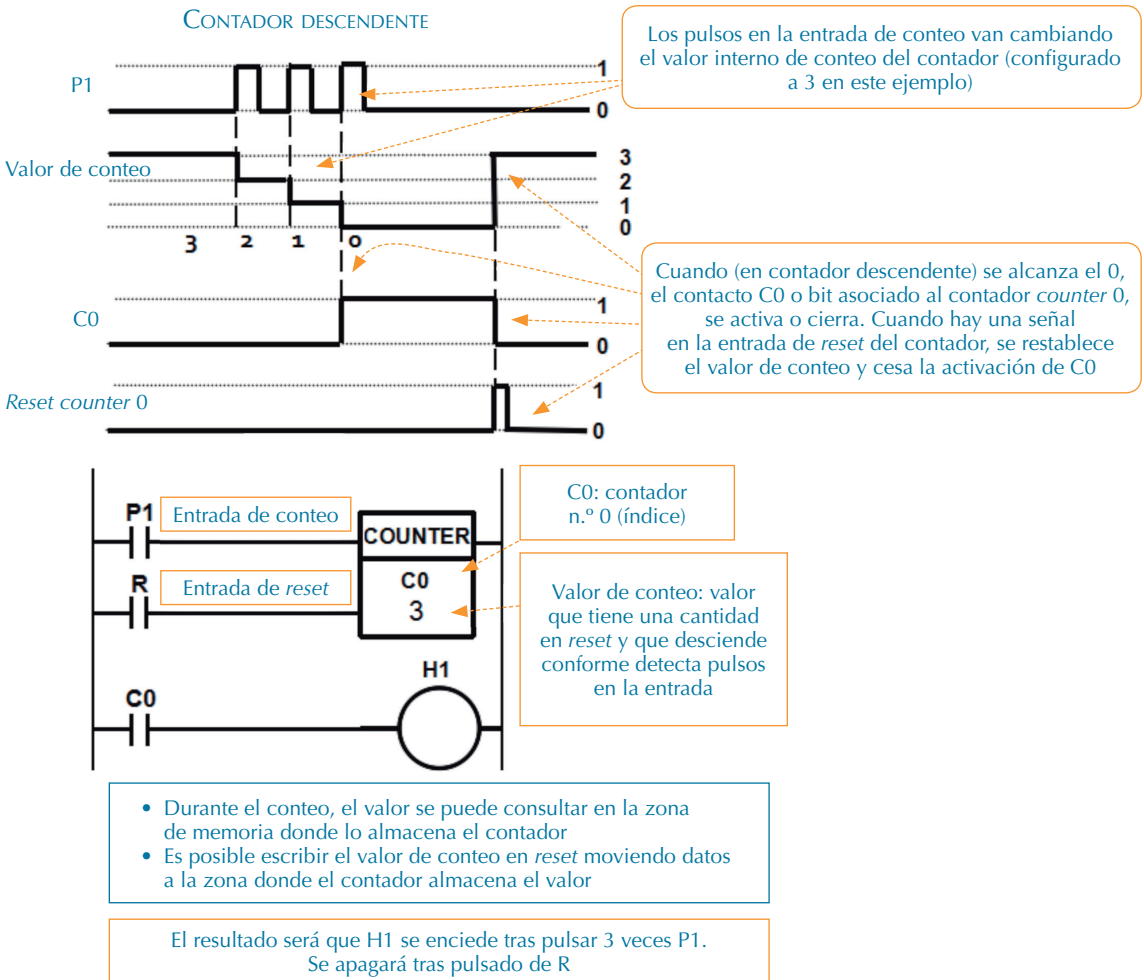


Figura 7.16
Contador descendente.

• Bucle de contador

Para explicar el uso del contador en el GRAFCET, es interesante estudiar el bucle de contador.

Es una estructura que puede resultar útil para repetir un trozo del GRAFCET, un grupo de etapas consecutivas (como un movimiento del cilindro), que se desea que se repitan un número determinado de veces. Se construye así:

1. En la etapa que garantice que se han realizado las acciones que deben repetirse, se vincula como una acción al contador. Esta etapa ejercerá la acción de conteo.
2. Se incluye una divergencia OR, tras esta etapa de conteo del contador, con dos caminos:
 - a) Un lazo ascendente hasta la entrada de la primera etapa del bloque que desea repetirse, donde existe una convergencia OR (aparte de la llegada del lazo, se encuentra la llegada desde las etapas superiores del GRAFCET).
Este lazo tiene como condición para el ascenso el contacto del contador negado o la correspondiente al proceso multiplicada por el contacto del contador negado. Así, si no se ha llegado al conteo establecido, el contacto será 0 y esta condición será un 1, el foco del GRAFCET ascenderá y se repetirán las etapas previas abrazadas por el lazo ascendente.
 - a) El segundo camino es la continuación sin ascender por el lazo. Su condición de transición será el contacto del contador o la correspondiente al proceso multiplicada por el contacto del contador. De este modo, mientras el contador no haya llegado al fin del conteo, este contacto estará inactivo (es un cero) y no se cumplirá la transición para el paso a la siguiente etapa. Cuando se active el contador (valor del contacto es 1), podrá continuar por aquí en lugar de repetir de nuevo las etapas (puesto que ya lo ha hecho todas las veces que se deseaba).

En el diagrama de contactos, se configura, por tanto, su entrada de conteo o pulsos con la etapa de conteo, que será la última de las que desea repetirse (será el contador contará cuando se active esta etapa).

De este modo, mientras la etapa y sus acciones no se hayan repetido las veces deseadas (valor de conteo configurado en el contador), el único camino disponible para el GRAFCET será el ascendente. Volverá a repetir las acciones en bucle y, cuando se alcance el valor de conteo, se cerrará el contacto del contador. En ese momento, el ascenso es imposible (incluye al contacto negado del contador, que, al estar activo, será un 0) y el camino factible es continuar saliendo del bucle de contador.

No debe olvidarse su *reset* en una etapa exterior al bucle. Se ilustra el uso del bucle de contador para la repetición de etapas en la colección de actividades resueltas disponible en el anexo web 7.4 disponible en www.sintesis.com.

7.3.7. Flancos de subida y de bajada

Es preciso introducir un concepto nuevo: los flancos de subida y bajada o ascendentes y descendentes. Se trata de una función que genera una señal de pulso (muy corta) en una marca cuando la variable conectada en su entrada cambia de estado. El cambio de estado puede ser:

- a) *Flanco ascendente: pasa de 0 a 1.* A partir del cambio de estado de la señal P1, la función FLANCO ASCENDENTE genera una señal de pulso en la marca M0, que se empleará a conveniencia en el programa.
- b) *Flanco descendente: pasa de 1 a 0.* A partir del cambio de estado de la señal P1, la función FLANCO DESCENDENTE genera una señal de pulso en la marca M1, que se empleará a conveniencia en el programa.

La función según el fabricante suele denominarse DIFFERENTIATE UP-DIFFERENTIATE DOWN, UP-DOWN, POSITIVE-NEGATIVE, RISING EDGE-FALLING EDGE, etc., haciendo alusión de alguna manera en inglés a su función.

Al ser un recurso muy empleado, en el software de programación del diagrama de contactos, es posible definir el flanco en su inclusión como tal para que, directamente, se comporte como flanco. De este modo, dará únicamente un pulso en el cambio ascendente o descendente del contacto o bit vinculado o aludido.

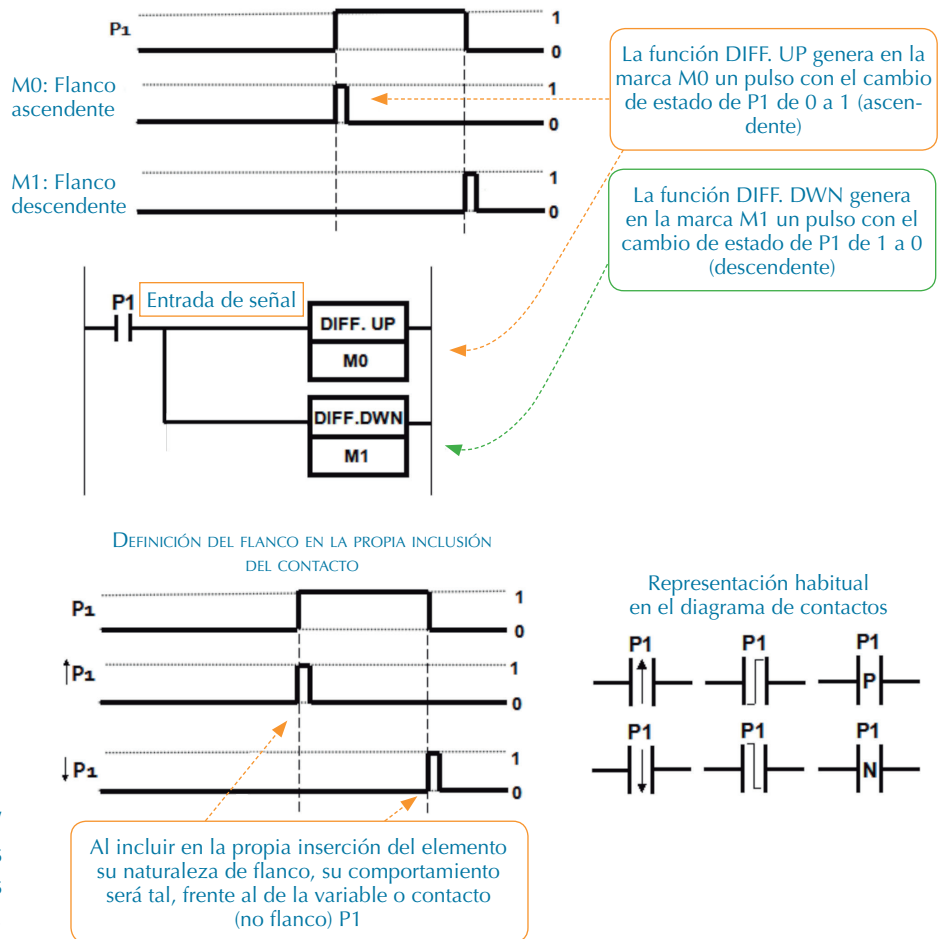


Figura 7.17
Flancos ascendentes y descendentes.

Esta función puede ser muy útil en muchas situaciones. Por ejemplo, si desea realizarse un ciclo muy corto con el pulsado de un botón. Se configura con GRAFCET y, si se activa directamente con el pulsado de un botón, se observa que, al durar el pulsado lo mismo que el ciclo, se tendrá el inconveniente de que se repite el ciclo. Si se configura el inicio del ciclo con el flanco de subida (o con el de bajada) del pulsado, será necesario volver a pulsar una vez ha terminado, con lo que se habrá resuelto dicha inconveniencia.

RECURSO ELECTRÓNICO 7.4 

En el anexo web 7.4, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas y ejemplos que te ayudarán a comprender mejor los contenidos estudiados en este capítulo.

Actividad propuesta 7.8



Una máquina, tras el pulsado de S1, realiza obligatoriamente por dos ramales las secuencias:

- 1+, 1 s (espera de 1 segundo), 1-.
- 2 s, 2+, 2 s, 2-.

Realiza el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos utilizando el mínimo número de temporizadores.

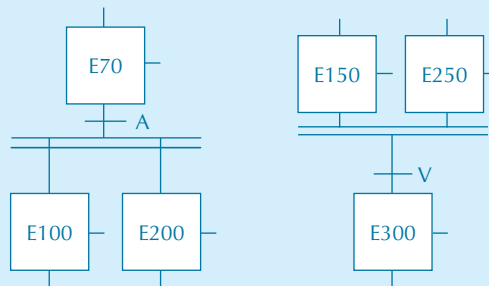
Resumen

- Se ha introducido la construcción del GRAFCET como herramienta de:
 1. Representación del problema secuencial que desea automatizarse.
 2. Obtención de:
 - Ecuaciones de Boole del automatismo.
 - Diagrama de contactos del automatismo: este es el programa introducido en el PLC.
- Para ello, se ha hecho una introducción a todos los elementos y estructuras básicas del GRAFCET: etapas, transiciones, acciones asociadas, divergencias y convergencias.
- También se han explicado funciones básicas como enclavamientos SET-RESET, temporizadores, contadores y flancos.
- De todos estos elementos, se ha estudiado su integración y funcionamiento en el GRAFCET, así como la obtención de ecuaciones y diagrama de contactos.

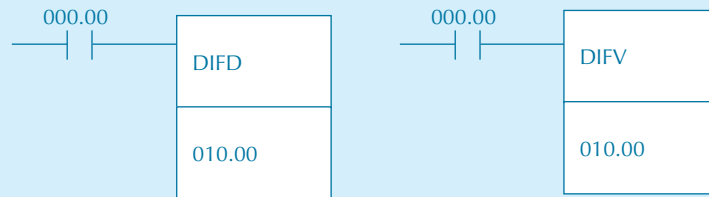


Ejercicios propuestos

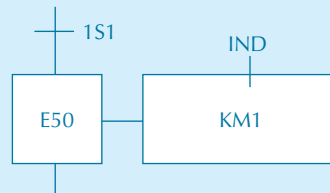
1. Escribe la ecuación de transición de E70 y de E300 (invéntate transiciones y etapas que falten).



2. Si DIFU y DIFD son funciones o instrucciones de bloque para el flanco de subida y el flanco de bajada respectivamente, representa en una línea de tiempo los valores (0 o 1) de 010.00 en cada caso cuando 000.00 pasa de 0 a 1 y, posteriormente, de 1 a 0.



3. Escribe la ecuación de salida de KM1.



4. Realiza el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos de las siguientes secuencias:
- (Cilindros 1 y 2): 1+ [2+, 2 s, 2-, este movimiento repetido 4 veces], 2 s de espera, 1-.
 - 1+, 2-, KM1-ON, 2 s, (2+ y 1- al mismo tiempo), KM1-OFF.
 - 1+, [2+, 2-, 1,9 s, 7 veces], 1-.
 - (KM1-ON KM2-ON al mismo tiempo), 1 segundo [1+ [2+, 2-, 7 veces] 1-, 3 veces], 2 s, (KM1-OFF KM2 OFF al mismo tiempo), 3 ds (décimas de segundo).
5. Una máquina realiza la secuencia 1+, 5 s, 2+, 3 s, 2-, 1-, pero, en caso de estar activo un sensor S10, se saltará la acción del cilindro 2 y la espera intermedia. Realiza el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos.

Caso práctico

Una máquina se alimenta manualmente de piezas, que se dejan en una plataforma. Se dispone de un pulsador de marcha S1. La secuencia que realizará la máquina es la siguiente tras el pulsado de S1: cuando detecta una pieza con un capacitivo DC1,

un cilindro 1 la empuja hacia la zona de medición y, tras extenderse totalmente, retorna. Hay una espera de 3 ds. A partir de aquí, un sensor inductivo DI1 permite detectar si la pieza es metálica o no. En cada caso, hace lo siguiente:

- *Pieza plástica*: soplado con aire mediante una válvula 3/2 monoestable durante 2 s. Marcado mediante impacto con un cilindro 2, con una tiempo de marcado de 3 s desde que el cilindro esté totalmente extendido, antes de su retorno. Expulsión lateral con cilindro 3 y retorno de este.
- *Pieza metálica*: expulsión lateral con cilindro 4 a una cinta. Puesta en marcha de la cinta y retorno del cilindro previo. Espera de 4 s desde la activación de la cinta antes de detenerse. La cinta solo se activará si está activado un sensor que indica el cierre de la máquina.

Todas las válvulas son monoestables, salvo la que gobierna al cilindro 4.

Para que la máquina realice otro ciclo, será necesario haber dejado de pulsar (el operario no puede dejar pulsado el botón

para que la máquina inicie el ciclo sin un nuevo pulsado).

1. Realiza el GRAFCET completo con todas las indicaciones necesarias.
2. Confecciona la tabla de variables y asigna direcciones de la siguiente forma:
 - a) Entradas en una palabra o double byte denominado *I* (con 16 bits I00, I01, I02... I15).
 - b) Salidas en una palabra o double byte denominado *O* (con 16 bits O00, O01, O02... O15).
 - c) Marcas en los bytes desde el 200 (con 8 bits disponibles en cada uno: 200.0... 200.7).
3. Escribe todas las ecuaciones.
4. Realiza el diagrama de contactos completo.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿En qué norma el SFC (GRAFCET) se considera ya lenguaje de programación?
 - a) La IEC 61231-3.
 - b) La IEC 61131-9.
 - c) La IEC 61131-3.
 - d) El SFC (GRAFCET) es únicamente un método gráfico y aún no se considera lenguaje de programación.
2. ¿Cuáles de las siguientes opciones son variables binarias en GRAFCET?
 - a) La activación de las etapas.
 - b) La activación de las acciones asociadas.
 - c) El resultado de las condiciones de transición.
 - d) Todas las opciones anteriores lo son.

3. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero?
- a) Un lazo ascendente se construye con una divergencia AND y una convergencia OR.
 - b) Un lazo descendente se construye con una divergencia OR y una convergencia OR.
 - c) Un lazo descendente se construye con una divergencia AND y una convergencia OR.
 - d) Un lazo ascendente se construye con una divergencia AND y una convergencia AND.
4. Respecto a la convergencia y divergencia AND, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) La divergencia AND obliga a la activación de todas las etapas tras ella.
 - b) La convergencia AND se rebasa solo si todas las etapas previas están activas y se cumple la única condición de transición.
 - c) La convergencia y divergencia AND se representan con una doble línea horizontal.
 - d) Todas las respuestas anteriores son verdaderas.
5. ¿Cuál de las siguientes frases es verdadera?
- a) Con un GRAFCET completo y bien indicado, puede programarse una secuencia sencilla en un PLC.
 - b) Aparte del GRAFCET, es necesario conocer ecuaciones de transición.
 - c) Aparte del GRAFCET, es necesario conocer ecuaciones de transición y ecuaciones de las salidas.
 - d) Aparte del GRAFCET, es necesario conocer ecuaciones de transición, salidas y el diagrama de contactos.
6. En relación con la siguiente expresión, ¿cuál de las proposiciones siguientes es verdadera?
- Etapa** = **Etapa Anterior (1)** · **Condición Transición Anterior (2)** + **Etapa (3)** · **Etapa Post (4)**
- a) El producto de los términos 1 y 2 son responsables del mantenimiento activo de la etapa (enclavamiento) y el producto de los términos 3 y 4, de la activación de esta.
 - b) El producto de los términos 1 y 2 son responsables de la activación de la etapa y el producto de los términos 3 y 4, del mantenimiento activo de la etapa (enclavamiento).
 - c) El producto de los términos 1 y 2 son responsables del inicio del GRAFCET y el producto de los términos 3 y 4, de la activación de esta.
 - d) El producto de los términos 1 y 2 son responsables del mantenimiento activo de la etapa (enclavamiento) y el producto de los términos 3 y 4, de la activación de la siguiente etapa.
7. ¿Cuál de las siguientes opciones relacionadas con el diagrama de contactos es falsa?
- a) El diagrama de contactos es una traducción directa a un diagrama eléctrico de las ecuaciones en álgebra de Boole obtenidas del GRAFCET.
 - b) El diagrama de contactos guarda similitud con los circuitos eléctricos de mando.

- c) El diagrama de contactos es un lenguaje denominado *diagrama de relés* o *diagrama ladder* o *de escalera*.
- d) El diagrama de contactos es la única forma de programar un PLC.
8. Para la divergencia OR, ¿qué es importante recordar en el álgebra de Boole?
- a) Que una variable por su negada es 0.
- b) Que una variable por sí misma es ella misma.
- c) Que la negada de la suma es el producto de las negadas de los sumandos.
- d) Que la negada del producto es la suma de las negadas de los factores.
9. Para la divergencia AND, ¿qué es fundamental tener en cuenta en el álgebra de Boole?
- a) Que una variable por su negada es 0.
- b) Que una variable más su negada es 1.
- c) Que la negada de la suma es el producto de las negadas de los sumandos.
- d) Que la negada del producto es la suma de las negadas de los factores.
10. Sobre las funciones o instrucciones de bloque, ¿con cuál de los siguientes enunciados estás de acuerdo?
- a) Solo existen enclavamientos (SET-RESET), temporizadores, contadores y flancos.
- b) Tienen un funcionamiento independiente del diagrama de contactos.
- c) Solo trabajan (igual que los contactos y salidas del diagrama) con variables binarias.
- d) Su definición y funcionamiento varían según los fabricantes, pero los fundamentales son siempre similares.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

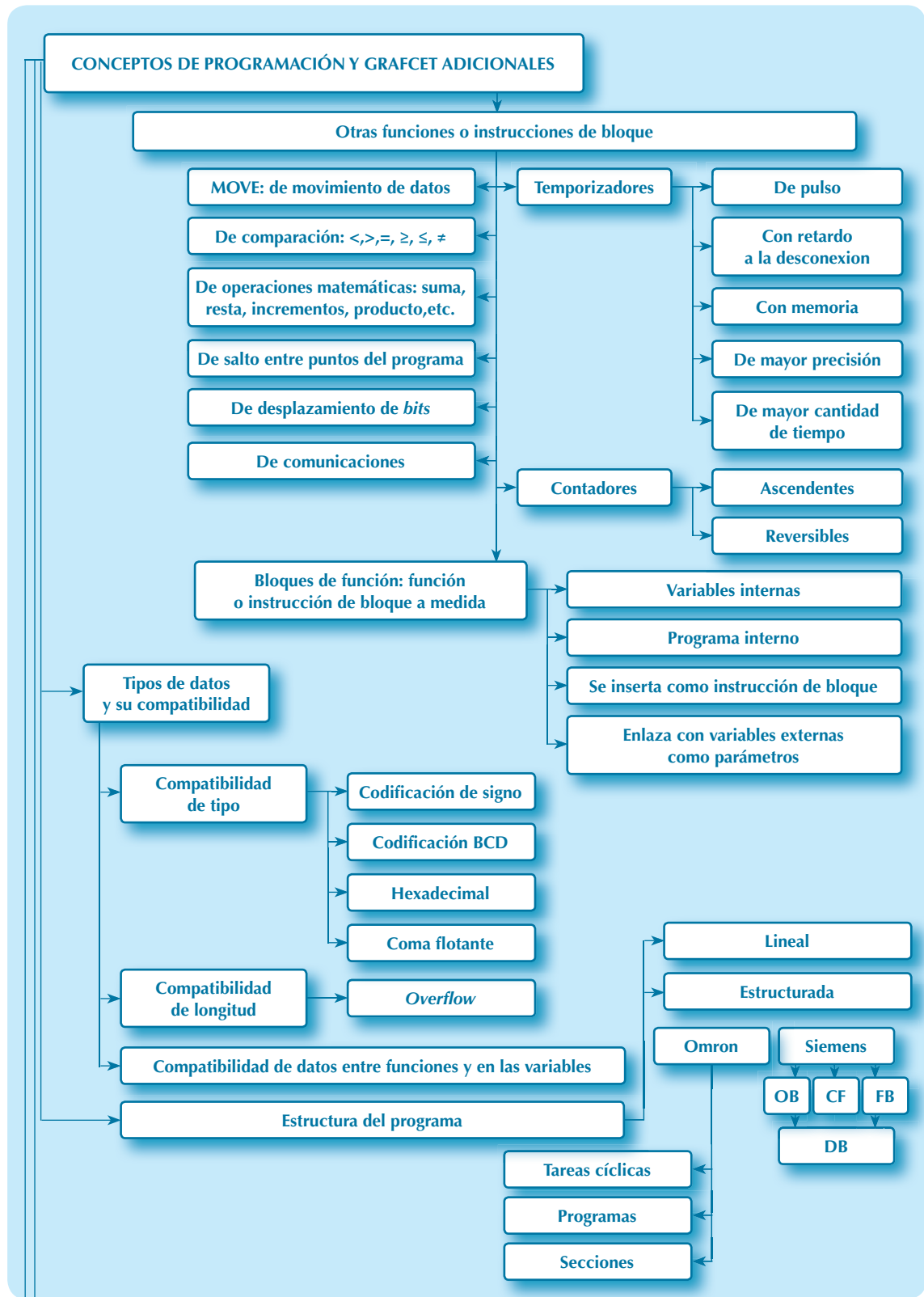
10. a b c d

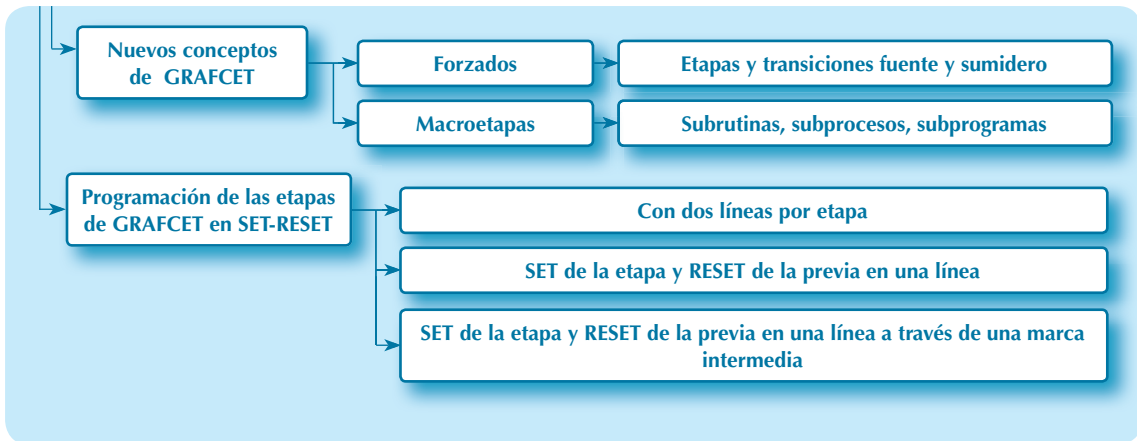
Conceptos de programación y GRAFCET adicionales

Objetivos

- ✓ Ampliar la funcionalidad de la programación con nuevos elementos del GRAFCET e introduciendo nuevas funciones o instrucciones de bloque con las que realizar operaciones más complejas (movimiento de datos, comparaciones, etc.).
- ✓ Ofrecer la opción de programación de las etapas mediante instrucciones de bloque SET-RESET, en lugar de con ecuaciones de transición.

Mapa conceptual





Glosario

Ámbito de una variable. Espacio del programa estructurado en el que una variable es visible y puede ser local (solo para un bloque o programa) o global (para todos los bloques o programas).

Desbordamiento u overflow. Se produce cuando la operación o el dispositivo intentan manejar un número que es demasiado grande para la longitud del tipo de dato que admite.

Etapas y transiciones fuente y sumidero (o pozo). Elementos no convencionales del GRAFCET en los que, si son fuente, no tienen elementos precedentes y, si son sumidero, no tienen elementos posteriores.

Forzado. Herramienta de GRAFCET en forma de acción de etapa, con la que un GRAFCET obliga a otro a la activación exclusiva de las etapas indicadas.

Lenguaje de líneas de instrucción. Alternativa de lenguaje de programación al diagrama de contactos y al resto mediante comandos de texto que permiten introducir los contactos, estructuras y funciones en forma de texto.

Macroetapa. Opción de representación por el que un trozo de secuencia de etapas y transiciones se representa aparte del GRAFCET principal consiguiendo organizar y reducir su complejidad visual.

Subrutina (o subprogramas o subprocesos). Estructura que permite ordenar la organización y funcionalidad del GRAFCET agrupando secuencias complejas o que vayan a repetirse durante el proceso, que pueden constituirse como secuencias aparte o como GRAFCET adicionales.

8.1. Introducción

En el capítulo anterior, se ha comenzado el camino de la programación de PLC. De la forma más básica, pero con capacidad de realizar ya secuencias de cierta complejidad con los elementos básicos.

Para añadir algo más de funcionalidad a esta programación básica, son necesarias aún más herramientas y, en este capítulo, se introduce un nuevo modo de programar las etapas con funciones SET y RESET y también nuevas funciones o instrucciones de bloque, así como nuevos conceptos del GRAFCET.

8.2. Funciones y conceptos de programación en el diagrama de contactos

En este apartado, se introducen nuevos elementos con los que enriquecer la programación en el diagrama de contactos. Tanto funciones o instrucciones de bloque como el manejo correcto de datos y estructuras en la programación.

Las funciones, al ser más específicas, también presentan más diferencias entre fabricantes y, por tanto, será necesario el estudio específico de su manual de programación. Sin embargo, no dejan de tener una funcionalidad similar y se estima útil introducirlas.

8.2.1. Funciones o instrucciones de bloque

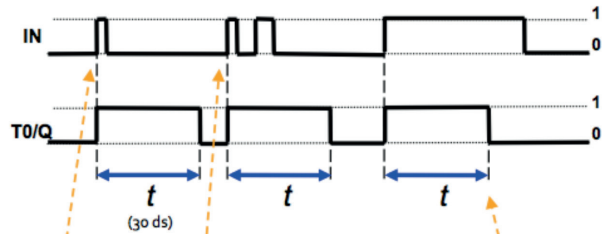
En el capítulo anterior, se han introducido las funciones más básicas. Aquí se exponen algunas adicionales para la programación, pero que siguen siendo básicas, pues, para la programación, los fabricantes ofrecen un enorme abanico de funciones, algunas muy específicas.

A) Temporizadores

Aparte del sencillo temporizador ya estudiado con retardo a la conexión TIMER o TIMER ON que activa su contacto asociado al agotarse el tiempo, pueden encontrarse temporizadores con más funciones o algo más específicos:

1. *Temporizador de pulso*: PULSE TIMER, con activación a la recepción de un pulso en la entrada (IN) e independientemente del mantenimiento de la señal en la entrada. El temporizador activa su salida y recuerda que ha sido activado el conteo de tiempo simplemente al recibir un pulso. Cuando transcurre el tiempo, desactiva su contacto asociado o salida (T0/Q) y deja de estar activado para volver a esperar un pulso de activación. Si, antes de transcurrir el tiempo de espera, vuelve a recibir un pulso en la entrada o se mantiene activa esta, el conteo de tiempo y activación de la salida continúa desde el primer impulso y se desactiva pasado el tiempo configurado (figura 8.1).
2. *Temporizador con retardo a la desconexión*: TIMER OFF, la salida o contacto asociado se activan con la activación de señal en la entrada. El conteo de tiempo se inicia tras cesar

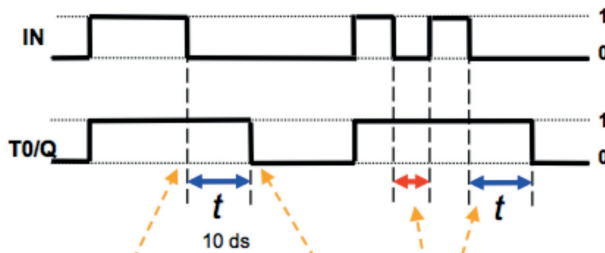
la señal en la entrada y, cuando se consume dicho tiempo, se desconecta la salida o contacto asociado. En caso de haber comenzado a contar el tiempo tras una desconexión de entrada y que esta vuelva a activarse, el temporizador dejará de contar y volverá a esperar una nueva desconexión de entrada (figura 8.2).



El conteo de tiempo y activación de la salida o contacto asociado comienza con un primer pulso de activación de la entrada del temporizador (a cargo de P1, no es necesario el mantenimiento de la señal, basta con el primer pulso durante el tiempo configurado)

Tras pasar el tiempo configurado durante el que ha mantenido la señal activa en la salida y contacto asociado, se desactiva dicha señal, aunque en la entrada se mantenga

Figura 8.1
Temporizador de pulso.



La salida se activa con la activación de la entrada, pero el conteo de tiempo comienza con su desactivación. Tras pasar el tiempo configurado desde la desactivación de la señal de entrada, se desconecta también la salida o contacto asociado.

La desactivación de la entrada es la que inicia el conteo de tiempo hasta la desconexión de la salida, pero, si no ha llegado a desconectar y la entrada se vuelve a activar, se desactiva el conteo de tiempo.

Figura 8.2
Temporizador con retardo a la conexión.

3. *Temporizadores con memoria o acumuladores de tiempo*: TOTALISING TIMER, son con retardo a la conexión y guardan el valor del tiempo durante el que ha habido estímulo en la entrada, de forma que puede interrumpirse la entrada al temporizador tantas veces como se quiera y este no se pone a cero. Memorizará el tiempo transcurrido durante los diferentes periodos de señal activa en la entrada e irá restándose al configurado. Al volver a activarse la entrada, seguirá restando del tiempo que quedaba hasta alcanzar el valor 0, momento en el que activará su contacto y reseteará su tiempo con la entrada de RESET (figura 8.3).
4. *Temporizadores de más precisión en su base de tiempos* (no trabajan con décimas, sino con valores menores): HIGH SPEED TIMER o ULTRA HIGH SPEED TIMER, con bases de tiempo de 10 cs o de 1 ms.
5. *Temporizadores capaces de contar grandes cantidades de tiempo*: LONG TIMER, capaces de contar durante centenas o miles de días.

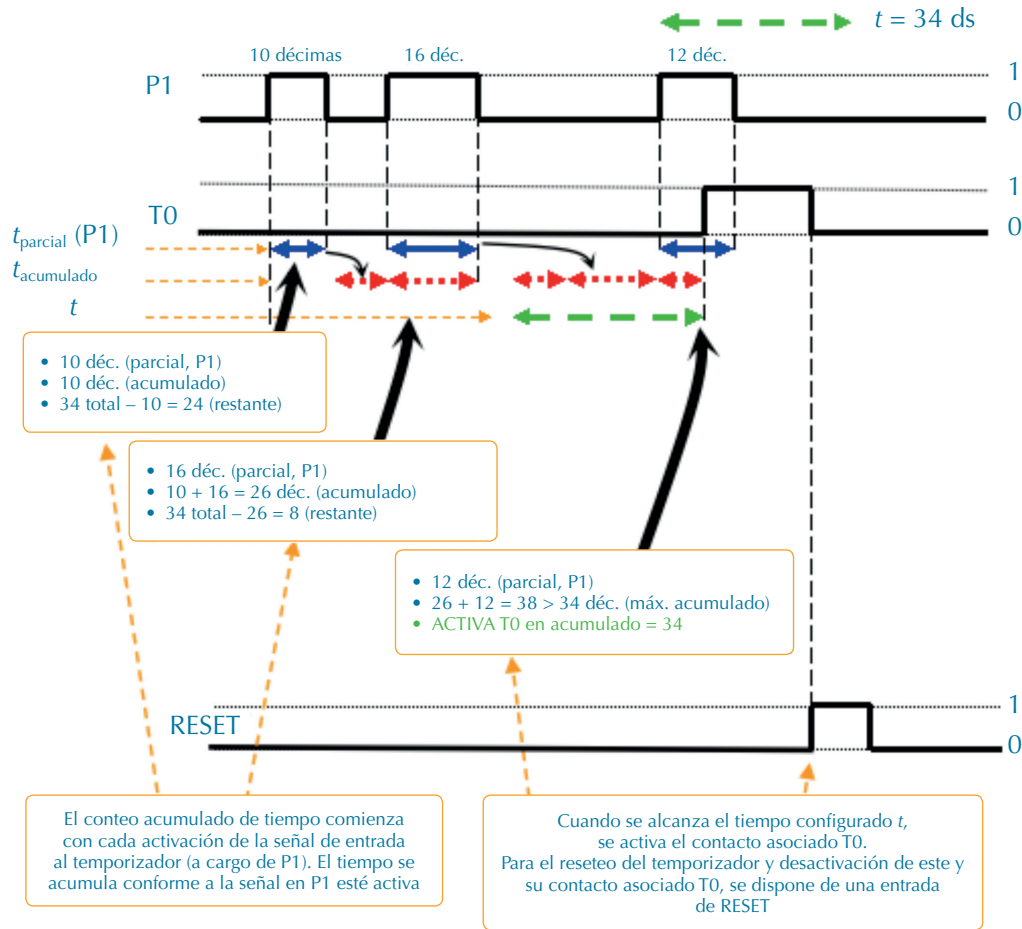


Figura 8.3
Temporizador con acumulador de tiempo.

© FUNDAMENTAL

Cuando la programación se enriquece con nuevas funciones, a menudo, pueden encontrarse fragmentos del diagrama de contactos que realizan funciones fundamentales, pero que no están estrictamente ligadas a la secuencia del proceso físico y, por ello, no están implementadas ni representadas en el GRAFCET (incluso algunos automatismos pueden programarse sin él). Esta divergencia no existirá en la metodología SFC, pues, siendo lenguaje de programación, cubrirá absolutamente todos los supuestos, pero, en el caso del GRAFCET y el diagrama de contactos, es posible programar de modo que ambos se complementen para conseguir la funcionalidad completa del automatismo

B) Contadores

Al igual que con los temporizadores, habitualmente, se dispone de más contadores que el estudiado:

1. *Contadores ascendentes*: COUNTER UP. Su funcionamiento es el mismo, pero el conteo es ascendente desde 0 hasta el valor que, una vez alcanzado, supone la activación del contacto asociado. Disponen de entrada de RESET también igual que un contador descendente.
2. *Contadores reversibles*: son contadores con dos entradas (aparte de la de RESET) en los que una entrada va sumando al contador y la otra va restando. Tendrá un valor de conteo inicial (normalmente 0) que se resetea con la entrada de RESET. Cuenta con el valor límite configurado de conteo, de modo que, cuando se rebasa en sentido creciente, pasa al 0 y activa su contacto asociado y, cuando se alcanza en sentido decreciente desde el 0, también activa su contacto asociado.

RECURSO ELECTRÓNICO 8.1



En el anexo web 8.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar con más detalle el funcionamiento de un contador reversible.

C) Funciones de movimiento de datos

Existen a disposición del usuario funciones que, directamente, toman los ceros y unos existentes en una zona de memoria y los desplazan a otra zona de memoria, borrando los datos existentes en la última.

D) Función MOVE

Cuando se requiera utilizar un valor existente o almacenado previamente (por ejemplo, el estado en un momento dado del conjunto de entradas en la zona de entradas o un número en binario almacenado en un byte o palabra), es posible mover los valores presentes de una zona de memoria a otra. Por ejemplo, para manipular los datos, realizar comparaciones o hacer cálculos. Se consigue con la instrucción o función MOVE, que, en su versión más sencilla, tendrá:

1. Una entrada de activación de la función.
2. Un canal fuente del que se copia su contenido habitualmente sin borrarse.
3. Un canal destino en el que se escribe el contenido del canal fuente, borrando lo que hubiera antes.

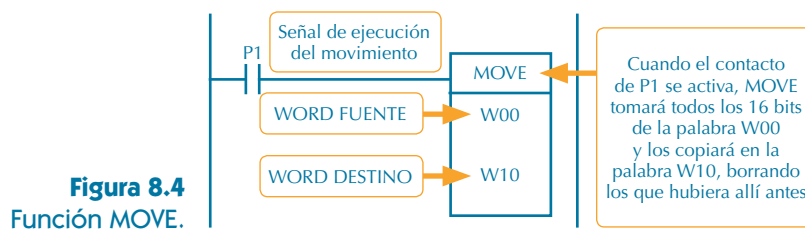


Figura 8.4
Función MOVE.

En la figura 8.4, el contacto asociado al bit P1 activa el movimiento de los datos de la palabra W00 a la palabra W10.

Ejemplo

Desea emplearse un contador con un valor límite de conteo variable cada vez que se pasa por la etapa E150. Este valor variable se encuentra en la palabra W75. Con la señal del paso por una etapa E150 entrando en la función MOVE, se mueve la cadena binaria desde W75 a W80 y se configura el contador para que el valor de este se tome de W80.

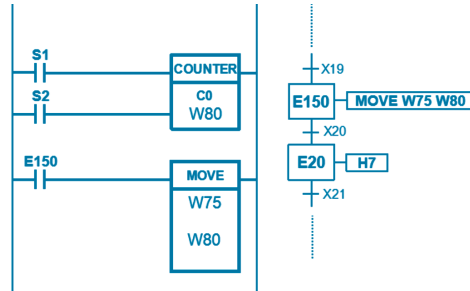


Figura 8.5
Ejemplo sencillo de empleo de MOVE.

En el manual de programación del fabricante, se indican las zonas de memoria o áreas de datos para la fuente y el destino que pueden emplearse (normalmente constantes, área CIO o de entrada y salida, zonas de marcas, zonas de marcas con retención, áreas de temporizadores, áreas de contadores, etc.). Pueden emplearse valores numéricos como constantes o cualquier otro (como resultados de cálculos), siempre que sean compatibles con el tamaño de datos que la función MOVE pueda mover (en este ejemplo, se habla de una palabra o dos bytes, pero pueden ser distintos).

También pueden moverse valores de contadores o temporizadores para compararlos y actuar en consecuencia.

Actividad propuesta 8.1



Desea emplearse un temporizador con dos posibles valores de tiempo, uno almacenado en W50 y otro almacenado en W51, según se pulse un botón S1 o S2. Dibuja el diagrama de contactos para conseguirlo.

E) Funciones de comparación

Para la programación, deben existir funciones que permitan comparar valores y que, según la comparación, ofrezcan un resultado. Una función genérica de comparación de dos valores de entrada (constantes o valores de las palabras especificadas) tendrá un conector por la izquierda para activarla y otro de salida por la derecha por el que generará una señal con condición ON cuando la comparación sea cierta. El símbolo de comparación establece cuál es la condición que debe cumplirse. Esta función opera de forma algo diferente a las vistas hasta ahora, pues no se comporta como una carga en el circuito eléctrico del diagrama de contactos, sino que es como un interruptor. Si se cumple la condición, deja pasar la intensidad y puede conectarse otro elemento a la derecha para su activación. A su izquierda, puede haber un contacto que lo active o simplemente estar conectado al bus izquierdo de tensión positiva.

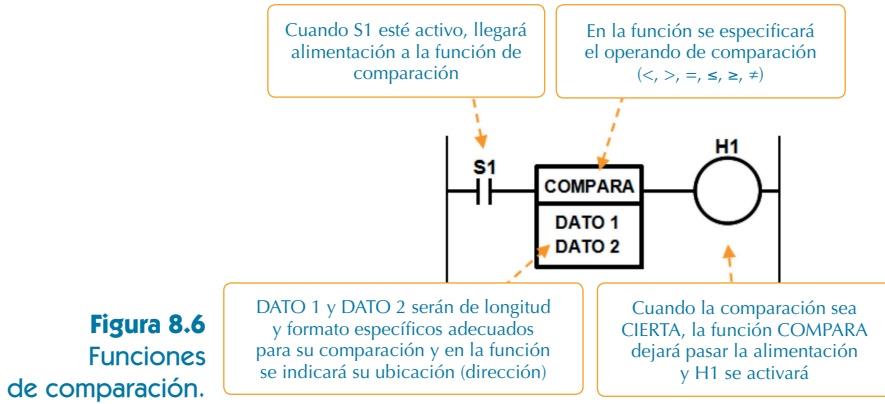


Figura 8.6
Funciones de comparación.

Pueden existir diversos tipos de comparadores incluidos en las funciones de programación por parte del fabricante. Puede haber un tipo que, en función del resultado de la comparación, active determinadas marcas de sistema. Estas marcas de sistema están expresamente creadas para servir a este propósito y pueden emplearse en el programa para ejecutar unas acciones u otras según haya sido el resultado de la comparación.

Actividad propuesta 8.2

Desea señalizarse la evolución de un contador descendente configurado para contar 10 veces. Para ello, ha de encenderse un piloto mientras el valor de conteo del contador sea igual o esté por encima (igual o mayor que) de 8. Otro piloto se encenderá cuando sea igual a 7 y, finalmente, otro piloto se encenderá cuando sea menor que 6. Realiza el diagrama de contactos que consiga este propósito.

F) Funciones de operaciones matemáticas

Hay aplicaciones en las que es necesario ejecutar algún tipo de fórmula matemática sobre datos disponibles (lecturas de sensores, constantes, tiempos, etc.).

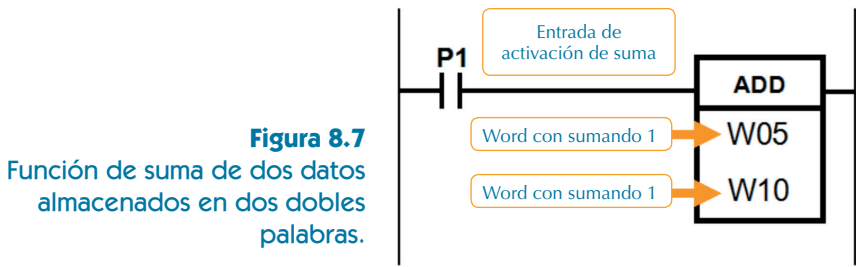


Figura 8.7
Función de suma de dos datos almacenados en dos dobles palabras.

Habitualmente, un PLC incluirá funciones matemáticas como las siguientes:

- Suma o adición: ADD.
- Incrementos o decrementos (incremento o decremento de una cantidad sobre un número).
- Resta o sustracción: SUB.
- Multiplicación: MUL.

- División: DIV.
- Raíz cuadrada: SQR.
- Valor absoluto: ABS.
- Funciones trigonométricas: seno, coseno, tangente, arcoseno, arcocoseno y arcotangente.
- Logaritmo y logaritmo neperiano.
- Potencias: X^Y.

Se requerirán por parte de cada función los operandos, que son los datos empleados en la fórmula, y se indicará la ubicación en la memoria donde se almacena cada número. Es posible que las funciones solo admitan operaciones con dos elementos y, por tanto, solo pueda trabajarse con 2 datos a la vez. Por ejemplo, no puede operarse directamente en una función con la fórmula $5 + 7 + 11 + 20$. Probablemente, habrá que realizar sumas parciales hasta acumular la suma total. En otras ocasiones, es posible que se ofrezcan funciones que puedan realizar sumas o productos múltiples. Por último, la función tendrá un parámetro que será la zona de memoria en la que se almacenará el resultado para su utilización.

G) Funciones de salto entre líneas de programa

Es posible que, dentro de la ejecución lineal del programa, exista un fragmento que desee saltarse, llegando a otro punto más avanzado. Esto se consigue con funciones de salto. Pueden ser parejas con inicio de salto y fin de salto (JUMP START-JUMP END) y una numeración para cada pareja de instrucciones de salto empleada. Su activación puede ser con lógica positiva (tensión por su entrada en el diagrama de contactos) o negativa (sin tensión).

También puede ser una función de salto ligada a una etiqueta de llegada o de destino, de modo que, al activar la función (puede interponerse una condición previa a su alimentación), la ejecución de las líneas buscará el fin del salto o etiqueta marcando el destino y seguirá ejecutando allí.

Según la activación del salto (de estas funciones), las líneas intercaladas entre el inicio y el fin del salto se ejecutarán o no.



TOMA NOTA

Es necesario consultar el manual de programación de la función concreta para ver en qué condiciones pueden insertarse los saltos y su comportamiento. Por ejemplo, si no se ha ejecutado el salto y en el siguiente ciclo de secuencia se ejecuta, es necesario vigilar qué bits del tramo no ejecutado se quedan activos y cuáles no (pueden no desactivarse automáticamente los bits activos o temporizadores, por ejemplo).

La omisión de acciones puede conseguirse de otros modos más sencillos. El principal objetivo y la ventaja de los saltos es el ahorro en tiempo de ciclo, pues, directamente, las líneas no se ejecutan. Esto puede ser interesante para programas muy largos y en situaciones en los que interesa minimizar el tiempo de ciclo de *scan*.

H) Funciones de desplazamiento de bits o registro de desplazamiento

Son funciones SHIFT REGISTER, que realizan el movimiento o desplazamiento de una cadena de bits a lo largo de una zona fija de la memoria del PLC. Es como un tren de unos y

ceros pasando por una ventana. Los ceros y unos visualizados son la cadena de bits y la ventana es la longitud de la zona fija de memoria.

Este movimiento implica que, en el extremo delantero del avance (final de la cadena), un bit se perderá y que, por el contrario, en el extremo trasero del avance, habrá que introducir un 0 o un 1.

Habitualmente, por tanto, en las funciones de registro de desplazamiento, es necesario configurar:

1. Una entrada que comanda la realización del desplazamiento.
2. Si se desplazan lateralmente los bits de una cadena binaria hacia la izquierda o hacia la derecha. Esta opción puede estar determinada por la elección de la función o puede haber funciones reversibles en las que deberá haber una entrada para el movimiento en un sentido y otra para el contrario.
3. Si, en el desplazamiento de la cadena, va a entrar un 1 o un 0 (por su inicio, sea por la derecha o por la izquierda).
4. La longitud y localización de cadena que sufre el desplazamiento. Por ejemplo, 16 bits (dos bytes) en bytes B20 y B21 u 80 bits (10 bytes) en las palabras de la W20 a la W29. También es posible que deba indicarse una localización de entrada y otra de salida (cubriendo la longitud de la cadena) con el registro de desplazamiento realizado.
5. Pueden disponer de una señal de RESET que pone a toda la cadena desplazable a cero.

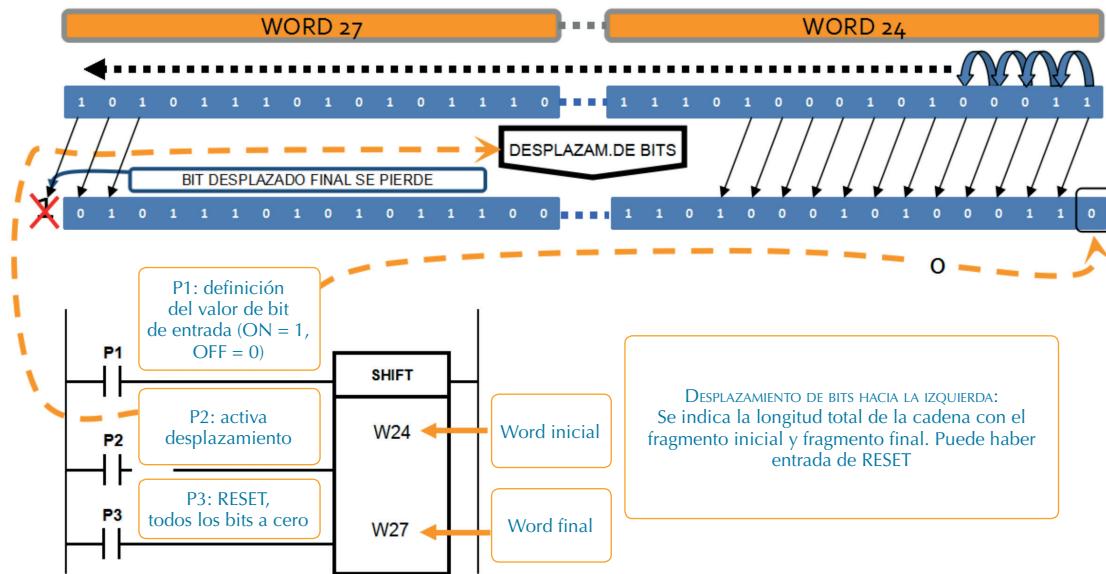


Figura 8.8
Registro de desplazamiento hacia la izquierda.

Si, por ejemplo, se desplaza una cadena de 16 bits hacia la izquierda una posición, el bit más a la izquierda, el número 15 contando desde el 0, se pierde.

Suelen ofrecerse diversas funciones SHIFT, por ejemplo:

- Con entrada de bit por la izquierda y desplazamiento hacia la derecha.

- Con movimiento reversible. Dos entradas marcan si la entrada es por la derecha (y el desplazamiento es hacia la izquierda) o si la entrada es por la izquierda (y el desplazamiento es hacia la derecha).
- Para desplazar varios bits a la vez. Puede ser de byte en byte o de *word* en *word* (en lugar de bit en bit), por ejemplo, un valor numérico almacenado.

I) Funciones de comunicaciones

Pueden existir funciones para gestionar las comunicaciones del PLC con otros PLC u otros dispositivos a través de un protocolo serie u otros. Es algo muy específico de cada fabricante y modelo, por lo que será necesaria su consulta, pero siempre existirá la definición de un área de memoria para el intercambio de datos en la comunicación. Por ejemplo, definir 20 bytes para zona de salida de datos: del B81 al B100 y otros 20 bytes para la escritura y posterior lectura de datos de entrada, del B101 al B120.

J) Bloques de función

Se han estudiado diversas funciones que, cuando reciben ciertas entradas, realizan determinadas operaciones para ofrecer una salida de algún tipo. Por ejemplo, activar un contacto cuando pasa un tiempo (temporizador TIM) o cuando se recibe un número determinado de estímulos (contador CNT). Supóngase que hubiera una operación de cierta complejidad, necesaria para la programación de automatización de máquinas, que desea incluirse en programas de forma muy repetitiva, recurrir a ella de forma constante, pero que no está en el catálogo que ofrece como función el fabricante en la *suite* de programación.

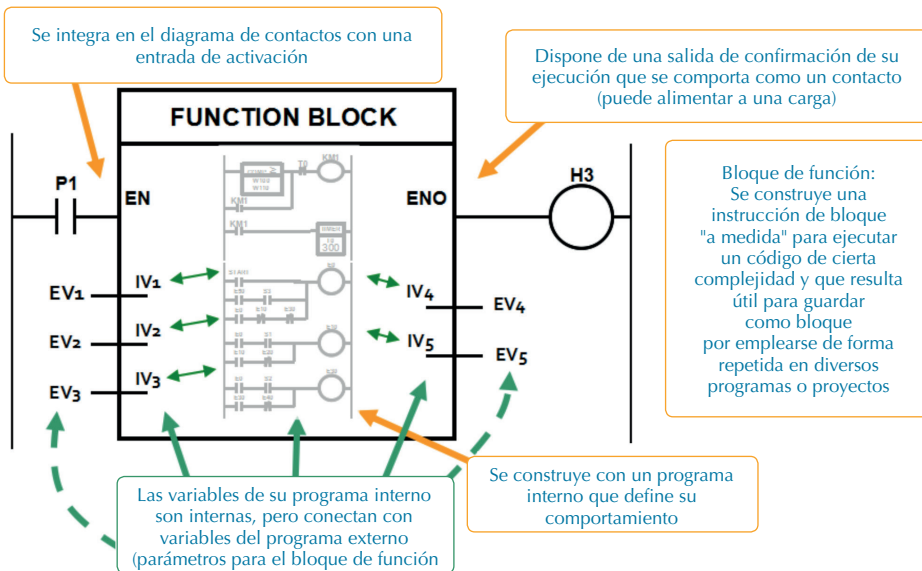


Figura 8.9
Bloques de función.

Es cierto que podría crearse un conjunto de líneas en el diagrama de contactos y copiarlo y pegarlo cada vez. Esto resulta engorroso y, además, si hay parámetros internos que desean configurarse, será necesario modificarlos acudiendo en cada parámetro al punto del código donde se encuentre.

Evidentemente, se ofrecen en la programación otras alternativas. Se trata de trozos de programa *encapsulables* en cajas, como si fueran funciones, para su reutilización tal cual se desee. Además, los parámetros configurados aparecen como parámetros de la propia función, por lo que es muy fácil configurarlos cada vez que vayan a emplearse.

Su creación consiste en hacer un programa en el diagrama de contactos u otro lenguaje con un conjunto de variables, de modo que se realizan las operaciones necesarias sobre ellas para ofrecer un resultado y asociarlo a una *caja* con entradas y salidas al programa principal, relacionadas con las variables del bloque. Se genera, entonces, una instrucción de bloque o función a medida, que podrá insertarse cuantas veces se quiera como si fuera un temporizador, contador o cualquier otra instrucción de bloque: se genera un bloque de función.

Las variables empleadas en su programa interno son variables internas de uso exclusivo dentro del bloque de función (salvo que se declaren de otra forma) y conectan con las variables externas del programa en el que se inserta el bloque de función. Para el bloque de función, estas variables externas son parámetros que hay que introducir al incluirlo en el diagrama de contactos.

8.2.2. Precauciones con los tipos de datos empleados y su compatibilidad

Hasta ahora, han ido introduciéndose muchos conceptos en los que se habla de variables binarias y también de datos no binarios (aunque almacenados en binario). Por ejemplo, el valor de conteo de un contador, evidentemente, no será una variable binaria, sino, por ejemplo, un entero sin signo. Se vio anteriormente que un entero sin signo (*unsigned integer*) es un tipo de dato con una longitud determinada. Para este tipo de dato, típicamente 2 bytes o una palabra (aunque puede depender de la definición del fabricante o del lenguaje informático o de programación). Será necesario conocer qué dato acepta el contador e introducirlo consecuentemente.

Para asegurar la corrección en el tratamiento de datos, se observan las características que se explican seguidamente.

FUNDAMENTAL

La corrección en el tratamiento de los datos a la hora de programar y emplear funciones, instrucciones de caja y variables que puedan ser no binarias es un aspecto absolutamente imprescindible.

A) *Compatibilidad de los datos en código binario*

A estas alturas, debe estar claro que se almacena la información en las áreas de memoria del PLC en ceros y unos o en binario. Sin embargo, la interpretación de esos ceros y unos no tiene

por qué ser siempre la misma. Véanse a continuación situaciones que pueden generar errores al introducir datos en funciones o almacenarlos en variables para su posterior uso:

1. *Codificación del signo de un número*: puede ser que se emplee el bit más a la izquierda para indicar el signo del número y que el resto de bits a la derecha sea binario natural o binario en complemento a dos (lo más habitual) cuando se trata de un número negativo.
2. *Codificación en BCD*: ya se ha estudiado que el BCD dispone de varias versiones, pero son todas decimal codificado en binario (*binary coded decimal*) en el que se toman grupos de 4 bits y cada uno de ellos es un dígito en decimal. Esto implica 10 combinaciones, cuando con 4 bits hay 16 disponibles. Por ello, siempre que uno de estos bloques ofrezca una combinación que no sea una de las 10 para indicar el dígito decimal, se producirá una situación de error. Cuando una función requiera la introducción de datos en BCD, habrá que tener en cuenta, según el manual o ayuda de la función, qué tipo de BCD emplea y la coherencia de la cadena binaria con esta codificación.
3. *Introducción o expresión de binario en hexadecimal*: a menudo, para ahorrar espacio de caracteres en la lectura e introducción de datos, se codifica el binario en hexadecimal mostrando cada bloque de 4 bits en su correspondiente carácter hexadecimal. Si es el caso, deberá tenerse en cuenta a la hora de diferenciar si una cadena con dígitos en hexadecimal:
 - Es decimal (o BCD) o simplemente hexadecimal.
 - Es binario con signo expresada en hexadecimal o simplemente hexadecimal sin signo.
4. *Codificación en coma flotante*: ya se ha estudiado que la expresión de una cantidad en coma flotante es una cadena binaria, pero con un código en el que hay distintos tramos de la cadena expresando distintas cosas: signo, exponente y mantisa. Por lo tanto, igual que en los casos previos, dicha cadena binaria deberá interpretarse como establece la codificación en coma flotante y no como binario, BCD, etc.

Actividades propuestas



8.3. Se dispone de una instrucción de comparación que acepta un entero de un byte de longitud en binario, con el bit más a la izquierda indicando signo y el resto de la cadena binaria (7 bits) expresado en complemento a dos. Explica qué sucedería en cada uno de los siguientes casos:

- a) Introducción de un binario ordinario sin signo de valor decimal 314.
- b) Introducción de un binario con signo por el bit más a la izquierda y codificación normal del resto de bits de valor -280.
- c) Introducción de un binario con signo por el bit más a la izquierda y codificación normal del resto de bits de valor -3.
- d) Introducción de un binario con signo por el bit más a la izquierda y codificación en complemento a dos de valor -126.

8.4. Una cantidad para introducir en una instrucción de bloque muestra los dígitos D2A3 en hexadecimal. Indica de qué cantidad en decimal se tratará según el código que emplea la función:

- a) Un entero sin signo de 16 bits.
- b) Un entero con signo de 16 bits y los bits de cantidad en binario normal (no en complemento a dos).
- c) Un entero con signo de 16 bits y los bits de cantidad negativa en complemento a dos.
- d) Un BCD natural.

B) Compatibilidad de los datos en longitud

Cada tipo de datos se define también por su longitud, aparte de por su codificación (una cadena binaria no expresa lo mismo en BCD, binario natural, binario con signo y complemento a dos o coma flotante). Por lo tanto, hay que tener en cuenta la longitud de la cadena y, especialmente, las cantidades límite que cada tipo de dato puede almacenar. Por ejemplo, un binario de 16 bits que sea un entero sin signo, puede almacenar valores en decimal entre el 0 y el 65 535 ($1111\ 1111\ 1111\ 1111 = 2^{16} - 1 = 65\ 535$). Si desea emplearse una cantidad de 80 200, este tipo de dato con esa longitud de 16 bits es claramente insuficiente. Una situación que puede darse en algunos dispositivos es el desbordamiento, cuyo comportamiento debe conocerse.

Cuando el dispositivo intenta manejar un número que es demasiado grande para su configuración (para la longitud del tipo de dato), se produce un *desbordamiento* u *overflow*. Cada dispositivo, función, tiene un rango bien definido de valores que puede representar y manejar. Si, durante la ejecución de un programa, se llega a un número fuera de este rango, se experimentará un error de desbordamiento, que puede consistir en:

- Generar un error: probablemente con la detención del programa.
- Sobrepasar su techo y seguir contando desde el inicio del rango.

Ejemplo

Imagina una función que emplea un tipo de datos de 4 bits para enteros sin signo. Su rango de representación será del 0 al 15 ($1111 = 2^4 - 1 = 15$). Si se realiza una operación de dos variables con valores de $8 + 9$, resulta que, en binario, los sumandos son representables como $1000 + 1001$, pero la suma que en decimal es 17, en binario, no puede representarse con 4 bits. Con 5 bits sí puede representarse con el valor 10001. Entonces, la función normalmente:

- Dará un mensaje de error de ejecución de programa.
- Para evitar la detención del programa, descartará los bits a la izquierda del cuarto, pues no puede tratarlo, obteniendo el valor resultante de quitar el quinto bit a la izquierda de 10001, que es 0001. Si el programa continúa con este valor, los resultados no van a ser los esperados.

Estos comportamientos pueden conocerse consultando el manual o experimentando en la programación, pero lo deseable es realizar una correcta selección de tipos de datos para su uso con el objetivo de evitar la situación de desbordamiento.

C) Compatibilidad de datos entre funciones y en las variables

A menudo, en la programación las funciones, se relacionan manejando datos. Por ejemplo, pueden obtenerse dos tiempos de dos temporizadores y compararlos directamente o moverlos previamente a una ubicación. También es posible que se declaren variables para almacenar dichos datos. Todo el tránsito a lo largo del programa debe respetar los tipos de datos que cada variable contiene y cada función puede manejar. Si esto no se tiene en cuenta, el programa no funcionará o lo hará erróneamente.

RECUERDA

- ✓ Cada fabricante define sus tipos de datos, a menudo específicos (no siempre estándar entre los fabricantes o conforme a la norma) que hay que conocer. Del mismo modo, establece los tipos de datos que acepta una función y la forma de representar e introducir el tipo de dato que está manejándose con símbolos incluidos previos al número (una almohadilla previa #5 indica en Omron que el dato 5 está expresado en BCD o el prefijo S5T# indica en Siemens que se trata de un dato de tipo S5TIME, de tiempo).

8.2.3. Filosofía de organización y ejecución de los programas

En la programación, existen dos ordenaciones posibles:

1. *Programación totalmente lineal*: ejecuta secuencialmente todas las instrucciones de la tarea de automatización, una detrás de otra, siguiendo una línea temporal y estructurado básicamente en un único bloque. Esto solo es posible cuando la secuencia es muy sencilla y el automatismo no presenta mucha funcionalidad.
2. *Programación estructurada*: cuando el automatismo tiene una mínima complejidad, hay que plantear una ordenación de sus partes de forma lógica y estructurada según sus funciones. Se ordena el conjunto del programa dividiéndolo en:
 - a) *Programa o tarea principal*: hace las tareas más importantes o iniciales. Suele ejecutarse en la puesta en marcha o inicio del automatismo y de forma cíclica automáticamente.
 - b) *Programas secundarios*: son más pequeños y con funciones particulares subordinadas al programa o tarea principal o a otros programas secundarios. No se ejecutarán de forma autónoma, sino que tienen que ser llamados por el programa principal (salvo por una situación particular como una interrupción o un error).

© FUNDAMENTAL

En la *suite* de programación, lo que habrá que configurar en primer lugar es el hardware: CPU o PLC, unidades de expansión de E/S puertos, periféricos, etc. Esto es necesario para conocer las zonas de memoria disponibles, puntos de E/S, comunicaciones, funciones disponibles, etc. Todos ellos elementos imprescindibles a la hora de diseñar y realizar el programa del automatismo. A partir de ese momento, se configurará el proyecto de software.

El programa o tarea principal hace llamadas a los programas secundarios que, a su vez, pueden llamar a otros bloques. De este modo, se establece una estructura modular estructurada de forma coherente con la funcionalidad del automatismo para conseguir que sea fácil de:

- Entender.
- Desarrollar.
- Ampliar tras su finalización.
- Corregir.

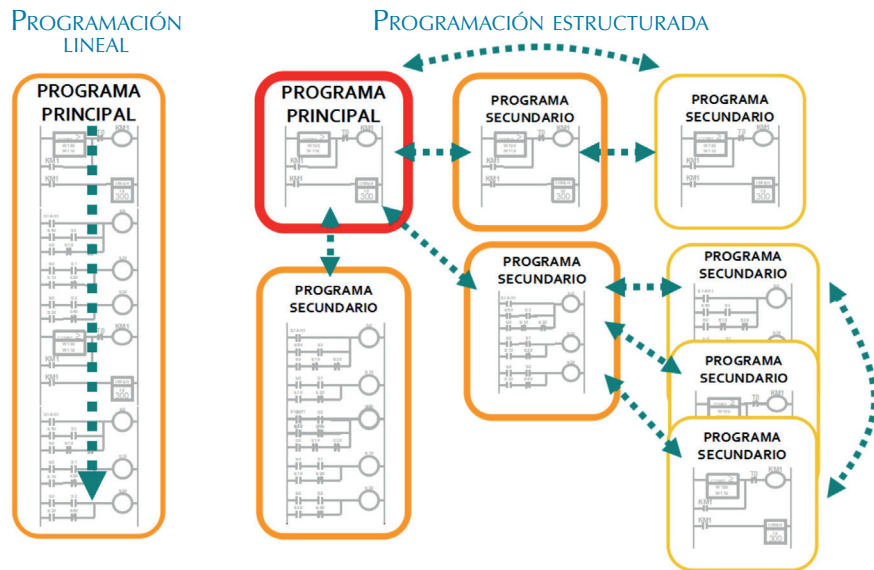


Figura 8.10
Programación lineal y programación estructurada.

El diseño de la ejecución y la forma de la programación variarán según cada fabricante, por lo que es necesario estudiarlos para automatismos de cierta complejidad.

Existen tareas de interrupción, mencionadas a continuación, que paralizan la ejecución entre las tareas.

RECURSO ELECTRÓNICO 8.2



En el anexo web 8.2, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar la filosofía de trabajo para la programación estructurada en Omron y en Siemens.

Sea cual sea el fabricante, hay que recordar que, aparte de la ejecución de todo el programa, se ejecutarán las otras etapas del ciclo de *scan* (lectura y escritura de entradas, escritura de salidas y tareas internas).

TOMA NOTA



Los fundamentos de la programación estructurada también serán similares en diversos fabricantes. Sin embargo, aquí se proporciona una visión general y, como con todo el contenido explicado sobre programación, la única forma de entender con detalle su funcionamiento será con la realización de prácticas reales empleando el software del fabricante de interés o que esté disponible para el aprendizaje.

A) *Ámbito de las variables*

Se ha mencionado ya el uso de variables, como un símbolo que es capaz de tomar diversos valores. Sin embargo, va a definirse de una forma más gráfica.

Las variables son como cajas de zapatos con una etiqueta identificativa, una forma específica y un contenido interior:

1. La etiqueta es fundamental, pues es su nombre y lo que la distingue de otras variables y permite referirse a ella.
2. Hay distintos tipos de cajas –más grandes, más pequeñas, de sección cuadrada, rectangular, etc.– para almacenar un tipo de dato u otro. No es igual una variables (o caja) que almacena un entero sin signo (16 bits) que un número en coma flotante (32 o 64 bits típicamente).
3. Por último, lo que se encuentra dentro de la caja es el valor que tiene la variable en ese momento, el dato que almacena.

Ya se han tratado las variables binarias en las funciones lógicas del álgebra de Boole, en las que cada variable podía tomar los valores 0 o 1 (binarias). También se ha definido en los primeros ejercicios de GRAFCET lo que era la tabla de variables o tabla de símbolos, indicando todas las variables binarias involucradas en la secuencia. Últimamente, también se mencionan los diversos tipos de datos y cómo puede haber variables que los almacenan (números de contadores, lecturas de sensores analógicos, resultados de operaciones matemáticas, etc.).

Sin embargo, a partir de cierta complejidad de programación, cuando se definen las variables, debe tenerse en cuenta su ámbito, es decir, aquel espacio del programa en el que la variable es visible y puede, por tanto, emplearse. Para el ejemplo de las cajas de zapatos, puede decirse que hay cajas de zapatos que solo son visibles en una habitación o estancia (programa), que son las variables locales, mientras que otras son visibles en toda la casa, que serían las variables globales (figura 8.11).

A la hora de realizar programación estructurada, habrá que tener este aspecto en cuenta y ser meticulosos para evitar errores e impedir que el programa funcione incorrectamente. Los fabricantes suelen dejar este aspecto claro en la definición de la variable, por ejemplo, anteponiendo algún símbolo a ella para definir o indicar si es global o local.

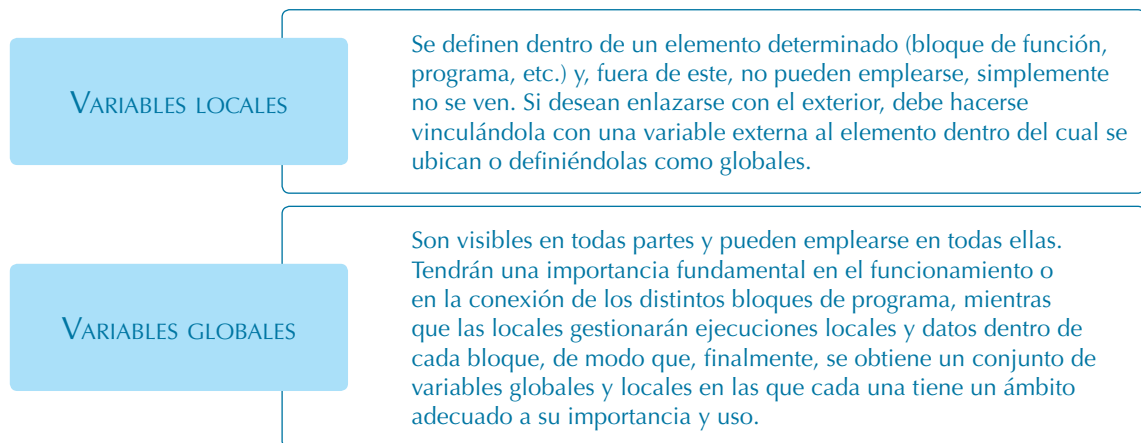


Figura 8.11
Tipos de variables.

B) Lenguaje de líneas de instrucción

Los fabricantes ofrecen una alternativa equivalente en gran medida al diagrama de contactos mediante comandos de texto que permiten introducir los contactos, estructuras y funciones en forma de texto. Es uno de los considerados lenguajes de programación normalizados en la IEC 61131-3. No siempre es equivalente al 100% al diagrama de contactos, pues sucede que, en algunas situaciones, la programación textual puede ofrecer algo más de funcionalidad o eficiencia que la programación gráfica en el diagrama de contactos. Algunos programadores prefieren la programación textual en muchas ocasiones o, al menos, su alternancia con el diagrama de contactos a conveniencia.

C) Interrupciones y rutinas o programas vinculados

Una interrupción es un evento que, por su singular importancia, interrumpe la ejecución normal del programa, deteniéndolo y activando la ejecución de otro programa vinculado a ella. Deben programarse con precaución, pues la interrupción repentina del código principal en su activación puede generar graves problemas si no se hace correctamente.

Pueden ser eventos relacionados con la seguridad o de especial importancia en el proceso y pueden tener hardware dedicado, como, por ejemplo, entradas del PLC específicas para conectar a sensores o mandos asociados a la interrupción.

8.3. Otros conceptos de GRAFCET para la programación

En este apartado, se introducen nuevos elementos con los que enriquecer la representación del automatismo en GRAFCET y, por tanto, la posterior programación.

Estos nuevos elementos del GRAFCET son necesarios para una representación más completa, potente y ordenada del automatismo y que, además, resultan necesarios para conceptos posteriores.

8.3.1. Forzados

Se trata de un método para establecer explícitamente la dependencia jerárquica entre GRAFCET (proceso principal y subrutinas) mediante el forzado desde uno a la activación de ciertas etapas y desactivación del resto en el otro. Se trata del *forzado* de un GRAFCET por parte del GRAFCET de jerarquía superior. En el forzado, mientras está activado, el GRAFCET sometido pasa de manera ineludible de la etapa en la que estuviera a aquella situación o etapa determinada que indique el orden de forzado. Permanecerá en este punto de manera inamovible mientras dure dicha orden.

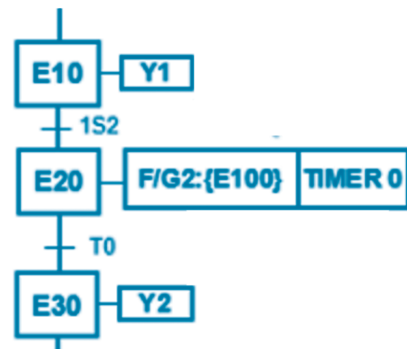


Figura 8.12

En la etapa 20 del GRAFCET ilustrado, este fuerza al GRAFCET 2 a que vaya a su etapa E100.

El forzado se representa como una acción en la etapa en la que se ejecuta. En su interior, se indica de una forma específica con una F (de forzado) una barra inclinada seguida del GRAFCET forzado, dos puntos y entre corchetes las etapas obligadas. Inmediatamente y mientras esté el forzado activo, estas etapas deberán quedar activas y el resto, inactivas.

© FUNDAMENTAL

Un GRAFCET no puede forzar y ser forzado a su vez por otro. Si G1 fuerza a G2, entonces, no es posible que G2 fuerce a G1.

Los forzados son muy útiles para tratar las cuestiones de seguridad para que los GRAFCET de mayor responsabilidad (los relativos a seguridades) prevalezcan invariablemente sobre otros GRAFCET (de proceso).

Será necesario programar el diagrama de contactos o añadir algún aspecto en el diseño del GRAFCET para que dichos forzados se cumplan.

8.3.2. Etapas y transiciones fuente y sumidero (o pozo)

Son elementos algo singulares y menos habituales, con la excepción de la etapa fuente por su uso como etapa inicial para la activación del GRAFCET:

1. *Etapa fuente*: es una etapa que no tiene ninguna etapa ni transiciones anteriores. Se activa por dos motivos: inicio del automatismo o forzado de GRAFCET.
2. *Transición fuente*: se dice de una transición que no tiene etapa previa y siempre está validada (es como si hubiera previamente una etapa activa), por ello, en cuanto la receptividad sea cierta, se activará la etapa posterior. Si la función lógica de la transición o receptividad permanece con valor 1 (verdadera), inevitablemente, cuando esté activa, siempre obligará a la etapa posterior a activarse, así que lo recomendable es que sea un flanco. Es un modo alternativo para el inicio de una secuencia de GRAFCET.
3. *Etapa sumidero (o pozo)*: es una etapa final, sin transición ni etapas posteriores que puedan desactivarla. Su desactivación, por tanto, dependerá de un forzado únicamente.

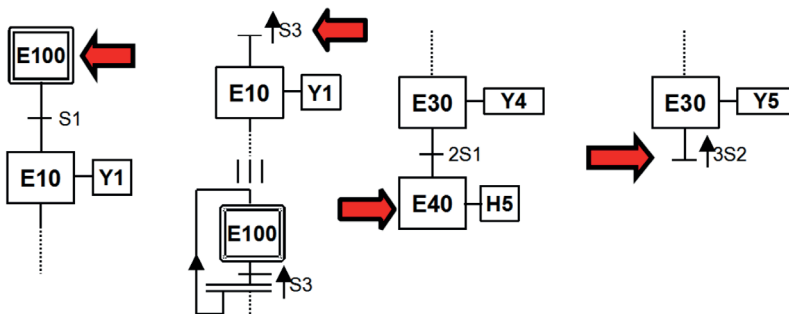


Figura 8.13
Etapa fuente, transición fuente (y su estructura equivalente), etapa sumidero y transición sumidero.

4. *Transición sumidero (o pozo)*: cuando su receptividad (ecuación o condición booleana de la transición) sea cierta, se desactivará la etapa previa. Se emplea para desactivar etapas y se comporta como una transición seguida de una etapa pozo, pero sin que se active esta última pues no existe. Cuando la receptividad sea cierta, obligará siempre a la desactivación de la etapa previa, así que, de modo similar a la transición fuente, se recomienda que las transiciones sumidero se asocien a receptividades de tipo flanco.

Los procesos secuenciales suelen tener una naturaleza cíclica y lo habitual es que, tras la última etapa de la secuencia, haya un modo de volver al inicio y quedar preparada para un nuevo ciclo. Por ello, el uso de estos elementos (salvo la etapa inicial como etapa fuente) no es lo más habitual en el diseño de automatismos sencillos.

8.3.3. Macroetapas

Una macroetapa en sí no es ningún elemento nuevo del GRAFCET, sino una opción para su representación más ordenada. Con ellas, consigue organizarse y reducirse la complejidad visual de un GRAFCET haciendo que un trozo de secuencia de etapas y transiciones se represente aparte. Es muy útil para representar de forma adyacente (desde el proceso o GRAFCET principal como una única etapa) secuencias únicas complejas o largas que, integradas en el GRAFCET principal, lo harían más complejo o extenso.

En el GRAFCET, se representa a la macroetapa como una etapa sin acción alguna, con los lados superior e inferior dobles. Esta etapa representa el espacio en el que se insertaría la secuencia de la macroetapa, y se le otorga idéntica denominación que a esta. Ni siquiera se tratará como etapa del GRAFCET, sino como la representación de las etapas en la macroetapa, que sí se tratarán como etapas.

La macroetapa se denomina Mx , M de macroetapa y la x para su índice numérico (0, 1, 2, etc.). La secuencia de la macroetapa se representa adyacente al GRAFCET y sus etapas pueden etiquetarse igual que en el GRAFCET principal o con un etiquetado que permita identificarlas como pertenecientes a la macroetapa, salvo las de entrada y salida, que se etiquetan como EN-1 y SA-1 si corresponden a la macroetapa 1, EN-8 y SA-8 si corresponden a la macroetapa 8, etc.



Se observa que la representación de la macroetapa no es cíclica, pero no tiene que ver con etapas fuente o sumidero, sino que es únicamente un trozo del GRAFCET principal representado aparte. Cada vez que se activa, se activará su primera etapa como continuación de la anterior en el GRAFCET principal y, cada vez que finaliza, debe desactivarse su última etapa con la activación de la siguiente en el GRAFCET principal.

Cuando el GRAFCET principal llega a la etapa de macroetapa, continúa el foco de acción del GRAFCET o su evolución por la primera etapa de la secuencia de la macroetapa, y su evolución, entonces, es como la de cualquier GRAFCET. La etapa inicial de la macroetapa, por tanto, debe ser activada por la etapa previa a la macroetapa en el GRAFCET principal. Esto significa que, cuando se franquea la condición previa a la etapa de macroetapa en el GRAFCET principal ($M1$), se activará la primera etapa de la macroetapa. Cuando se activa la etapa final de la macroe-

tapa, dicha activación ha validado la condición de salida (receptividad) de la etapa de macroetapa en el GRAFCET principal (M1). Cuando esto sucede, la activación de la etapa posterior desactiva SA-1 y la evolución del proceso representado continúa en el GRAFCET principal.

8.3.4. Subrutinas

Cuando desea estructurarse el automatismo, pueden agruparse las secuencias complejas o que vayan a repetirse durante el proceso en subrutinas, que se constituyen como secuencias aparte o como GRAFCET adicionales. También se denominan *subprogramas* o *subprocesos*.

Las subrutinas son, por tanto, GRAFCET o secuencias que se llaman desde el GRAFCET principal de forma única o repetitiva y que se ejecutan para volver al GRAFCET principal tras su finalización. Parecen similares a las macroetapas, pero no lo son, pues son funcionalmente más completas y no solo son un método de representación, sino una forma de estructurar efectivamente el GRAFCET y su evolución.

La etapa inicial de la subrutina se activará con el encendido del automatismo.

El paso a sus siguientes etapas desde su etapa inicial estará marcado por la llegada en el GRAFCET principal a las etapas que llaman como acción a la subrutina.

Cuando se llega al final de la subrutina, hay dos opciones para su finalización:

1. *Opción asíncrona*: el GRAFCET principal continúa sin verificar la última transición de la subrutina. Es la más sencilla y basta con alcanzar la etapa final de la subrutina para salir de la etapa llamante en el GRAFCET principal. Para salir de la última etapa de la subrutina (última condición de transición del ciclo), se exige alcanzar alguna de las etapas inmediatamente posteriores a las de llamada en el GRAFCET principal o que no estén activas ninguna de las etapas llamantes también en el GRAFCET principal.
2. *Opción síncrona*: aparte de la llegada a la última etapa, también debe verificarse la última condición de transición de la subrutina sincronizando su final con la continuación en el GRAFCET. De este modo, no continúa el proceso en el GRAFCET principal hasta que finaliza la subrutina con el cumplimiento de su última condición de transición (puede ser algo relacionado con el proceso).

La llamada a una subrutina se hace como una acción asociada a la etapa de llamada en la que se incluye el nombre de la subrutina y cuyo rectángulo tienen los lados laterales con doble línea. Sus etapas se numerarán igual que cualesquiera otras. Cuando se constituyen como GRAFCET aparte, disponen de etapa inicial.

Se diferencian de las macroetapas, por tanto, en los siguientes aspectos:

- Son un cambio en la estructura del GRAFCET en forma de secuencia o GRAFCET aparte con etapa inicial (no solo son un modo de representación).
- Pueden llamarse de forma repetida.
- Son llamadas como una acción en el GRAFCET principal.
- Ni la etapa inicial ni la final pueden tener acciones asociadas (en macroetapa, la inicial puede tenerla).

La opción de subrutina puede implementarse anidada, de modo que un GRAFCET principal llama a otro que constituye una subrutina y este segundo llama a otro que es otra subruti-

na, etc. Esto permite organizar las diferentes tareas de forma jerárquica y diferenciada, aparte de la conveniencia de ser llamadas cuantas veces sea necesario si se repiten.

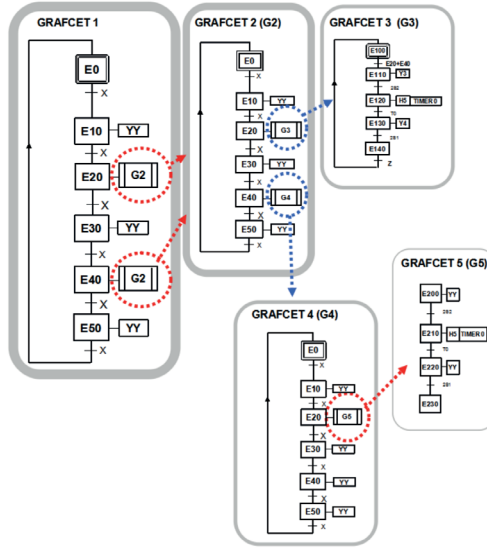


Figura 8.14
Anidamiento de subrutinas para estructurar el programa en GRAFCET.

INTERESANTE

Como puede observarse, este anidamiento permite estructurar la representación del automatismo en GRAFCET. Si se hace convenientemente, su estructura y flujo de funcionamiento guardarán un paralelismo con los conceptos vistos de organización de la programación o programación estructurada: el GRAFCET principal puede corresponderse con el programa principal (tarea cíclica inicial con su programa u OB principales) y los secundarios con bloques de función/ FB, etc. En este punto, hará falta ceñirse a la estructura que el programador estime más adecuada tanto en GRAFCET como en programación estructurada.

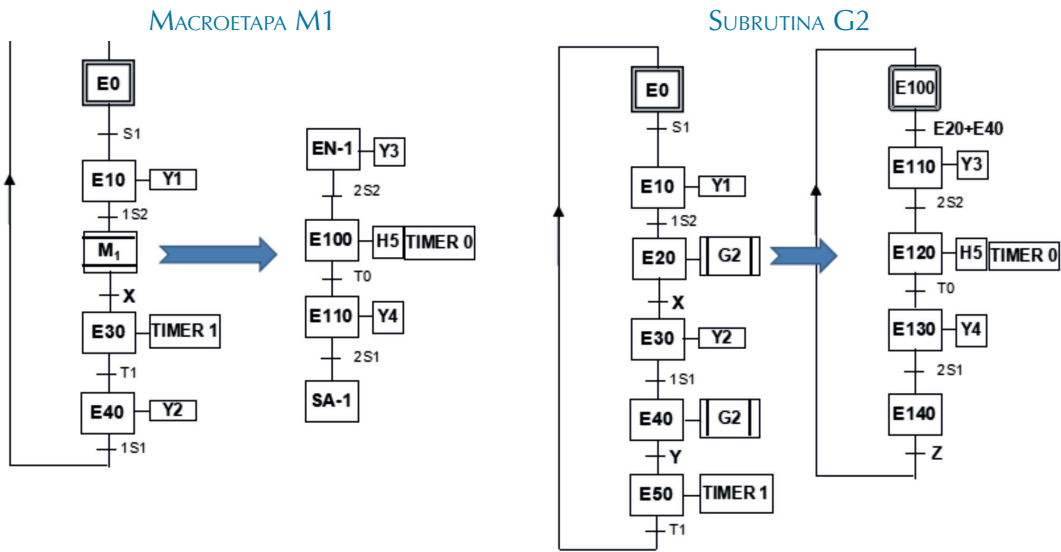


Figura 8.15
Macroetapa y subrutina en GRAFCET.

8.4. Programación en SET-RESET de las etapas del GRAFCET

8.4.1. Justificación

En la programación a partir del GRAFCET, puede optarse por construir las ecuaciones de las etapas, tal como se ha visto en el capítulo 7, o cubrir su funcionalidad con otro método.

En definitiva, lo que se necesita es que se cumplan las reglas y la dinámica de funcionamiento del GRAFCET etapa a etapa:

1. Que una etapa previa activa y la condición de transición con receptividad verdadera activen la etapa posterior.
2. Que la etapa que se active se quede en su activación enclavada.
3. Que la activación de una etapa signifique la desactivación del enclavamiento de la previa.

Los puntos 1 y 2, ahora, pueden conseguirse con la etapa previa y la condición de transición entrando en una función SET de la etapa posterior.

Para realizar la función del tercer punto, se hará que la activación de la etapa posterior realice un *reset* sobre la etapa previa.

Se analiza con mayor detenimiento la situación previa y se introducen, posteriormente, varias opciones para la programación de etapas con SET-RESET.

- **Análisis de las ecuaciones de transición y su diagrama de contactos**

Hasta ahora, al traducir las etapas del GRAFCET a ecuaciones, se ha buscado que estas ecuaciones sigan las reglas de comportamiento del GRAFCET.

Esto se consiguió con la ecuación siguiente:

$$E50 = E40 \cdot X + E50 \cdot \overline{E60}$$

Donde, en este ejemplo de ecuación, $E40$ es la etapa anterior a $E50$; X , la condición de transición entre ellas, y $E60$ la etapa posterior a $E50$.

Esta ecuación tiene traducción directa a un diagrama de contactos como indica la figura 8.16.

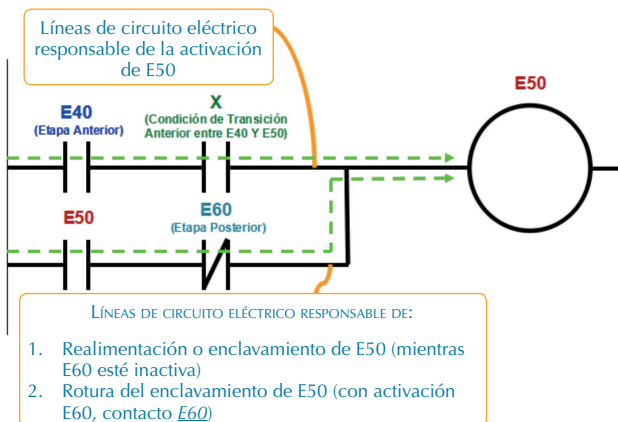


Figura 8.16
Estructura del diagrama de contactos para el comportamiento de las etapas según las reglas del GRAFCET con marcha prioritaria.

Hay otras alternativas para conseguir que se cumplan las reglas del GRAFCET. La alternativa escogida hasta ahora se denomina de *marcha prioritaria*, pues, aunque E60 se active y rompa la realimentación (paro), cuando E40 y X estén activas (marcha), E50 lo estará también.

Otra opción es generar un comportamiento con *paro prioritario* (figura 8.17), que no se ha empleado por no cumplir una de las reglas de evolución del GRAFCET.

$$E50 = (E40 \cdot X + E50) \cdot E60$$

Es paro prioritario, pues, si se activa E60 (paro), la desactivación o paro de E50 prevalece sobre la opción de que E40 y X estén activas para la activación de E50.

La opción de marcha prioritaria se prefiere al paro prioritario, pues hay alguna circunstancia en la que esta última no funciona (una etapa que sea anterior y posterior al mismo tiempo).

Otra opción muy interesante y muy empleada es cumplir con el cumplimiento de las reglas del GRAFCET en las etapas con:

1. Función SET de enclavamiento para la activación y realimentación o enclavamiento de la etapa con la etapa previa y la condición de transición previa entre ambas.
2. Función RESET de desenclavamiento para la rotura del enclavamiento con la activación de la etapa posterior.

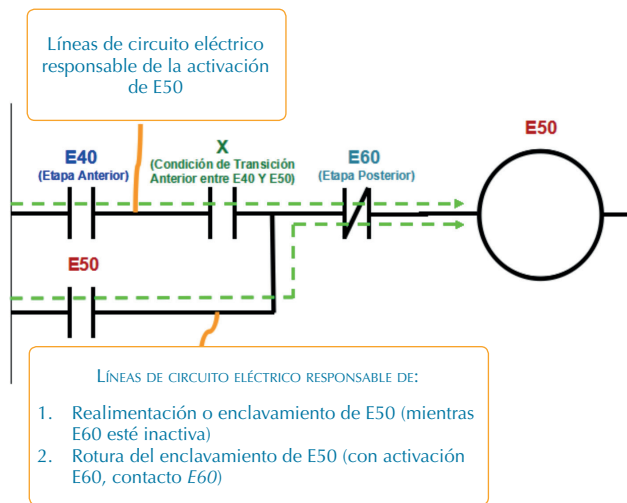


Figura 8.17
Estructura del diagrama de contactos para el comportamiento de las etapas según las reglas del GRAFCET con paro prioritario.

8.4.2. Método 1: SET-RESET de la etapa con dos líneas por etapa

La activación de la etapa posterior hace *reset* sobre la etapa presente (la desenclavan) y, seguidamente, la etapa presente en serie con la condición de posterior hacen (enclavan) *set* sobre la etapa siguiente. En este orden, la marcha es prioritaria. Si se hace el *set* antes del *reset*, será paro prioritario.

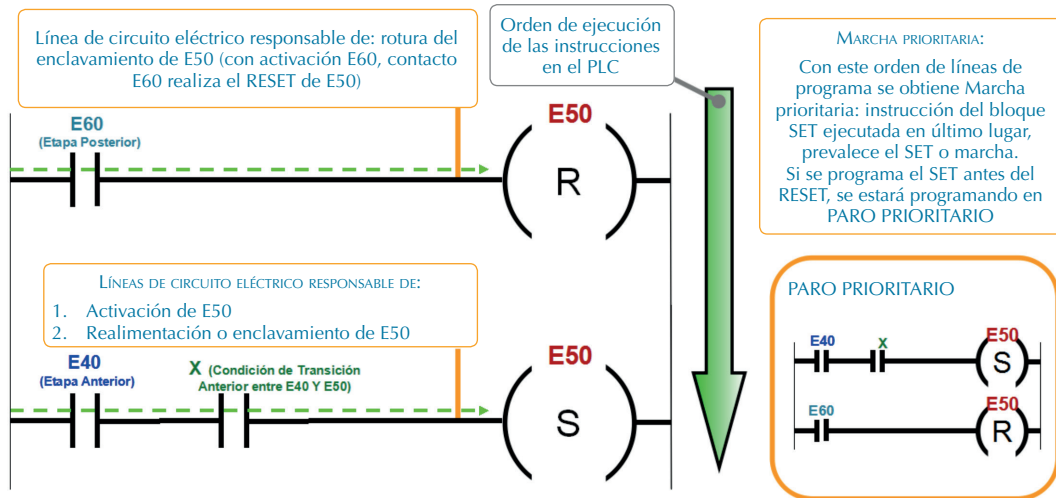


Figura 8.18
Programación de ecuaciones con SET-RESET en marcha prioritaria.

Actividad propuesta 8.5



Realiza las ecuaciones de transición y su diagrama de contactos en SET-RESET en dos líneas del GRAFCET mostrado. No se dispone de bit de START.

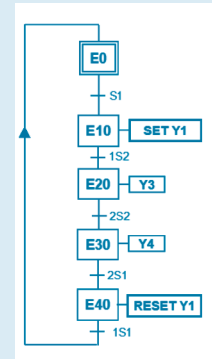


Figura 8.19
Ejemplo de GRAFCET para la programación de etapas con SET-RESET.

8.4.3. Método 2: SET de la etapa y RESET de la previa en una línea

Otra alternativa posible es agrupar la activación de la etapa con la desactivación de la etapa previa. En este ejemplo, dado que, para una misma etapa, la última instrucción ejecutada es de RESET, se trata de un paro prioritario.

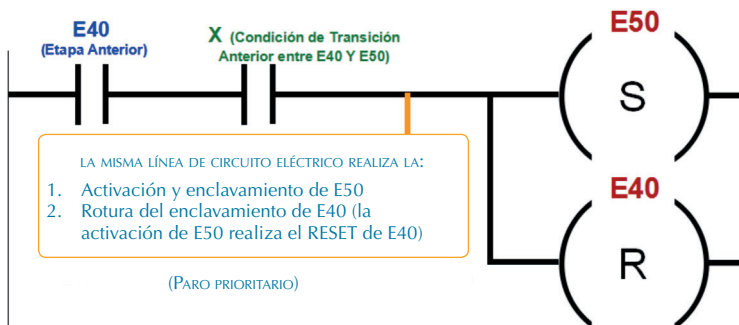


Figura 8.20
Programación de ecuaciones con SET-RESET agrupados en paro prioritario.

8.4.4. Método 3: SET de la etapa y RESET de la previa en una línea a través de una marca intermedia

En ocasiones, se define el enclavamiento de la etapa y desenclavamiento de la etapa previa del mismo modo que con el método 1, pero a través de una marca intermedia, que se define como transición. Cada etapa y condición de transición entre ella y la siguiente activa una bobina o marca intermedia. Después y en otra línea, esta hace el *set* y el *reset* correspondientes: SET de la etapa o etapas posteriores a la transición y RESET de la etapa o etapas precedentes.

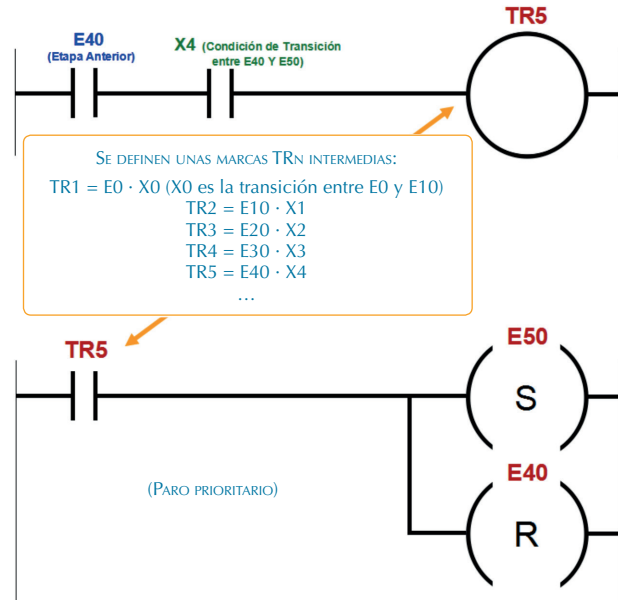


Figura 8.21
Programación de ecuaciones con SET-RESET agrupados y marca intermedia en paro prioritario.



Actividades propuestas

- 8.6.** Elabora el GRAFCET, las ecuaciones de transición y su diagrama de contactos en SET-RESET en dos líneas de la siguiente secuencia (se dispone de bit de START): Cil. 1+, 5 s, 2+, 3 s de espera, 2-, 1-. En caso de estar activo un sensor S10, la secuencia se saltará la acción del cilindro 2.
- 8.7.** Realiza las ecuaciones de transición y el diagrama de contactos con SET-RESET y la marca de transición intermedia del GRAFCET (figura 8.22). Se dispone de bit de START.
- 8.8.** Diseña el GRAFCET, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en SET-RESET con el método 1) de la siguiente secuencia: 1+, 2-, KM1-ON durante 2 s, (2+ y 1- al mismo tiempo) y KM1-OFF.

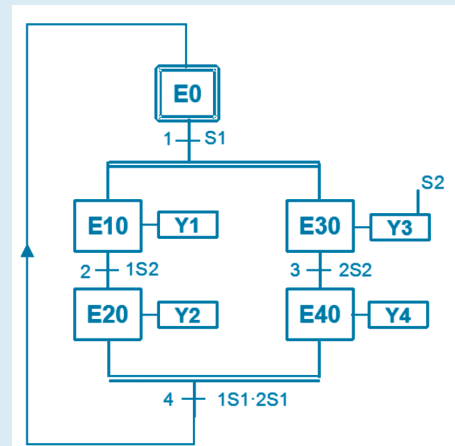


Figura 8.22
Programación de etapas con SET-RESET.



RECURSO ELECTRÓNICO 8.3

En el anexo web 8.3, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas, ejemplos y definiciones que te ayudarán a comprender mejor los contenidos estudiados en este capítulo.

Resumen

En el capítulo, se han estudiado nuevos elementos con los que poder ampliar las capacidades de programación de un automatismo:

- Nuevas funciones (temporizadores, contadores, bloques de función y otros, etc.).
- Precauciones que han de observarse con los tipos de datos a la hora de programar y emplear funciones.
- Conceptos de programación estructurada, necesarios cuando el programa del automatismo aumenta en complejidad.
- Nuevos elementos de GRAFCET, destacando los forzados y las subrutinas, que permiten expresar con esta herramienta programas más funcionales.
- Programación de etapas en SET-RESET, una alternativa a la construcción de ecuaciones de transición para conseguir la evolución de las etapas del GRAFCET en la programación con el diagrama de contactos.



Ejercicios propuestos

1. Desea programarse un PLC para que muestre un patrón en una tira de pilotos luminosos donde cada piloto tiene una conexión independiente. El patrón deseado es, moviéndose de derecha a izquierda y de forma constante, un piloto apagado y tres encendidos. Entre cada movimiento, deben pasar 5 ds. Propón las líneas del diagrama de contactos que emplearías con la función SHIFT e indica la tabla de variables empleada.
2. Elabora el esquema neumático (simplificado), el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en SET-RESET con el método 1) de la siguiente secuencia: 1–, 2–, KM1-ON durante 3 s, KM1-OFF y 1+ al mismo tiempo, 2+ y piloto H1 encendido al mismo tiempo. Las válvulas para el gobierno de los cilindros son monoestables. Las entradas serán una palabra entera de bits I0.00 hasta I0.15. Las salidas también serán una palabra entera de bits entre O0.00 hasta O0.15.
3. Realiza el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en SET-RESET con el método 2) de la siguiente secuencia. En función de la posición de un detector (utiliza la entrada I0.00 como entrada de selección), el automatismo hace las secuencias siguientes:
 - 1.0+, (KM1-ON, KM2-ON) 4 s, 1.0–, (KM1-OFF, KM2-OFF).
 - 2.0+, Piloto ON, 2 s, 2.0–, Piloto OFF, 1 s.

Las válvulas para el gobierno de los cilindros son biestables.

Repite el diseño del GRAFCET anterior, pero agrupando cada secuencia de las dos posibles en subrutinas llamadas desde un GRAFCET principal.

4. Una máquina realiza la secuencia 1+, 5 s, 2+, 3 s, 2-, 1-, pero, en caso de estar activo un sensor S10, se saltará la acción del cilindro 2 (entre 2 + y 2-, incluidas ambas acciones y la espera intermedia de 3 segundos). Realiza el esquema neumático (simplificado), el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en SET-RESET con el método 3). Los puntos de conexión de entrada empleados tienen como dirección los bytes 0 y 1 completos, cuyos bits se etiquetan como B0.00, B0.01... B0.07, B1.00, etc. Los puntos de conexión de salida tienen como dirección los bytes 100 y 101 con representación análoga a las entradas.
5. Diseña el GRAFCET, la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en SET-RESET con el método 3) de la siguiente secuencia: [1+, Motor ON sentido horario durante 1 s, 1-, 4 s, Motor OFF y 2 s de espera, todo esto repetido 3 veces], 2+, 2-. El motor se activa con un contactor.

Las válvulas para el gobierno de los cilindros son biestables. Las entradas serán una palabra entera de bits I0.00 hasta I0.15. Las salidas también serán una palabra entera de bits entre O0.00 hasta O0.15.

Caso práctico

Una máquina comienza su secuencia con un pulsador S1. A partir de ahí, se alimenta de piezas con un movimiento 1+ 1- de un cilindro neumático y espera de 1 s. A continuación, si la pieza recibida es de plástico, acciona el cilindro 2 (2+, 2 s, 2-) y, si es metálica, el cilindro 3 (3+, 2 s, 3-).

- a) Diseña el GRAFCET con una divergencia OR (según sea pieza plástica o metálica) y, mediante funciones de suma, contadores y comparadores, programa la activación en un diagrama de contactos de las siguientes alarmas:

- H1 se encenderá cuando se procesen más de 100 piezas de plástico desde el encendido de máquina.
- H2 se encenderá cuando se procesen más de 100 piezas metálicas desde el encendido de máquina.
- H3 se encenderá cuando se procesen las mismas o más piezas plásticas que metálicas.
- H4 se encenderá cuando se procesen más piezas metálicas que plásticas.
- H5 se encenderá cuando se procesen en conjunto más de 120 piezas. El valor de 120 podrá modificarse en la comparación introduciendo el valor almacenado en el byte B81 con un pulsador S3.

- b) Haz una propuesta de estructura con dos subrutinas, una para el cilindro 2 y otra para el cilindro 3.
- c) Añade una etapa sumidero al GRAFCET principal que se activará con un sensor C1 y encenderá un piloto H6.
- d) Añade una subrutina de emergencia que será un GRAFCET aparte y se activará con un pulsador E1, con la que se forzará a todos los otros GRAFCET a sus etapas iniciales. Tras 3 s, estará lista para ser reactivada (retornará a su etapa inicial).
- e) Realiza la tabla de variables, las ecuaciones y el diagrama de contactos (etapas programadas en

SET-RESET con el método 1) del GRAFCET completo una vez realizados todos los apartados.

Supóngase que los enteros son sin signo y se almacenan en un byte, sin haber problemas de compatibilidad de datos entre funciones. Un pulsador S10 reseteará todos los contadores.

Los puntos de conexión de entrada empleados tienen como dirección los bytes 0 y 1 completos, cuyos bits se etiquetan como B0.00, B0.01... B0.07, B1.00, etc. Los puntos de conexión de salida tienen como dirección los bytes 100 y 101 con representación análoga a las entradas.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué permite el acogimiento a la norma IEC 61131-3?
 - a) Que las funciones o instrucciones de bloque entre fabricantes sean idénticas.
 - b) Que las funciones o instrucciones de bloque que no sean según la norma IEC 61131-3 no puedan incluirse.
 - c) Que haya mayor uniformidad, aunque no igualdad total entre funciones de distintos fabricantes que sean conforme a la norma IEC 61131-3.
 - d) Ninguna de las opciones anteriores es correcta.
2. ¿Cuál de las siguientes características está relacionada con un temporizador de pulso?
 - a) Se activa en el flanco de bajada de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado.
 - b) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado.
 - c) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado siempre que se mantenga la señal de entrada.
 - d) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y, si hay otros pulsos en la entrada dentro del tiempo configurado, vuelve a iniciar el conteo.
3. Respecto a un temporizador con retardo a la desconexión, ¿con cuál de los siguientes enunciados estás de acuerdo?
 - a) Se activa en el flanco de bajada de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado.
 - b) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado tras el flanco de bajada en la señal de entrada.

- c) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y permanece activo el tiempo configurado desde dicho flanco.
 - d) Se activa en el flanco de subida de la señal en la entrada y se mantiene activo el tiempo configurado mientras haya señal en la entrada.
4. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) Un contador reversible cuenta el tiempo en un sentido u otro (incremento o decremento) según la entrada que esté activa.
 - b) Un temporizador acumulador de tiempo acumula el tiempo durante un máximo de tres periodos de tiempo.
 - c) La función de movimiento de datos puede introducir un dato en la configuración de tiempo o de conteo de un temporizador o de un contador respectivamente.
 - d) El comportamiento eléctrico de una función de comparación estudiado es como el de una bobina (carga) en el diagrama de contactos.
5. ¿Cuál de las siguientes opciones es verdadera?
- a) Es necesario emplear funciones de operaciones matemáticas en el control de procesos con sensores analógicos.
 - b) El principal cometido de las funciones o instrucciones de salto es recorrer las líneas de programa incluidas en el salto.
 - c) Las funciones de registro de desplazamiento solo pueden desplazar la cadena de bits de izquierda a derecha.
 - d) Ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
6. ¿Cuál de las siguientes características no está relacionada con los bloques de función?
- a) Pueden almacenarse y, después, insertarse en el diagrama de contactos como si de una instrucción de bloque estándar (contadores, temporizadores, etc.) se tratara.
 - b) Su programación puede hacerse en diagrama de contactos.
 - c) Sus variables son internas y se conectan con las variables del programa al rellenar su valor como parámetros en el diagrama de contactos al insertar el bloque de función.
 - d) Puede insertarse un número limitado de veces.
7. ¿Cuál de las siguientes frases es verdadera?
- a) Lo más habitual para expresar el signo en una cadena binaria que exprese un número negativo es dedicar el bit más a la izquierda al signo y que los números negativos se expresen en complemento a dos.
 - b) Lo más habitual para expresar el signo en una cadena binaria que exprese un número negativo es dedicar el bit más a la izquierda al signo y que los números negativos se expresen en binario normal.
 - c) El valor 1101 0001 sería un valor aceptable si una función solicita datos en BCD natural.
 - d) A una función que indica trabajar con enteros sin signo de 16 bits en binario, puede remitírsele una variable que almacene un número en coma flotante.

8. ¿Cuál de las siguientes proposiciones es falsa?

- a) La programación lineal tiene cabida tanto en automatismos sencillos con secuencias sencillas como en automatismos complejos.
- b) La programación estructurada facilita el entendimiento, desarrollo, ampliación y corrección de los programas de cierta complejidad.
- c) La estructura de un programa, normalmente, se corresponderá con su funcionalidad.
- d) La programación estructurada suele partir de un programa principal y de programas secundarios subordinados a este.

9. ¿Con cuál de las siguientes afirmaciones estás de acuerdo?

- a) En un forzado, las etapas indicadas deben activarse al finalizar el ciclo de la secuencia.
- b) Una etapa fuente no tiene transición previa, pero una etapa sumidero sí tiene transición posterior.
- c) Una transición fuente tiene una etapa previa y una transición sumidero tiene una etapa posterior.
- d) La transición sumidero se emplea para desactivar etapas y una etapa inicial es una etapa fuente.

10. En relación con el GRAFCET, ¿cuál de los supuestos es verdadero?

- a) Una macroetapa modifica la estructura funcional del GRAFCET.
- b) En una macroetapa, ni la etapa inicial ni la final de esta pueden tener acciones asociadas.
- c) Una subrutina no modifica la estructura del GRAFCET, sino que solo sirve para mejorar su representación agrupando etapas.
- d) Una subrutina puede constituirse como un GRAFCET aparte adicional que se activa con la etapa que hace la llamada desde el GRAFCET principal.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

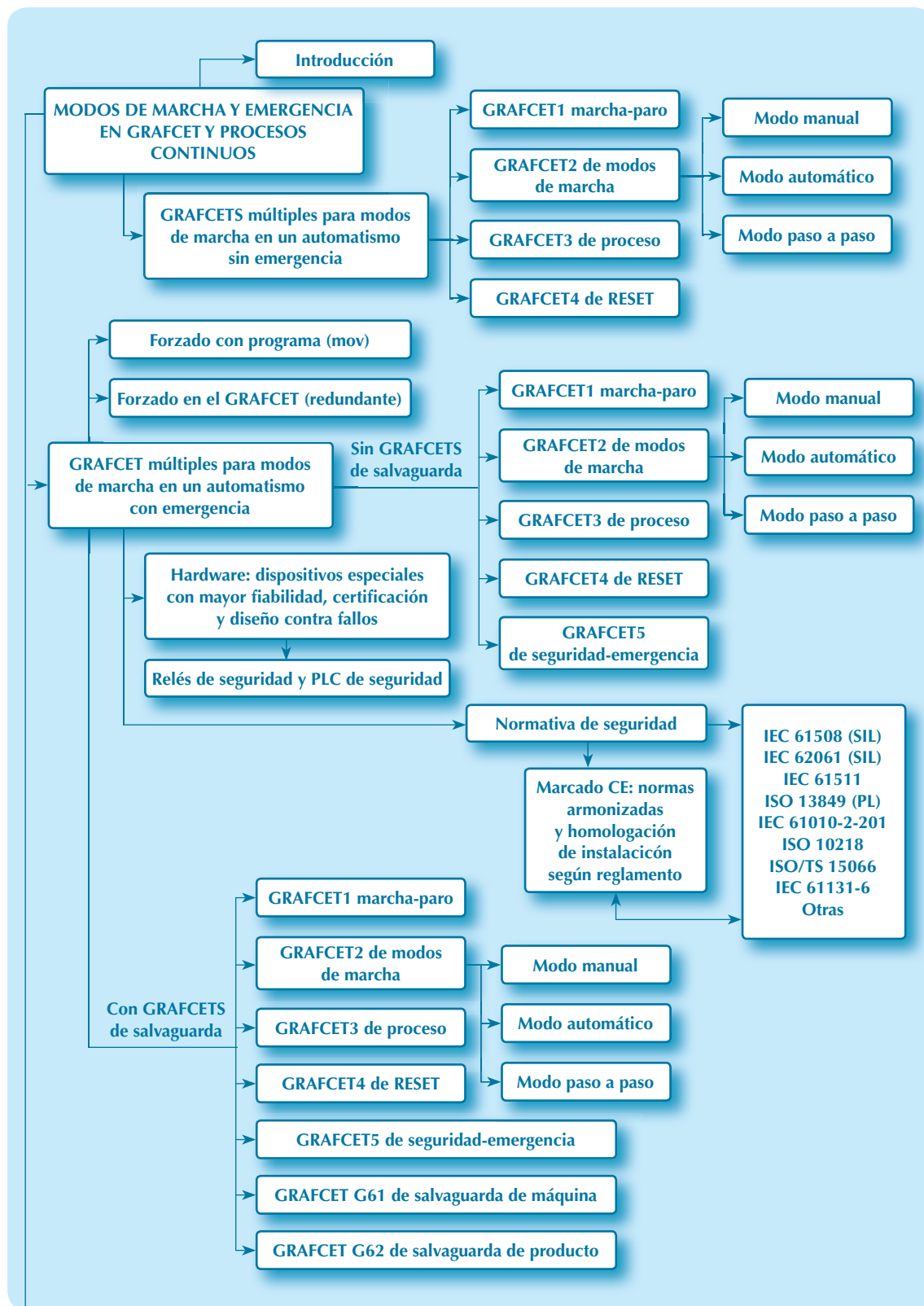
10. a b c d

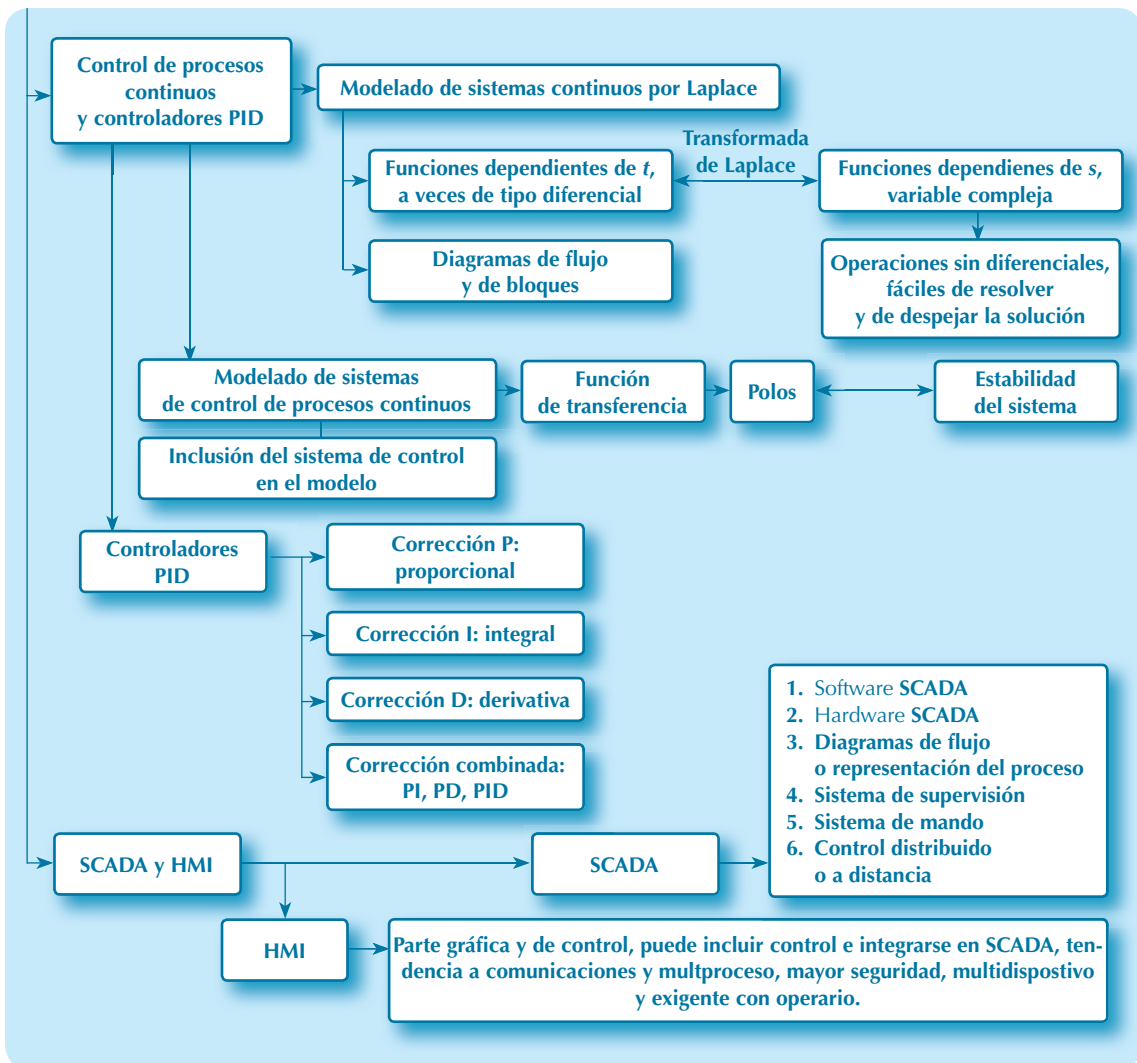
Programación ampliada y control de procesos en continuo

Objetivos

- ✓ Ampliar un paso más la funcionalidad de la programación con propuestas para el gobierno de una máquina con distintas alternativas de comportamiento, como elegir entre ejecutar el ciclo manualmente (ejecuta un único ciclo tras presionar un pulsador), en modo automático, paso a paso o en una secuencia de *reset*.
- ✓ Instruir en la complejidad y responsabilidad de la programación de seguridades y a la normativa implicada, así como al hardware requerido.
- ✓ Ofrecer una implementación de emergencia fuera de la norma con GRAFCET (en este libro, no se ajusta a la norma y, por tanto, no se garantiza que sea válida ni efectiva sobre una máquina real).
- ✓ Presentar otros GRAFCET de jerarquía elevada, pero inferior a la del de seguridad-emergencia para activar secuencias de salvaguarda de máquina y producto.
- ✓ Conocer los fundamentos de los procesos continuos variables con el tiempo no secuenciales, su modelado y su resolución (aproximación matemática para el análisis de sistemas), así como el modelado que incluye el sistema de control y el comportamiento de los controladores PID.
- ✓ Exponer la filosofía de supervisión y control mediante sistemas SCADA y dispositivos HMI.

Mapa conceptual





Glosario

Circuito de seguridad o emergencia. Circuito eléctrico o electrónico capaz de realizar funciones de seguridad abortando el accionamiento de actuadores peligrosos y realizando otras acciones necesarias a partir de la señal de una situación de emergencia o de falta de seguridad y que, además, está realizado con dispositivos especiales diseñados para una mayor fiabilidad y operación correcta incluso frente a fallos internos o externos.

Controlador o PLC de seguridad. Dispositivo programable de especial fiabilidad y diseño contra fallos que cumple con el mismo cometido que un relé de seguridad, pero con capacidad muy superior a la hora de realizar maniobras complejas para funciones de seguridad y de gestionar múltiples circuitos de seguridad.

Controlador PID. Controlador en lazo cerrado empleado en el control de sistemas continuos dependientes del tiempo donde, sobre el valor del error (resta de la salida y la entrada o referencia), se aplica una corrección proporcional al error, otra proporcional al cambio del error (derivativa) y otra proporcional al error acumulado (integral).

Diagrama de flujo o de bloques. Representación gráfica de un proceso sobre materia prima, señales o elementos matemáticos, mediante bloques o elementos (símbolos de acciones o transformaciones) que representan las transformaciones del proceso, unidos por flechas de flujo con sentido indicado, que señalan el tránsito del elemento entre unos bloques y otros hasta llegar al resultado final tras el último bloque.

Dispositivos HMI. Del inglés *human-machine interface* (interfaz hombre-máquina), son pantallas táctiles con capacidad de mostrar mandos e indicadores, incluso también representaciones de la máquina que pueden ir desde la mera pantalla táctil sin otra capacidad más que mostrar información y recibir comandos táctiles en su panel hasta un sistema completo de control incorporando PLC u ordenador personal y comunicaciones, así como software para la generación de representación SCADA.

Función de transferencia. Expresa la relación (cociente) entre la entrada al sistema y la salida del sistema, todas ellas en el dominio de Laplace.

Número complejo. Resultado de la suma de un número real y otro imaginario. Un número imaginario es un número que resulta de la raíz cuadrada de un número negativo.

Polos de la función de transferencia. Son los ceros del denominador de la función de transferencia, que resultan ser números complejos, pues s es una variable compleja y, de su posición en el plano complejo, depende la estabilidad del sistema.

Sistemas SCADA (*supervisory control and data acquisition*). Sistemas de supervisión, control y adquisición de datos. Son un conjunto de hardware y software para la configuración de un entorno visual y táctil con representaciones del proceso y presencia de indicadores y mandos para realizar la supervisión y control del operario de la máquina a través de pantallas táctiles y que, además, puede realizarse a distancia.

Transformada de Laplace. Transformación matemática que se aplica sobre expresiones matemáticas y que, tras dicha transformación, genera otras expresiones, de las cuales se dice que "están en el campo de Laplace", en función de una variable compleja, y que resultan más sencillas de operar y representar. La transformación en sentido inverso también es posible (transformada inversa de Laplace).

9.1. Introducción

Con lo que se ha estudiado hasta este capítulo, pueden programarse secuencias de cierta complejidad, pero, en el caso de desear abordar la programación de una máquina por sencilla que sea, es difícil conseguir un programa mínimamente práctico. Por ejemplo, tener que pulsar cada vez que acabe el ciclo para que se realice una nueva ejecución puede resultar engorroso, así como que no exista la opción de ejecutar la secuencia paso a paso para poder visualizar los problemas y hacer ajustes en la máquina (la velocidad de cilindros neumáticos o la posición de detectores) o programa (como el tiempo de espera de temporizadores).

Si se desea algo más de funcionalidad, también sería deseable poder programar una emergencia (aunque sea sencilla), que, como se indicaba en los objetivos, en este libro, no se ajusta a la norma.

Como luego se explica, la implementación de seguridades no es algo trivial ni en lo que respecta al hardware ni en lo que respecta al software.

Finalmente, será necesario conocer los fundamentos de control de procesos en continuo y los sistemas SCADA y HMI, muy relacionados con todos los procesos, pero aún más con dichos procesos en continuo.

9.2. Propuesta de GRAFCET múltiples para modos de marcha en un automatismo sin emergencia ni salvaguardas

En este apartado, se indican los elementos de la propuesta más completa (con todos los GRAFCET) y, posteriormente, se explica la más sencilla para diseñar con GRAFCET el programa de automatización de una máquina (inicialmente, sin emergencia ni salvaguardas).

9.2.1. Algunos supuestos previos

Se realizan determinadas elecciones de diseño en las propuestas que se explican a continuación.

A) Propuestas de GRAFCET sin selectores ni interruptores

En todas las propuestas realizadas, se trabaja con señales monoestables, es decir, con pulsadores sin enclavamiento, sin interruptores ni selectores. La justificación (seguramente discutible) es la siguiente: en caso de que el hardware de un panel de mando o máquina lo tuviera y se estimara adecuado, es fácil implementar el programa igualmente sin más que asignar cada señal a la posición del selector. Sin embargo, el diseño de un GRAFCET, contando con dispositivos de mando con enclavamientos eléctricos y físicos (como interruptores o selectores), haría más compleja su modificación para obtener el mismo comportamiento mediante pulsadores o señales monoestables.

Igualmente, la adaptación a estas propuestas de mando remoto o con señales de una pantalla HMI será más sencilla con señales asimilables a pulsadores.

Solo hay una excepción: la seta de emergencia, que siempre tendrá enclavamiento eléctrico y mecánico y rearme.

B) Uso de flancos en los pulsados de mando

Los pulsadores suelen conectarse a entradas que son condiciones de transición para el paso de una etapa a otra y, muchas veces, su pulsado tiene gran importancia, pues decide (al ser de mando) el comportamiento de la máquina.

Aunque el pulsado de un humano puede parecer rápido, a menudo, dura varias décimas de segundo, pero este tiempo puede ser suficiente para que el autómatas recorra muchas etapas en determinadas circunstancias mientras el botón permanece pulsado. Incluso podría suceder que, en un GRAFCET, hiciera todo el ciclo y volviera a pasar por la etapa previa a la condición del

pulsador mientras aún está pulsado. Esto sería un accionamiento o mando indeseable y, para salvar este inconveniente, en el GRAFCET, se emplean pulsos ascendentes o descendentes del pulsado de los botones de mando. Esto implica que, por ejemplo, con un pulso ascendente, aunque se quedara el operador pulsando a fondo el botón, la señal solo duraría un pulso y, para generar de nuevo dicha señal, habría que liberar el pulsador y volver a pulsarlo.

C) Pulsadores de cualquier tipo de paro, siempre normalmente cerrados

Los pulsadores de cualquier mando que impliquen una parada o fin de modo automático, o cualquier otro paro, deberán ser eléctricamente (por hardware) normalmente cerrados. El motivo es que, si (con dispositivos NA) la señal de paro debe darse con el establecimiento de corriente en la entrada correspondiente, cuando se produzca un corte o desconexión accidental del cable correspondiente al dispositivo de paro, nunca llegará la señal y será imposible realizar dicho paro. Sin embargo, si la señal de paro es la ausencia de tensión o corriente eléctrica en la entrada correspondiente conectada al mando, como es el caso con un pulsador de hardware NC (normalmente cerrado), cuando se produzca dicho corte o desconexión accidental, se producirá el paro de máquina o de la función en cuestión. Este segundo supuesto siempre será más seguro que el primero y, por ello, cualquier botón o pulsador de paro será NC.

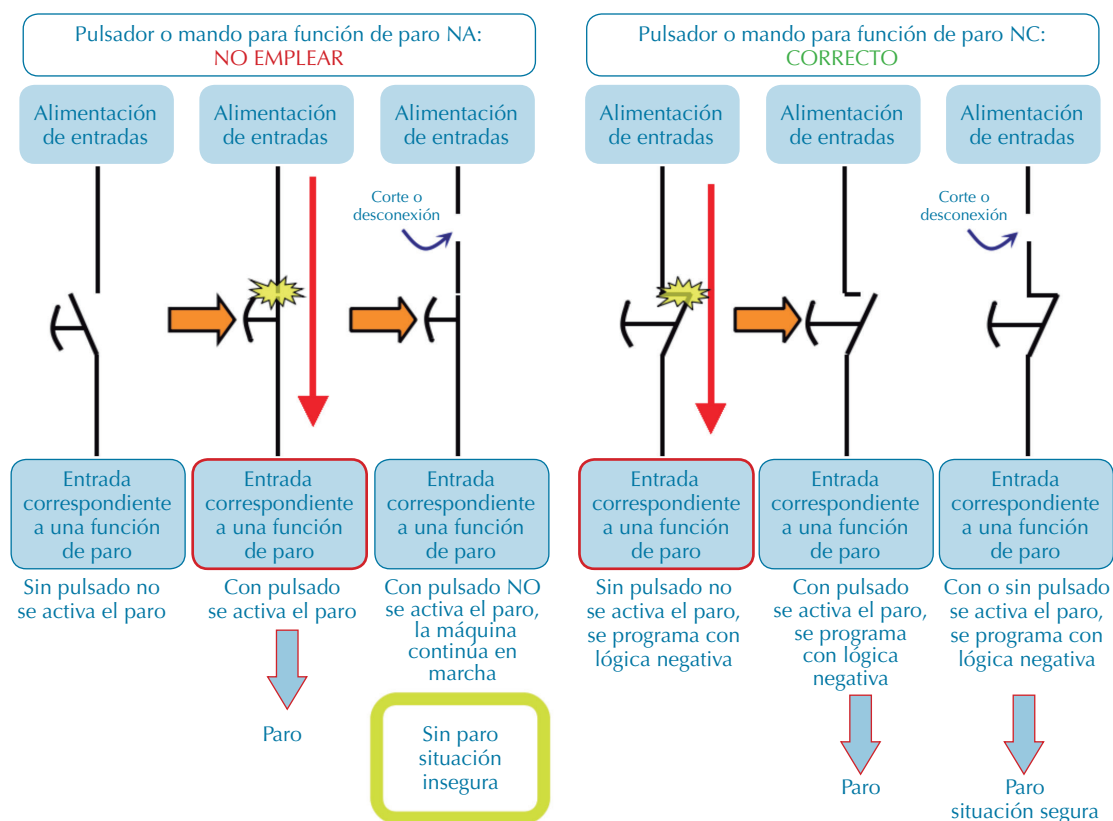


Figura 9.1
Empleo de mandos NC en cualquier entrada con función de paro.

Esta elección se representará junto al GRAFCET para justificar la programación de la variable que corresponde a la entrada del mando NC con lógica negativa (de modo que la activación de la entrada implique un 0 lógico en el programa y la desactivación de la entrada implique un 1 lógico en el programa).

FUNDAMENTAL

Por seguridad, es recomendable instalar mandos NC en los paros. Instalando un mando de paro NA en el esquema eléctrico, se proporciona corriente y ofrece un valor de 1 lógico en la entrada. Sin embargo, si el cable eléctrico tuviera un mal contacto o se cortara, no habría forma de parar la máquina. Al ser NC, si se corta el cable del PFC, la máquina entiende la falta de señal como una orden de paro y lo lleva a cabo.

9.2.2. Planteamiento multi-GRAFCET

A) Estructura modular o de varios GRAFCET

En el diseño del programa mediante GRAFCET, puede optarse por dos estrategias:

1. *Intentar integrar todas las funciones en un único GRAFCET.* Esto solo será posible con secuencias muy sencillas y, aun así, la complejidad de las condiciones de transición será importante. Cuando, en una secuencia de mínima complejidad, comience a haber alternativas, dependencias, lazos, etc., integrar los aspectos indicados (modos de marcha y emergencia) para una funcionalidad de máquina en un GRAFCET único lo convertirán en algo complicado y difícil de manejar y modificar.
2. *Trabajar modularmente con diversos GRAFCET, aislando en ellos tareas, funciones y responsabilidades.* Este modo es el preferido y el que se abordará en este libro, especialmente necesario para los modos de marcha y emergencia. Hace la programación más simple y comprensible, más fácil de probar (pueden probarse funciones aisladas), más modificable y menos dada a errores de programación y a problemas, costosos en el tiempo para desarrollar cualquier automatización. Como único inconveniente, puede mencionarse la necesidad de coordinar o unir correctamente los diversos GRAFCET.

B) Estados de paro y marcha, modos de marcha, reset y emergencia

En un automatismo secuencial, la secuencia se repite habitualmente. Hasta ahora, lo que se ha propuesto en las secuencias estudiadas es, simplemente, la ejecución de un ciclo con el pulsado de un pulsador PM. Para una funcionalidad más completa en la máquina, lo lógico es añadir otras prestaciones o modos de marcha. En conjunto, se proponen las prestaciones recogidas en el cuadro 9.1, incluyendo varios modos de marcha.

Cuadro 9.1**Prestaciones o modos de marcha de la máquina para una funcionalidad completa**

Prestaciones	
<i>Distinción entre máquina conectada y máquina operativa</i>	<p><i>Máquina encendida, pero en paro.</i> Estado de la máquina tras su encendido o activación de un pulsador de paro PP. En este estado, no puede realizar acción alguna (salvo las de emergencia o salvaguarda).</p> <p><i>Máquina encendida y operativa o en marcha.</i> Estado de la máquina encendida, pero en paro, con el pulsado de un botón PM. En este estado y con otro comando (por ejemplo, el de ejecución de modo automático), la máquina comenzará a ejecutar el automatismo según la demanda.</p>
<i>Modo manual o ciclo a ciclo</i>	Para cada repetición del ciclo, es necesario mandar una orden o pulsar un pulsador tras entrar en el estado de máquina encendida y en marcha. Se denominará al bit de esta orden o pulsador MAN. El automatismo iniciará un ciclo y este pulsador, de forma autónoma, se detendrá tras terminar el ciclo.
<i>Modo automático o continuo</i>	Tras entrar en el estado de máquina encendida y en marcha con una orden o pulsado de un pulsador AUT, el ciclo debe mantenerse constantemente en marcha, repitiéndose una y otra vez de forma automática hasta recibir la señal de un pulsador de fin de modo automático FAUT. Tras el pulsado de FAUT, acabará el ciclo en curso y, seguidamente, se detendrá.
<i>Modo paso a paso</i>	Para el ajuste y mantenimientos de la máquina, es necesario que la secuencia no se ejecute a su velocidad normal, sino que pueda ejecutarse acción a acción, dependiendo cada vez de un comando por parte del operador que hace el ajuste, que será una señal o pulsado de un pulsador PPP. Como en todos los casos, será necesario entrar en el estado de máquina encendida y en marcha. Tras realizar la última acción del ciclo, el automatismo quedará preparado de nuevo para iniciar cualquier otro modo de marcha.
<i>Operación de reset o restablecimiento a condiciones iniciales</i>	Se trata de que, en caso de que los elementos de la máquina no estén preparados (por un apagado abrupto o corte de la alimentación en medio del ciclo de proceso), sea posible efectuar las acciones necesarias para que dichos elementos queden listos y vayan a su posición inicial. El objetivo es que la máquina vuelva a estar preparada para funcionar, tras haber entrado en el estado de máquina en marcha. Una vez que terminen las acciones de <i>reset</i> y otras acciones que puedan ser necesarias (condiciones iniciales CI), el automatismo quedará preparado para iniciar cualquier otro modo de marcha.
<i>Disparo de la emergencia</i>	Se realizará con la señal proveniente de una seta de emergencia normalmente cerrada y con enclavamiento o de otro dispositivo de seguridad (aquí se tratará únicamente con la seta de emergencia). Será necesario que el disparo de emergencia tenga prioridad absolutamente sobre todo, que implique la ejecución de acciones por un dispositivo especial y que ponga al automatismo de forma imperativa en el estado que se estime seguro (en este libro, se fuerza a todos los otros GRAFCET a sus etapas iniciales). Solo alcanzando dicho estado seguro y comprobando el rearmado de la seta, quedará la máquina autorizada para un nuevo funcionamiento. El hardware involucrado en la emergencia debe estar compuesto por dispositivos especiales para seguridad, con una fiabilidad y certificación especial. El GRAFCET responsable de la emergencia se añade tras el planteamiento de los modos de marcha y <i>reset</i> inicialmente sin emergencia.

[.../...]

CUADRO 9.1 (CONT.)

Prestaciones	
<i>Salvuardas de máquina y producto</i>	Puede darse el caso de que una situación anómala comprometa la integridad de la máquina o del producto, sin riesgo alguno para las personas. Si se materializa el daño, el coste económico puede ser importante. Para resolver esta situación, se incorpora como última prestación propuesta GRAFCET de salvaguarda de máquina y producto, que tendrá una prioridad alta y capacidad de detener el proceso, pero siempre subordinados a la emergencia, igual que el resto de GRAFCET.

Las propuestas estudiadas en el cuadro 9.1 para hacer más pragmático el funcionamiento de la máquina se distribuyen en estas funciones en siete GRAFCET:

1. *GRAFCET G1 de marcha-paro*. Regula el funcionamiento o paro de la máquina. Requiere entrar en el estado de máquina en estado de marcha para que, en el GRAFCET 2, pueda iniciarse cualquier modo de marcha y para poder realizar la operación de *reset*.
2. *GRAFCET G2 de modos de marcha*. Permite elegir entre los modos de marcha llegando a distintas etapas con divergencia OR según el pulsado de unos botones u otros y, una vez hecha la elección, permitirá las transiciones entre etapas en el GRAFCET 3. Incluye el modo manual, modo automático y modo paso a paso.
3. *GRAFCET G3 de proceso*. En él, se ejecutan las etapas del proceso, incorporando determinados aspectos para que, según haya sido la elección en el GRAFCET 2, la secuencia se comporte de una u otra forma.
4. *GRAFCET G4 de reset*. Sirve para ejecutar las acciones que, en caso de ser necesario, lleven a la máquina a su estado inicial, requerido para ejecutar el proceso.

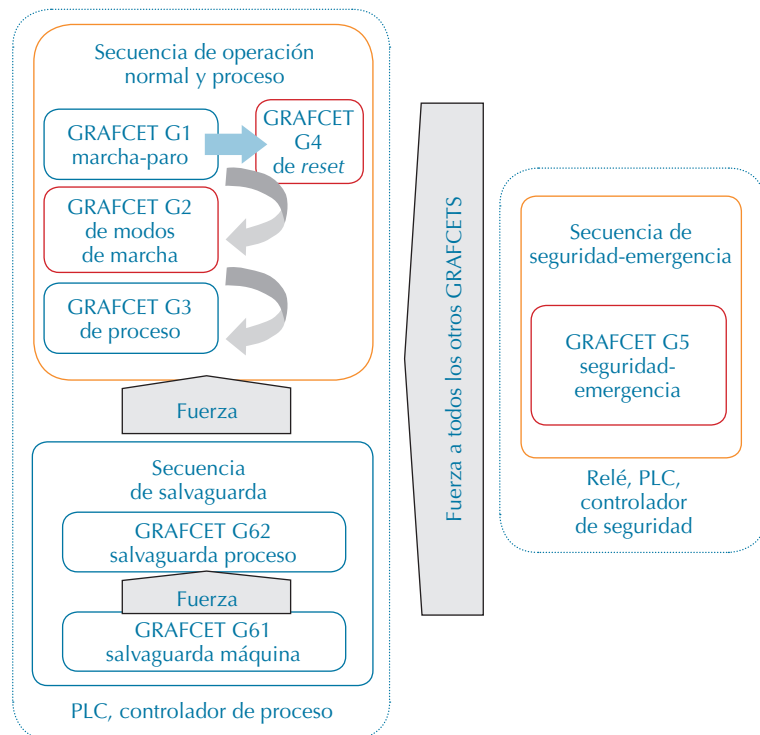


Figura 9.2
Propuesta de GRAFCET
para el automatismo
de una máquina
multi-GRAFCET.

5. *GRAF CET G5 de seguridad-emergencia.* Será el primero en jerarquía y forzará al resto del GRAFCET a las etapas que se considere que dejan en estado seguro a la máquina. Además, puede ejecutar acciones necesarias para la seguridad, que deberían llevarse a cabo por un dispositivo especial homologado para ejecutar seguridades (PLC de seguridad o relé programable de seguridad), que se estudia en el siguiente apartado.
6. *Otros GRAFCET G61 y G62 de salvaguarda de máquina o producto.* Se trata de GRAFCET que se sitúan en jerarquía entre el G5 y el resto, donde, sin considerar que gestionen situaciones que supongan un riesgo para las personas y, por tanto, sin ser de seguridad, pueden tener consecuencias económicas importantes (ruina de la máquina o el producto). Se denominan *G61* y *G62*, donde la salvaguarda de máquina (*G61*) suele estar por encima en jerarquía a la del producto (*G62*).

Todos estos GRAFCET se desarrollan en los siguientes apartados, con una secuencia muy sencilla: 1.0+, 1.0-, 2.0+, 2.0- salida y entrada de dos cilindros, 1.0 y 2.0 con válvulas biestables (dos solenoides por cilindro Y1, Y2 e Y3, Y4).

Se hacen las propuestas de forma progresiva para ofrecer alternativas desde una menor hacia una mayor complejidad:

1. Inicialmente, se proponen los GRAFCET del 1 al 4 para implementar solo modos de marcha (manual, automático y paso a paso) sin emergencia ni salvaguarda de máquina o producto.
2. En el apartado siguiente, se propone la inclusión del GRAFCET G5 de seguridad-emergencia y la adaptación consecuente de los GRAFCET de G1 a G4.
3. Finalmente, se expone la solución con la inclusión de todos los GRAFCET, junto con los de salvaguarda de máquina o producto G61 y G62.

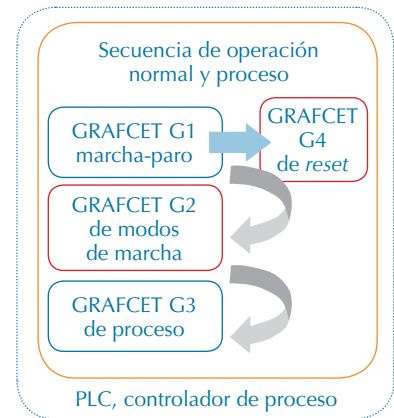


Figura 9.3
Propuesta inicial para un sistema multi-GRAFCET con modos de marcha y sin emergencia ni salvaguardas.

C) Ejecución de forzados

Para implementar los forzados de G5, G61 y G62 sobre el resto de GRAFCET, se opta por dos alternativas, que se explican en cada propuesta:

1. *Alternativa 1: por programación mediante instrucción MOV.* Mueve la cadena binaria correspondiente a las etapas forzadas (las etapas activas valen 1 y las etapas inactivas valen 0) a la zona en la que están direccionadas las etapas. Esta alternativa es la más potente, especialmente si, en una aplicación particular, no desean forzarse etapas iniciales, sino cualesquiera otras.
2. *Alternativa 2: implementar forzado en GRAFCET.* Implementar caminos hacia las etapas iniciales desde cualquier punto de los GRAFCET con la emergencia. Generar estos caminos en los GRAFCET y, además, indicar el forzado en los GRAFCET y etapas que fuerzan (resulta redundante, pero, aun así, es preciso indicar dichos forzados).



En el anexo web 9.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás un ejemplo sobre forzado mediante instrucción MOV.

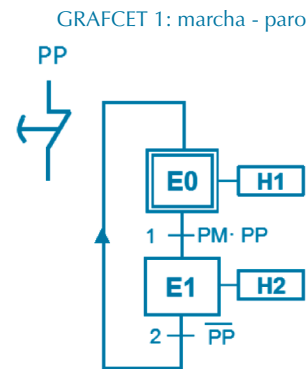
9.2.3. GRAFCET 1 de marcha (máquina en servicio) y paro sin emergencia ni salvaguarda

En este apartado, intenta conseguirse este propósito de forma sencilla empleando solo dos etapas E0 y E1, de modo que E0 corresponde al estado de paro y E1, al estado de marcha. Como habitualmente, será necesario implementar el PP cableado NC e incluirlo como transición hacia E1 para que prevalezca el paro sobre la marcha en caso de ser simultáneamente PM y PP pulsados.

Este GRAFCET determina si la máquina está en modo de marcha o no. Cuando se pulse PM (y PP, NC no esté pulsado, prioridad al paro), se pasará a E1, etapa cuya activación se incluirá en las transiciones primeras del GRAFCET siguiente (el de modos de marcha). E1 será, entonces, requisito para poder entrar en cualquier modo de marcha programado.

Opcionalmente, pueden asociarse acciones a las etapas vinculadas con la señalización de cada estado (pilotos H1 y H2).

A partir de este punto, en los siguientes GRAFCET, se omitirá la numeración de condiciones de transición que les correspondería para simplificar su representación.



H1 = piloto de señalización de estado de paro
H2 = piloto de señalización de estado de marcha

Figura 9.4

GRAFCET de marcha-paro sin emergencia ni salvaguarda de máquina o producto.



Actividad resuelta 9.1

Realiza las ecuaciones y diagrama de contactos del GRAFCET G1 de marcha-paro sin emergencia ni salvaguardas.

Ecuaciones:

Etapas:

$$E0 = \text{START} + E1 \cdot \overline{PP} + E0 \cdot \overline{E1}$$

$$E1 = E0 \cdot PM \cdot PP + E1 \cdot \overline{E0}$$

Salidas:

$$E1 = H1$$

$$E2 = H2$$

Diagrama de contactos:

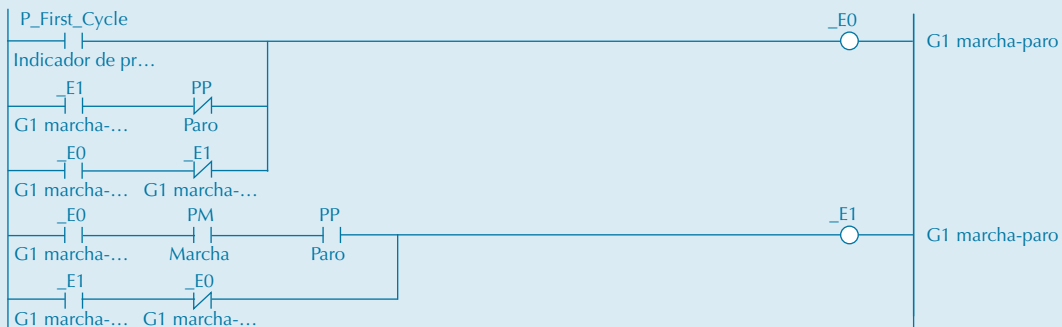


Figura 9.5

Diagrama de contactos de etapas de G1 sin emergencia ni salvaguardas.

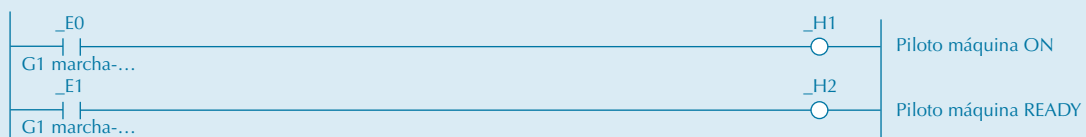


Figura 9.6

Diagrama de contactos de salidas de G1.

9.2.4. GRAFCET 2 o de modos de marcha sin emergencia ni salvaguardas

En la etapa E3 de G2, según el botón que se pulse, se activa cada uno de los modos de marcha y se entra en las etapas E4, E5 o E6. En estas primeras transiciones, se exige que el GRAFCET 1 esté en modo de marcha o funcionamiento multiplicando por E1 (necesariamente, la etapa E1 de G1 debe estar activa) y que el GRAFCET 3 de proceso y el GRAFCET 4 de *reset* estén ambos en la etapa inicial, por lo que la condición también está multiplicada por E10 y por E400 (no ha de poder entrarse en un modo de marcha de otra manera).

Cada una de las etapas que implican el funcionamiento en cada modo de marcha E4, E5 y E6 serán desactivadas por:

- E4: la última etapa del GRAFCET G3 de proceso o E0 si se sale del estado de marcha en G1.
- E5: el pulsado del pulsador FAUT de fin de modo automático o E0 si se sale del estado de marcha en G1.
- E6: la última etapa del GRAFCET G3 de proceso o E0 si se sale del estado de marcha en G1. Atención: en el caso de salir de E6 (modo paso a paso) con el pulsado de E0, la secuencia se ejecutará sin depender del pulsado de PPP hasta acabar el ciclo. Por este motivo, se sitúa entre paréntesis. Si este comportamiento no se desea, puede omitirse E0 en esta condición. Para salir del modo de paso a paso en caso de haber alguna irregularidad y que no llegara a la última etapa, habría que recurrir a la activación de los GRAFCET de salvaguarda o apagar y encender la máquina y, posteriormente, hacer un *reset*.

GRAF CET 2: modos de marcha

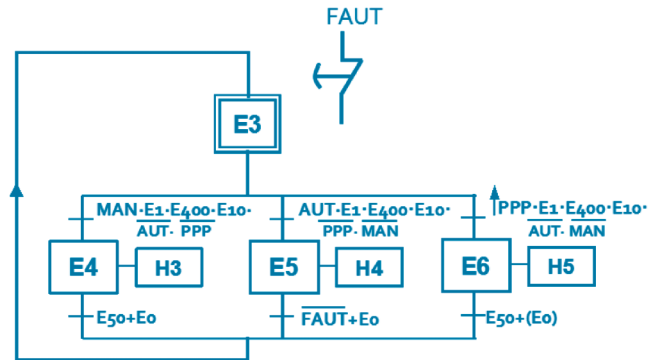


Figura 9.7
GRAF CET G2 de modos de marcha sin emergencia ni salvaguardas.

E50 = última etapa de G3
 H3 = piloto de señalización de modo manual
 H4 = piloto de señalización de modo automático
 H5 = piloto de señalización de modo paso a paso



Actividad resuelta 9.2

Desarrolla las ecuaciones de las etapas del GRAFCET G2 de modos de marcha sin emergencia ni salvaguardas para un proceso cuya última etapa de G3 es E50.

Ecuaciones:

Etapas (E50 es la última etapa):

$$E3 = START + E4 \cdot (E50 + E0) + E5 \cdot (\overline{FAUT} + E0) + E6 \cdot (E50 + E0) + E3 \cdot \overline{E4} \cdot \overline{E5} \cdot \overline{E6}$$

$$E4 = E3 \cdot (MAN \cdot \overline{E1} \cdot \overline{E400} \cdot \overline{E10} \cdot \overline{AUT} \cdot \overline{PPP}) + E4 \cdot \overline{E3}$$

$$E5 = E3 \cdot (AUT \cdot \overline{E1} \cdot \overline{E400} \cdot \overline{E10} \cdot \overline{MAN} \cdot \overline{PPP}) + E5 \cdot \overline{E3}$$

$$E6 = E3 \cdot (\overline{PPP} \cdot \overline{E1} \cdot \overline{E400} \cdot \overline{E10} \cdot \overline{AUT} \cdot \overline{MAN}) + E6 \cdot \overline{E3}$$



Actividad propuesta 9.1

Diseña el diagrama de contactos del GRAFCET G2 de modos de marcha (sin emergencia ni salvaguardas).

9.2.5. GRAFCET 3 o de proceso sin emergencia ni salvaguardas

Tras encender la máquina, todas las etapas iniciales (E0, E3, E10 y E400, más E500, E61, E62 cuando posteriormente se incluyan emergencia y salvaguarda) se activan con bit de START u otro mecanismo. Activando o pulsando PM pulsador de marcha, se pasa a E1. E1 queda activa hasta que se pulse PP pulsador de paro, requisito imprescindible para que puedan activarse E4, E5 o E6.

A) Condiciones iniciales

En el inicio del GRAFCET G3 de proceso, debe estar activa alguna de las etapas correspondientes a modos de marcha y, además, que se cumplan las condiciones iniciales. Estas condiciones son el conjunto de sensores que verifican que todos los elementos de la máquina están en la situación adecuada para el inicio de la secuencia. Puede haber circunstancias en las que todas estas condiciones están al alcance del automatismo, por ejemplo, en el caso de movimientos de cilindros neumáticos. Puede, sin embargo, haber situaciones en las que haga falta alguna acción externa, como una señal de otro autómeta, robot o una validación manual del operario. En adelante y por simplicidad, se tratará a CI como el producto de los sensores que verifican las posiciones correctas de inicio de los elementos accionados por el automatismo (en este ejemplo, los finales de carrera 1S1 y 2S1).

B) BP: bit o marca de paso

Tras la etapa primera, en el GRAFCET 3, se desarrolla el proceso ejecutado, con la salvedad de que, en cada etapa, se incluye un bit que permite regular su funcionamiento. Tal como se construye dicho bit BP (bit o marca de paso), la transición entre etapas en G3 se permite por BP:

- Cuando no se ha activado el modo de paso a paso (etapa 6 negada), con lo que ocurrirá normalmente en los modos manual y automático.
- Cuando sí se ha activado el modo de paso a paso (etapa 6 activa) y, además, se registra un flanco de subida del pulsador PPP para realizar cualquier movimiento. Este sumando del bit BP exige que, cuando está el modo paso a paso activo, haya que pulsar PPP para cada movimiento.

Lo lógico es agrupar en el bit BP este elemento repetitivo que garantiza los modos de funcionamiento en las transiciones de las etapas:

$$BP = \overline{E6} + E6 \cdot \uparrow PPP$$

Los flancos de subida en PPP impiden que, en etapas sucesivas muy rápidas, un único pulsado humano (que puede durar décimas de segundo) permita la transición de varias etapas. Con el flanco (cambio de estado de 0 a 1), se obliga a que, para el paso de unas etapas a otras, sea necesario dejar de pulsar y tener que volver a hacerlo.

Un detalle importante es la penúltima etapa, en la que no se incluirá la marca o bit de paso BP, sino:

$$E6 + E6 \cdot \downarrow PPP$$

GRAFCET 3: proceso

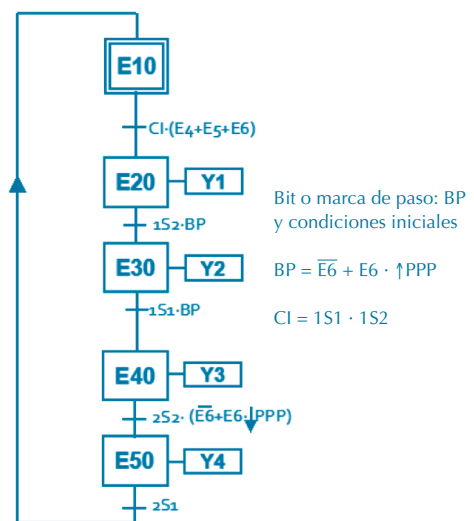


Figura 9.8
GRAFCET G3 de proceso
sin emergencia ni salvaguardas.

Cuyo único matiz es que el flanco de PPP, en este caso, es de bajada. El motivo es evitar que, con el último pulsado de PPP y una posible última etapa instantánea en G3 con última condición de transición verdadera (valor 1), el flanco de subida de PPP en G2 vuelva a entrar (involuntariamente) en el modo de paso a paso, sin poder salir de dicho modo.



Actividad resuelta 9.3

Elabora las ecuaciones de etapas y su diagrama de contactos del GRAFCET G3 de proceso de la secuencia 1.0+, 1.0-, 2.0+, 2.0- (del ejemplo empleado hasta ahora).

Ecuaciones:

Etapas (E50 es la última etapa):

$$E10 = \text{START} + E50 \cdot 2S1 + E10 \cdot \overline{E20}$$

$$E20 = E10 \cdot CI \cdot (E4 + E5 + E6) + E20 \cdot \overline{E30}$$

$$E30 = E20 \cdot 1S2 \cdot BP + E30 \cdot \overline{E40}$$

$$E40 = E30 \cdot 1S1 \cdot BP + E40 \cdot \overline{E50}$$

$$E50 = E40 \cdot 2S2 \cdot (E6 + E6 \cdot \downarrow\text{PPP}) + E50 \cdot \overline{E10}$$

Marcas:

$$BP = \overline{E6} + E6 \cdot \uparrow\text{PPP}$$

$$CI = 1S1 \cdot 2S1$$

Diagrama de contactos:

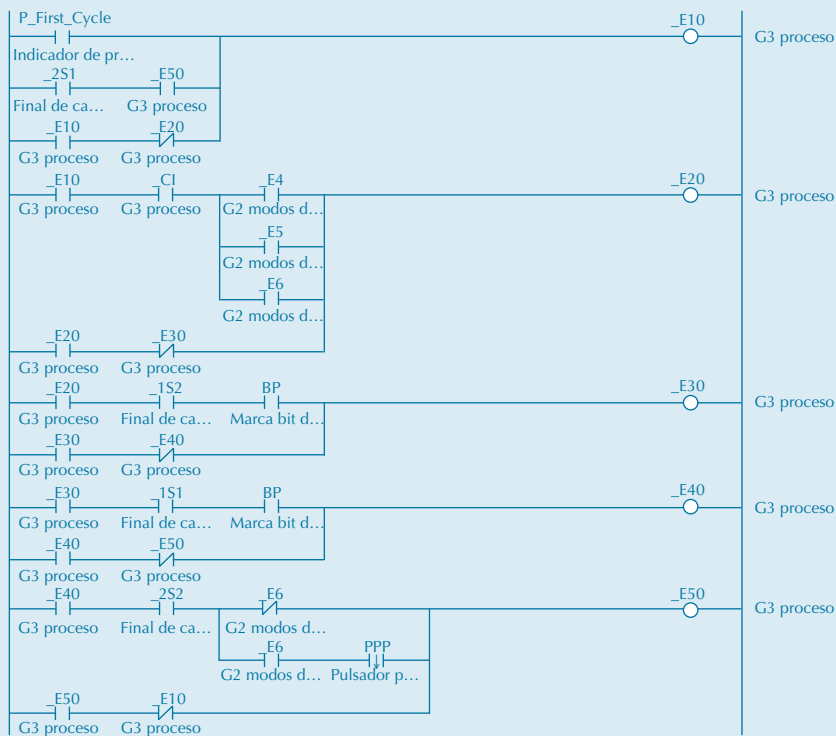


Figura 9.9

Diagrama de contactos de etapas de G3 sin emergencia ni salvaguarda.

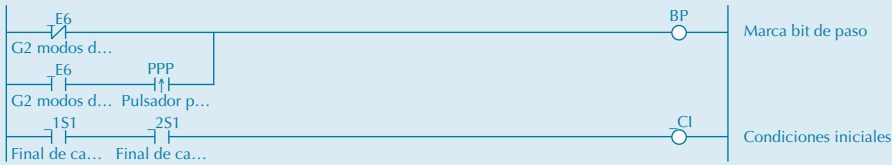
**Figura 9.10**

Diagrama de contactos de marcas de G3 sin emergencia ni salvaguarda.

Actividad propuesta 9.2



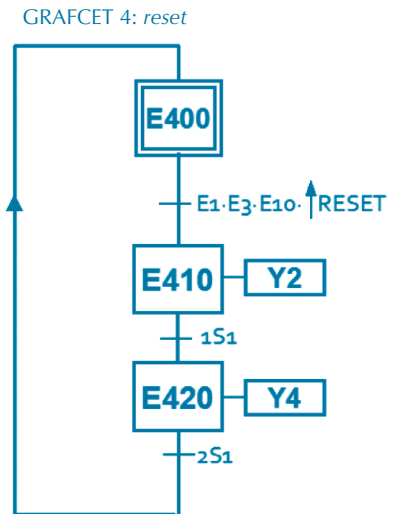
Determina el GRAFCET G3 de proceso de la secuencia 1.0+, [2.0-, 3 s de espera, 2.0+, todo esto 3 veces], 1.0-, las ecuaciones de etapas y el diagrama de contactos de las etapas.

9.2.6. GRAFCET 4 o de *reset* sin emergencia ni salvaguardas

Este GRAFCET tendrá como objetivo único preparar a la máquina para su funcionamiento llevando todos los elementos a su situación inicial y necesaria tras una parada abrupta por corte de alimentación. Según el automatismo, puede requerir acciones complejas o muy sencillas como, en el ejemplo propuesto, donde, simplemente, se llevará el cilindro 1.0 a su posición inicial y, posteriormente, el cilindro 2.0.

Como exigencia para su arranque desde su etapa inicial E400, aparte del pulsado de RESET (flanco de subida), el G1, G2 y G3 deberán estar en sus etapas iniciales E1, E3 y E10 (el automatismo debe estar en estado de marcha, sin modo de marcha activo y sin proceso activo). Por lo tanto, la condición de inicio desde E400 se multiplica por E1, por E3 y por E10 (no ha de poder entrarse en las acciones de *reset* de otra manera). Se ha implementado la salida de cualquier modo de marcha con el pulsado del paro (activación de E0). Esto dejará a G3 en cualquier etapa (no en E10, exigido para ejecutar el *reset*). Por ello, para hacer el *reset* en esta situación, será necesario apagar y encender la alimentación de la máquina o efectuar un forzado con emergencia o salvaguardas. Existe la opción de eliminar E10 de los requisitos para el disparo de *reset*, pero eso implica la posibilidad de que, accidentalmente, se pulse en medio de la secuencia con consecuencias indeseables.

El flanco de subida del pulsado de RESET, se justifica porque puede darse el caso de que las acciones de *reset* sean algo tan corto como la simple puesta a cero de una zona de datos, reseteo de contadores o temporizadores o enclavamientos, especialmente si son remanentes. Por tanto,

**Figura 9.11**

GRAFCET G4 de *reset* sin emergencia ni salvaguarda.

la duración de un pulsado podría activar más de una vez la secuencia de *reset* (probablemente nada grave, pero evitable con un simple flanco).

Para salir de la última etapa del GRAFCET 4 de *reset*, la marca CI de condiciones iniciales debe ser cierta (hay que recordar que CI puede incluir la condición de alguna operación externa como, por ejemplo, algo que deba completar el operario, siendo CI una condición más completa que aquello que pueda abarcar el automatismo).



Actividad propuesta 9.3

Indica el diagrama de contactos de las etapas del GRAFCET G4 de *reset* programando en SET-RESET el retorno a la posición inicial de ambos cilindros en una etapa (correspondiente al ejemplo tratado hasta ahora 1.0+, 1.0-, 2.0+, 2.0-).



Actividades resueltas

9.4. Realiza las ecuaciones del G4 de *reset* del ejemplo de la figura 9.11 y el diagrama de contactos.

Ecuaciones:

Etapas:

$$E400 = \text{START} + E420 \cdot 2S1 + E400 \cdot \overline{E410}$$

$$E410 = E400 \cdot E1 \cdot E3 \cdot E10 \cdot \uparrow \text{RESET} + E410 \cdot \overline{E420}$$

$$E420 = E410 \cdot 1S1 + E420 \cdot \overline{E400}$$

Diagrama de contactos:

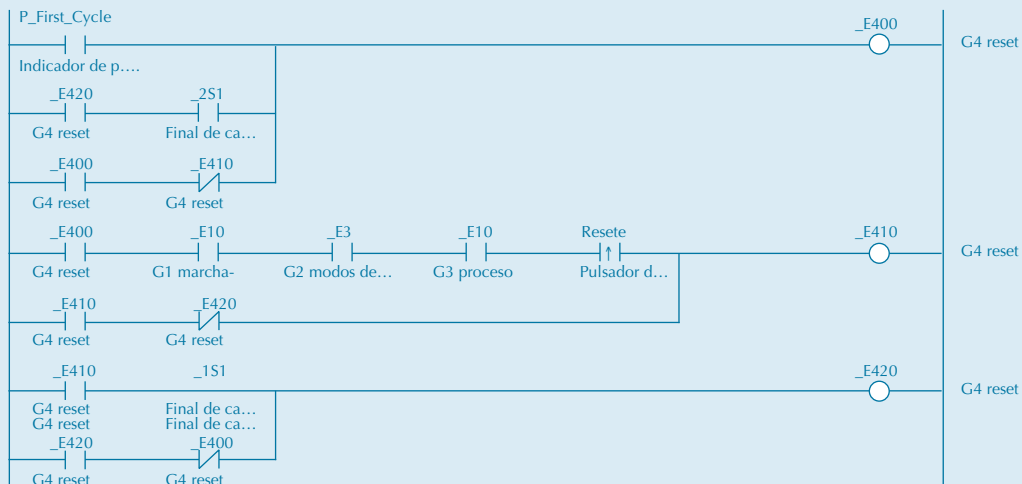


Figura 9.12

Diagrama de contactos de las etapas de G4 sin emergencia ni salvaguarda.

9.5. Desarrolla las ecuaciones y el diagrama de contactos de las salidas del ejemplo tratado hasta ahora (1.0+, 1.0-, 2.0+, 2.0-).

Ecuaciones:

Salidas:

$$E0 = H1$$

$$E1 = H2$$

$$E4 = H3$$

$$E5 = H4$$

$$E6 = H5$$

$$E20 = Y1$$

$$E30 + E410 = Y2$$

$$E40 = Y3$$

$$E50 + E420 = Y4$$

Diagrama de contactos:



Figura 9.13

Diagrama de contactos de las salidas para G1, G2, G3 y G4 en la propuesta de modos de marcha sin emergencia.

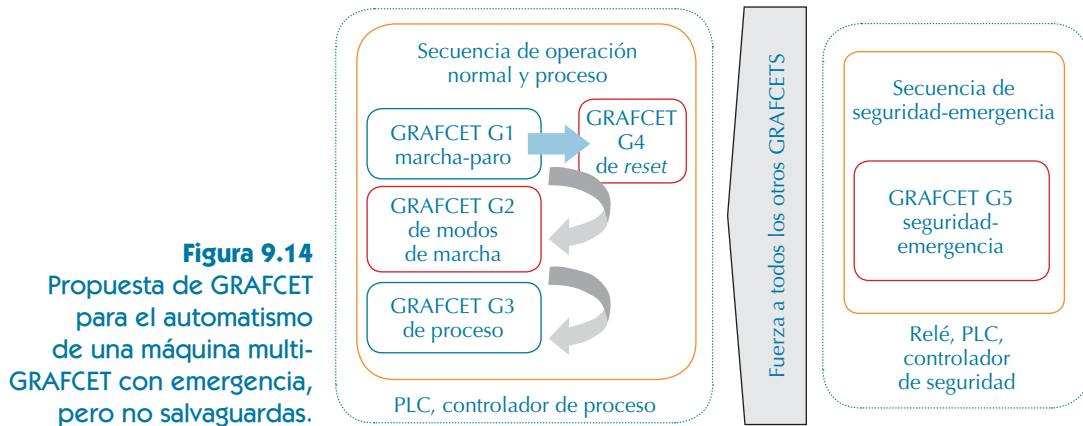
9.3. Propuesta de GRAFCET múltiples para modos de marcha en un automatismo con emergencia

En las soluciones de automatización basadas en GRAFCET que se han visto hasta ahora, no se ha abordado la emergencia. En el caso de una emergencia, existe la necesidad de realizar acciones inmediatas y que deben tener lugar con absoluta prioridad sobre el resto de acciones posibles de la automatización. En este apartado, va a hacerse una propuesta para la estructura e implementación de una emergencia. No es un planteamiento legal ni conforme a la norma, pues, para cualquier aproximación, se requiere el estudio de la normativa y su aplicación estricta para el caso concreto de cada máquina, aparte de seguir con todos los procesos reglamentarios de validación y homologación legal. El planteamiento ofrece una propuesta de partida para diseñar el programa de automatismos sencillos a partir de GRAFCET con emergencia.

También se ofrece aquí la visión de la complejidad y responsabilidad que supone la implementación de la emergencia tanto en hardware como en software.

Por último, es preciso indicar que todos los programas (diagrama de contactos) mostrados en los ejemplos y actividades resueltas, incluyendo el de G5, se realizarán sobre un único PLC

ordinario. En el caso de disponer de un PLC de seguridad, este debería gestionar G5 y establecer una conexión entre ambos para su coordinación.



RECURSO ELECTRÓNICO 9.2



En el anexo web 9.2, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás la normativa de seguridad en automatismos y algunos conceptos relacionados.

9.3.1. Cómo se relacionan las normas técnicas con la legalidad europea (mercado CE para comercialización) de una máquina

Para el mercado CE de una máquina, se sigue un procedimiento con el objeto de cumplir lo indicado en el Real Decreto 1644/2008, que transpone la Directiva Europea 2006/42/CE.

En el procedimiento, se incluye el acogimiento voluntario por parte del fabricante a las normas armonizadas. Aunque el acogimiento es voluntario, se recomienda por el procedimiento, ya que, de otro modo, la homologación resulta más compleja (por ello, se emiten las normas).

Al cumplir las normas armonizadas relacionadas con la máquina homologada, se presume que se cumple la directiva europea (y se obtiene el mercado CE).

Las normas armonizadas constituyen un extenso listado (indicado en el *Diario Oficial de la Unión Europea* 2014/C220/01), en el que se incluyen las normas técnicas mencionadas.

Por tanto, la importancia de las normas técnicas alcanza prácticamente el rango legal, especialmente importante en el área de la seguridad. Además, puede haber reglamentos adicionales que también haya que cumplir. Como ejemplo con rango de ley, en España, pueden mencionarse los reales decretos tales como:

- Real Decreto 1215/1997: equipos de trabajo. Disposiciones mínimas de seguridad y de salud.
- Real Decreto 444/1994: aparatos que pueden crear perturbaciones electromagnéticas.
- Real Decreto 2486/1994: recipientes a presión simples.
- Real Decreto 1836/1999: reglamento de instalaciones nucleares y radioactivas.

- Real Decreto 1644/2008: normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas
- Directivas europeas (Directiva 2006/42/CE).

9.3.2. Certificación de un sistema compuesto de diversos elementos

Cuando hay que integrar un conjunto compuesto por diferentes elementos, la máquina o el sistema completo integrado debe ser auditado y certificado como un todo por parte de organismos de control autorizados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) si la reglamentación así lo exige. Es decir, cuando son parte de un sistema integrado, no basta con el cumplimiento de estas normas de máquinas y elementos del sistema de control y de los sistemas responsables de las funciones de seguridad individuales.

El ejercicio de diseño de un automatismo y su programa, en lo que respecta a su funcionamiento y seguridad, incluyendo emergencia, que deberá respetar las pautas indicadas en la reglamentación, normativa y estándares relacionados con la máquina, no es algo nada trivial. Requiere un estudio de riesgos y el trabajo de técnicos expertos con conocimiento profundo de:

1. Prevención de riesgos de maquinaria.
2. La normativa de seguridad en máquinas respecto a:
 - a) El diseño de la propia máquina.
 - b) Los sistemas y elementos de seguridad.
 - c) El software y programación de la seguridad.
3. La máquina y los procesos automatizados (tecnología específica de la máquina concreta).

Por último y no menos importante, el uso de dispositivos y maquinaria (hardware) certificados de seguridad no garantiza una seguridad del sistema de control. Todo el sistema tiene que ser auditado y certificado como un todo por parte de organismos de control autorizados por la ENAC si la reglamentación así lo exige.

9.3.3. Hardware de control en seguridad y emergencias y ámbito de aplicación

Ya se ha visto que el diseño y la implementación de una automatización para una máquina real son muy complejos, pues, en el caso de la seguridad y emergencia, requiere un trabajo estricto conforme a la normativa.

También se ha visto que un PLC es el sistema de control protagonista a la hora de realizar las labores de control de proceso.

A) Circuito de emergencia-seguridad

En caso de implementar los sistemas de emergencia, aparece el concepto de *circuito de emergencia-seguridad*, que debe ser gestionado por un elemento de seguridad.

Se trata de un circuito eléctrico o electrónico que es capaz de realizar funciones de seguridad abortando el accionamiento de actuadores peligrosos y realizando otras acciones necesarias a partir de la señal de una situación de emergencia o de falta de seguridad y que, además, está realizado con dispositivos especiales diseñados para una mayor fiabilidad y operación correcta incluso frente a fallos internos o externos.

Estos circuitos se catalogan en cuatro categorías según la complejidad requerida (tipo de respuesta o prestaciones, cantidad de canales de dispositivos de seguridad controlados, etc.) y, en función de ello, deberá seleccionarse un dispositivo más sencillo como un simple relé de seguridad o uno más complejo como un PLC o controlador de seguridad.

En cualquier caso, en la distribución de tareas del planteamiento de una automatización, las funciones de control de seguridad (por ejemplo, de seguridad derivadas de una emergencia) no deben dejarse a un dispositivo estándar (como un PLC estándar de control de procesos), sino que deben realizarse por los dispositivos mencionados que poseen una certificación de uso para funciones de seguridad por mayor fiabilidad y que los convierte en aptos para la responsabilidad que conllevan estas tareas.

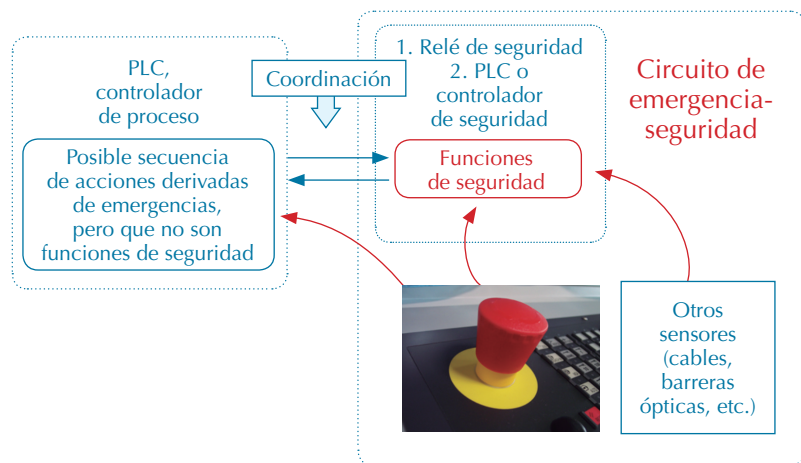


Figura 9.15
Circuito de emergencia-seguridad y coordinación de PLC seguridad-PLC proceso.

B) Relés y controladores de seguridad

Los dispositivos responsables mencionados son relés de seguridad, relés programables de seguridad y controladores de seguridad específicos para las emergencias y funciones de seguridad. Son dispositivos con los más altos niveles PL y SIL según EN ISO 13849-1 y EN IEC 62061.

Hay alternativas de dispositivos en función de la complejidad de las funciones de seguridad y emergencia y su circuito.

1. Relés de seguridad

Un circuito de emergencia sencillo puede realizarse simplemente con relés de seguridad simples. Son relés de comportamiento especial, a veces con circuitería electrónica, que gestionan la señal desde uno o varios dispositivos de seguridad de personas o de mando de emergencia (seta, barreras, tapices sensibles, etc.) para gestionar la desenergización de preactuadores o directamente de elementos de potencia en el esquema de potencia y proporcionar señal a otro dispositivo. Tienen propiedades particulares:

- a) Contactos de guiado forzado (requisito de UNE-EN 61810-3:2015), que son excluyentes incluso en situación de falta o soldado de los contactos. En ellos, un contacto NC y otro NA nunca pueden estar al unísono abiertos o cerrados porque uno de ellos quede soldado. Esta situación podría comprometer la función de seguridad del relé, por ejemplo, en un circuito de seguridad que emplee ambos contactos o para desenergizar las salidas o desconectar una carga tras el pulsado de la emergencia. Se diseñan con contactos forzados a abrir y cerrar mediante una guía conectada directamente al accionamiento del solenoide. Si se suelda un NA, un NC no se cerrará, aunque se desenergice el solenoide, dejando un espacio de al menos 0,5 mm. Igualmente, si un contacto NC suelda, un contacto NA no se cerrará al energizar el solenoide y deberá mantener, al menos, 0,5 mm de espacio entre contactos.
- b) Están diseñados mediante circuitería interna para que una falta o falla interna o externa no elimine la ejecución de la función de seguridad, con diseño de autocontrol (supervisión de fallos del dispositivo y circuitos que salvan dichos fallos) y redundancia de elementos (para minimizar la posibilidad de fallo).
- c) Pueden trabajar con uno o varios canales conectados a varios elementos de seguridad.
- d) Suelen requerir una señal de rearme o *reset* tras saltar la seguridad, que puede ser manual o automático.
- e) Presentan varias categorías según prestaciones frente a seguridades (canales disponibles y comportamientos).

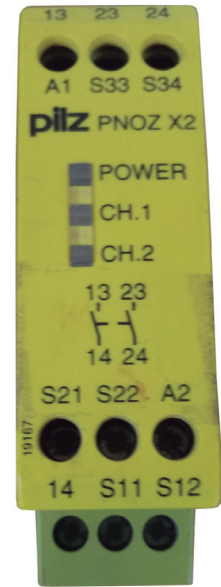


Figura 9.16
Relé de seguridad.

2. Controladores de seguridad, PLC de seguridad

Cuando las funciones son más complejas, existen controladores de seguridad, desde relés programables de seguridad con capacidad de realizar maniobras y gestionar varios circuitos de seguridad (cuando, aparte de la seta, hay otros dispositivos de emergencia) hasta PLC de seguridad cuando se requieren muchos canales de seguridad y funciones más complejas.

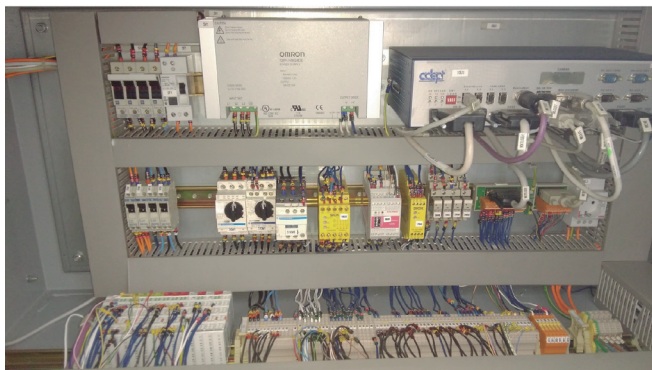


Figura 9.17
Relés de seguridad
(dispositivos amarillos)
integrados en un cuadro
eléctrico de un automatismo.

C) PLC de seguridad

El PLC de seguridad es un dispositivo en el que se ha supervisado, de forma aún más intensa que en un PLC ordinario, el software, hardware y diseño del sistema para asegurar que no haya fallos en el funcionamiento del dispositivo.

El código fuente de *firmware* y software de configuración es auditado y verificado según las prácticas de la industria informática para la generación de código 100% fiable. Todas estos procesos de auditoría y certificación son largos y costosos, por lo que los fabricantes restringen las funciones de los dispositivos a las requeridas para la seguridad (a menudo, se recortan las prestaciones del producto para reducir la cantidad de código o software que necesita ser auditado y reducir la posibilidad de tener que volver a auditar en actualizaciones de *firmware* o software).

TOMA NOTA



Los PLC de seguridad están diseñados para integrar sistemas con otros dispositivos de seguridad y para realizar funciones de seguridad en caso de emergencia o detección de riesgo y no para control de procesos. Por esta especialización, también pueden disponer de menos prestaciones que un PLC de control normal.

Aparte de la supervisión de diseño de hardware, un PLC de seguridad utiliza la redundancia en todo su diseño de hardware para minimizar la posibilidad de fallos de fiabilidad frente a un PLC normal. Por ejemplo, electrónica duplicada en procesamiento, entrada-salida, etc.

Un PLC de seguridad dispone de certificación según normas para garantizar niveles PL y SIL. Al ser menor su demanda, existe menor disponibilidad y oferta, por lo que también resultan más costosos. Suelen ser de color rojo o amarillo.

D) Otros dispositivos de seguridad

Existen otros dispositivos involucrados, particularmente sensores y elementos de mando, que también tienen una consideración de hardware especial y las certificaciones mencionadas debido a su uso en funciones de seguridad. Por ejemplo, setas para paradas de emergencia, cables para paradas de emergencia, interruptores y selectores de seguridad, pedales de seguridad, mandos sensitivos para accionamiento, mandos de accionamiento doble, cerraduras de seguridad y dispositivos de control de acceso, elementos de señalización (lumínica y acústica) y dispositivos de seguridad de detección de presencia (de personas) para evitar intrusiones en zonas peligrosas o que generen riesgos.

Entre los dispositivos de seguridad de detección de presencia, cabe destacar sensores de barrera y barreras optoelectrónicas o cortinas de luz, escáneres láser de seguridad, sensor de seguridad de detección de manos, tapetes o alfombras de seguridad y flancos sensitivos de seguridad (sensores lineales que detectan el contacto).

E) Ámbito de actuación

El PLC ordinario realizará todas las funciones de control normal del proceso y aquellas del proceso derivadas de una actuación de seguridad o emergencia, pero que no correspondan a

acciones de emergencia. Por ejemplo, el PLC podrá comunicarse con la central de control para indicar una situación de emergencia o para desenergizar salidas y preactuadores no involucrados en seguridad (para detener maquina), pero, si la emergencia implica la necesidad por seguridad de un sistema de extinción de incendios o movimientos específicos como parte de la actuación segura, el disparo de dicho sistema y estos movimientos estarán a cargo de un PLC de seguridad.

La comunicación de la emergencia al PLC ordinario debe darse siempre, por tanto y normalmente, también el PLC ordinario comunicará al PLC de seguridad las acciones que ha de ejecutar conforme al procedimiento establecido (secuencia no de funciones de seguridad que el PLC ordinario ejecute en caso de emergencia). El PLC de seguridad también informará al PLC ordinario del progreso de las funciones de seguridad y del estado en el que queda la máquina o el sistema.



RECURSO ELECTRÓNICO 9.3

Ya se ha indicado anteriormente que la implementación concreta de las funciones de seguridad y emergencia requiere análisis y estudios complejos y realizados por personal especializado en el área de procesos, maquinaria y seguridad y prevención, dentro del marco de toda la normativa técnica y legal. Aparte de requerir una maquina específica objetivo, estudiar correctamente esta implementación de forma rigurosa está fuera del alcance y capacidades de este libro y estos estudios. En el anexo web 9.3 (disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro), encontrarás información detallada sobre la implementación de la emergencia como propuesta de partida y solución simplificada.

Seguidamente, también se proponen GRAFCET adicionales de salvaguarda.

9.4. Control de procesos continuos y controladores PID

En este apartado, se hace una aproximación a un control industrial muy importante y, al mismo tiempo, muy diferente respecto a lo estudiado hasta ahora en procesos secuenciales. Los procesos secuenciales, cuya automatización ya se ha abordado de forma básica, presentan cambios o acciones significativas instantáneamente o en un corto periodo de tiempo, marcando unas claras etapas.

El concepto fundamental que diferencia a los procesos continuos de los secuenciales es que no hay cambios significativos que puedan marcar etapas, sino que los cambios se dan de forma continua a lo largo del tiempo.

9.4.1. Modelado de sistemas continuos por Laplace

Como acaba de explicarse, los procesos continuos son dependientes de forma continua del tiempo y, por tanto, aparece dicha variable en las ecuaciones que los representan. Es decir, se modelizan con ecuaciones dependientes del tiempo.

Sus parámetros medidos (ya sean de las entradas, del interior del proceso, de posibles perturbaciones o de la salida) también se expresan como ecuaciones dependientes del tiempo y forman parte del modelo o ecuación matemática.

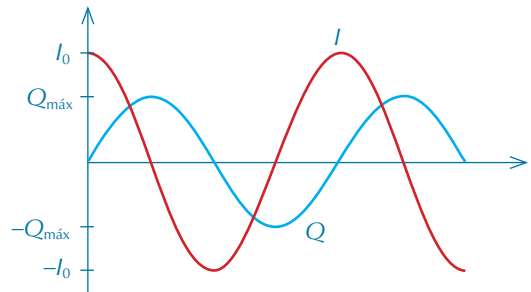


Figura 9.18
Curvas variables con el tiempo de carga del condensador e intensidad en un circuito LC.

A) Ecuaciones de sistemas físicos o procesos modelados con ecuaciones (a veces diferenciales) dependientes del tiempo

Además, a menudo las ecuaciones que modelizan los sistemas continuos son ecuaciones diferenciales (con derivadas de variables respecto al tiempo).

En la figura 9.19, se muestra un sistema mecánico. En cualquier sistema, se cumple que el sumatorio de fuerzas es igual a 0.

$$\sum F_i = 0$$

Sumando las fuerzas involucradas y con las leyes de su funcionamiento (en este caso, la ley física de sumatorio de fuerzas es nula) se obtiene el modelo del sistema (ecuación diferencial en función del tiempo):

$$m \cdot \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + B \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x = F(t)$$

El lado izquierdo es la suma de fuerzas que actúan sobre el bloque con masa m y el término $F(t)$ a la derecha de la igualdad es la fuerza aplicada F que tiene siempre dirección contraria a las otras en este ejemplo. Si se pasara todo a uno de los dos lados de la igualdad, en el otro lado, el resultado sería 0, como efectivamente indica la ley física. El primer término se debe a la aceleración sufrida por la masa (donde m es la masa), el segundo es la amortiguación del amortiguador (donde B es la constante de amortiguación), el tercero es la fuerza ejercida por el muelle y el término a la derecha la fuerza ejercida $F(t)$.

Un ejemplo podría ser el sistema del ejemplo previo, donde deseará preverse para su control la posición x , que sería la salida del sistema en función de la fuerza aplicada $F(t)$, que sería la entrada y el elemento sobre el que se hace la medida.

Como se observa, se obtienen fácilmente ecuaciones en cálculo diferencial que pueden llegar a ser complejas de operar y resolver.

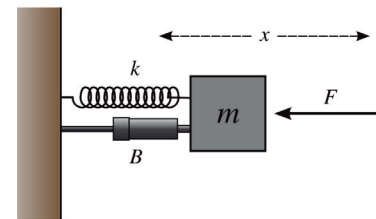


Figura 9.19
Sistema mecánico variable con el tiempo con ecuación diferencial.

B) Transformada de Laplace

La transformada de Laplace es una transformación matemática que se aplica sobre expresiones matemáticas y que, tras dicha transformación, genera otras expresiones que se dice “están

en el campo de Laplace”, en función de una variable compleja, y que resultan más sencillas de operar y representar.

$$F(s) = L \{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} \cdot f(t) \cdot dt$$

El procedimiento es el siguiente: a partir de una compleja ecuación dependiente de t , que, además, puede ser de tipo diferencial (con derivadas), que modele un proceso continuo (por ejemplo, un proceso de mezclado y calentamiento de un producto alimenticio), con la transformada de Laplace, se obtiene una expresión más sencilla y manejable sin el tiempo como variable, no de cálculo diferencial, sino algebraico, que relaciona las variables involucradas.



Figura 9.20

Etapas en el uso de la transformada de Laplace para resolver sistemas dependientes del tiempo.

Esta ecuación en el campo algebraico (con una variable s compleja, también se dice que “se pasa al campo de la frecuencia”), puede resolverse para dejar la salida en función de las otras variables. Entonces, puede hacerse la transformada inversa de Laplace y volver a obtener la salida en función del tiempo. Es decir, que, en la expresión en función de s , se despeja la solución buscada y se realiza la transformada inversa de Laplace para obtener la solución en función de t .

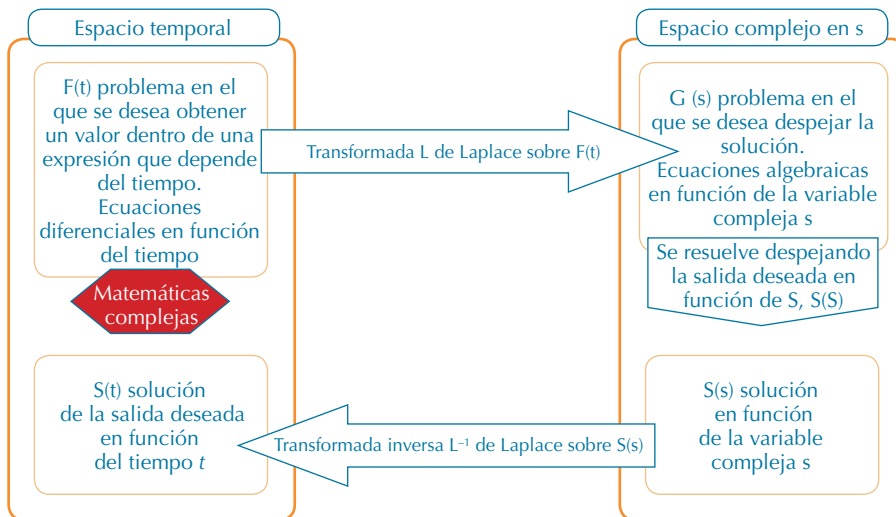


Figura 9.21

Esquema del uso de la transformada de Laplace para resolver sistemas dependientes del tiempo.

La expresión de conversión por Laplace es compleja, pero la conversión puede realizarse con la ayuda de tablas en ambos sentidos (tanto convertir a Laplace desde una expresión en función de t como convertir de Laplace a expresión en función de t).

$f(t)$	$F(s)$	$\sin(at)$	$\frac{a}{s^2 + a^2}$
1	$\frac{1}{s}$	$\cos(at)$	$\frac{s}{s^2 + a^2}$
$u(t-a)$	$\frac{e^{-as}}{s}$	$e^{at} \sin(bt)$	$\frac{b}{(s-a)^2 + b^2}$
k cte.	$\frac{k}{s}$	$e^{at} \cos(bt)$	$\frac{s-a}{(s-a)^2 + b^2}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$ para $n \in \mathbb{Z}^+$	$\sinh(at)$	$\frac{a}{s^2 - a^2}$
t^a	$\frac{\Gamma(a+1)}{s^{a+1}}$ para $a \in (-1, \infty)$	$\cosh(at)$	$\frac{s}{s^2 - a^2}$
e^{at}	$\frac{1}{s-a}$	$e^{at} \sinh(bt)$	$\frac{b}{(s-a)^2 - b^2}$
$e^{at} t^n$	$\frac{n!}{(s-a)^{n+1}}$ para $n \in \mathbb{Z}$	$e^{at} \cosh(bt)$	$\frac{s-a}{(s-a)^2 - b^2}$
$e^{kt} t^a$	$\frac{\Gamma(a+1)}{(s-k)^{a+1}}$ para $a \in (-1, \infty)$		

Figura 9.22
Tabla parcial de transformadas de Laplace.



Actividad resuelta 9.6

Busca una tabla completa de las transformadas de Laplace y, empleándola, rellena la tabla siguiente con expresiones en el dominio de t y expresiones en el dominio de Laplace:

$F(t)$, dominio de t	$F(s)$, dominio de s (Laplace)
e^{-7t}	$\frac{1}{s+7}$
k	$\frac{k}{s}$
$\text{sen}(w \cdot t)$	$\frac{w}{s^2 + w^2}$
$e^{2t} \cdot t^2$	$\frac{2}{(s-2)^3}$

9.4.2. Representación de los sistemas continuos con un diagrama de bloques

A) Diagrama de flujo de sistemas físicos

En procesos continuos, se produce un flujo continuo de producto desde las materias primas de entrada hasta el producto final, pasando por diferentes transformaciones intermedias que producen semielaborados. La representación con diagrama de flujo del proceso es muy habitual, con un detalle más gráfico o más esquemático, con simbología estándar o no, pero siempre con bloques o elementos unidos por flechas de flujo que siguen el tránsito de la materia continua de forma lógica y pasando por todas las transformaciones.

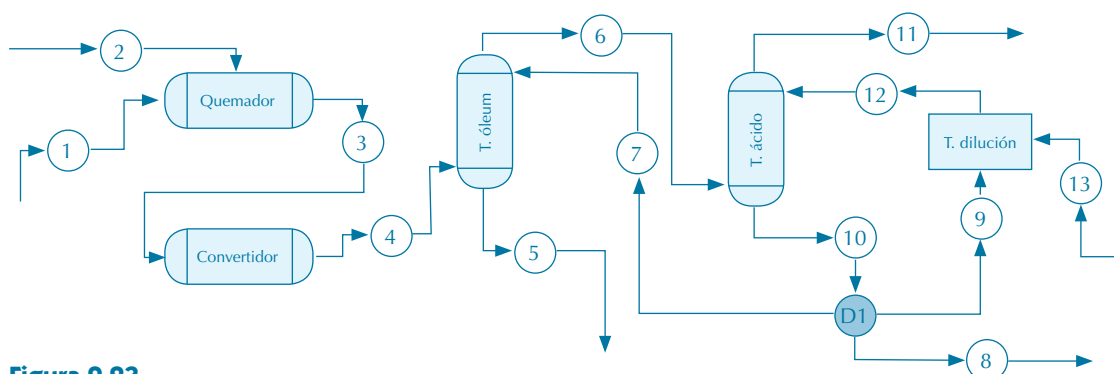


Figura 9.23
Diagrama de flujo de un proceso químico.



PARA SABER MÁS

A partir del QR adjunto, puedes acceder a un diagrama de flujo del tratamiento de zinc publicado por la US Environmental Protection Agency.



B) Diagrama de flujo o de bloques de señales

Para el control de procesos, se requieren señales (en forma digital o analógica y de naturaleza eléctrica u óptica):

1. De medida desde los sensores y representando diversas posibles magnitudes (temperatura, velocidad, salinidad, acidez, distancia, presión, etc.).
2. Internas o intermedias, producto de la manipulación o procesado de las señales de medida por parte del control, para conseguir al final la señal de salida.
3. De salida hacia preactuadores o actuadores (señales digitales o analógicas a *drivers* de calefactores, variadores de motores, *drivers* de servomotores, de iluminación, a compre-

sores, a válvulas, etc.). Estas señales son las que, supuestamente, a partir de las de medida y a través de las transformaciones que hace el sistema de control, están diseñadas para que, mediante la acción final de los actuadores, el proceso permanezca bajo control o, lo que es lo mismo, dentro de los parámetros deseados (parámetros relacionados con las variables de entrada).

Estos tres tipos de señales se relacionan también a través de diagramas de flujo, que son la representación gráfica del funcionamiento interno de un sistema de control que, mediante la disposición de flechas con un sentido, relaciona los bloques que transforman las señales y definen la estructura del proceso interno de control, sus entradas y sus salidas.

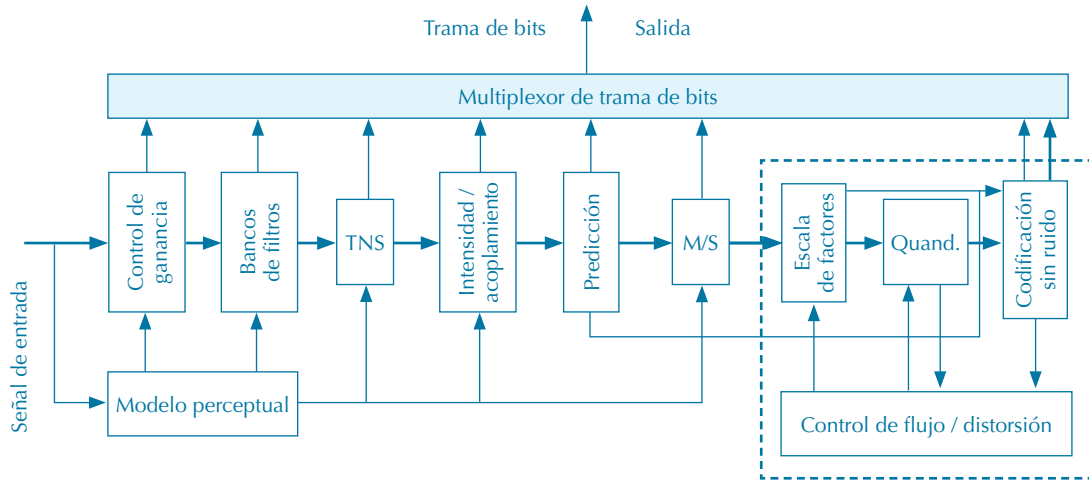


Figura 9.24

Diagrama de bloques del circuito de tratamiento de una señal.

Las transformaciones o bloques pueden representarse con una función matemática que procesa la entrada del bloque y el resultado matemático es la salida del bloque.

Recurso web

www

En el vínculo de la página web de Texample enlazado en el QR adjunto, encontrarás un diagrama de bloques del circuito de tratamiento de una señal.



C) Diagramas de bloques en control automático

En ingeniería de control, se emplea este tipo de representación gráfica de las señales de entrada o medida, de su modificación por el control y de la señal de salida representadas como un diagrama de bloques donde cada bloque multiplica a su entrada para ofrecer la salida y donde, adicionalmente, se dispone de sumas y restas representadas por círculos. Muchas veces, esta representación se hace habiendo convertido el sistema al dominio de Laplace, donde las transformaciones son expresiones matemáticas en Laplace.

Esta representación es habitual a la hora de mostrar un sistema de control, como se observa en la figura 9.25.

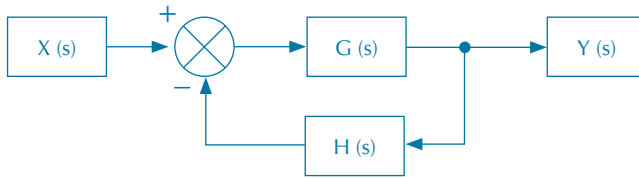


Figura 9.25
Diagrama de bloques de un circuito en lazo cerrado en el dominio de Laplace.

D) Números complejos

Un número complejo es un aquel que se expresa como la suma de un número real y otro imaginario. Un número imaginario es un número que resulta de la raíz cuadrada de un número negativo: se representa con la letra i y equivale a la raíz cuadrada de -1 .

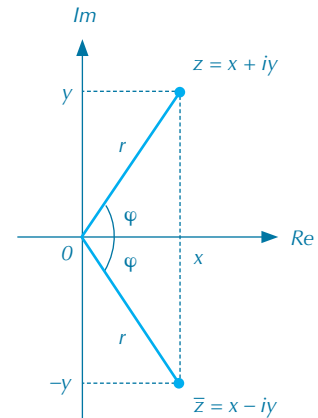


Figura 9.26
Números complejos.

9.4.3. Modelado de sistemas de control de procesos continuos

A) Introducción al control de sistemas o procesos continuos

El siguiente paso consiste en incorporar, al modelo, el sistema de control que va a emplearse.

Ya se han estudiado los conceptos de lazo abierto y lazo cerrado, donde el segundo es el que más interesa en este apartado. Ahora, contando con las funciones de transferencia obtenidas en función de s tras la transformada de Laplace, se busca modelar el proceso y el control. Por lo tanto, las etapas serán:

1. Modelar un proceso (sistema) y conocer su comportamiento con el tiempo.
2. Modificar el proceso (sistema) incorporando el sistema de control que se estime adecuado.
3. Modelar el proceso con el control de proceso incorporado y conocer su comportamiento para poder ajustar sus parámetros.

Además, el modelado del proceso con el control incorporado puede representarse con un diagrama de bloques y utilizar herramientas matemáticas (informáticas) para pasar a la representación con el tiempo (tras realizar la transformada inversa de Laplace) y ajustar el control más adecuado con la modificación del tipo y de sus parámetros.

En la figura 9.27, se explica la estrategia habitual de control en lazo cerrado trabajando con transformadas de Laplace.

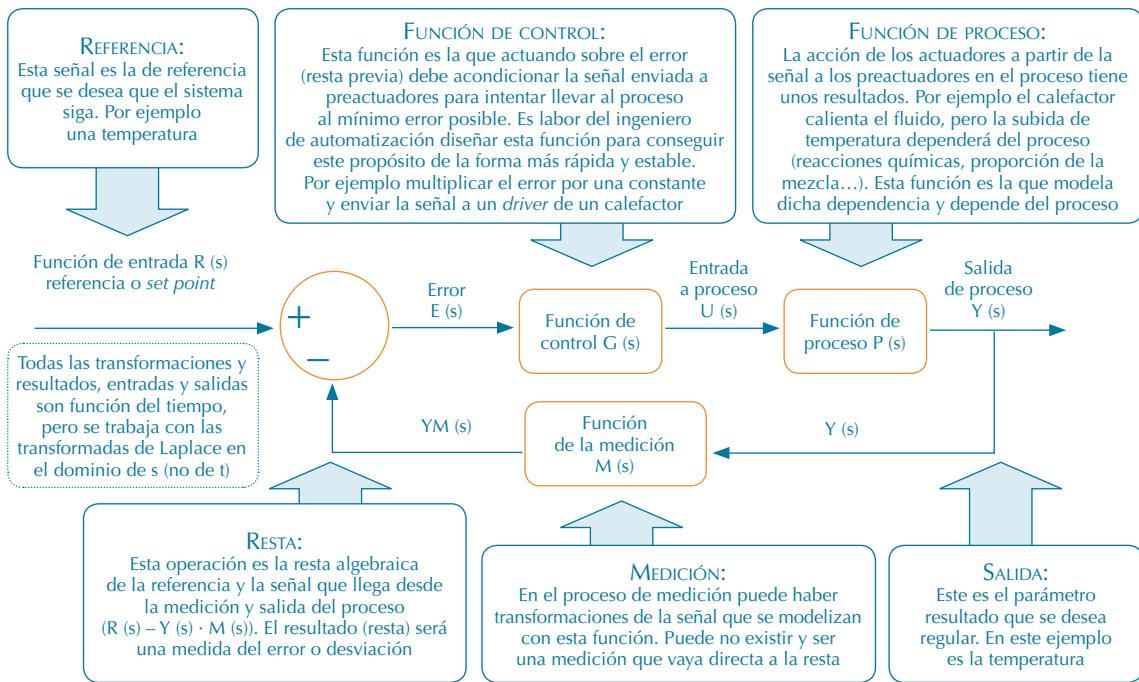


Figura 9.27
Diagrama de bloques de control en lazo cerrado.

La representación del típico sistema de control en lazo cerrado sería la que se muestra en la figura 9.28.

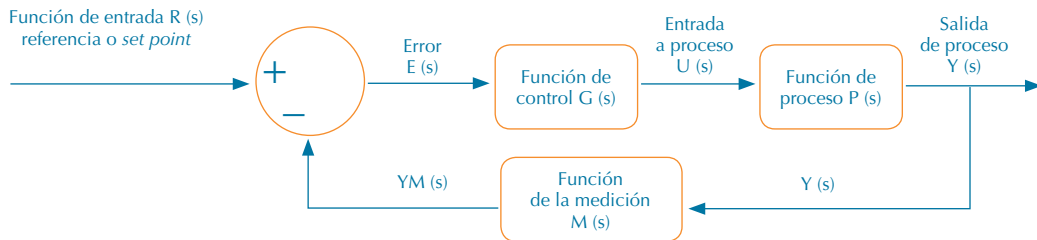


Figura 9.28
Diagrama de bloques de control en lazo cerrado.

Según el diagrama, puede deducirse lo siguiente:

$$Y(s) = P(s) \cdot U(s)$$

$$U(s) = E(s) \cdot G(s)$$

$$E(s) = R(s) - Y(s) \cdot M(s)$$

Por lo tanto:

$$Y(s) = P(s) \cdot G(s) \cdot (R(s) - Y(s) \cdot M(s))$$

$$Y(s) = P(s) \cdot G(s) \cdot R(s) - P(s) \cdot G(s) \cdot Y(s) \cdot M(s)$$

$$Y(s) + P(s) \cdot G(s) \cdot M(s) \cdot Y(s) = P(s) \cdot G(s) \cdot R(s)$$

$$Y(s) \cdot (1 + P(s) \cdot G(s) \cdot M(s)) = P(s) \cdot G(s) \cdot R(s)$$

Finalmente:

$$Y(s) = \frac{P(s) \cdot G(s)}{1 + P(s) \cdot G(s) \cdot M(s)} \cdot R(s) = H(s) \cdot R(s)$$

Donde $H(s)$ se denomina como función completa de transferencia en lazo cerrado, incluyendo el controlador y el proceso.

También es muy frecuente que no se manipule la medición (figura 9.29).

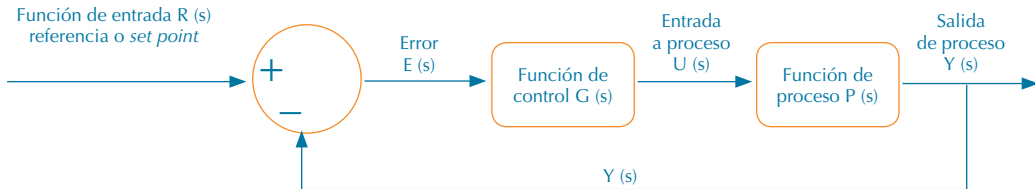


Figura 9.29

Diagrama de bloques de control en lazo cerrado.

Según el diagrama, de la segunda versión simplificada, puede decirse lo siguiente:

$$\begin{aligned} Y(s) &= P(s) \cdot U(s) \\ U(s) &= E(s) \cdot G(s) \\ E(s) &= R(s) - Y(s) \end{aligned}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} Y(s) &= P(s) \cdot G(s) \cdot (R(s) - Y(s)) \\ Y(s) &= P(s) \cdot G(s) \cdot R(s) - P(s) \cdot G(s) \cdot Y(s) \\ Y(s) + P(s) \cdot G(s) \cdot Y(s) &= P(s) \cdot G(s) \cdot R(s) \\ Y(s) \cdot (1 + P(s) \cdot G(s)) &= P(s) \cdot G(s) \cdot R(s) \end{aligned}$$

Finalmente:

$$Y(s) = \frac{P(s) \cdot G(s)}{1 + P(s) \cdot G(s)} \cdot R(s) = H(s) \cdot R(s)$$

Donde $H(s)$ se denomina como función completa de transferencia en lazo cerrado, incluyendo controlador y proceso.

Cuando se tiene la función completa de transferencia, puede representarse como se muestra en la figura 9.30.

Donde la entrada es la referencia que se desea que el sistema siga y la salida $Y(s)$ es el resultado, que es lo que se desea que siga a $R(s)$. Del diseño de $H(s)$, dependerá que esto se consiga o no.



Figura 9.30

Diagrama de bloques de control en lazo cerrado una vez obtenida la función de transferencia del lazo que relaciona la entrada $R(s)$ y la salida $Y(s)$.



RECURSO ELECTRÓNICO 9.4

En el anexo web 9.4, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás un ejemplo para entender mejor este apartado.

B) Los polos de la función de transferencia y la estabilidad del sistema

En la función de transferencia, puede tenerse en el denominador un polinomio de s , que tiene valores que lo convierten en 0, como sucede con cualquier otro polinomio. Con la salvedad de que son ceros que deben ser números complejos (pues no puede olvidarse, s es una variable compleja). Los ceros son importantes para la estabilidad del sistema (tienen relación con la pulsación y el coeficiente de amortiguación cuando hay oscilaciones en la salida).

En efecto, algunos sistemas sobre los que se aplica un control pueden resultar inestables si no se hace el control adecuado. Es decir, en el diseño del control, puede modificarse la corrección en $H(s)$, pero algunos valores en el diseño de $H(s)$ pueden hacer que, en lugar de llevar la salida a un valor deseado, empiece a oscilar o se aleje definitivamente de ella, lo que es una situación indeseable.

Se considera que un sistema con el control incorporado es estable cuando, al aplicar en su entrada un delta de Dirac $\delta(t)$, la respuesta en la salida es una señal que se convierte en 0 con el paso del tiempo. Independientemente de la referencia, siempre se desea que el sistema sea estable para el control de procesos.

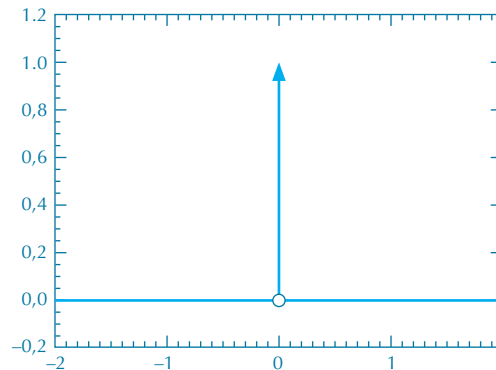


Figura 9.31
Función delta de Dirac.

RECURSO ELECTRÓNICO 9.5



En el anexo web 9.5, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar las respuestas de un sistema con un delta de Dirac $\delta(t)$ en la entrada. Así mismo, encontrarás una actividad resuelta sobre la estabilidad de los sistemas.

C) Régimen transitorio y régimen permanente

La respuesta final del sistema no se produce instantáneamente tras aplicarle una entrada determinada o perturbación en el proceso, sino que tiene que pasar un tiempo durante el cual el sistema pasa por un periodo transitorio antes de alcanzar el estado final.

Por lo tanto, en dicha respuesta, se obtiene:

1. Un periodo de régimen transitorio.
2. Un periodo de régimen permanente.

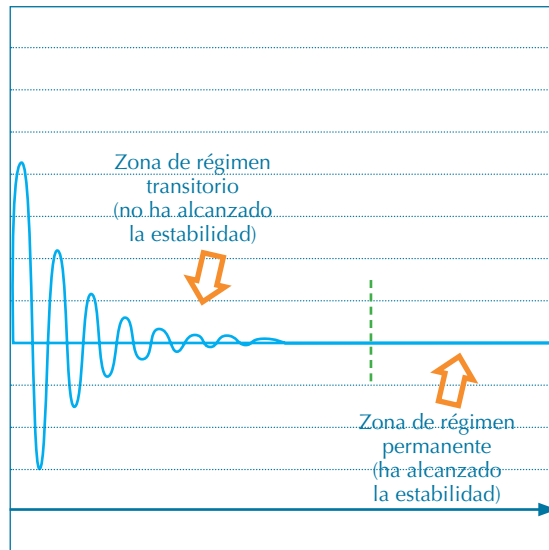


Figura 9.32
Régimen transitorio
y permanente
en la respuesta
de un sistema.

La respuesta en régimen permanente es el resultado que proporciona el sistema como control cuando las variables involucradas están ya estables (no varían).

La respuesta en régimen transitorio es el resultado que proporciona el sistema como control mientras intenta estabilizar el sistema (si es estable) y tiene un tiempo limitado. En este régimen, las variables no se han estabilizado (están variando con el tiempo).

La respuesta transitoria, una vez conseguido que el sistema sea estable, varía también según la configuración del control y puede ser más corta (estabilización rápida) o más larga (estabilización lenta) y proporciona una medida de la rapidez de estabilidad del sistema de control.

Por otro lado, el valor de la respuesta una vez que se ha alcanzado el régimen permanente puede aproximarse más o menos al deseado, por lo que la respuesta permanente proporciona una medida de la precisión del sistema de control.

9.4.4. Controladores PID

Para el control de procesos continuos, se ha estudiado el control en lazo cerrado, donde se actúa constantemente sobre un proceso para mantener una o varias magnitudes (temperatura, salinidad, caudal, presión, etc.) en torno a un valor o en un rango deseado. Estos controladores son los protagonistas del control de procesos en continuo o por lotes, por lo que es necesario conocer sus fundamentos.

Para realizar un control PID, se hace la lectura del resultado y se resta a un valor inicial deseado (recuerda su estructura mostrada en la figura 1.14). El error resultante sirve para definir una acción correctora de control para intentar dirigir el proceso (planta) hacia alcanzar el valor deseado (error mínimo o cero) en el resultado.

RECUERDA

- ✓ En la acción del control, se realizan tres tipos de corrección: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D). Según la corrección que incorporen, se denominan *controladores P, I, PI, PD y PID*.

El sistema de control presentará lógicamente un régimen transitorio y un error frente al valor de referencia. El operador deberá ajustar los parámetros del controlador para conseguir el mejor control posible en función de cómo sea el proceso (planta).

Las constantes K_p (o K a secas), K_i y K_d , que también se denominan P , I y D , son parámetros regulables que pueden mejorar o empeorar la respuesta del control. Son las ganancias de cada tipo de corrección.

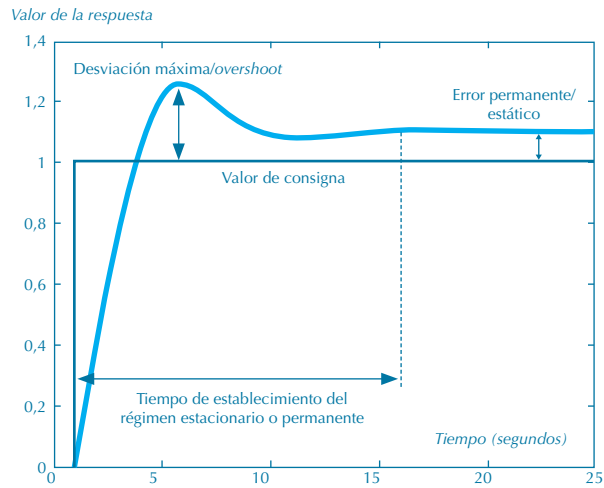


Figura 9.33
Respuesta de un sistema con control en lazo cerrado con PID y error en régimen permanente.

A) Corrección proporcional

La corrección proporcional (P) es directamente proporcional al error o desviación entre lo medido y lo deseado a la salida. En general, está relacionado con la rapidez de respuesta en la corrección. Para que exista en un momento una corrección significativa, también debe existir un error considerable. Un valor P , K o K_p excesivo puede sobre-reaccionar al error y desestabilizar el sistema.

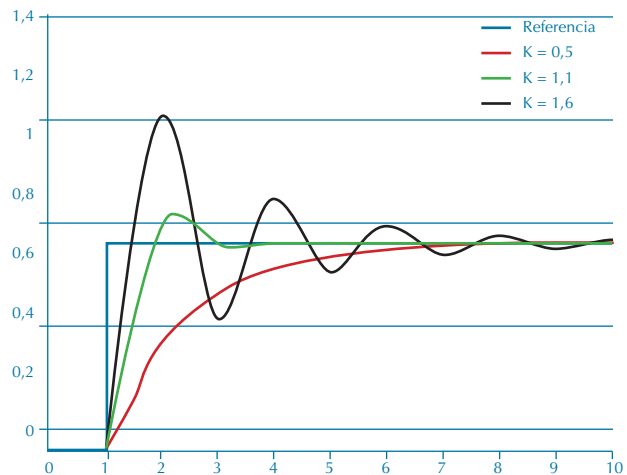


Figura 9.34
Respuesta de un sistema frente a una entrada (referencia) escalón con control en lazo cerrado con PID según valores distintos de P (k).

La corrección proporcional-derivativa (PD) es proporcional al error y a la tendencia con el tiempo de este.

B) Corrección integral

La corrección integral (I) es proporcional al error acumulado (tiene cierto tiempo de reacción o proporciona un control lento frente a desviaciones rápidas). Con una corrección integral, un error, aunque sea pequeño, va acumulándose y se generará una corrección creciente tendente a eliminar el error. Se supone que, con este tipo de control, el error en régimen permanente será siempre 0.

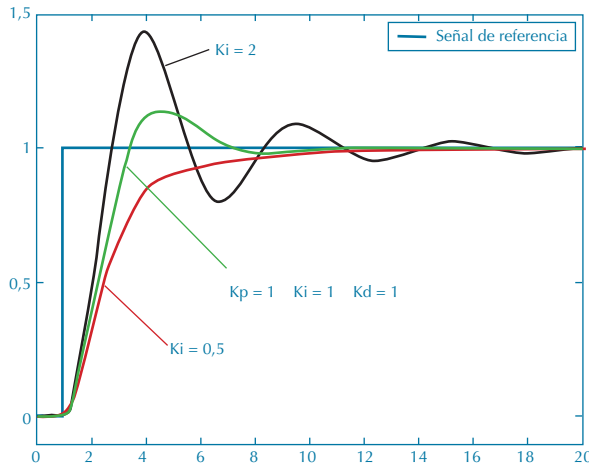


Figura 9.35
Respuesta de un sistema frente a una entrada (referencia) escalón con control en lazo cerrado con PID según valores distintos de I (o K_i).

La corrección proporcional-integral (PI) combina las dos previas. Muchos controladores industriales tienen solo acción PI.

C) Corrección derivativa

La corrección derivativa (D) es proporcional a la pendiente del error (con el tiempo). Esto quiere decir que, si el error es constante (pendiente 0), pero grande, la corrección derivativa no ejercerá acción ninguna y, por ello, nunca se utiliza por sí sola. Corrige únicamente periodos transitorios (zonas de cambio) y tiene carácter de previsión con una acción de control rápida, pero que también puede responder excesivamente a ruido, picos de lectura o desviaciones. En general, aumentar su ganancia hará que el sistema de control reaccione más fuertemente a los cambios en el término de error y aumentará la velocidad de la respuesta del sistema de control global. Sin embargo, no suelen emplearse ganancias D altas, pues la corrección derivativa es muy sensible al ruido en las señales y esto o una tasa de muestreo lenta del sistema de control (cambios muy bruscos en la señal) pueden incluso hacer que el sistema de control sea inestable.

La unión de una acción de control derivativa y otra proporcional generan un control con buena sensibilidad, respondiendo a la velocidad del cambio del error (parte derivativa) con una corrección significativa antes de que el error crezca mucho y, además, reacciona en periodos permanentes donde hay que corregir error sin pendiente (corrección proporcional). La reacción al cambio del término derivativo otorga amortiguamiento frente a los cambios y, por tanto, permite incrementar la corrección proporcional. Pero, como se ha comentado, un valor D o K_d excesivo puede sobre-reaccionar al error y desestabilizar el sistema.

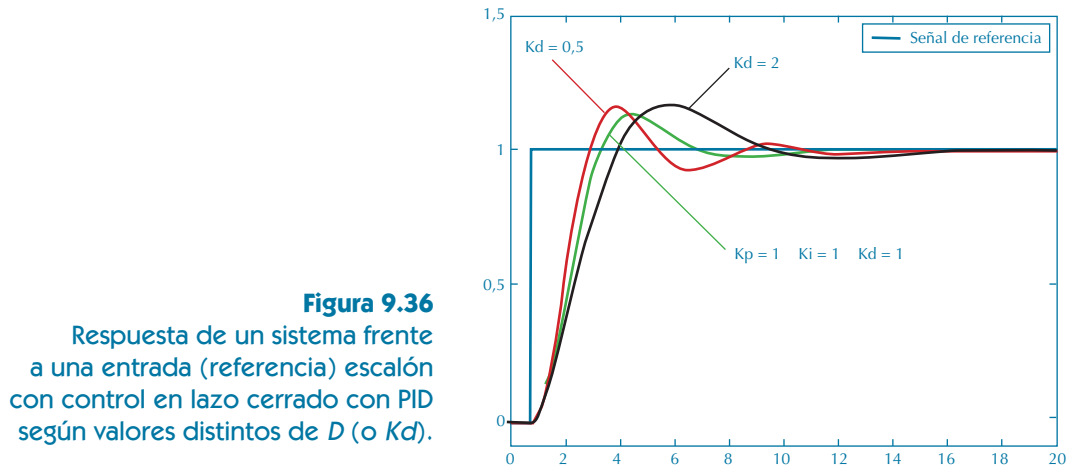


Figura 9.36
 Respuesta de un sistema frente a una entrada (referencia) escalón con control en lazo cerrado con PID según valores distintos de D (o K_d).

La corrección proporcional-integral-derivativa (PID) reúne las ventajas de los tres tipos de corrección: corrección en régimen permanente con la corrección P , corrección del error acumulado con la corrección I y, finalmente, previsión del error y amortiguamiento a los cambios con la corrección derivativa D .

9.4.5. Ajuste del regulador PID

El ajuste de los parámetros del regulador PID se realiza, entre otros, con los métodos siguientes:

1. *Tanteo o prueba y error.* Inicialmente I y D se ponen a cero y la ganancia proporcional P se incrementa hasta que la salida del sistema o lazo de control comienza a oscilar. Conforme aumenta P (ganancia proporcional), el sistema se hace más rápido en la corrección frente al error, pero, si se incrementa en exceso, puede generar una oscilación con un valor muy por encima de la referencia (*set point*) denominado *overshoot* o incluso hacer al sistema inestable. Con P ajustado para obtener una respuesta rápida deseada, la ganancia integral I se modifica para detener las oscilaciones que se producen, pero, si se incrementa mucho, su efecto puede generar también *overshoot*. Según los requisitos del sistema, el nivel de *overshoot* puede ser admisible o no. I corrige el error en régimen permanente y, para ello, se busca un conjunto de valores de P e I con respuesta rápida, no excesivo *overshoot* y un mínimo error estacionario. La ganancia D , entonces, se selecciona para que el sistema acelere la búsqueda de la referencia al máximo. Reacciona a la tasa de cambio

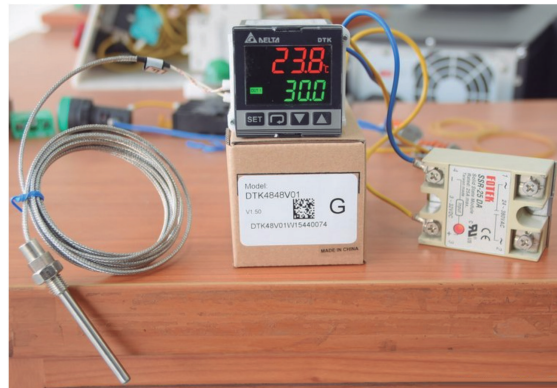


Figura 9.37
 Controlador PID montado con sonda de temperatura y relé en estado sólido.

del error, ganando velocidad para alcanzar la estabilidad o el régimen permanente, pero valores altos pueden generar inestabilidad o excesiva sensibilidad al ruido (errores o picos introducidos en las señales)

2. *Método Ziegler-Nichols*. Igual que en el caso previo, I y D se ponen a cero y P se incrementa hasta que el sistema comienza a oscilar hasta llegar al punto justo de ganancia P que establece el límite entre que permanezca oscilando con amplitud constante o que la amplitud comience a hacerse creciente. Este punto es el que determina la ganancia crítica y el periodo de oscilaciones correspondiente a dicha ganancia. En función de estos dos valores y unas tablas del método, se determinan las ganancias de P , I y D aplicadas.

WWW

Recurso web

En la página web vinculada al QR adjunto, puede simularse un sistema PID, modificando sus parámetros y observando la salida obtenida.



RECURSO ELECTRÓNICO 9.6

En el anexo web 9.6, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás información sobre el origen de la lógica difusa.

9.4.6. Sistemas SCADA

El término *SCADA* viene de *supervisory control and data acquisition* (supervisión, control y adquisición de datos). Son un conjunto de hardware y software para la configuración de un entorno visual y táctil con representaciones y control del proceso y presencia de indicadores y mandos para realizar la supervisión y control de la máquina a través de pantallas táctiles y que, además, puede realizarse a distancia y con gestión de elevadas cantidades de datos.

En la figura 9.39, se muestran los componentes fundamentales de los sistemas SCADA, que se desarrollan a continuación.

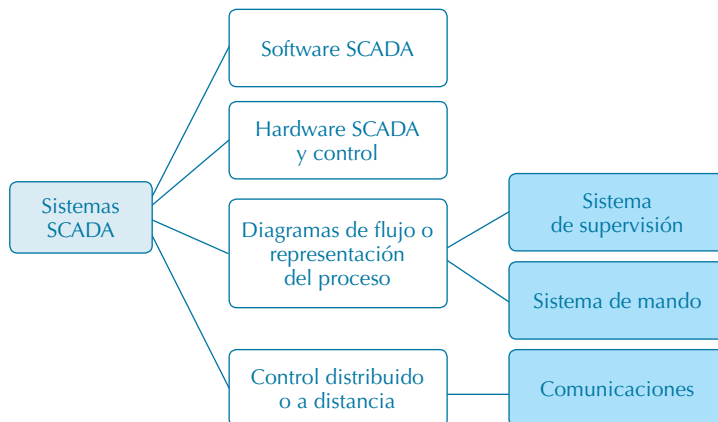


Figura 9.38
Componentes fundamentales de los sistemas SCADA.

A) Software SCADA

Los fabricantes siempre disponen desde controladores de gama media y baja (no para un relé programable, por ejemplo) hasta módulos de software destinados al diseño del sistema SCADA/HMI, incluyendo el aspecto visual y funcional y conectando lógicamente con la parte o programa de control que gestiona el PLC y todas las variables de entrada y salida involucradas. Se trata de la herramienta con la que se crea y se hace funcionar el sistema SCADA en coordinación con la realidad del proceso y su sistema de control automático.

La variedad de oferta es elevada, desde el software que proporcionan los fabricantes hasta el software de otros proveedores o incluso la realización de un sistema específico para el proceso en cuestión.

B) Hardware SCADA

El control de una máquina sencilla puede hacerse sin sistema visual táctil, con una botonera de mando, pilotos de señalización e incluso incluir algún indicador analógico o digital de determinados valores como temperaturas, presiones, piezas procesadas, etc. Sin embargo, hoy en día, es casi un estándar el uso de algún sistema de pantalla táctil incorporando al menos los mandos e indicadores fundamentales, que es un elemento HMI y que puede considerarse como un precursor o componente de un sistema SCADA. Cuando se trata de máquinas o procesos de cierta complejidad, es algo imprescindible. Para soportar el sistema, es necesaria una serie de componentes adicionales de hardware: controlador, comunicaciones, pantalla y módulos auxiliares que puedan hacer falta. Todos los elementos deben ser compatibles entre sí y con el sistema de control con el que hagan pareja (PLC o PC industrial habitualmente), que, a menudo, se considera integrante o parte del sistema SCADA.

C) Diagramas de flujo o representación SCADA del proceso

El aspecto visual de lo mostrado en pantalla debe ser tal que represente fielmente el proceso mostrando los elementos señalados en el cuadro 9.2.

CUADRO 9.2
Elementos que deben aparecer en pantalla

Diagrama de flujo o representación visual del proceso	Debe recoger el tránsito del producto o representación de la máquina y los puntos fundamentales de transformación que deban supervisarse y controlarse de forma que se identifique claramente a qué corresponde cada elemento representado.
Parámetros requeridos para la supervisión	Están incluidos en el sistema visual de supervisión, ya sea con indicadores numéricos (valor numérico) o visuales (barras o relojes analógicos representados).
Controles	Están incluidos en el sistema visual de mando, que el operario a cargo puede modificar (puede haber diferentes niveles o privilegios de control) para mantener el proceso bajo control, fácilmente visibles y manipulables.

El diagrama de flujo o representación de proceso o máquina corre a cargo del programador en el módulo SCADA que facilita el fabricante, donde suele contarse con una librería de ele-

mentos y herramientas (como actuadores, botones, mandos selectores y deslizantes e indicadores de muchos tipos) para su uso y, además, el programador puede diseñar sus propios elementos. Estos elementos se introducirán en la pantalla y se relacionarán entre sí y con los eventos del proceso para, después, representarlo fielmente, así como a su control desde la pantalla táctil. Además, pueden programarse varias pantallas para el mismo proceso o máquina, incluyendo así mucha más información y posibilidades de control y regulación.

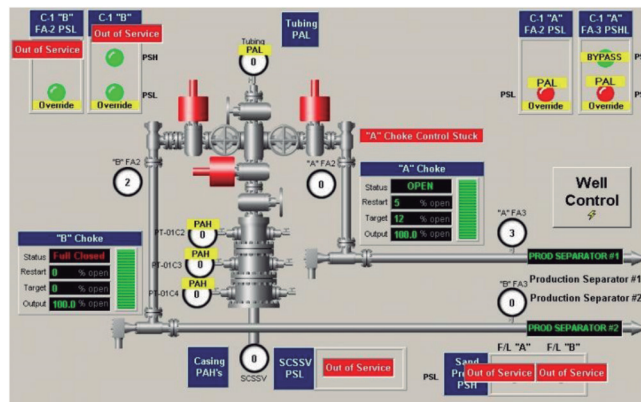
1. Sistema visual de supervisión

Los parámetros requeridos para su supervisión en el diagrama de flujo o representación SCADA deben estar conectados con variables reales de lectura del proceso o indicadores derivados calculados por el sistema de control o el bloque SCADA. Por ejemplo, un valor de concentración de un disolvente obtenido a partir de una medida de densidad puede recogerse por el PLC o controlador y pasar la variable calculada al sistema visual SCADA. Pero también el sistema SCADA aceptará su programación para realizar autónomamente dicho cálculo de concentración a partir de la medida de densidad y mostrar los indicadores resultantes en pantalla a partir de dicho cálculo, e incluso utilizar los cálculos para el propio control de proceso. Todo esto debe programarse por el programador estableciendo un paralelismo de funcionamiento y variables de salida e internas, por un lado, del sistema de control y, por otro, del bloque de programación que conforma el sistema de supervisión y control SCADA.

2. Sistema visual de mando

Los controles que el operario puede manipular en el diagrama de flujo o representación SCADA también están conectados con variables reales de mando y entrada al proceso. El panel y la representación SCADA dispondrán de botones representados para funciones de forma idéntica a como lo hacen los botones físicos. Por ejemplo, los botones de marcha y paro o modos de marcha. Sin embargo, la representación de los botones en pantalla nunca será tan perceptible y manejable como los botones físicos principales, por los que estos segundos seguirán estando y los botones de la pantalla serán un control adicional paralelo junto a ellos o en otro lugar para un control a distancia. Lo mismo sucede con los pilotos de señalización, se representan en pantalla, pero, en el diseño del control, se decide qué pilotos luminosos también tendrán presencia física real. La seta de emergencia no puede estar representada en pantalla, siempre tendrá que ser un accionamiento físico, pues, por normativa, debe estar cableado eléctricamente al circuito de seguridad-emergencia y su señalización igualmente.

Figura 9.39
Panel de control
de proceso con sistema
SCADA/HMI.



RECUERDA

- ✓ Igual que en el caso de los indicadores, toda la estructura de mandos en la pantalla y sistema SCADA debe programarse por el programador estableciendo un paralelismo de funcionamiento y variables de entrada e internas, por un lado, del sistema de control y, por otro, del bloque de programación que conforma el sistema visual de mando SCADA.

D) Control distribuido o a distancia

La concentración de información y controles que puede incorporarse al sistema SCADA y el hecho de que dichas señales no necesariamente tengan que ser cableadas individualmente (sino mediante conexión de un cable de datos de comunicación industrial) hacen que estos sistemas estén diseñados para la supervisión y control a distancia y distribuido de procesos. Un sistema SCADA puede controlar una máquina a distancia o incluso diversas máquinas o diversos procesos con multitud de pantallas programadas (una o más representaciones SCADA de cada proceso) y físicas (diferentes monitores para facilitar la visualización de parámetros en una sala de control centralizado, por ejemplo).

9.4.7. Sistemas HMI

Una pantalla HMI, del inglés *human-machine interface* (interfaz hombre-máquina) es, hoy en día, un componente casi indispensable en cualquier máquina automatizada.

Se trata de una pantalla o dispositivo con pantalla que, en los últimos tiempos, siempre es táctil, con capacidad de mostrar mandos e indicadores, incluso también representaciones de la máquina y procesos para multiplicar la capacidad de control sobre el automatismo con respecto a la clásica botonera y que puede ser un sistema completo de control incorporando PLC u ordenador personal y comunicaciones, así como un software para la generación de sistemas de representación tipo SCADA.

La explosión del HMI vino con dos elementos:

1. *Pantalla LCD en lugar de CRT*: la pantalla plana permite su inclusión en casi cualquier sitio.
2. *Incorporación del PLC y del ordenador industrial al HMI*: el enfoque ha cambiado de hardware a software. El HMI se convirtió en un sistema y la funcionalidad de las HMI explotó. Cuando ahora los fabricantes ofrecen HMI, ya no hablan de su hardware, sino de software, pues, con un hardware estándar (capaz de soportar el software), el software es lo que proporciona la potencia de control. En el caso de incorporar un ordenador industrial, la mezcla de las dos tecnologías de sistemas operativos (otros también, pero fundamentalmente Microsoft Windows) y Ethernet han ayudado a dar a los sistemas HMI la flexibilidad de llegar a casi cualquier lugar, pues la conexión puede realizarse con cualquier elemento que utilice Ethernet, empleando, además (con protocolos particulares), señales e información en tiempo real como requieren muchos procesos industriales.

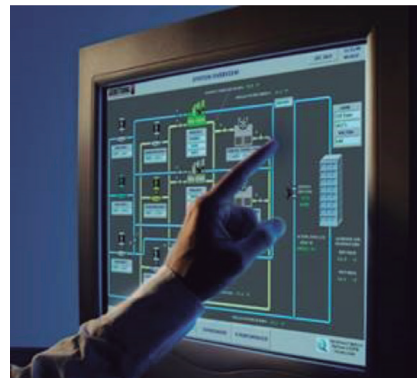


Figura 9.40
Pantalla HMI y sistema SCADA.

Con modelos sencillos, puede decirse que un dispositivo HMI es parte (pantalla) de un sistema SCADA. Pero, actualmente, con modelos más completos, un HMI ya no es solo parte del sistema SCADA, ya que pueden incorporar:

1. *Sistema de control*: un PLC o un PC industrial corriendo un sistema operativo.
2. *Software para representación y supervisión de proceso*: si incorpora el sistema de control, el software incluye las herramientas para generar un sistema de representación del proceso.

Incluso estos sistemas HMI avanzados con la capacidad de comunicación comentada con otros dispositivos han dejado atrás el control básico de la máquina para ser capaces de integrarse en sistemas colaborativos (varios procesos) programados para que distintos procesos con distintos controladores se coordinen para trabajar óptimamente y proporcionar datos a los niveles superiores de gestión (no solo de control de procesos), pero, en este caso, ya se entra en lo que sería la definición de SCADA.



TOMA NOTA

A medida que los sistemas HMI han ganado en prestaciones, han absorbido la función del sistema de control (programa de control de proceso) y la función de supervisión y control de operario de tipo SCADA, pero con un enfoque de control local de máquina y bajo flujo de datos. Cuando se incorpora un controlador y la representación y supervisión del proceso, es lógico que, para facilitar las tareas, se proporcione un software integrado capaz de gestionar el diseño del control de proceso (PLC-ordenador industrial) y con la misma interfaz de diseño de supervisión y control en pantalla (HMI).



RECURSOS ELECTRÓNICOS 9.7 y 9.8

En el anexo web 9.7, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás más información sobre los sistemas HMI y SCADA. Y en el anexo web 9.8, puedes consultar algunas definiciones relacionadas con lo estudiado en este capítulo.

Resumen

- En los dos capítulos anteriores, se ha estudiado una programación básica de PLC basada fundamentalmente en GRAFCET y en el conocimiento de las instrucciones de bloque más comunes. En este capítulo, se añade la posibilidad de gobernar una máquina de forma práctica incorporando estructuras de GRAFCET para condicionar el comportamiento de la máquina a conveniencia y generando modos de marcha: ciclo único, modo automático o ciclo continuo y paso a paso.
- También se ofrece una propuesta no normativa (sin ser esta propuesta válida genéricamente, dada la complejidad y responsabilidad que supone y la no adhesión a norma) de implementación de la emergencia.
- Seguidamente, se estudian los conceptos del comportamiento, modelado y resolución de procesos continuos dependientes del tiempo, sin incidir excesivamente en la resolución práctica, dada su complejidad. En este punto, se hace imprescindible conocer

los fundamentos de un controlador PID y la influencia de sus componentes en el control de procesos en continuo.

- Por último y estrechamente ligados a los procesos en continuo, se exponen los conceptos de SCADA y HMI, similares y complementarios, pero no iguales.

Ejercicios propuestos



1. Diseña el GRAFCET G3 de proceso sin emergencia ni salvaguardas para un proceso con la secuencia 1.0+, (1.0–, 2.0– al mismo tiempo) 2.0+.
2. Elabora el GRAFCET G3 de proceso con emergencia, pero sin salvaguardas para un proceso con la secuencia [(1.0+ KM1-ON a la vez), 3 s, (1.0– KM1-OFF a la vez), todo esto 3 veces].
3. Para la siguiente secuencia 1.0+, 3 s, 1.0–, 2.0+, 2 s, 2.0–, determina G1, G2 y G3 (sin emergencia ni salvaguardas), pero modificados para realizar únicamente un ciclo continuo (elimina las partes de G2 y G3 que sean para ciclo único o paso a paso).
4. Si un proceso tiene la siguiente expresión en función de t , indica su transformada de Laplace: $G(t) = \cos(2 \cdot t) + e^{3 \cdot t} \cdot t^4$.
5. Si las siguientes expresiones representan la función de transferencia $H(s)$ de dos sistemas de control, explica si serán estables y por qué.

Sistema 1:

$$H(s) = \frac{s-1}{2 \cdot s^2 + 2 \cdot s + 1}$$

Sistema 2:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 - 4 \cdot s - 5}$$

Caso práctico

Desea realizarse la automatización de una máquina marcadora que realiza la siguiente secuencia: 1.0+ (sujeción mordaza), 0,2 s, [2.0+, 2.0–, 4 veces (marcado)], 0,2 s, 1.0– (liberación de mordaza).

Contando con la propuesta de tabla de símbolos para las etapas mostrada a continuación (las direcciones se establecerán a criterio del programador), realiza la programación completa de todos los GRAFCET, siendo las otras secuencias las siguientes:

- Reset: retracción de ambos cilindros en la misma etapa y espera de 0,5 s.

- *Emergencia*: debe abrirse la válvula Y100 durante 5 s (el contacto del temporizador T20 se incluirá en las condiciones de seguridad finales, CS finales).
- *Salvaguarda de máquina*: retracción, primero, del cilindro 1.0 y, posterior, del cilindro 2.0. La posición inicial de ambos cilindros será CSM.
- *Salvaguarda de producto*: retracción, primero, del cilindro 2.0 y, posterior, del cilindro 1.0. La posición inicial de ambos cilindros será CSP.

Etiqueta	Tipo de dato	Dirección	Comentarios
_E0	BOOL	3800.00	G1 MARCHA-PARO
_E1	BOOL	3800.01	G1 MARCHA-PARO
_E3	BOOL	3800.02	G2 MODOS DE MARCHA
_E4	BOOL	3800.03	G2 MODOS DE MARCHA
_E5	BOOL	3800.04	G2 MODOS DE MARCHA
_E6	BOOL	3800.05	G2 MODOS DE MARCHA
_E10	BOOL	3801.00	G3 PROCESO
_E20	BOOL	3801.01	G3 PROCESO
_E30	BOOL	3801.02	G3 PROCESO
_E40	BOOL	3801.03	G3 PROCESO
_E50	BOOL	3801.04	G3 PROCESO
_E400	BOOL	3810.00	G4 <i>RESET</i>
_E410	BOOL	3810.01	G4 <i>RESET</i>
_E420	BOOL	3810.02	G4 <i>RESET</i>
_E600	BOOL	3815.00	G61 SALVAGUARDA MÁQUINA
_E610	BOOL	3815.01	G61 SALVAGUARDA MÁQUINA
_E620	BOOL	3815.02	G61 SALVAGUARDA MÁQUINA
_E700	BOOL	3820.00	G62 SALVAGUARDA PRODUCTO
_E710	BOOL	3820.01	G62 SALVAGUARDA PRODUCTO
_E720	BOOL	3820.02	G62 SALVAGUARDA PRODUCTO
_E500	BOOL	W50.00	G5 EMERGENCIA
_E510	BOOL	W50.01	G5 EMERGENCIA
_E520	BOOL	W50.02	G5 EMERGENCIA
_E530	BOOL	W50.03	G5 EMERGENCIA
_E540	BOOL	W50.04	G5 EMERGENCIA

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

- ¿Cómo debe ser un pulsador de paro de cualquier tipo?
 - a) NA porque así un corte del cable del pulsador detendrá la acción como si se hubiera pulsado, que siempre será más seguro que no poder detenerla.
 - b) NC porque así un corte del cable del pulsador no detendrá la acción y, de este modo, la máquina continúa su función.
 - c) NC porque así un corte del cable del pulsador detendrá la acción como si se hubiera pulsado, que siempre será más seguro que no poder detenerla.
 - d) NA porque así un corte del cable del pulsador no detendrá la acción y, de este modo, la máquina continúa su función.

2. En el planteamiento de control multi-GRACET, ¿cómo se plantean los forzados?
- a) G5 fuerza a todos, salvo a G1, que es forzado por G61 y G62.
 - b) G5 fuerza a todos, y G1 fuerza también a G61 y G62.
 - c) G61 y G62 fuerzan a todos, salvo a G5.
 - d) G5 fuerza a todos, G61 fuerza al resto y G62 fuerza a todos, menos a G5 y G61.
3. ¿Qué norma trata la seguridad funcional de los sistemas eléctricos y electrónicos programables relacionados con la seguridad?
- a) IEC 61010.
 - b) 61508, 62061 (maquinaria) y 61511 (sistemas instrumentados).
 - c) ISO 10218.
 - d) EN ISO 12100.
4. ¿Cuál de las siguientes características está relacionada con la implementación de la seguridad-emergencia?
- a) Exige dispositivos especiales y un software (programación de sus funciones) adecuados a las funciones de seguridad-emergencia que deban desempeñarse más un control y autorización por organismos autorizados cuando la reglamentación lo exija.
 - b) En un automatismo, es un aspecto sencillo y de baja responsabilidad en el hardware, pero complejo y de alta responsabilidad en el software.
 - c) No exige dispositivos especiales, pero, antes de la puesta en marcha, debe haber un control y autorización por un organismo autorizado.
 - d) Con dispositivos especiales adecuados a las funciones de seguridad-emergencia, garantiza el correcto desempeño de la línea o máquina en todos los casos.
5. ¿Cuál es de los siguientes enunciados es verdadero?
- a) Un relé de seguridad no forma parte importante del circuito de seguridad.
 - b) La función principal del circuito de seguridad es avisar al PLC de control de proceso de que la emergencia o seguridad han sido activadas.
 - c) El circuito de seguridad debe integrar dispositivos de seguridad como relés o controladores de seguridad y, entre otras, realizar el corte de energía de los actuadores que seguridad o emergencia exijan.
 - d) Ninguna de las respuestas anteriores es verdadera.
6. ¿En qué consiste la característica o utilidad de la transformada de Laplace para la resolución de sistemas de control de procesos continuos?
- a) En salvar la dificultad que a menudo presenta resolver sistemas de ecuaciones diferenciales dependientes del tiempo.
 - b) En obtener expresiones fáciles de manipular en el dominio de Laplace para poder despejar, por ejemplo, la salida de un sistema en función de la entrada, control y proceso en un lazo cerrado.
 - c) En realizar a conveniencia la transformada y transformada inversa para obtener y operar con expresiones en función de s o de t respectivamente.
 - d) Todas las respuestas anteriores son correctas.

7. Se considera que un sistema con el control incorporado es estable cuando, al aplicar en su entrada un delta de Dirac, ¿qué tipo de respuesta se obtiene?
- a) Exponencial decreciente o senoidal de creciente exponencialmente en amplitud.
 - b) Constante o senoidal de amplitud constante.
 - c) Crecimiento exponencial o senoidal creciente exponencialmente en amplitud.
 - d) Constante o exponencial decreciente.
8. ¿Cuál de las siguientes oraciones es verdadera?
- a) Un controlador PID no actúa sobre el error, sino sobre la referencia (entrada) directamente.
 - b) La ganancia P reacciona a la variación del error con el tiempo.
 - c) La ganancia D eliminará el error en régimen permanente.
 - d) Todo sistema requerirá un ajuste de los parámetros P , I y D del controlador para obtener un sistema de control con el comportamiento deseado.
9. ¿Con cuál de las siguientes proposiciones estás de acuerdo?
- a) El GRAFCET de seguridad-emergencia puede gestionarse en algunos casos por un PLC ordinario de control de procesos.
 - b) El circuito eléctrico de seguridad-emergencia puede gestionarse por un relé ordinario, pero la seta debe conectarse a un relé de seguridad.
 - c) Un PLC de seguridad-emergencia tiene la misma robustez y fiabilidad que un PLC ordinario de control de procesos.
 - d) En el caso de producirse un disparo de la seguridad-emergencia, el dispositivo de seguridad-emergencia que gestiona el circuito de seguridad debe comunicarse con el PLC de control de proceso para indicarle dicho evento.
10. En relación con los sistemas SCADA, ¿cuál de las siguientes afirmaciones es verdadera?
- a) Está enfocado a la supervisión y control visual local de la máquina.
 - b) Es un dispositivo individual con pantalla táctil.
 - c) En caso de observar una sala de control de procesos, será más apropiado hablar de HMI.
 - d) En caso de observar una sala de control de procesos, será más apropiado hablar de SCADA.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

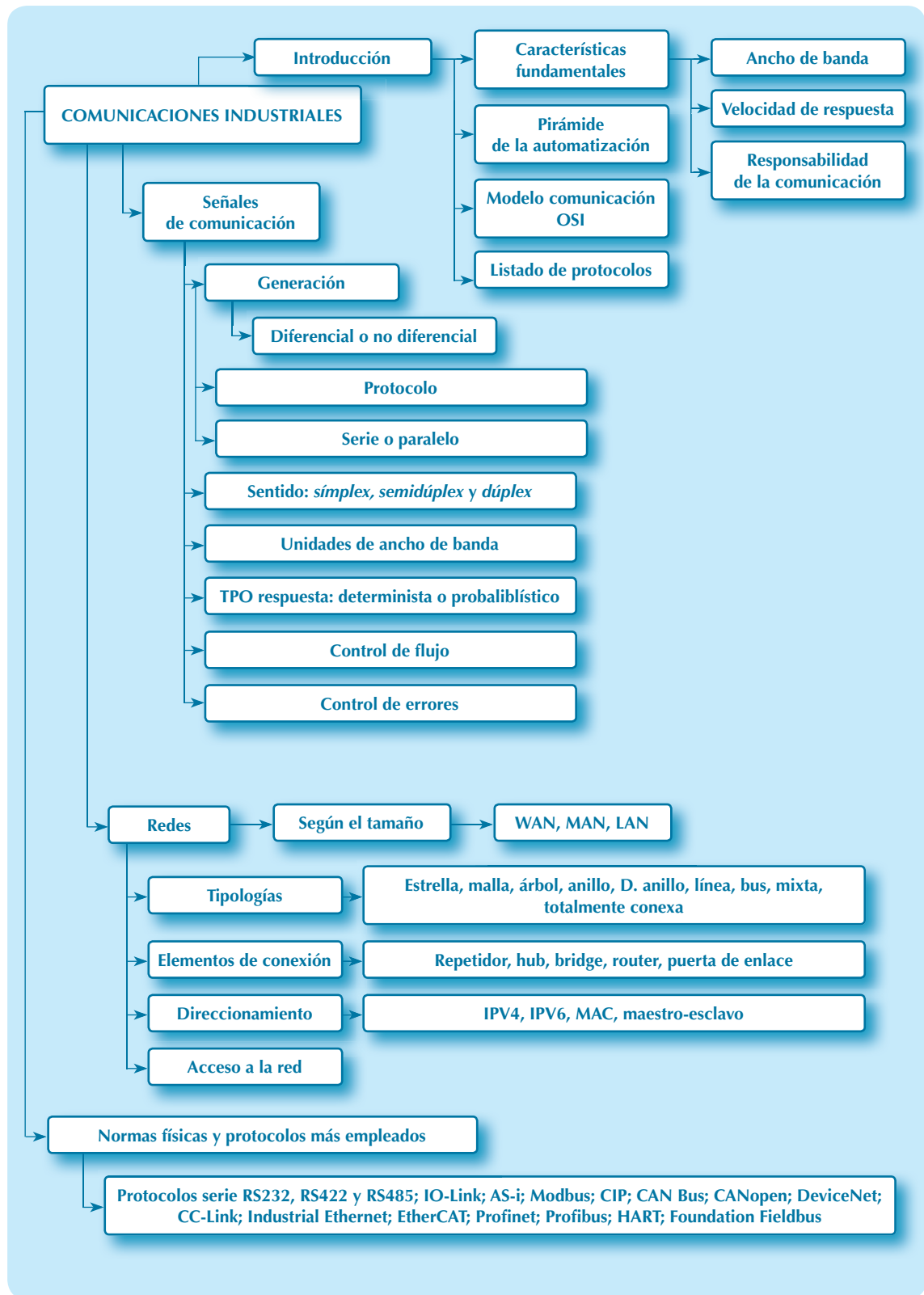
10. a b c d

Necesidad de la comunicación en la industria

Objetivos

- ✓ Conocer el papel de las comunicaciones dentro de los procesos y automatización industrial.
- ✓ Familiarizarse con los fundamentos de las señales y redes de comunicación, así como de los estándares actuales en la tecnología de la información.
- ✓ Identificar las características principales e importancia de los principales estándares y sistemas de comunicación entre PLC o dispositivos de automatización industrial.

Mapa conceptual



Glosario

Ancho de banda. Cantidad de información o de datos que puede enviarse a través de una conexión de red en un periodo de tiempo dado.

Bridge o puente. Dispositivo de red con cierta inteligencia para realizar la unión básica de redes, pues es capaz de almacenar información, comprobando entonces si hay errores y eliminando tramas con error.

CSMA/CD. Del inglés *carrier sense multiple access with collision detection*, es un método de acceso al medio en redes de tipo aleatorio en el que la estación intenta emitir y, si detecta colisión, espera un tiempo aleatorio para volver a intentarlo.

IPv4. Número de 32 bits para el direccionamiento de equipos o nodos en una red con protocolos TCP/IP que está dividido en 4 bytes, donde cada byte se muestra con su valor equivalente en decimal y, entre ellos, se separan por un punto.

LAN. Siglas de *local area network*, es decir, red de área local.

MAC (media access control). Dirección física o de hardware que incluye cada nodo de conexión, siendo cada nodo no un equipo de la red, sino el adaptador de red que conecta la red y el equipo (cada *network interface card* o NIC).

MAN. Siglas de *metropolitan area network*, es decir, red de área metropolitana.

Métodos de control de flujo. Aquellos que sirven para asegurar que el receptor recibe correctamente el flujo de datos y poder avisar al emisor en caso contrario.

Modelo OSI de comunicaciones. Del inglés *open system interconnection*, es una referencia de diseño para los protocolos de comunicaciones de la norma ISO/IEC 7498-1 que divide la red en distintas capas conceptuales, según la función realizada.

Paridad. Método de detección de errores consistente en añadir un bit cuyo valor depende de la paridad o no de la cantidad de unos presentes en el bloque binario transmitido.

Protocolo de comunicación. Sistema de reglas que definen todo lo necesario para establecer el código que permite a dos o más elementos de un sistema de comunicaciones o red transmitir información a través de una variación de una cantidad física en un medio.

Puerta de enlace o gateway. Dispositivo de red que es, a la vez, un nodo en una red y actúa como nexo entre redes. A menudo, sirve para traducir entre diferentes protocolos de comunicaciones, formatos de datos y otras funciones.

Repetidor. Dispositivo de red que se utiliza para regenerar eléctricamente señales que están debilitadas o distorsionadas por transmisión a grandes distancias o por perturbaciones en la red.

Router. Dispositivo de red capaz de conectar, al menos, dos redes y enviar paquetes entre ellos de acuerdo con la información en el encabezado de los paquetes y según las tablas de enrutamiento (tablas que indican los caminos que deben seguir los mensajes).

Tasa efectiva de transferencia de datos. Porcentaje de datos útiles (mensaje) con respecto al tráfico total de datos realizados en la transmisión.

TCP/IP. Se refiere, habitualmente, al conjunto o *suite* de protocolos de comunicación de internet y otras redes de comunicación y, concretamente, este término viene de los protocolos *transmission control protocol* (TCP) y el *internet protocol* (IP).

Técnicas de codificación digital. Establecen una relación más compleja que la mera resta entre las tensiones eléctricas de los cables empleados y la asignación de los valores 1 y 0 de binario de la señal que quiere transmitirse.

Topología de red. Estructura lógica o física que forman los elementos conectados de una red.

WAN. Siglas de *wide area network*, es decir, red de amplia área (áreas geográficas).

10.1. Comunicación

El flujo de información es inherente a la automatización industrial donde todo está conectado, y más mirando a un presente y futuro próximo de fábrica inteligente. Pero, sin mirar más allá, los sistemas de comunicación industrial han estado presentes desde el inicio de la automatización, donde es necesario recibir y emitir señales digitales cargadas de datos para comunicar máquinas y dispositivos sensores, preactuadores y actuadores.

¿Qué podría hacer una persona sin comunicación? En un entorno muy controlado, podría hacerse una tarea específica de forma indefinida. Por ejemplo, con un cuchillo, pelar montañas de patatas. O picar piedra en una cantera.

Cualquier otra labor sería imposible, pues exigiría algún tipo de coordinación y comunicación con otras personas. Este ejemplo puede ilustrar lo que sucede en cualquier proceso industrial. Hay muchísimas situaciones lo suficientemente sencillas como las descritas en las que un automatismo trabaja de forma autónoma. Sin embargo, cuando los procesos son mínimamente complejos o hace falta un control centralizado y su coordinación, es necesaria la comunicación entre procesos y autómatas. Si, además, se entiende que las señales entre sensores y control y control y preactuadores pueden considerarse comunicación, en tal caso, cualquier automatismo la emplea y la necesita.

En este punto, pueden diferenciarse las redes industriales y otras en función de sus características principales, que se recogen en el cuadro 10.1.

La lista de sistemas o protocolos de comunicación industrial existentes es muy extensa. En este capítulo, se explicarán solo algunos de ellos. Además, se estudiarán conceptos de comunicaciones, señales y redes de comunicaciones en general. Se entiende que esto es importante, pues deben conocerse conceptos básicos de la tecnología en la que se basa la transmisión de datos y redes de comunicación para que el estudiante esté preparado para afrontar redes, conociendo conceptos comunes de comunicaciones y redes que, para la configuración de cualquier protocolo, será necesario conocer (paridad, baudios, IP, etc.).

En cuanto a las comunicaciones industriales en concreto, la configuración de cada sistema de comunicación en el ámbito industrial está estrechamente ligado a las herramientas que proporciona cada fabricante distinto y es una enseñanza obsoleta en el momento en que el fabricante modifica dicha herramienta. Por esta variedad y obsolescencia, no se estudia pormenorizadamente la configuración con el software del fabricante de cada uno de estos protocolos o sistemas específicos de comunicación. Sí se estudian aquellos considerados más importantes, sus fundamentos, sus características principales y la importancia de cada uno.

CUADRO 10.1

Características fundamentales de los sistemas de comunicación

Ancho de banda	Cantidad de información o de datos que puede enviarse a través de una conexión de red en un periodo de tiempo dado. Se requieren anchos de banda elevados para redes o conexiones que necesitan la transmisión de grandes volúmenes de datos, pero normalmente con tiempos de respuesta elevados. En una red industrial, el ancho de banda no suele ser elevado, no es necesario trasladar grandes cantidades de datos a velocidades elevadas de transmisión. Solo para los niveles más altos de gestión, donde se supervisan todo tipo de datos de una corporación entera, o de diversas fábricas, puede resultar necesario.
Velocidad de respuesta	Aquella con la que un dispositivo satisface la necesidad de enviar información o realizar una comunicación. En el caso de redes industriales, es muy baja, pues, a menudo, así lo exigen los procesos. Por ejemplo, en el caso de elementos de seguridad (como un sensor de barrera para una zona de seguridad), la respuesta debe ser prácticamente instantánea.
Responsabilidad de la comunicación	Cuando, por algún motivo, se produce un error en la comunicación (en la transmisión de datos de una automatización de estampación de grandes piezas o fabricación de alimentos o, peor aún, en las señales que emite el ordenador de un coche al ABS cuando se requiere su actuación), la responsabilidad es muy elevada.

10.1.1. Pirámide de la automatización

Para ilustrar las diferencias entre redes según el nivel en el que operan, se emplea lo que suele denominarse *pirámide de la automatización*, que establece habitualmente cinco niveles, que se explican en el cuadro 10.2 y se esquematizan en la figura 10.1.

CUADRO 10.2

Pirámide de la automatización

Nivel de gestión global o corporativa	Este es el nivel más alto (utilizado en una fábrica completa o incluso en una corporación con varias fábricas con sus líneas y procesos), donde se visualizan y estudian diversos datos económicos y de gestión teniendo en cuenta todos los procesos empresariales (no solo los de fabricación), finanzas, productividad, ventas, etc., para introducirlos en sistemas de gestión ERP (<i>enterprise resource planning</i>) y perseguir su optimización. Es un nivel alejado de la fabricación. Las redes aquí empleadas deberán tener un elevado ancho de banda y no será necesario un tiempo de respuesta corto (respuesta rápida). El acceso a internet por parte de estas redes cuando hay distintas fábricas separadas será necesario para gestionar los datos de todas ellas. La responsabilidad en caso de fallar la comunicación no es elevada, pues no se requiere respuesta rápida y estas redes tendrán medios para detectar el fallo y volver a transmitir los datos. Las redes serán de tipo Ethernet no necesariamente industriales.
--	---

[.../...]

CUADRO 10.2 (CONT.)

Nivel de gestión de fabricación o planta	En este nivel, se incluye la planificación de la producción, la gestión logística de aprovisionamiento y la salida de producto terminado, los indicadores de planta de cumplimiento de plazos, de calidad, etc. El tipo de redes tendrá las mismas exigencias y será similar al caso anterior, por tanto, de tipo Ethernet, pero no necesariamente industriales.
Nivel de supervisión y optimización de proceso o línea de fabricación	Este nivel es más cercano al proceso y, en él, se encuentra la implementación de sistemas SCADA y equipos HMI para la supervisión de las líneas y se realiza el análisis y la comparación contra referencias de datos de los procesos: tiempos de espera, tiempos de avería, consumos de material, consumos energéticos, tasas de fallo, etc. Aquí los requisitos de ancho de banda disminuyen y la responsabilidad y necesidad de rapidez de respuesta aumentan. Las redes serán de tipo Industrial Ethernet o redes industriales de tipo bus.
Nivel de control de proceso	En este nivel, operan los controladores directos del proceso como PLC, ordenadores industriales, controladores CNC, variadores de frecuencia, etc. Aquí los programas de control realizados con software de automatización son protagonistas y las comunicaciones son entre dispositivos de control, con un volumen de datos bajo, pero muy alta velocidad de respuesta requerida. La velocidad de respuesta debe cumplir con los tiempos requeridos para el control del proceso, que, en fabricación industrial, puede ser de pocos milisegundos. La responsabilidad de la transmisión en la comunicación estando tan cerca del proceso puede ser importante. Las redes serán de tipo Industrial Ethernet o redes industriales de tipo bus en el nivel más cercano al proceso.
Nivel de campo	En la parte más baja de la pirámide de automatización, están las comunicaciones que manejan sensores, que son las más simples, incluso pueden ser todo o nada y, en el caso de los sensores digitales con señal codificada binaria, con muy poco volumen de datos. Es donde hay el menor requerimiento de ancho de banda, pero se exige un tiempo de respuesta (por ejemplo, de los sensores) muy corto, pues, en procesos rápidos, hace falta que la respuesta lo sea también. El fallo en la transmisión de una señal sí puede tener una responsabilidad elevada, ya que puede suponer una avería de la máquina o pérdidas económicas por errores en la fabricación. Las redes serán industriales de tipo bus.

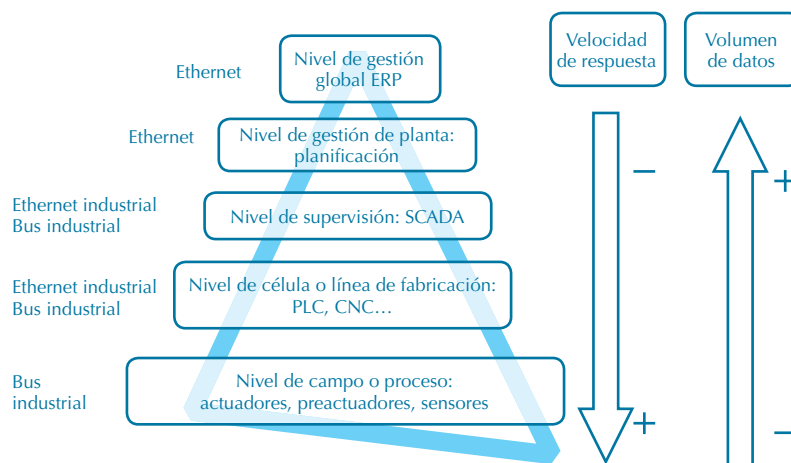


Figura 10.1
Esquema de la pirámide de la automatización.

RECURSO ELECTRÓNICO 10.1



En el anexo web 10.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, se recoge un listado de sistemas y protocolos de comunicación industrial.



Actividad propuesta 10.1

Sitúa los siguientes elementos en el nivel de la pirámide de automatización industrial que les corresponda:

- PLC.
- Solenoides de válvula hidráulica.
- Ordenador industrial para el control de procesos.
- Datos de seguimiento del flujo de materiales para la planificación logística.
- Centro de control de tres líneas de pintado con SCADA.
- Sensor inductivo de detección de avance de un carro.
- Indicador de resultados financieros de una corporación.

10.1.2. Niveles de comunicación del modelo OSI

La norma ISO/IEC 7498-1 establece el modelo OSI (en inglés, *open system interconnection*) y es una referencia de diseño para los protocolos de comunicaciones, pues divide la red en distintas capas conceptuales según la función realizada. Esta división permite entender cómo se estructuran los sistemas de comunicación para su funcionamiento. En una comunicación completa, unos elementos tendrán relación con una capa y otros con otra. Por ejemplo, el tipo de cable o conector estarán en la capa física, mientras que la interfaz gráfica estará en el nivel de presentación y aplicación.

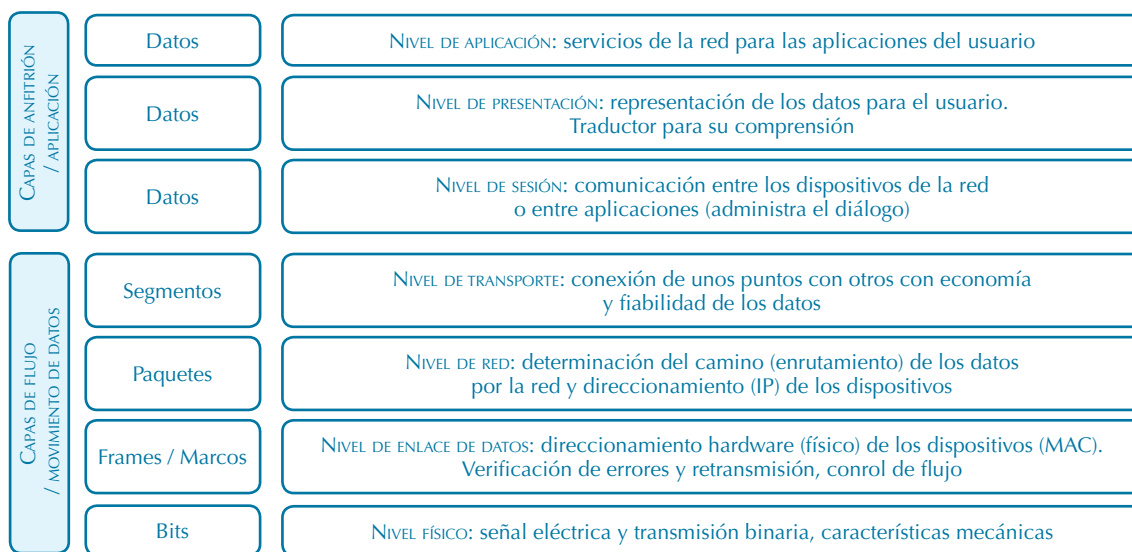


Figura 10.2
Modelo OSI de niveles de comunicación.

10.2. Conceptos básicos de señales de comunicación

En este apartado, se estudian las bases necesarias para comprender cómo funciona físicamente la transferencia de señales y su relación con el código transmitido.

10.2.1. Fundamentos de la generación e interpretación de señales

¿Cómo se realiza la comunicación de información a través de los cables? La respuesta es demasiado amplia, pero puede empezarse por la base tecnológica más habitual.

Realizando continuos cambios de nivel de tensión eléctrica o impulsos lumínicos en intervalos de tiempo determinados por un reloj o por los propios datos transmitidos, consigue emitirse e interpretarse en el receptor una cadena binaria que, con un código comúnmente conocido, transmite información.

© FUNDAMENTAL

La transmisión de datos se hace generando, con una determinada frecuencia, valores eléctricos cambiantes de diferencia de tensión eléctrica (u ópticos de luz) entre un cable eléctrico (o fibra óptica) y otro cable eléctrico de referencia para interpretar valores de *alto* y *bajo* en los niveles de diferencia de tensión y asignar a estos niveles *unos* y *ceros* (o viceversa) de comunicación binaria.

A) Transmisión no diferencial y diferencial

Con la explicación previa de cómo se transmite una señal de datos, se detallan aquí dos métodos para establecer, en el caso de que haya tensión eléctrica, esta diferencia de potencial que permite identificar dos estados distintos y asignarlos a ceros o unos binarios.

1. Tipo de transmisión no diferencial:
 - a) Dos hilos, uno con tensión y otro a masa.
 - b) El dato se obtiene de la diferencia de tensión entre los dos hilos.

2. Tipo de transmisión diferencial
 - a) Tres hilos, dos con tensiones opuestas y referidas a un cable de masa con tensión 0.
 - b) El dato se obtiene de la diferencia de tensión (resta) entre los dos hilos con tensiones opuestas.

La transmisión diferencial es más robusta, pues las diferencias de tensión son significativamente superiores y, por ello, es una señal capaz de recorrer más distancia y menos sensible a perturbaciones eléctricas (tensiones introducidas indeseadamente en los cables).

Los rangos de tensión que determinan cuándo debe considerarse que hay señal o no están definidos por cada especificación. Cuando la diferencia de tensión es positiva o negativa, pero cercana a 0 por debajo de un límite determinado, no se considera que haya señal. Los límites a partir de los cuales no se considera señal se denominan *zona de transición*, que es la zona de cambio de tensión de positivo a negativo, y viceversa. Por ejemplo, en RS232, cuando la tensión esté entre -3 y $+3$ V, no se considera señal, pues esta es la zona de transición. Las señales deberán ser menores de -3 V hasta -15 V o mayores de 3 V hasta 15 V.

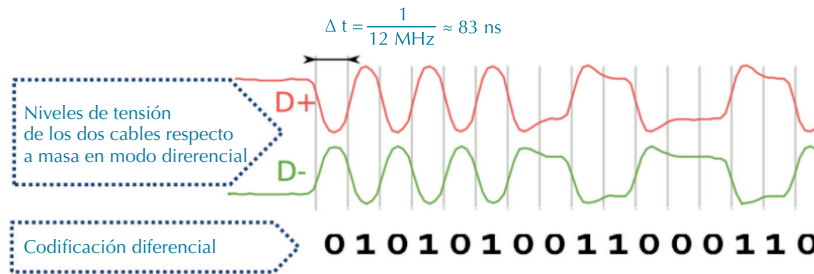


Figura 10.3
Ejemplo de codificación diferencial con las tensiones opuestas de dos cables.

B) Técnicas de codificación digital

A veces, la relación entre el dato binario (0 o 1) y la señal eléctrica no se obtiene directamente de la diferencia de tensión, sino que se emplean técnicas de codificación digital (como, por ejemplo, la codificación Manchester). Estas técnicas establecen una relación algo más compleja entre las tensiones y los valores 1 y 0 de binario de la señal que quiere transmitirse (por ejemplo, una operación lógica XOR entre el valor binario del dato y el valor de la señal de reloj que, periódicamente, cambia entre 0 y 1).

10.2.2. Protocolo de comunicaciones

En este capítulo, es un concepto que se emplea constantemente, por lo que es necesario conocer a qué se refiere.

Un protocolo de comunicación es un sistema de reglas que definen la sintaxis, la semántica y la sincronización de la comunicación y los posibles métodos de recuperación de errores en telecomunicaciones que permiten que dos o más elementos de un sistema de comunicaciones o red transmitan información a través de cualquier tipo de variación de una cantidad física (por ejemplo, diferencia de tensión eléctrica) y medio (por ejemplo, cables de cobre).

Los protocolos definen, por tanto, cómo transformar información en el mensaje binario e incluirlo en el paquete con la información adicional requerida y también cómo generar la variación de cantidad física empleada para transmitirlo. Esta transformación involucra a elementos de hardware (chips diseñados específicamente) y de software (programación).

Los sistemas de comunicación deben utilizar protocolos perfectamente definidos y acordados para la compatibilidad de dispositivos de comunicación. A menudo, los protocolos son desarrollados en normas técnicas emitidas por organismos como la ISO o la IEEE.

RECUERDA

- ✓ Con frecuencia, son necesarios varios protocolos para un sistema de comunicación y conforman un conjunto en el que todos son diseñados para trabajar juntos (*protocol suite* o *protocol stack* si se implementan en software).

10.2.3. Comunicación en serie o en paralelo

En la *transmisión en serie*, se establece un canal de comunicación donde todos los bits van uno detrás de otro en serie:

- Bit a bit con una línea.
- Para la misma frecuencia, es una transmisión más lenta que la paralela.
- Permite distancias mayores
- Es un tipo de transmisión muy empleado antiguamente y que todavía se utiliza.

En la *transmisión en paralelo*, se establece un canal de comunicación donde hay varias líneas de comunicación, de modo que los bits se envían en paralelo uno en cada canal, transmitiendo de una vez una cadena binaria (con un bit por cada línea y la longitud de la cadena binaria igual al número de líneas):

- El número de líneas coincide con la longitud en bits del carácter transmitido.
- Se emplean para comunicación local, pues su distancia no suele exceder (sin repetidores) los 20 m.
- Tiene mayor ancho de banda (rapidez de transmisión de datos) que la transmisión en serie para la misma frecuencia.

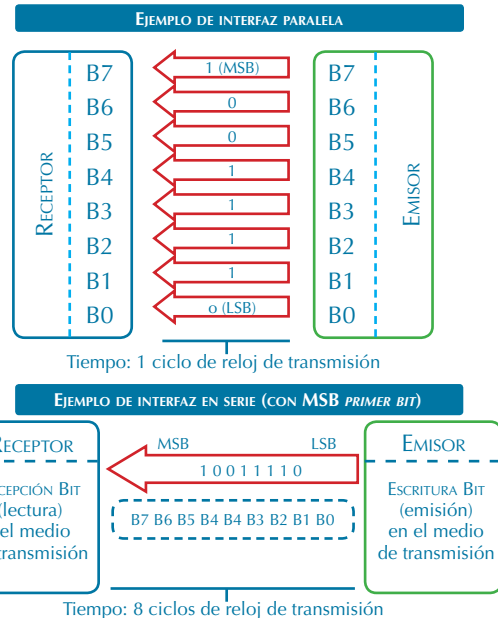


Figura 10.4 Comunicación en paralelo y en serie (LSB: *less significant bit*; MSB: *most significant bit*).

- **Sincronización envío-lectura o recepción en protocolos serie**

Cuando se genera un mensaje con una variación de tensión, por ejemplo, en un cable, se interpreta una emisión de ceros y unos en sucesión en el tiempo. Al ser algo dependiente del tiempo, es necesario conocer:

1. La frecuencia o ritmo determinado de emisión de bits (tiempo entre señales de dos bits contiguos).
2. Cuándo empieza y acaba cada bloque o cadena binaria para que tenga sentido, o bien una frecuencia suya conocida en emisor y receptor.

Estas dos características definen dos tipos de transmisión según la sincronización:

1. *Conexión asíncrona*: se da cuando la frecuencia de emisión de bits puede ser conocida (configurada en emisor o receptor) o detectada automáticamente, pero no hay una señal de reloj que sincronice periódicamente a emisor y receptor en lo que respecta al inicio y final de cada mensaje. La emisión de los mensajes puede darse en cualquier momento, pues no se conoce la frecuencia de llegada de los paquetes o bloques binarios que representan un mensaje.
2. *Conexión síncrona*: en este caso, aparte de la sincronización de frecuencia de bits, la transmisión se apoya en unas señales constantes y periódicas de sincronización de mensajes, con lo que se asegura en todo momento que emisor y receptor están sincronizados respecto al inicio y final de los bloques de bits que representan mensajes y, por tanto, la recepción de datos también tiene una sincronía y constancia periódica.

RECURSO ELECTRÓNICO 10.2



En el anexo web 10.2, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás explicados con más detalle los tipos de conexión.

10.2.4. Configuración del sentido de transmisión de datos en el canal

Según el sentido de transmisión del mensaje en el cable o canal, hay tres configuraciones posibles:

1. *Simplex*: los datos siempre viajarán en una dirección, desde emisor hasta receptor.
2. *Semidúplex (half duplex)*: los datos pueden viajar en una u otra dirección, pero solo durante un tiempo y la línea debe ser conmutada para que los datos puedan viajar en la otra dirección. Es decir, la comunicación va en un sentido o en otro, pero no en ambos a la vez.
3. *Dúplex (full duplex)*: los datos pueden viajar en ambos sentidos simultáneamente.

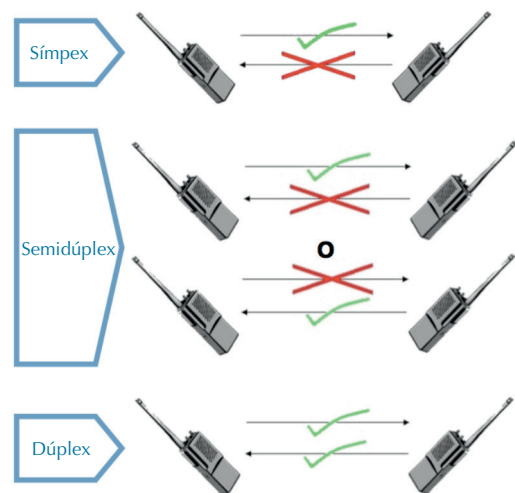


Figura 10.5
Modos simplex, semidúplex y dúplex.



PARA SABER MÁS

Convertidores UART y USART. Un convertidor UART (*universal asynchronous receiver-transmitter*) es un chip o dispositivo de hardware, bien individual, bien integrado en un microcontrolador, que gestiona la comunicación serial asíncrona entre elementos. Por ejemplo, entre los dispositivos de un ordenador y sus puertos serie, para la entrada o salida de información. Por tanto, los UART se utilizan comúnmente junto con estándares de comunicación serie tales como RS232, RS422 o RS485. Pueden integrarse en un chip varios UART. El USART (*universal synchronous and asynchronous receiver-transmitter*) es un UART, pero que también gestiona comunicaciones síncronas.

10.2.5. Unidades de ancho de banda o velocidad de transmisión de la información

En el capítulo 2, se han estudiado las unidades empleadas para indicar la longitud de cadenas de bits o de grandes cantidades de memoria binaria, donde, según el sistema internacional (SI), se anteponen prefijos como *kilo*, *mega*, *tera* y *peta* con símbolos *k*, *M*, *G*, *T* y *P* para cantidades de 10^3 , 10^6 , 10^{12} y 10^{15} veces la unidad indicada, por ejemplo, bits o bytes.

La velocidad de transmisión se expresará como una de estas cantidades por unidad de tiempo, normalmente el segundo. Por ejemplo, en bits por segundo bits/s o bps (*bits per second*) o mil bits por segundo con kbps (*kilo bits per second*) o un millón de bits por segundo con Mbps (*mega bits per second*), etc.

Cuanto menor sea el tiempo entre bit y bit siguiente transmitido, mayor será la velocidad, pues más bits cabrán en cada segundo: la frecuencia de bits equivale a la velocidad y será la inversa del periodo entre bit y bit. Si, por ejemplo, el tiempo entre dos bits es de $10 \text{ ns} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ s}$, la velocidad de datos es igual a $1/(10 \cdot 10^{-9}) = 10^8 \text{ bps}$ o bits por segundo o bits/s, lo que equivale a 100 millones de bps, que se expresa como 100 Mbps o Mb/s o Mbit/s.

La velocidad de transmisión en un canal de comunicación también se denomina *capacidad del canal*.

CUADRO 10.3

Unidades principales para indicar velocidades de transmisión

VELOCIDADES CON PREFIJO DEL SI		
Nombre	Símbolo	Cantidad de bits por segundo
Bit por segundo	bps o bit/s	1
Kilobit por segundo	kbps o kbit/s o kb/s	10^3
Megabit por segundo	Mbps o Mbit/s o Mb/s	10^6
Gigabit por segundo	Gbps o Gbit/s o Gb/s	10^9
Terabit por segundo	Tbps o Tbit/s o Tb/s	10^{12}
Petabit por segundo	Pbps o Pbit/s o Pb/s	10^{15}

Atención, no hay que confundir estas unidades previas con kBps, MBps, GBps, etc., pues la B mayúscula se refiere a bytes (un byte son 8 bits). En este caso, los prefijos del SI empleados implican que también estas unidades se refieren a múltiplos de 10^3 , 10^6 , etc., de bytes, de modo que las cantidades serán:

$$1 \text{ kBps} = 1000 \text{ bytes/s} = 8000 \text{ bps}$$

$$1 \text{ MBps} = 10^6 \text{ o } 1\,000\,000 \text{ bytes/s} = 8\,000\,000 \text{ bps} = 8 \text{ Mbps}$$

$$1 \text{ GBps} = 10^9 \text{ o } 1\,000\,000\,000 \text{ bytes/s} = 8\,000\,000\,000 \text{ bps} = 8 \text{ Gbps}$$

Pero, de nuevo hay que tener precaución con el origen del dato, pues, en el pasado, los cambios de una unidad a otra eran de 2^{10} (1024) en 2^{10} (lo que la norma IEC 60027-2 actual definió en unidades de cantidad como Kibibit, Mebibit, Gibibit, etc.), de modo que, en algunas referencias, aún pueden referirse a estas velocidades:

$$1 \text{ kBps} = 2^{10} \text{ bytes/s} = 1024 \text{ bytes/s} = 8192 \text{ bps}$$

$$1 \text{ MBps} = 1024 \text{ kBps} = 2^{20} \text{ bytes/s} = 1\,048\,576 \text{ bytes/s} = 8\,388\,608 \text{ bps}$$

Por último, es preciso indicar que los operadores de servicios de internet, coloquialmente, anuncian “megas” de velocidad, refiriéndose a “megabits por segundo” o “Mbps”.

A) Tasa efectiva de transferencia de datos

Cuando se habla de velocidad de datos, suele pensarse en un aprovechamiento completo. Sin embargo, para la mayoría de las transmisiones en serie, los datos representan parte de un paquete más completo que incluye bits con información de la dirección de origen y destino, códigos de corrección y detección de errores, aparte de otros bits de información o control. La parte referida a los datos se denomina *payload* y la otra, *overhead*. Las segunda puede tener mucho protagonismo y la relación entre los bits de datos (*payload*) del paquete enviado y su longitud total ofrecen un porcentaje que representa la eficiencia del protocolo empleado. Por ejemplo, si, en una conexión Gigabit Ethernet, la tasa de transferencia puede ser de 0,6 Gbits/s y tener un rendimiento neto o velocidad de datos efectiva de 0,5 Gbit/s, esto arroja un rendimiento de $0,5/0,6 = 83,33\%$.

B) Tasa de baudios

El término *baud* o *baudio* fue acuñado por el ingeniero francés Emile Baudot, que fue pionero midiendo la velocidad de las transmisiones con el telégrafo.

Es muy frecuente confundir baudios con bps, pero no son lo mismo. La velocidad en baudios se refiere al número de símbolos transmitidos por segundo. Si se define el bit como símbolo, los baudios equivaldrán a bps, pero, si se define el símbolo como, por ejemplo, una palabra binaria (2 bytes), se trata de una velocidad de transferencia mucho mayor. Por ello, debe conocerse la longitud del paquete o elemento que se considera como símbolo transmitido en el protocolo empleado. De cualquier forma, al configurar una conexión con más baudios, implicará mayor velocidad, pero, sobre todo, será fundamental que la tasa de baudios sea igual en el receptor y en el emisor.

10.2.6. Tipos de sistemas de comunicación según la gestión del tiempo

La filosofía de gestión del tiempo en la transmisión de mensajes define dos tipos generales de sistemas de comunicación:

1. *Determinista*: el tiempo máximo de transmisión y recepción debe ser fijo y conocido. Esta exigencia se aplica en las redes industriales, donde el control de procesos tiene unas claras restricciones de tiempo a las que deben adaptarse los sistemas de comunicación, por lo que es preciso garantizar unos tiempos máximos. Por ejemplo, son deterministas los sistemas AS-i, Profibus y Profinet.
2. *Probabilístico*: los tiempos máximos de transmisión y recepción son aleatorios y no fijos y, por tanto, desconocidos. Para redes donde los tiempos no sean críticos ni tengan tiempos máximos de transmisión imperativos, como Ethernet con CSMA/CD.

10.2.7. Control del flujo de comunicaciones

Durante una transmisión, puede suceder que el equipo receptor no procese la información recibida tan rápidamente como el emisor la emite. Para evitar la pérdida de información que no pueda ser procesada a tiempo, el receptor debe poder ir avisando al emisor de que el flujo de datos se produce de modo adecuado. Para ello, se realiza el control de flujo de dos modos:

1. *Control de flujo por hardware*: se dedica al cableado físico para enviar señales de control de flujo como, por ejemplo, el cable o pin de señal “listo para enviar o recibir”: RTS (*request to send*)/CTS (*clear to send*), el cable o pin de señal de equipos preparados: DTR/DSR.
2. *Control de flujo por software*: software *flow control* o software *hand shaking*, en el que se emplean caracteres ASCII de control que el dispositivo receptor emplea para indicar al emisor que continúe o detenga el envío de datos como, por ejemplo, XON (*transmit on*): ASCII 17 y XOF (*transmit off*): ASCII 19.

10.2.8. Control de errores (detección y corrección)

Durante la transmisión, por motivos como el ruido eléctrico y la capacitancia de los cables, puede haber distorsión en el mensaje y no recibirse en el receptor, lo que se ha emitido desde el emisor.

Este problema que hay que resolver se divide, a su vez, en dos: detección y corrección de errores. Se indican, a continuación, diversas técnicas de detección de errores.

A) Paridad

En la *verificación de paridad* o de *redundancia vertical VRC* (*vertical redundancy checking*), el emisor incluye en el mensaje un bit adicional, denominado *bit de paridad*, que es función de la paridad de unos (si su cantidad es par o impar) que hay en la cadena emitida. Al recibir el mensaje, el receptor verifica si el bit de paridad es coherente con la cadena recibida. Si lo es, dará el mensaje por bueno y, si no lo es, lo rechazará e indicará un mensaje de error de transmisión.

- *Verificación con paridad par*: si la cantidad de unos emitidos es un número par, el emisor incluye en el bit de paridad un 0. Si la cantidad es impar, incluye un 1.
- *Verificación con paridad impar*: al revés que con la paridad par, si la cantidad de unos emitidos es un número par, el emisor incluye en el bit de paridad un 1. Si la cantidad es impar, incluye un 0.

El bit de paridad se constituye al emitir y, si, al recibir el mensaje, hay discrepancia entre el bit de paridad y los bits recibidos, es que se ha producido un error.

Una limitación es que, si hay dos bits corruptos, no habrá detección del error.

B) Técnicas o métodos de corrección de errores

La corrección del error puede conseguirse de dos formas:

1. *Filosofía de corrección hacia atrás*: cuando se descubre un error, el receptor puede pedir al emisor que retransmita toda la unidad de datos.
2. *Filosofía de corrección hacia delante*: el receptor emplea un código de corrección de errores que corrija automáticamente determinados errores contando con información redundante que incrementa el número de bits total transmitido. El número de bits redundantes necesarios para corregir muchos errores es tan alto que su uso no es eficiente, por esa razón, la mayoría de la corrección se limita a errores de tres bits o menos. Algoritmos conocidos de corrección son el de Hamming o Reed-Muller.

RECURSO ELECTRÓNICO 10.3



En el anexo web 10.3, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás otras técnicas de detección de errores más complejas.

10.3. Conceptos básicos de redes

Una red de comunicaciones es un sistema de elementos comunicados entre sí, basado en un medio de transmisión de datos y en señales capaces de viajar por este medio.

El medio de transmisión establece los canales de comunicación conformando la red con unos caminos y estructuras determinadas. Las uniones deben realizarse con dispositivos y los elementos han de ser localizables dentro de la red. Todos estos elementos se describen a continuación.

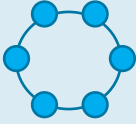
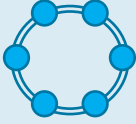
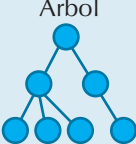
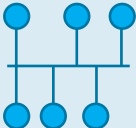
10.3.1. Clasificación según el tamaño

Por tamaño y extensión, puede establecerse una clasificación de las redes. Desde pequeñas redes con unos pocos nodos, pasando por redes de área local (LAN, *local area network*) para conectar un buen número de nodos o equipos en una fábrica, grandes redes de área metropolitana (MAN, *metropolitan area network*) o grandísimas redes de área amplia (WAN, *wide area network*), incluyendo enlaces con satélites, utilizadas para conexiones a grandes distancias geográficas.

10.3.2. Topologías de red

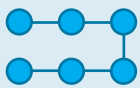


A la hora de diseñar la red, física o lógicamente, los elementos conectados pueden unirse formando distintas estructuras. Estas estructuras es lo que se define como *topología de red* y hay distintas posibilidades.

CUADRO 10.4
Topologías de red

Tipo	Descripción
<p>Anillo</p>  <p>Doble anillo</p> 	<p>Es un bus cerrado por los extremos, donde cada nodo tiene la responsabilidad de recibir y emitir. El emisor está conectado a cada lado con otros equipos y suelta el mensaje, que viaja en un sentido pasando por todos los nodos hasta llegar al receptor. Al ir el mensaje de equipo a equipo, puede haber más de un mensaje en la red al mismo tiempo. Su capacidad es mayor que la topología bus, pero, al pasar por todos los nodos, es menor que la de estrella. Es fácil ampliar la red conectando nodos al anillo. Trabaja con el concepto de <i>token passing</i> o <i>paso de testigo</i>, por el que el mensaje contiene información del destinatario. El testigo pasa de nodo en nodo y cada uno comprueba si la señal está destinada a él. Si lo es, lo procesa y lo pasa vacío (sin destinatario) a la red. Si no lo es, pasa el <i>token</i>, junto con los datos, al siguiente nodo y esto se repite hasta que el mensaje alcanza su destino deseado. Si cae un nodo, afecta a toda la red y la conexión física es única (igual que en un bus), por lo que tiene mucha responsabilidad. El doble anillo es igual, pero con un anillo adicional que proporciona redundancia de comunicación en caso de fallo y, por tanto, mayor fiabilidad. Cada anillo funciona de forma independiente y los datos circulan en ambos sentidos (ambos anillos), salvo cuando la red falla en uno de ellos, entonces, el anillo secundario asegura el flujo de datos.</p>
<p>Árbol</p> 	<p>Todos los equipos conectados entre sí a través de dispositivos concentradores o <i>hubs</i> formando una estructura arbórea. Es apta para la organización por zonas o departamentos y tiene más alcance que un bus simple. El rendimiento es bueno, salvo cuando la ramificación tiene muchas bifurcaciones, pues los recursos de red van dividiéndose. Además, todos los nodos aguas abajo de un nodo son dependientes de este para comunicarse aguas arriba y con otras ramas. La ventaja principal y, a veces, una consecuencia de una mala planificación o de un crecimiento muy paulatino de la red es que se amplía fácilmente incrementando la ramificación.</p>
<p>Bus</p> 	<p>Todos los equipos están conectados a una misma línea que recorre longitudinalmente la red y es compartida por todos. En cada momento, debe haber un solo mensaje en el bus, pues hay que evitar <i>colisiones</i>. Por ello, debe haber un control de flujo y cada nodo debe verificar que el bus está libre antes de comenzar a transmitir. Es un diseño de gran protagonismo en las redes industriales, especialmente en la base de la pirámide de la automatización (comunicaciones en el proceso de sensores, preactuadores, actuadores e incluso PLC). Su coste suele ser bajo, es fácil ampliar la red añadiendo nodos (conectar al bus) y el fallo de un nodo no afecta al resto. Los nodos pueden comunicarse entre sí sin depender de otros y el control de flujo es fácil. Sin embargo, hay atenuación por distancia en el bus y, al incrementar la distancia, hay que instalar repetidores. Existe la posibilidad de colisiones y, al ser una vía de comunicación única, el bus tiene mucha responsabilidad y un mensaje largo acapara el bus mucho tiempo.</p>

[.../...]

CUADRO 10.4 (CONT.)

Tipo	Descripción
En línea 	Es como una red en bus, pero donde cada equipo o estación de la red forma parte del canal de comunicación. Si cae un nodo, la red se divide.
Estrella 	Todos los equipos están conectados a un concentrador o <i>hub</i> con alta capacidad de transmisión de datos y caminos cortos, de modo que se consigue un buen rendimiento, es fácil añadir nodos (conectar al <i>hub</i>) y de instalar y mantener. Sin embargo, la dependencia del <i>hub</i> es total: rendimiento de la red, fiabilidad (si falla el <i>hub</i> , cae toda la red). Se emplea mucho para LAN con Ethernet.
Malla 	Cada nodo está conectado a muchos o todos los nodos, con lo que es posible llevar los mensajes de un nodo a otro por distintos caminos. Si la red de malla está completamente conectada, se dice que está totalmente conexas y difícilmente habrá interrupción en las comunicaciones. No requiere un nodo central, con lo que se reduce el riesgo de fallos y, por tanto, el mantenimiento periódico (un error en un nodo, sea importante o no, no implica la caída de toda la red). Una red en malla resulta muy fiable frente a fallos puntuales, siempre que la interconexión sea alta.

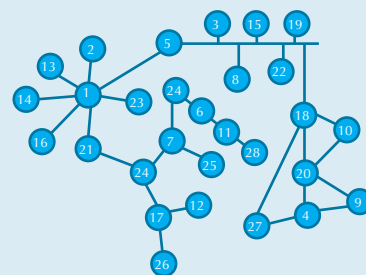
También existe la denominada *conexión punto a punto*, que no es una topología de red, sino, simplemente, una conexión directa entre dos equipos. Si se conectan más, el equipo intermedio deberá tener otra tarjeta de red para establecer otra conexión punto a punto con el tercer equipo.

Por último, hay que mencionar que las redes de cierto tamaño presentan a menudo una topología mixta, donde, según las zonas de esta, puede encontrarse una configuración u otra.



Actividad propuesta 10.2

En la imagen de una red mixta que se adjunta, intenta identificar subredes con distinta tipología y confecciona una tabla indicando a qué tipo de subred pertenece cada nodo representado.



10.3.3. Elementos de conexión de nodos en redes

Los elementos de conexión de nodos en redes son los siguientes:

1. *Repetidor*. Dispositivo de red que se utiliza para regenerar eléctricamente señales que están debilitadas o distorsionadas por transmisión a grandes distancias o por perturbaciones en la red.

2. *Concentrador o hub*. Es esencialmente un repetidor que tiene múltiples puertos (es decir, puntos de conexión) y puede conectar más de dos segmentos de red. Por ejemplo, para conexiones en estrella, los repetidores serán concentradores o *hub*.
3. *Puente o bridge*. Posee cierta inteligencia para realizar la unión básica de redes, pues es capaz de almacenar información, así como de comprobar si hay errores y eliminar las tramas con error. Si no hay error, reenvía.
4. *Router*. Es capaz de conectar al menos dos redes y envía paquetes entre ellos, de acuerdo con la información en el encabezado de los paquetes y según las tablas de enrutamiento (tablas que indican los caminos que deben seguir los mensajes).
5. *Puerta de enlace o gateway*. Es un término general que se refiere a un nodo en una red que actúa como nexo entre redes y que, a menudo, sirve para traducir entre diferentes protocolos de comunicaciones, formatos de datos y otras funciones. Se personalizan y se diseñan para realizar funciones específicas.



RECURSO ELECTRÓNICO 10.4

En el anexo web 10.4, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás una explicación más detallada de los elementos de conexión de nodos en redes.

10.3.4. Direccionamiento de elementos de la red

Para que los paquetes de información lleguen al destino deseado, debe ser posible identificar dicho destino. En la red, debe haber una dirección para cada elemento o nodo que permita identificarlo. La dirección puede ser lógica y estar asignada por los dispositivos que gestionan el tráfico y la conexión de elementos (una puerta de enlace, cuando se conecta un ordenador a una red, le asigna una dirección IP) o puede ser por hardware (con un código invariable presente de fábrica en el dispositivo, como la dirección MAC).

A) Direccionamiento del Ethernet Internet Protocol (dirección IP)

1. Ethernet

Es un término que, conforme indica la familia de normas IEEE 802.3, define los siguientes aspectos:

- a) Cómo debe ser la parte física (cableado y conectores, señal eléctrica y nivel físico OSI).
- b) Cómo es el protocolo que describe cómo los dispositivos en red pueden *colocar* los datos (nivel de enlace de datos OSI) en la parte física, formatear datos para su transmisión a otros dispositivos de red en el mismo segmento de red y poner esos datos en la conexión de red. Se relaciona con los protocolos TCP/IP.

La parte física actual emplea cables de par trenzado o cableado de fibra óptica. El protocolo Ethernet define el bloque completo que ha de transmitirse donde la trama o cadena binaria

no solo incluye la información transmitida, sino también la información de direcciones físicas MAC (*media access control*) tanto de emisor como de receptor y otras informaciones como, por ejemplo, información para corrección de errores y detección de problemas de transmisión. Su origen es de los años ochenta y ha evolucionado, con una velocidad inicial máxima de 10 megabits por segundo (Mbps) pasando por diversos estándares Fast Ethernet a 100 Mbps y Gigabit Ethernet o 10 Gigabit Ethernet que amplía el ancho de banda máximo hasta 1000 Mbps y más. También existen los estándares IEEE 802.11a, b, g, n y ac, que definen el equivalente de Ethernet para redes inalámbricas (wifi).

2. TCP/IP

Se refiere, habitualmente, al conjunto o *suite* de protocolos de comunicación de internet y otras redes de comunicación. El nombre viene de los protocolos originales iniciales, que eran el TCP (*transmission control protocol*) y el IP (*internet protocol*). Esta *suite*, aparte de los TCP e IP, incluye otros como el HTTP (*world wide web's hypertext transfer protocol*); el FTP (*file transfer protocol*); el Telnet, para conexiones a ordenadores remotos, o el SMTP (*simple mail transfer protocol*). Son protocolos que, mediante software, realizan todas las acciones necesarias para que los datos lleguen de un extremo a otro extremo de la red (cómo empaquetarlos, dirigirlos o enrutarlos, transmitirlos y recibirlos).

En referencia concreta a los protocolos originales, TCP) e IP realizan sus funciones de red en dos niveles:

- a) El nivel superior es el TCP y gestiona la división de un mensaje o archivo en paquetes pequeños que se transmiten a través de la red o internet y son recibidos por el protocolo TCP en el equipo receptor, que reensambla los paquetes para reconstituir el mensaje original.
- b) El nivel inferior es el IP y gestiona la parte de dirección a la que cada paquete debe llegar (su destino). Cada puerta de enlace revisa esta dirección para ver adónde debe reenviar el mensaje y cada paquete (puede que algunos paquetes del mismo mensaje sigan caminos distintos, pero llegarán todos a su destino y allí se reensamblarán).

RECUERDA

- ✓ Para intentar aclarar en lo posible la confusión entre Ethernet y TCP/IP, puede decirse lo siguiente:
 - Ethernet incluye el nivel físico y de enlace de datos del modelo OSI a través de la definición del medio (cableado) y MAC, definiendo cómo los paquetes de datos se traducen a una variación de magnitud física (voltaje) en el medio de transmisión (cables).
 - TCP/IP se ubican en el nivel de red (IP) y el nivel de transporte (TCP).

Estos dos niveles de protocolo TCP/IP emplean el modelo de comunicación cliente-servidor, en el que un equipo de la red (cliente) solicita y recibe un servicio (como recibir una página web) a otro equipo de la red (servidor). La red puede tener una topología, pero la comunicación TCP/IP es punto a punto (cada equipo comunica desde un punto de la red a otro

punto). Cada solicitud de cliente se considera una nueva petición no relacionada con ninguna anterior para liberar las rutas de red y que todos los nodos puedan usarlas continuamente (dentro de un mensaje sí se mantiene la petición y la conexión permanece hasta que se hayan recibido todos los paquetes del mensaje).

3. Dirección física MAC

La dirección física MAC (*media access control*) es una dirección de hardware que incluye cada nodo de conexión, donde cada nodo no es un equipo de la red, sino el adaptador de red que conecta red y equipo (cada *network interface card* o NIC). Por ejemplo, un equipo puede tener dos o más nodos de conexión a redes y tendrá para cada nodo de conexión su adaptador de red (NIC), cada uno con su dirección MAC. Puede conocerse también por *Ethernet hardware address* (EHA).



Figura 10.6
Etiqueta de un router UMTS-3G (*universal mobile telecommunications service*) con direcciones MAC para los módulos LAN y WLAN (wifi).

La dirección MAC es un código de 48 bits que se imprime en el hardware del adaptador por parte del fabricante y es única.

La IEEE define tres métodos (MAC-48, EUI-48 y EUI-64, *extended unique identifier*) para generar el código, donde los primeros son de 24 bits para ofrecer información del adaptador y del fabricante, según el OUI (*organizationally unique identifier*).

Es una dirección que se emplea por algunos protocolos, no todos, pero sí por uno muy importante. Se emplea por el TCP/IP, donde la dirección IP gestionada por software sirve para identificar al nodo en la red y un protocolo ARP (*address resolution protocol*) relaciona dicha dirección IP con la dirección MAC del dispositivo, que identifica el hardware de adaptadores de red y lo vincula a la dirección IP que se le ha asignado.

Actividad propuesta 10.3



Busca 5 códigos MAC en el adaptador wifi de los ordenadores que tienes cerca o en el de teléfonos móviles.

Extrae los primeros 6 dígitos hexadecimales (son los primeros 24 bits del código completo) y averigua a qué fabricante pertenecen en internet. Contrasta la información con los dispositivos de los que has anotado las direcciones MAC (recuerda que no tienen por qué coincidir, pues el código MAC de fabricante corresponde al adaptador de red y no al fabricante que lo integra en su dispositivo ya sea este un teléfono, *router*, etc.).

4. Dirección IP

Como se deduce de todo lo explicado previamente (Ethernet, TCP/IP, MAC, etc.), una parte fundamental de la configuración de una red con protocolos TCP/IP es la configuración de las direcciones IP.

RECURSO ELECTRÓNICO 10.5



En el anexo web 10.5, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar cómo se averigua la dirección IP de una página web y otros datos que proporciona esta dirección.

5. Dirección IPv4

Es un número de 32 bits para el direccionamiento de equipos o nodos en una red con protocolos TCP/IP que está dividido en 4 bytes, donde cada byte se muestra con su valor equivalente en decimal y, entre ellos, se separan por un punto. Por ejemplo, 192.168.1.50.

Por ello, cuando se observa una dirección IP, cada campo separado por un punto nunca puede superar el valor 255. Al ser, en realidad, un binario puede encontrarse la dirección IP expresada como 8 caracteres hexadecimales (2 para cada byte).

Cada equipo conectado a una red TCP/IP debe tener una dirección IP única.

La dirección IP se divide en dos partes:

1. La primera es la dirección de red. Las redes grandes están, a su vez, compuestas por otras redes unidas. Por ello, en la dirección IP de un equipo, se incluye la dirección de red (única para cada red) a la que el equipo pertenece.
2. La segunda es la dirección local. Cada dispositivo dentro de su red tiene una identificación única.

An IPv4 address (dotted-decimal notation)

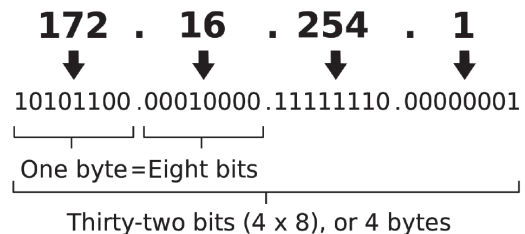


Figura 10.7
Ejemplo de dirección IP.

Por tanto, es posible que las direcciones locales se dupliquen en diferentes redes, pero el conjunto de la dirección IP (dirección de red y dirección local) será siempre única.

6. Máscara de subred

Sirve para determinar qué parte de la dirección IP es la dirección de red y qué porción es la dirección local. También es un número de 32 bits con el mismo formato que una dirección de red, donde cada bit que es un 1 significa que el bit correspondiente de la dirección IP es parte de la dirección de red y cada bit de la máscara de subred que es un 0 significa que el bit correspondiente de la dirección IP es parte de la dirección local. Hay que recordar que, por ejemplo, la máscara de subred 255.255.0.0 es en realidad FFFF.00.00 o, lo que es lo mismo, 1111 1111 1111 1111 0000 0000 0000 0000. En definitiva, cuando una máscara de subred tenga 255 en uno de sus bloques significa que dicho bloque en la IP pertenece a la dirección de red.

7. Puerta de enlace predeterminada

Supóngase que el dispositivo con IP 192.168.1.50 debe comunicarse con un dispositivo con dirección IP de 192.168.0.3, cuya máscara de subred en ambos casos es 255.255.255.0.

La primera red es la 192.168.1 y la segunda, 192.168.0. Dado que ambos dispositivos no están en la misma red, uno de ellos no puede enviar sus datos directamente al otro, pues no pueden *verse* y deben pasar por el elemento que conecta ambas redes, que es un *router* y puerta de enlace predeterminada y también tiene una dirección IP por cada red que conecta.

El *router* está configurado para enrutar (pasar o cambiar) paquetes de una interfaz (una red) a la otra, y viceversa. Necesariamente, esto significa que el *router* tendrá al menos dos direcciones IP en dos redes IP diferentes, una por interfaz de red. En este ejemplo, podría tener IP 192.168.1.1 para la red 192.168.1 e IP 192.168.0.1 para la red 192.168.0.

Para poder comunicar con una dirección fuera de su red, por ejemplo, el equipo con IP 192.168.1.50 deberá indicar la dirección IP del *router* encargado de unir su red con otras (que para su red será, por ejemplo, 192.168.1) y el *router* se encargará de que el paquete llegue a su destino en la otra red.

Normalmente, los dispositivos envían directamente los paquetes destinados a dispositivos en su misma red y envían a la puerta de enlace predeterminada los paquetes destinados a otros dispositivos con una dirección de red diferente.

Puede no haber necesidad de indicar la puerta de enlace si la red está aislada (no está conectada a ninguna otra red) o si no desea permitirse al equipo comunicarse con otras redes.

8. Servidor DNS

Cuando un ordenador hospeda (contiene) una página web que es accesible en internet, debe tener una dirección IP para ser localizable. Estas direcciones de infinidad de páginas web o portales existentes en internet son, en definitiva, direcciones IP y, por tanto, son del tipo 64.233.160.0; lo que a cualquier persona no le dice nada, al contrario que `www.google.com` por ejemplo. El servidor DNS es la dirección de un servidor (ordenador) que contiene una base de datos de direcciones IP públicas y sus nombres de página web asociados o lo que se conoce como *direcciones web*. Por ejemplo, si, en el navegador, se introduce “`www.facebook.com`”, no es una dirección IP con la que conectar. En ese instante, el ordenador comunica con el servidor DNS preguntándole la IP correspondiente a `www.facebook.com` y este remite al ordenador el código de dirección IP relacionado con `www.facebook.com`, que realmente corresponde con la máquina que hospeda dicha página. Por ejemplo, devolvería la IP 209.85.255.255, que debe ser el servidor con el que el ordenador realizará la conexión. Si esta

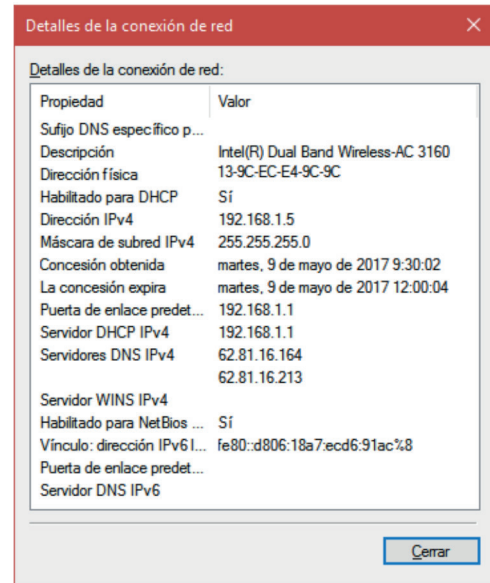


Figura 10.8
Ejemplo de detalle de propiedades de red en Windows.

fuera realmente la IP pública de Facebook (los grandes portales ocupan muchas IP públicas distintas y las emplean según les conviene), podría insertarse dicha IP en el navegador y se conectaría igualmente.



Actividad propuesta 10.4

Si se dispone de un ordenador conectado a una red y preferentemente a internet, abre una ventana de símbolo de sistema (buscar y ejecutar "cmd.exe") y escribe "ipconfig". Explica todo lo que entiendas de la información que aparece.

9. IPv6

Se ha explicado la IPv4, pero existen dos versiones de direccionamiento IP del protocolo Internet Protocol.

La versión más conocida (y explicada) es la versión IPv4 (protocolo de internet versión 4), que es la cuarta revisión del protocolo de internet (IP) utilizada para identificar dispositivos en una red a través de un sistema de direccionamiento. Esta versión puede direccionar con un binario de 32 bits y permite, por tanto, un total de 2^{32} direcciones (algo más de 4 mil millones de direcciones). Con el crecimiento de internet, se espera que el número de direcciones IPv4 sea pronto insuficiente porque cada dispositivo que se conecta a internet requiere una dirección.

La IPv6 es un nuevo sistema de direccionamiento que permitirá ofrecer las próximamente requeridas direcciones de internet extra. También se denomina *IPng* (*internet protocol next generation*), diseñado por la Internet Engineering Task Force (IETF), reemplazará a la actual IPv4, pero coexistirán ambas durante un tiempo. Está diseñado para permitir un crecimiento de direcciones constante, pero también introduce muchas otras mejoras de protocolo para implementar en conjunto el tráfico de datos.

Las direcciones IPv6 son direcciones IP de 128 bits escritas en hexadecimal y separadas por dos puntos.



Actividad resuelta 10.1

Indica para las siguientes direcciones cuál es la dirección de red y cuál es la dirección del equipo:

192.168.0.3/255.255.255.0: IP de clase C para redes pequeñas o medianas, dirección de red 192.168.0 y la dirección del equipo dentro del rango posible para equipos es la 3 o con la IP completa 192.168.0.3.

10.253.100.1/255.0.0.0: IP de clase A para redes enormes, dirección de red 10 y la dirección del equipo dentro del rango posible para equipos, es la 253.100.1 o con la IP completa 10.253.100.1.

148.17.9.1/255.255.0.0: IP de clase B para redes grandes, dirección de red 148.17 y la dirección del equipo dentro del rango posible para equipos, es la 9.1 o con la IP completa 148.17.9.1.

B) Configuración del direccionamiento en comunicaciones de tipo bus maestro-esclavo

Es un modelo de comunicación en el que el dispositivo maestro tiene el control unidireccional sobre uno o más dispositivos esclavos.

El método de direccionamiento en un sistema maestro-esclavo se determinará por cómo lo defina cada sistema, el protocolo empleado o la norma que lo regule si existe, pero, en una red basada en bus, este direccionamiento se realiza habitualmente con los esclavos de forma dependiente de cada maestro. Una vez que se establece la relación maestro-esclavo, el maestro adquiere una dirección de maestro y el control es siempre del maestro al esclavo o esclavos, con las direcciones de los esclavos dependientes del grupo subordinado al maestro.

Algo habitual es realizar una configuración de todos los dispositivos grabando en ellos una dirección. Se selecciona un maestro de entre un grupo de dispositivos y el resto actúan como esclavos. En la trama o telegrama de llamada o comando del maestro, se incluye una cadena de bits con longitud suficiente para contener la dirección del destinatario. Por ejemplo, con 6 bits, pueden direccionarse 64 módulos (2^6 combinaciones, del 0 al 63). Puede haber direcciones reservadas (como, por ejemplo, la 0 en el sistema AS-i).

Con este esquema y el maestro con el control de la comunicación, cualquier comando de control se propaga simplemente a los esclavos desde el maestro y se hace efectiva según la dirección del esclavo destinatario incluida en la trama del mensaje.

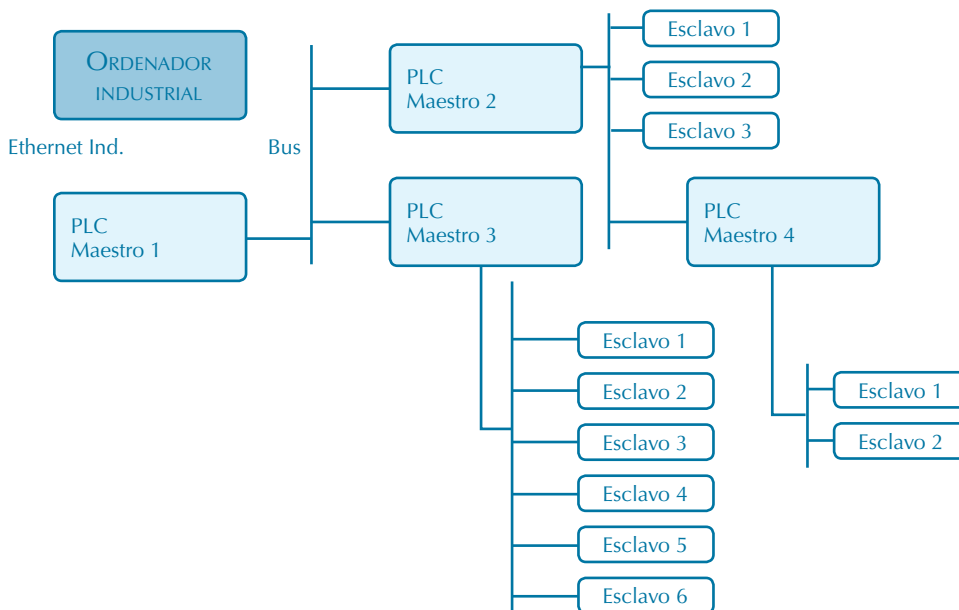


Figura 10.9
Red bus multimaestro.

Para configuraciones multimaestro, cada maestro tendrá una dirección y todos los esclavos que dependen de él, direcciones subordinadas a este. Cada maestro será dominante sobre sus esclavos, pero será necesario establecer un arbitraje entre maestros para que haya una jerarquía o preferencia de mando en el envío de los mensajes.

10.3.5. Métodos de acceso a la red

Los nodos, cuando deseen comunicar algo a otros nodos, dispositivos o equipos conectados a la red, deben insertar el mensaje en la red. Cuando hay un intento de transmisión simultánea, puede haber colisiones, por tanto, errores y pérdida de información. Existen dos tipos de métodos de acceso al medio que garantizan el uso exclusivo de la red por un único mensaje al mismo tiempo y que se explican a continuación.

A) Métodos centralizados o con control

1. *Sondeo y selección con maestro y esclavo (lento):*
 - a) *Polling o sondeo:* el equipo maestro pregunta nodo a nodo de todos los esclavos cuál desea transmitir.
 - b) *Selección:* el maestro selecciona o acepta una petición e indica al nodo esclavo que ha sido seleccionado y, entonces, este último sabe que dispone del medio para transmitir.
2. *Paso de testigo:* todas las estaciones tienen la misma prioridad, donde, en la trama, hay un campo de control o testigo que indica qué nodo es el destinatario o si el testigo está libre para ser empleado. La trama va pasando de nodo en nodo y es retransmitida mientras no sean ellos los destinatarios. Cuando llega la trama al destinatario, este la utiliza:
 - a) *En bus o token bus:* recibe datos e introduce en la trama un mensaje de transferencia correcta, entonces, el testigo viaja de vuelta hasta el emisor que lo modifica para dejarlo libre o introducir otro. Si un nodo desea transmitir y recibe el testigo vacío, lo modifica con el destinatario y envía la trama incluyendo también el mensaje deseado.
 - b) *En anillo o token ring:* igual que el anterior, pero la trama (cadena binaria) da toda la vuelta en una red configurada como un anillo.

B) Métodos de contienda o aleatorios

No existe maestro, cada estación controla su comunicación sin tener que esperar. Se emplea el método CSMA/CD, del inglés *carrier sense multiple access with collision detection*. El dispositivo escucha el canal. Si no detecta datos en transmisión, transmite. Si resulta que hay una transmisión simultánea y entran ambas en conflicto, se detecta un error en la transmisión de datos (colisión), entonces:

1. Cada emisor detiene la emisión.
2. Espera un tiempo aleatorio para reemitir.
3. Cada emisor reintenta la emisión (hay un número máximo de intentos tras el cual se reporta un error).

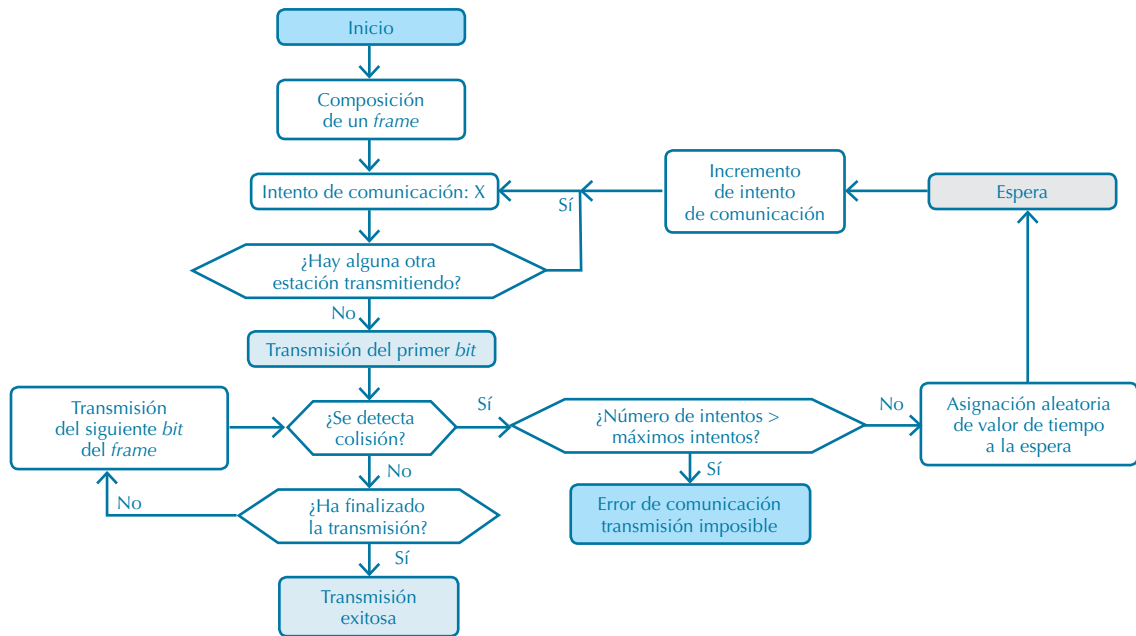


Figura 10.10
Algoritmo CSMA.

10.4. Normas físicas y protocolos en comunicaciones industriales

Existe gran cantidad de normas o protocolos empleados en las comunicaciones industriales, tanto propietarios (específicos del fabricante) como de norma (globales), con mayor o menor penetración y para distintos tipos de comunicación. Es un ecosistema bastante complejo, pues, además, unos sistemas derivan de otros y tienen mayor o menor penetración según las áreas geográficas.

Como en tantos aspectos tecnológicos, a la hora de abordar la configuración de un proyecto nuevo, ampliación o mantenimiento de comunicaciones industriales, será necesario tener formación específica del sistema de comunicación y de las herramientas facilitadas por el fabricante del hardware para su diseño configuración y, por supuesto, considerar los sistemas existentes para su integración.

La tendencia actual en el uso de sistemas de comunicaciones industriales establece tres grandes grupos:

1. *Sistemas basados en bus*: tradicionalmente, los sistemas de comunicación industrial originales estaban basados en bus y muchos siguen estándolo, predominantemente en los dos primeros niveles de la pirámide de automatización, nivel de proceso y nivel de línea de fabricación.
2. *Sistemas basados en Ethernet TCP/IP*: en muchos casos, han adaptado otros protocolos a las ventajas y a la flexibilidad del Ethernet TCP/IP, con la conveniencia de los protocolos industriales para obtener todas las ventajas de ambos y poder operar a cualquier nivel de la pirámide de automatización. Por ello, han surgido diversas versiones o variantes, pero que, consideradas en conjunto, actualmente ganan terreno a los sistemas basados en bus (en crecimiento frente a estos).

3. *Sistemas mixtos*: existen sistemas soportados por organizaciones cuya importancia o ámbito de actuación ha hecho que dispongan de dispositivos basados en bus y también en Ethernet TCP/IP, como, por ejemplo, Profibus y Profinet o *suítes* de fabricantes que empleen protocolos bus y también protocolos Ethernet TCP/IP.

10.4.1. Protocolos serie RS232, RS422, y RS485

A) RS232

La Recommended Standard 232 está basada en la norma EIA/TIA RS232C y es un protocolo muy empleado en el pasado (su primera definición fue en 1962) que aún puede tener protagonismo.

CARACTERÍSTICAS

1. 25 contactos de conector con norma DB25, reducidos a 9 con la norma DB9 (señales y pines definidos en norma).
2. Conector DCE hembra (ordenador) y conector DTE (en módem o emisor).
3. Longitud reducida. La capacidad del conductor actúa como un freno a los cambios de tensión. Se estima que cada metro de cable introduce 170 pF. Para evitar errores, la capacidad máxima del cable es de 2500 pF. Por tanto, $2500/170 = 14,7$ m (15 m según norma inicial).
4. Velocidades de transferencia bajas.
5. Tipo de transmisión simple o no diferencial.
6. Configuración de canal simplex, semidúplex o dúplex.

B) RS422

Estándar definido en la norma RS422. Para mayores velocidades y distancias y en ambiente industrial con ruido eléctrico, es más adecuado que la conexión con RS232. Con un único par de conductores (diferenciales), es simplex y, cuando se utiliza una red con dos pares de cables, puede ser dúplex (los dos dispositivos de una red RS422 pueden comunicarse entre sí al mismo tiempo). RS422 permite múltiples receptores en cada par de hilos, pero solamente un emisor y, por tanto, en una configuración maestro-esclavo, un maestro puede hablar con varios esclavos, pero solo un esclavo puede hablar con el maestro.

C) RS485

Es una mejora de la norma RS422. Permite múltiples dispositivos en los dos cables, de modo que, en una configuración maestro-esclavo, un maestro puede hablar con varios esclavos, todos los esclavos pueden hablar de nuevo con el maestro y cada dispositivo en la red puede oír cada otro dispositivo. La implementación de esto requiere indicar un esquema de direccionamiento para que los mensajes lleguen a los destinos correctos, algo que no especifica la norma.

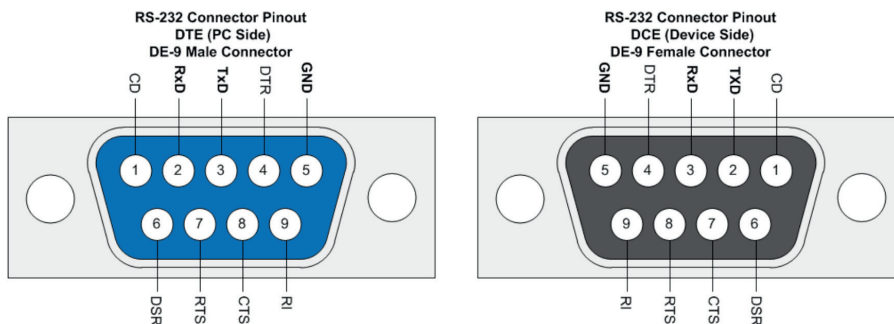


Figura 10.11
Conector DB9 empleado por RS232.



RECURSOS ELECTRÓNICOS 10.6 y 10.7

En el anexo web 10.6, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, puedes consultar con más detalle las principales características de algunos protocolos y sistemas que se utilizan habitualmente en las comunicaciones industriales. Y en el anexo web 10.7, puedes consultar las características de RS422 y RS485.

10.4.2. IO-Link

Es un protocolo de comunicación serie según la IEC61131-9 (estándar) abierto y que permite el intercambio bidireccional de datos de sensores y dispositivos con el sistema maestro-esclavo. La transmisión de estos datos puede hacerse a través de distintas redes o buses de campo, haciendo que los datos sean accesibles a diversos dispositivos de control como PLC, pantallas HMI, etc. Cada sensor IO-Link cuenta con un archivo IODD (*in and out device description*) con los datos del dispositivo y sus capacidades de comunicación IO-Link. No se trata de otro bus de campo ni de un sistema de red industrial, sino de un protocolo de comunicación punto a punto entre un sistema de control con entradas y salidas y un dispositivo de campo cuando ambos son compatibles con IO-Link. Al ser abierto, pueden integrarse dispositivos en prácticamente cualquier bus de campo o sistema de automatización.

IO-Link es muy adecuado en instalaciones con sustituciones o modificaciones frecuentes y sensibles a los tiempos de parada. Está justo por encima de los sensores de señal eléctrica todo o nada.

10.4.3. AS-i

Este sistema está en el nivel más bajo de la pirámide de automatización, integrando dispositivos simples (binarios) como finales de carrera, fotocélulas, relés, etc., y actuadores simples en aplicaciones de tiempo real y agrupados en una pequeña zona de la planta, típicamente una máquina. Comprenden las capas física y de enlace del modelo OSI, es decir, señales físicas y patrones de bits de las tramas. Son redes sencillas, baratas, fáciles de expandir y eficaces. Utiliza únicamente

un cable plano con dos conductores y, además, en estos dos cables, incluye tanto la transmisión de datos como la alimentación de los dispositivos.

10.4.4. Modbus

Es un protocolo de comunicaciones, con un sistema que, antiguamente, era maestro-esclavo (denominada *RTU*, del inglés *remote terminal unit*), que se ha convertido en un protocolo industrial muy extendido gracias, principalmente, a su simplicidad y, por tanto, facilidad de uso e implantación. En posteriores versiones, también implementa la comunicación basada en cliente-servidor TCP/IP, que se llama *Modbus TCP/IP*.

CARACTERÍSTICAS

1. Abierto (libre de pago de licencias).
2. Su implementación es fácil.
3. Abarca diversos niveles de automatización, desde el control de una red de dispositivos de campo y la comunicación de las lecturas con ordenadores hasta la conexión de un ordenador de supervisión con una unidad remota (RTU) en sistemas de supervisión adquisición de datos (SCADA).
4. Existen variantes, con diferentes representaciones numéricas de los datos y detalles del protocolo ligeramente desiguales: Modbus RTU, Modbus ASCII y Modbus/TCP.
5. Finalmente, existe Modbus Plus (Modbus+ o MB+), versión extendida del protocolo y privativa de Modicon.
6. Emplea paso de testigo.
7. Emplea cable de par trenzado (similar a RS485, pero no compatible) o fibra óptica.

10.4.5. CIP

El CIP, del inglés *common industrial protocol* (protocolo industrial común) abarca una *suite* completa de servicios de comunicación para integrar los dispositivos que conecta en estas aplicaciones de proceso con redes Ethernet, de nivel empresarial e incluso internet. Tiene bastante penetración y pretende proporcionar una arquitectura de comunicación unificada en toda la empresa y fábrica. Se utiliza en EtherNet/IP, DeviceNet, CompoNet y ControlNet. La Open DeviceNet Vendors Association (ODVA) es la organización que apoya el CIP. Al ser utilizado por varios sistemas, sería posible que el protocolo trabajara en prácticamente todos los niveles de la pirámide de automatización industrial (exceptuando el superior, de abajo arriba con CompoNet, DeviceNet y EtherNet/IP).

10.4.6. CAN Bus

CAN (*controller area network*) es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la firma alemana Robert Bosch GmbH, basado en una topología bus según la ISO 11898-2:2016 para vehículos de carretera. Permite la comunicación entre múltiples CPU (unidades centrales de proceso).

CARACTERÍSTICAS

1. Ofrece alta inmunidad a las interferencias y habilidad para el autodiagnóstico y la reparación de errores de datos.
2. Es un protocolo de comunicaciones normalizado (empleado por múltiples fabricantes).
3. Los conectores suelen ser el SubD-9 o Mini de 5 patillas o regleta.
4. Se concibió como un protocolo de alta robustez (por ejemplo, para comunicar el sistema de frenos de un automóvil).
5. El procesador anfitrión (*host*) delega la carga de comunicaciones a un periférico inteligente, por lo tanto, el procesador anfitrión dispone de mayor tiempo para ejecutar sus propias tareas.

10.4.7. CANopen

Es un estándar de bus de campo industrial que ha adquirido protagonismo propio por su aceptación y que se emplea, sobre todo, a nivel de célula. Está basado en el bus CAN según la ISO 11898 y la EN 50325-4 y fue lanzado por una asociación de fabricantes y usuarios de bus CAN denominada *CAN in Automation*. Emplea varios protocolos de comunicación con varios modelos de red, entre ellos, el de maestro-esclavo.

10.4.8. DeviceNet

Es un protocolo, originalmente desarrollado por la compañía americana Allen-Bradley (ahora firma de Rockwell Automation), de comunicación industrial para interconectar dispositivos que está basado en CAN Bus y CIP. Después, pasó a ser una especificación abierta de la Open DeviceNet Vendor Association, donde cualquier fabricante asociado puede diseñar, homologar y comercializar dispositivos DeviceNet.

Define una capa de aplicación para cubrir un rango de dispositivos de control, dispositivos de seguridad y grandes redes de control con E/S. Es soportado por muchos fabricantes: Allen Bradley, ABB, Danfoss, Crouzet, Bosch, Festo, Omron, Control Techniques, etc.

CARACTERÍSTICAS

1. Topología basada en un bus principal con ramificaciones.
2. Soporta hasta 64 nodos.
3. Cable de 2 pares: uno para alimentación de 24V y otro para comunicación.
4. Transporte de datos de control discretos y también analógicos.
5. Gran robustez frente interferencias electromagnéticas.

10.4.9. CC-Link

Es un sistema de red industrial de topología y protocolos bus (pero también con una versión Ethernet), abierto y, por tanto, que permite comunicarse a dispositivos de distintos fabricantes si estos lo soportan. Empleado en automatización de máquinas o control de procesos, también

puede utilizarse en la gestión integral de instalaciones, el control de procesos complejos y la automatización de edificios.

CARACTERÍSTICAS

1. Alta inmunidad al ruido.
2. Velocidad de red de hasta 10 Mbps.
3. Funciones específicas de red.
4. Tiempo de respuesta muy corto: puede actualizar todos los datos en todas las 65 estaciones en 3,9 ms y dando un tiempo de respuesta muy rápido no solo para la transmisión de datos, sino también para tiempos de reacción de señal digital en líneas de producción de alta velocidad.
5. Red determinista con tiempos de respuesta garantizados.

10.4.10. Industrial Ethernet

Ya explicadas previamente, Ethernet y TCP/IP son, en general, sistemas y protocolos basados en la IEEE 802.3 (y la IEEE 802.11 para Wireless LAN), que, habitualmente, rigen las redes de ordenadores y también de otros dispositivos, incluidos los de ámbito industrial.

CARACTERÍSTICAS

1. Rápida puesta en marcha de una red.
2. Mucha flexibilidad para ampliaciones.
3. Alto rendimiento.
4. Es posible interconectar áreas de diversa funcionalidad, por ejemplo, oficina, sistemas SCADA y fábrica (hasta el nivel de control de proceso, PLC).
5. Posibilidad de entornos de comunicación corporativa (muy extensa): WAN.
6. Inversión económica segura por compatibilidad futura.
7. Existen dispositivos IWLAN, *industrial wireless LAN*, preparados para redes industriales inalámbricas.
8. Sistema diferencial.
9. Conector RJ45, especificación de cable UTP categoría 3 (10 Mbps) o mayor (5-100, 6 gigabit) y par trenzado (antiguamente coaxial) y conectores de fibra óptica.
10. Conexiones entre redes locales e internet sencilla mediante elementos de unión de redes (*router* o puertas de enlace).
11. Aunque es probabilístico, existen protocolos adicionales para garantizar la comunicación determinista requerida en el ámbito industrial a nivel de campo.

Industrial Ethernet se basa en Ethernet y TCP/IP, pero ambos componentes están adaptados al uso industrial:

1. *Ethernet/IP*. Hasta ahora, se ha estudiado Ethernet como un protocolo o sistema que regulaba el aspecto físico, el de conversión de paquetes a dicha transferencia física en el medio (cables) y el direccionamiento en hardware (MAC). Para el ámbito industrial, existe una versión específica derivada denominada *Ethernet/IP*.

Utiliza la infraestructura física de Ethernet y la conversión de señales para administrar la conexión entre varios dispositivos de automatización tales como robots, PLC, sensores, CNC y otras máquinas industriales. Es muy robusto y válido para uso industrial. Está gestionado por la ODVA y ControlNet International y se basa en el protocolo CIP. En CIP, también se basan los sistemas de redes industriales DeviceNet y ControlNet.

2. *TCP/IP Industrial o Modbus TCP/IP.* Del mismo modo, hasta ahora, el protocolo IP se ha estudiado como protocolo de internet TCP/IP. TCP es un protocolo responsable de gestionar la conexión entre un cliente y un servidor, asegurándose de que los datos que necesitan ser transferidos se dividen en varios paquetes y que todos alcanzan su destino finalmente. Si no lo hacen o si uno de ellos es corrupto, TCP define cómo se retransmiten los datos que faltan. Del mismo modo, IP sirve para direccionar todos los nodos y poder hacer llegar los paquetes a su destino. Para el ámbito industrial, existe una versión específica derivada denominada *Modbus TCP/IP* o *TCP/IP Industrial*.

Emplea la trama binaria según protocolo Modbus utilizando para el direccionamiento y la transmisión de los paquetes los protocolos TCP/IP cliente-servidor. Modbus TCP/IP se ha convertido en un estándar industrial por ser sencillo, económico y abierto (no propietario). Es un protocolo muy sencillo, pues TCP/IP son muy estándar y Modbus es muy simple. Además, tiene la ventaja importante de que Modbus TCP/IP puede comunicarse fácilmente con ordenadores personales.

En definitiva, Modbus TCP/IP es el protocolo Modbus RTU con una interfaz cliente-servidor TCP y direccionamiento IP que corre sobre el soporte físico de Ethernet.

Resumiendo:

- a) Ethernet-TCP/IP se ha convertido actualmente en el estándar de comunicación global.
- b) Ethernet-TCP/IP Industrial es un término general para describir un conjunto de protocolos Ethernet-TCP/IP adaptados al uso industrial y que son capaces, incluso, de una comunicación determinista.
- c) Estos protocolos son empleados total o parcialmente por otros sistemas, como EtherCAT, Profinet, versiones de CC-Link, CIP, Sysmac de Omron, etc.
- d) Por su base común con Ethernet-TCP/IP, aporta a la industria ventajas de comunicación e integración frente a sistemas basados en bus, con el resto de sistemas de comunicación no industriales.
- e) El uso de Ethernet-TCP/IP Industrial es creciente frente a los sistemas basados en bus.

10.4.11. EtherCAT

Es un sistema de red Ethernet abierto y de ámbito industrial que persigue servir a sistemas en tiempo real y que fue desarrollado, originalmente, por Beckhoff. Está apoyada por la organización EtherCAT Technology Group. Se le suponen bajos tiempos de respuesta (se promociona como la red Ethernet más rápida y capaz de trabajar en tiempo real) y capacidad, por tanto, de sincronización con los dispositivos en bus, así como la flexibilidad de topología y economía que ofrece Ethernet. Además, el protocolo cumple con el nivel SIL 3 (*security integrated level*) para implementar comunicaciones relacionadas con la seguridad o integrarlas en la red EtherCAT.

10.4.12. Profinet

Acrónimo de *process field net*, es un protocolo de comunicación basado en Industrial Ethernet, bajo las normas IEC 61158 e IEC 61784 y que está apoyado por el grupo de interés Profibus and Profinet International (PI), que dispone también del sistema basado en bus Profibus.

CARACTERÍSTICAS

1. Queda en la pirámide de automatización por encima del Profibus de campo y está enfocado a procesos y control de planta.
2. Establece comunicación directa entre equipos y controladores.
3. Permite la automatización distribuida.
4. Es un modelo de trabajo basado en componentes configurables: un sistema Profinet *component based automation* (CBA) descansa sobre un conjunto de componentes de automatización. Cada componente tiene unas características mecánicas, eléctricas y de comunicación que se generan con el software de programación y que se describen en un archivo XML denominado *descripción de componente Profinet (PCD)*. Después, una herramienta de planificación utiliza estas descripciones para habilitar las conexiones necesarias entre los distintos componentes para implementar la automatización de máquina, célula o planta.
5. Se considera uno de los sistemas líder y es apoyada por Siemens.
6. Emplea Ethernet y TCP/IP, pero, cuando es necesario, también emplea otros protocolos que le permiten ser un sistema determinista (a menudo denominados *válidos para trabajar en tiempo real o real time*).

10.4.13. Profibus

Acrónimo de *process field bus*, es un estándar internacional de comunicaciones para bus de campo. En las comunicaciones de célula y campo, es, probablemente, el más extendido: existen gran cantidad de dispositivos de hardware y diversos fabricantes trabajan con este protocolo.

Existe una organización promotora y certificadora de Profibus y Profinet que, además, reúne a asociaciones de usuarios: Profibus and Profinet Internacional.

CARACTERÍSTICAS

1. Es un protocolo de red abierto y estándar, por ello, dispone de una amplia gama de productos: componentes y sistemas en el mercado de diversos fabricantes (no depende de un fabricante).
2. En buses de campo, es el líder, por lo que está soportado por los fabricantes de PLC más importantes.
3. Como consecuencia de los puntos previos, es fácil integrar cualquier automatización y ofrece flexibilidad, pues cubre muchas necesidades y es fácil modificar o ampliar redes.
4. Es económica y fácil de presupuestar.
5. Seguridad de datos alta por el uso de un par trenzado o fibra óptica.
6. Está en vigencia y con evolución y desarrollo de productos (garantía de durabilidad de la inversión en el futuro).
7. Topología bus con maestros y esclavos, mono y multimaestro (varios maestros).



RECURSO ELECTRÓNICO 10.8

En el anexo web 10.8, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas y definiciones que te ayudarán a comprender mejor los contenidos estudiados en este capítulo.

Actividad propuesta 10.5



Respecto a los sistemas industriales de comunicaciones estudiados:

- a) Realiza un esquema que incluya todos ellos divididos en tres bloques: tipo bus, tipo Ethernet o mixtos.
- b) Indica en dos líneas un resumen con las características que creas que son destacables.
- c) Investiga cuáles de ellos son válidos para la parte baja de la pirámide de automatización gracias a poder garantizar bajos y conocidos tiempos de respuesta (son deterministas).

10.4.14. HART

El *highway addressable remote transducer* (HART) es un protocolo de comunicaciones industriales para instrumentación que puede configurar redes de control de procesos y es capaz de transmitir señal de sensores analógicos (4–20 mA) y, por el mismo cableado, superponer una señal de comunicación digital. Por lo tanto, consigue la comunicación digital y analógica al mismo tiempo, por el mismo cableado y, además, de modo bidireccional. La señal digital facilita o transporta información del sensor como configuración, calibración, diagnóstico de su funcionamiento o incluso otras medidas de proceso que pueda aportar el sensor aparte de la señal analógica.

Es un protocolo industrial bastante empleado en instrumentación. Fue originado por Rosemount Inc. y, con el tiempo, se convirtió en un protocolo abierto. Mediante revisiones sucesivas de su especificación, se han incrementado las capacidades del protocolo.

10.4.15. Foundation Fieldbus

Es un estándar abierto de bus de campo desarrollado y gestionado por FieldComm Group. Facilita la comunicación bidireccional digital, serie, que sirve para generar redes de nivel de campo (nivel inferior de la pirámide de automatización) para automatización industrial. Además, es compatible con comunicaciones intrínsecamente seguras (diseño del sistema de comunicaciones capaz de la operación segura de equipos eléctricos en áreas peligrosas o con riesgo de explosión). Se consigue limitando la energía eléctrica o térmica que pudiera suponer una ignición, eléctrica y térmica, mediante la operación con bajas intensidades y voltajes.

Dispone de dos versiones o implementaciones distintas del protocolo (utilizan distintos medios físicos de transporte y consiguen distintas velocidades): FFH1, intrínsecamente segura y más lenta, y FF HSE (High Speed Ethernet), versión para alto volumen de datos y compatible con dispositivos basados en Ethernet.

Resumen

- Se ha repasado todo lo que se estima necesario para entender cómo funciona la comunicación y, basado en ello, cómo funciona la comunicación industrial y los principales sistemas empleados.
- Se ha comenzado por describir tres conceptos básicos (ancho de banda, responsabilidad y tiempo de respuesta) e ideas protagonistas en la comunicación industrial (la pirámide de la automatización y el modelo de comunicación OSI).
- Tras ello, se han estudiado las bases tecnológicas sobre las que se sustentan las señales de comunicación que se emplean actualmente: concepto físico o eléctrico, configuraciones de sentido de los datos, idea de protocolo, medida del ancho de banda, tipos de comunicación (serie o paralelo), control de errores y flujo y tiempo de respuesta.
- A continuación, se ha desarrollado lo mismo, pero en el nivel de redes, donde hay muchos nodos y canales de comunicación involucrados: tipologías, cómo conectar los nodos, direccionamiento (incluyendo el empleado en Ethernet TCP/IP, IPv4) y cómo acceder al medio o a la red para transmitir un mensaje.
- Finalmente, se han detallado los principales sistemas de comunicación industrial, donde van ubicándose en dos bloques fundamentales: basados en bus, en Industrial Ethernet o en ambos. Los primeros suelen ser protagonistas en los niveles inferiores de la pirámide de automatización industrial y los segundos, en los superiores (aunque existen versiones de protocolos basados en Industrial Ethernet capaces de garantizar tiempos de respuesta cortos y, por tanto, capaces de gestionar comunicaciones en niveles inferiores). En este apartado, se han incluido normas y sistemas completos que engloban diferentes protocolos.

Ejercicios propuestos

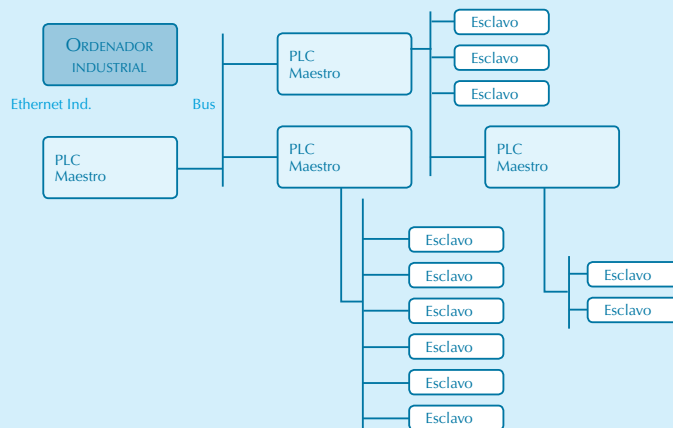


1. Indica la topología de cada una de las siguientes redes:



2. Según el sentido de comunicación, señala qué tipo de transmisiones son las siguientes (simplex, semidúplex o dúplex):
 - a) Dos personas hablando ordenadamente.
 - b) Lenguaje corporal de dos perros que se miran fijamente.
 - c) Un guardia de tráfico indicándote que detengas el automóvil en el arcén.
 - d) Un panel de información en un aeropuerto.
 - e) Un juego *online* en tu teléfono móvil.
 - f) Un padre o una madre regañando a un niño pequeño.
 - g) Un mensaje de telégrafo.

3. Explica qué son los siguientes códigos y también el porqué de su equivalencia:
 101.48. 255.30
 65.30.FF.1E
 01100101.00110000.11111110.00011110
4. Están realizándose pruebas de rendimiento con varias configuraciones de red. Para ello, se miden tres transferencias distintas. Compara tres transferencias, cada una con una configuración, e indica: cuál es la configuración más rápida en bruto, cuál es la configuración con mejor tasa efectiva de transferencia y cuál es la configuración más rápida en transferencia de datos. Se produce la transferencia por FTP (*file transfer protocol*) de los siguientes archivos:
- Configuración 1*: 3 archivos de 703 MB cada uno, 14 s a una tasa de transferencia de 201,2 Mbps.
 - Configuración 2*: 2 archivos de 1082 MB cada uno, 16,2 s a una tasa de transferencia de 160,9 Mbps.
 - Configuración 3*: 4 archivos de 511 MB cada uno, 13,1 s a una tasa de transferencia de 165,1 Mbps.
5. Basándote en la siguiente figura, haz una propuesta de direccionamiento de una red maestro-esclavo multimaestro con dígitos entre el 1 y el 20.



ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Qué son las técnicas de codificación digital?
 - a) Métodos de eliminación de ruidos eléctricos en las señales.
 - b) Una técnica de amplificación de la señal por la atenuación que producen largas longitudes de cable.
 - c) Técnicas que establecen una relación mediante algún algoritmo entre las tensiones en los cables de datos y los valores 1 y 0 de binario de la señal que quiere transmitirse.
 - d) La técnica por la que se establece un canal de comunicación donde todos los bits van uno detrás de otro.
2. ¿Cuál de las siguientes características se relaciona con la conexión síncrona?
 - a) Se sincroniza la frecuencia de emisión de bits, pero no hay una señal de reloj que sincronice periódicamente a emisor y receptor en lo que respecta al inicio y final de cada mensaje.
 - b) Aparte de la sincronización de frecuencia de bits, la transmisión se apoya en unas señales constantes y periódicas de sincronización de mensajes, con lo que se asegura en todo momento que emisor y receptor están sincronizados respecto al inicio y final de los bloques de bits que representan mensajes y, por tanto, la recepción de datos también tiene una sincronía y constancia periódica.
 - c) No hay una señal que sincronice la frecuencia de emisión de bits de reloj ni tampoco que sincronice periódicamente a emisor y receptor en lo que respecta al inicio y final de cada mensaje.
 - d) Ninguna de las respuestas anteriores es correcta.
3. ¿Qué ancho de banda representa una conexión a internet de 50 megas?
 - a) 50 millones de bits por segundo.
 - b) 50 millones de bytes por segundo.
 - c) 419 430 400 bps.
 - d) Todas las respuestas anteriores son correctas.
4. ¿Qué sistema elegirías para un proceso industrial secuencial donde se requieren tiempos de respuesta por debajo de 10 ms?
 - a) Sistema CSMA.
 - b) Sistema probabilístico.
 - c) Sistema determinista.
 - d) Sistema paralelo.
5. ¿Cuál de las siguientes frases es verdadera?
 - a) LRC, VRC y CRC son métodos de detección de errores.
 - b) LRC, VRC y CRC son métodos de corrección de errores.
 - c) LRC, DTR y CRC son métodos de detección de errores.
 - d) XON, VRC y CRC son métodos de detección de errores.
6. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?
 - a) En una red con topología en línea, un fallo de un nodo intermedio parte la red.
 - b) La configuración de doble anillo es más segura que la configuración de anillo simple.

- c) En la configuración en estrella, un fallo del nodo o conector central detiene las comunicaciones.
- d) En una malla totalmente conectada, es fácil que haya interrupción de las comunicaciones.
7. ¿Con cuál de las siguientes proposiciones no estás de acuerdo?
- a) RS232, RS422 y RS485 son normas para transmisión serie.
- b) IO-Link, AS-i y Modbus son sistemas de comunicaciones fundamentalmente para los niveles de campo y célula de la pirámide de automatización.
- c) CPI es un protocolo que está presente en varios sistemas y, por ello, es capaz de operar en todos los niveles de la pirámide de automatización, salvo quizá el superior.
- d) MPI es un sistema de Siemens que opera con Ethernet.
8. ¿Cuál de los siguientes enunciados es verdadero?
- a) CC-Link es un sistema de comunicaciones especialista, con solo dos versiones para operar a nivel de campo.
- b) DeviceNet se basa exclusivamente en el protocolo CIP y está basado en Ethernet.
- c) Modbus TCP/IP es la versión industrial de protocolos TCP/IP para Ethernet Industrial y está basado, a su vez, en Ethernet y CIP.
- d) CAN bus y CANopen no tienen nada en común, a pesar de la similitud del nombre.
9. ¿Cuál de las siguientes oraciones es verdadera?
- a) EtherCAT se supone capaz de trabajar en tiempo real, pero Profinet no.
- b) Profinet se supone capaz de trabajar en tiempo real, pero EtherCAT no.
- c) Ni Profinet ni EtherCAT son capaces de trabajar en tiempo real.
- d) Tanto Profinet como EtherCAT son capaces de trabajar en tiempo real.
10. ¿Cuál de los siguientes supuestos es falso?
- a) Profibus es uno de los sistemas de campo más extendidos en las comunicaciones industriales.
- b) Controller link, Compobus y Sysmac son sistemas Omron.
- c) Profibus se basa en el sistema maestro-esclavo y tiene tres perfiles DP, PA y FMS.
- d) Profibus PA se caracteriza, principalmente, por tener tiempos de respuesta muy bajos y Profibus DP añade seguridad intrínseca para atmósferas explosivas según la IEC 1158-2.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

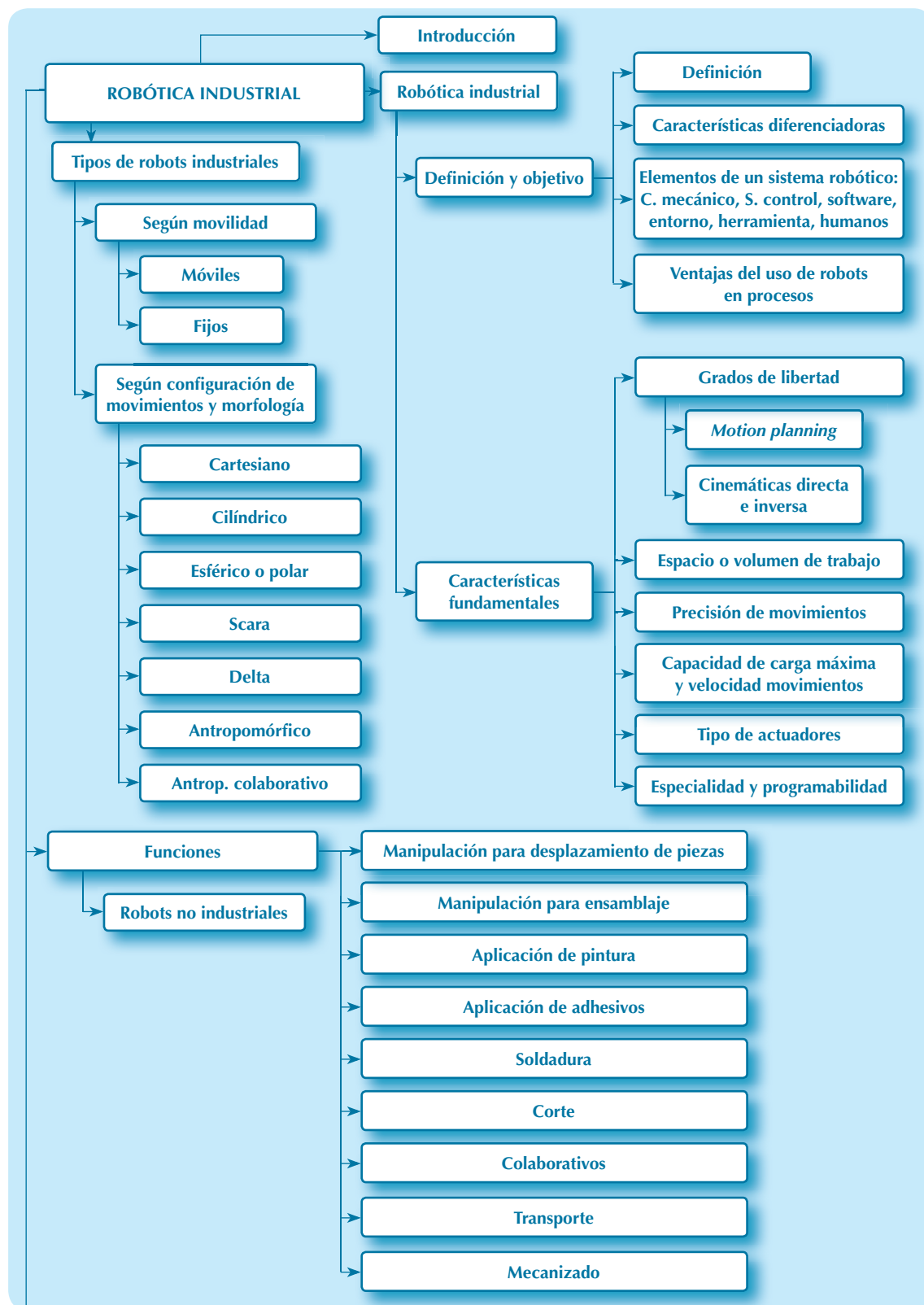
10. a b c d

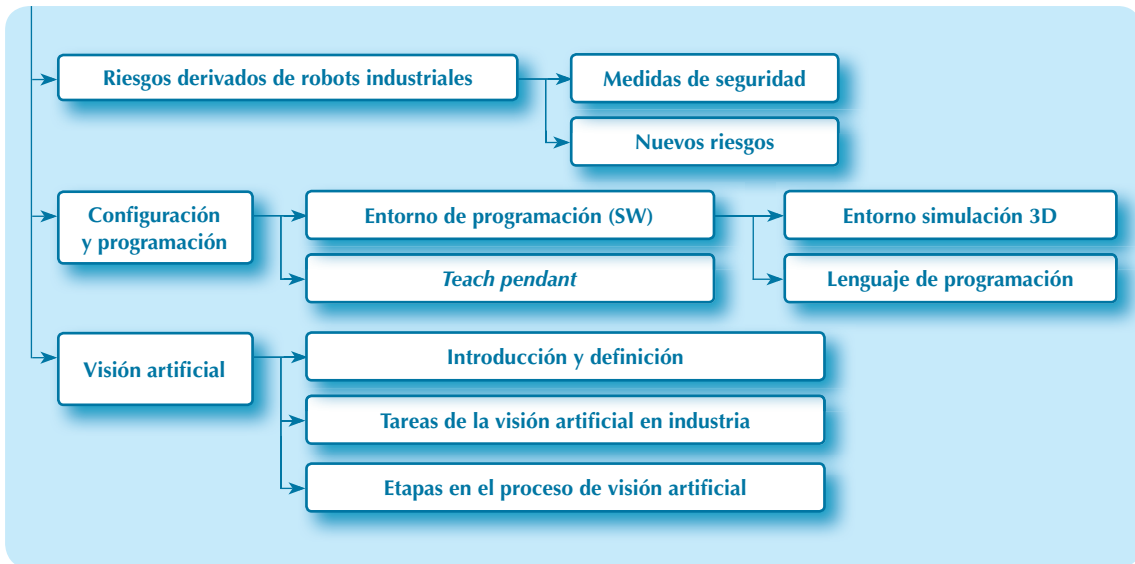
Robótica industrial

Objetivos

- ✓ Conocer la definición, los fundamentos y las funciones actuales de los robots industriales.
- ✓ Describir los principales tipos y ventajas de los robots industriales, incluyendo las precauciones de seguridad.
- ✓ Entender la filosofía de trabajo del software de configuración y programación de robots industriales.
- ✓ Familiarizarse con las nuevas tendencias de robots colaborativos y de servicios.
- ✓ Introducir (conceptualmente) la visión artificial.

Mapa conceptual





Glosario

Carga máxima del robot. Aquella que es la (masa) máxima manipulable por el robot.

Espacio, volumen o área de trabajo. Todos los puntos del espacio que el robot es capaz de alcanzar con la punta de su herramienta.

Grados de libertad de un robot (GDL o DOF). Suma de todos aquellos grados de libertad que tienen cada una de sus articulaciones.

Grados de libertad en el espacio. Posibles movimientos en el espacio de un cuerpo, que resultan ser seis: tres traslaciones según los ejes x , y y z y tres giros alrededor de los ejes x , y y z .

Motion planning. Obtener las posiciones o ángulos de todas las articulaciones a partir de un punto objetivo y orientación en el que desea situarse a la herramienta en cada instante de la tarea.

Muestreo de imagen. Reducción de la resolución de una imagen a costa de la pérdida de información con el fin de aligerar los cálculos necesarios para cualquier procesamiento posterior.

Potencia de los actuadores. Aquella disponible en los actuadores que mueven las articulaciones y que limita el producto de las cargas (incluyendo las masas de la propia estructura del robot) y las velocidades, pues potencia es el producto de la fuerza por la velocidad.

Precisión de los movimientos o repetibilidad. Error máximo de posicionado que cometerá el robot frente a su objetivo programado o teórico entre distintos movimientos a la misma posición.

Preprocesamiento de imagen. Manipulación de la información obtenida en la imagen enfatizando aquellos aspectos que sean necesarios para el éxito de aplicación buscada.

Rango dinámico de una imagen. Rango de grises, incluyendo el número de niveles de gris disponibles en la imagen digital.

Segmentación de una imagen. Se trata de realizar la partición de una imagen o volumen en distintas regiones diferenciables que, por lo general, pueden discriminarse entre sí, pues no se superponen en sus características (brillo, color, etc.) de una forma que resulte significativa.

Teach pendant. Apéndice cableado de un robot, terminado en una pantalla táctil con botones y mandos sensibles, que sirve para manejar el robot e incluso configurar y programar *online* o modificar el programa contenido en la controladora.

11.1. Introducción

En este capítulo, se aborda el desarrollo de ambos bloques (robótica industrial y visión artificial), en los que, por desgracia, existe (más que en el caso de los PLC) una fuerte dependencia tecnológica de los fabricantes y la aplicación práctica de ambos, por lo que la aproximación va a ser más conceptual que pragmática.

11.1.1. Robots industriales

La mecanización de los trabajos mecánicos supuso el origen de una familia de máquinas absolutamente ligadas a la automatización: los robots industriales. Como ya se ha visto en el capítulo 4, ellos liberaron inicialmente a los humanos de tareas mecánicas pesadas, peligrosas y repetitivas y también redujeron en la industria los costes de fabricación de cualquier producto: menos costes laborales y prestaciones nuevas, iguales o muy superiores en capacidad de carga, velocidad, productividad, precisión, etc. Las cifras de robots industriales instalados, prominentes en los países ricos y de alta tecnología y productividad industrial, siguen creciendo en todo el mundo incluso tras varias décadas de su nacimiento.

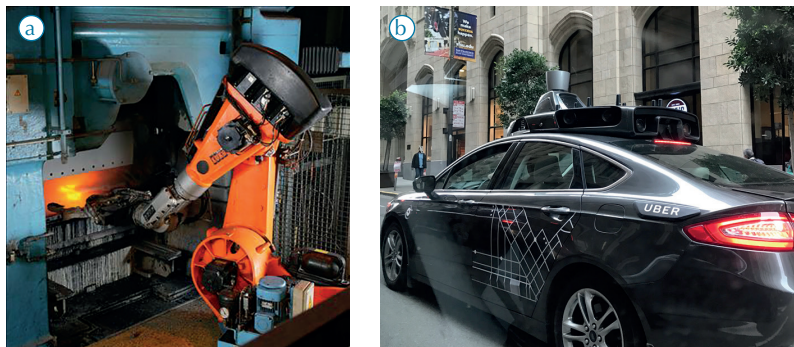


Figura 11.1 Robot Kuka en el manipulado de piezas al rojo vivo (a) y vehículo autónomo dotado de cámaras y visión e inteligencia artificial (b).

11.1.2. Visión artificial

Está ganando protagonismo la inteligencia artificial, últimamente muy ligada a la disciplina del aprendizaje automático o *machine learning*, donde se programa a las máquinas para aprender. Algo tan potente que muchos intelectuales y figuras contemporáneas de renombre (como Elon Musk o el mismísimo Stephen Hawking) indicaron en el pasado como una amenaza para la misma humanidad y que deberá ser tenido bajo control, pero que, en el área de automatización industrial, supone una enorme ayuda para ampliar las capacidades de los robots.

Robots que, hasta ahora, estaban confinados a un entorno de trabajo muy controlado y repetitivo empiezan a ser capaces de tomar decisiones en entornos más flexibles. Un buen ejemplo son los robots colaborativos, capaces de percibir presencia y contacto con los humanos para trabajar conjuntamente con ellos o la manipulación o control de calidad realizada con robots unidos a sistemas de visión artificial, que se estudia brevemente al final de este bloque.

11.2. Sistemas robóticos

Un robot industrial es un conjunto que incluye un entorno de configuración o programación, el controlador programable con entradas y salidas y sensórica conectado con una estructura mecánica móvil a la que gobierna, con el objetivo de realizar tareas repetitivas, pero altamente modificables en un entorno industrial, todo ello de forma segura para las personas.

La definición es bastante amplia. De hecho, a veces, no es fácil poner una frontera clara entre lo que es un robot y lo que no: ¿acaso un almacén automático no es un robot? Podría considerarse como tal. Del mismo modo: ¿cuál es la diferencia entre, por ejemplo, una máquina ensambladora neumática que repite siempre una misma secuencia y un robot? Para intentar acotar la definición, ayuda mucho conocer los tres elementos fundamentales que un robot industrial tiene específicamente: flexibilidad y versatilidad, capacidad de movimientos y un sistema de control y sensórica más compleja e inteligente (cuadro 11.1).

CUADRO 11.1
Características de un robot industrial

Flexibilidad y versatilidad	Habitualmente, una máquina específica es un manipulador diseñado puramente para esa tarea, por lo que no tendrá capacidad de modificar sus trabajos de forma sencilla. Un robot puede adaptarse a cambios en el proceso o a otros procesos, pues es más versátil que una máquina con un diseño para una única función o tarea específica.
Capacidad de movimientos complejos	Cuando la aplicación requiera trayectorias complejas y variadas, las capacidades de los robots ya disponibles estarán por encima de una máquina específica que resultará muy difícil de diseñar y crear frente a recurrir en este punto a un robot. De todos modos, según el tipo de robot y sus articulaciones, variará la complejidad de movimientos que el robot puede realizar.
Sistema de control y sensórica compleja e inteligente	Como consecuencia de lo anterior, es necesario disponer de este sistema para tener la capacidad de realizar infinidad de diversos y complejos trabajos.

Curiosamente, estas características las poseen las personas: flexibilidad, capacidad de movimientos, sensibilidad e inteligencia. La razón es que todavía somos más completos y complejos que cualquier robot, pero estos van evolucionando. Por ello, puede decirse que el robot está a mitad de camino entre las máquinas y las personas, pues es capaz de realizar las tareas que antes solo podían hacer las personas. Como se indicaba al principio del libro, con la automatización, con los robots como herramientas de esta, en algunos casos, tiene lugar una sustitución; en otros casos, una mejora de prestaciones, y, en otros, prestaciones no realizadas previamente por humanos.

11.2.1. Elementos de un sistema robótico

Los robots suelen estar compuestos de un conjunto mecánico conformado por los actuadores y la estructura mecánica del robot; un sistema de control (PLC, ordenador industrial o controladora propia) que, habitualmente, está ubicado en un armario eléctrico cerca del robot, donde se encuentra también todo lo relativo a la potencia eléctrica; un software de configuración o programación, y, finalmente, su entorno inmediato, que incluye elementos con los que deberá colaborar (como, por ejemplo, otros robots), una sensorica externa y elementos de seguridad tales como sensores internos capaces de detectar una colisión o la propia jaula de protección del robot.

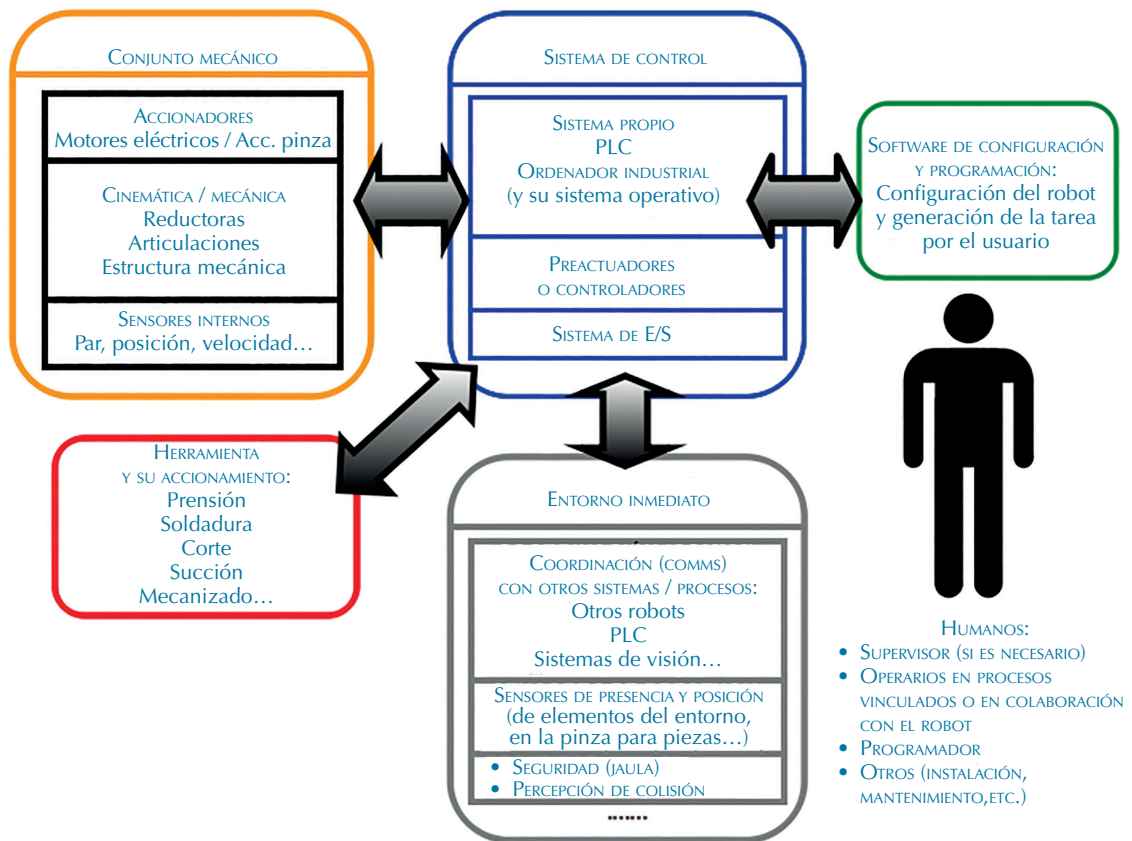


Figura 11.2
Sistema robótico industrial.

Finalmente, aunque no forma parte del sistema robótico, en la figura 11.2, se muestra la silueta humana, pues no puede olvidarse que el robot es una máquina al servicio de y comandada

por humanos y habrá interacción con ellos y su necesidad en un momento dado: ya sea supervisando el robot (si es necesario), colaborando con el robot, en procesos vinculados, configurado por el programador, en procesos de mantenimiento, etc.

11.2.2. Herramienta final o pinza

La herramienta final o pinza es un elemento absolutamente fundamental para que el robot realice correctamente la tarea. El motivo es que todo el sistema llevará a la herramienta en la extremidad del robot a los puntos adecuados, pero será la herramienta o pinza la responsable de ejecutar correctamente la acción protagonista: sujetar la pieza para un movimiento de piezas, soldar, cortar, mecanizar, etc. Por ejemplo, al margen de la robótica, para realizar una correcta soldadura, es imprescindible una correcta elección del tipo de soldadura más conveniente, electrodos, potencias empleadas, atmósfera, etc. La misma importancia tiene para cualquier operación exitosa la herramienta que se seleccione y monte en el extremo del robot.

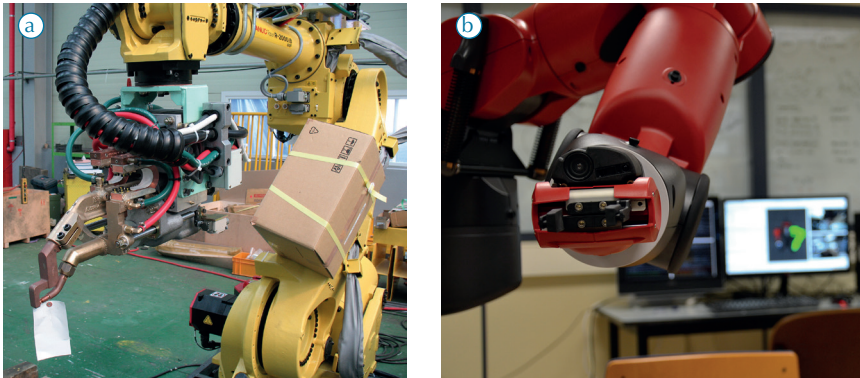


Figura 11.3

Herramienta de soldadura en el extremo de un FANUC R-2000iB (a) y pinza prensora de dos dedos, accionada por un servomotor y con sensores de proximidad y cámara de visión en el brazo de un robot Baxter de Rethink Robotics (b).

Hay tantas herramientas como funciones pueda requerir una aplicación robotizada: ventosas, pinzas de dos dedos, de varios dedos (pinzas de accionamiento con servomotor, electroneumático, etc.), puntas de soldadura TIG, puntas para corte por plasma, etc., y su selección puede ser casi independiente del robot (la unión debe ser compatible):

1. El robot proporciona los movimientos y la orientación de la herramienta.
2. La herramienta proporciona la acción protagonista.

11.2.3. Ventajas del empleo de los robots industriales en los procesos

Aunque son comunes a la automatización industrial que ya se ha estudiado, se enumeran las ventajas de robots industriales:

1. *Reducción de costes laborales*: reducción de personal humano.
2. *Ahorro de materia prima y energía*: mayor eficiencia en los procesos y menos desperdicio.
3. *Incremento de la capacidad productiva* (puede fabricarse más) *y de la productividad* (se fabrica cada unidad a menor coste).
4. *Flexibilidad productiva*: un robot puede programarse para diversas tareas y sus capacidades mecánicas y de control le aportan los distintos movimientos requeridos.
5. *Mejora de la calidad*: mayor precisión en las operaciones, menores desviaciones y mayor calidad.
6. *Mejora de las condiciones de trabajo*:
 - a) *Reducción de riesgos personales por la eliminación de actividades peligrosas*: trabajos de riesgo por cuestiones de seguridad (por ejemplo, operaciones manuales con herramienta, de corte) asignados a robots.
 - b) *Reducción de riesgos para la salud por trabajos insalubres*: trabajos de riesgo para la salud (por ejemplo, manipulado de cargas) asignados a robots.
 - c) *Reducción de trabajos repetitivos, monótonos y en posiciones forzadas*.

Con todas las ventajas que se nombran, el motivo fundamental que ha hecho y hace imparable su instalación es la mayor competitividad de proceso que otorgan los robots (igual que sucedía con la automatización industrial), con lo que puede producirse más barato (menores costes, mayor productividad) y con mayor calidad.



PARA SABER MÁS

Los fabricantes principales (hay muchos otros) de robots industriales, donde destaca Japón como país de origen de la mayoría de ellos, son: ABB, Adept, Yaskawa (motoman), Fanuc, Kuka, Kawasaki, Comau, Panasonic, Cloos, Nachi-Fujikoshi, Stäubli, Epson y Mitsubishi.

11.3. Aspectos fundamentales de un robot industrial

Para definir los trabajos habituales que realizan los robots, primero, deben conocerse los grados de libertad, el espacio o volumen de trabajo, la precisión de los movimientos, la capacidad de carga máxima y velocidad de movimientos, los tipos de actuadores y la especialidad y programabilidad de los robots, como se explica a continuación.

11.3.1. Grados de libertad y movimientos del robot

Los grados de libertad en general se definen como los posibles movimientos en el espacio de un cuerpo, que resultan ser seis: tres traslaciones según los ejes x , y y z y tres giros alrededor de los ejes x , y y z , cualquier movimiento será una mezcla de estos seis grados de libertad (figura 11.4).

Para un robot, el concepto es algo distinto. Cuando una parte del robot se mueve respecto a otra, lo hace a través de una articulación. Una articulación es un tipo de unión entre dos ele-

mentos que permite unos movimientos determinados y otros no. Es decir, tiene unos determinados grados de libertad entre los dos elementos unidos por la articulación y, al mismo tiempo, restringe los otros movimientos relativos posibles entre ambos elementos.

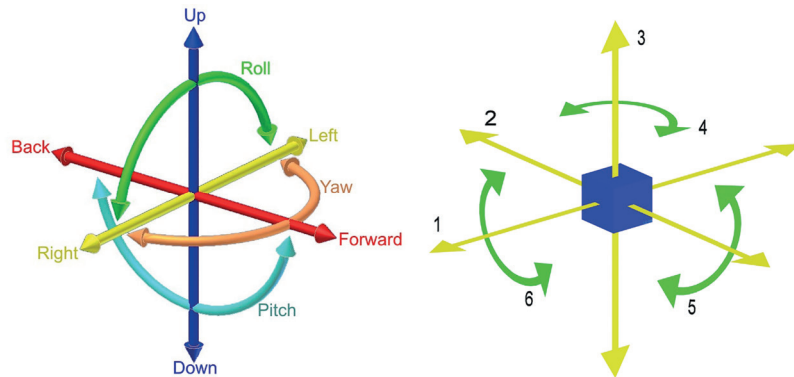


Figura 11.4
Grados de libertad
en el espacio.

Ejemplo

En la figura 11.5, se muestra un robot industrial y se identifican sus articulaciones y tipos de grados de libertad para un total de 6.

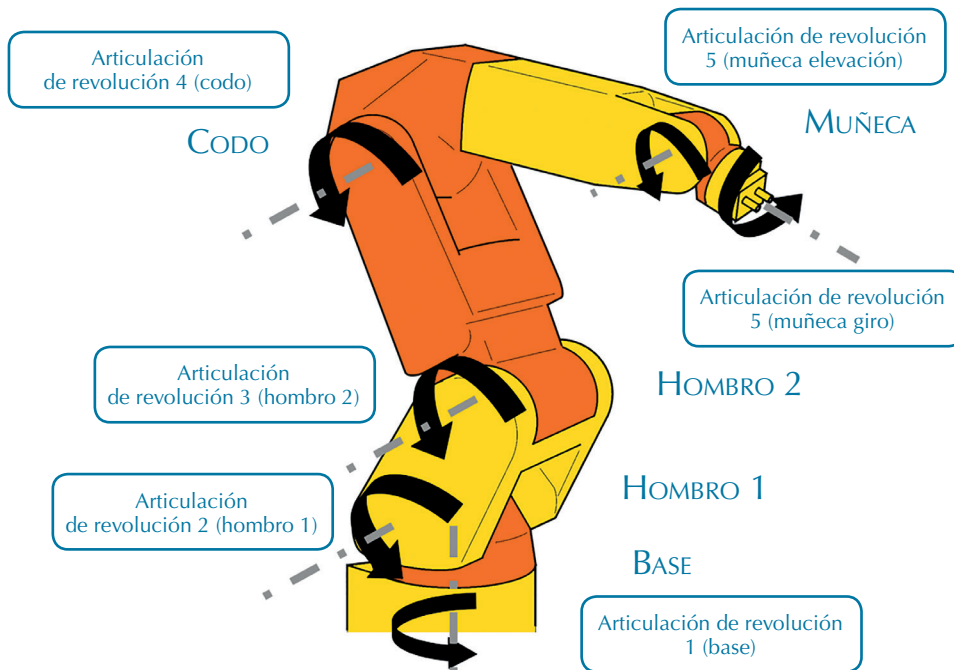


Figura 11.5
Robot industrial y sus articulaciones.

Por ejemplo, un robot humanoide, habitualmente, tendrá en torno a 20 grados de libertad.

En el caso de los robots industriales, para que un robot que acumule grados de libertad en un único brazo compuesto de distintos tramos articulados pueda mover una pieza y orientarla en cualquier dirección, el robot deberá contar con, al menos, 6 grados de libertad.

Según los grados de libertad de la articulación, se dispone de la clasificación que muestra la figura 11.6.

Los tipos de articulación definen ciertas clasificaciones de robots, pero también permiten definir cuántos grados de libertad (GDL o DOF en inglés, de *degrees of freedom*) tiene un robot. Los GDL de un robot serán el conjunto de GDL acumulados por todas sus articulaciones.

Un número mayor de GDL debe aportar mayor versatilidad y posibilidades de movimientos del robot que un número menor.

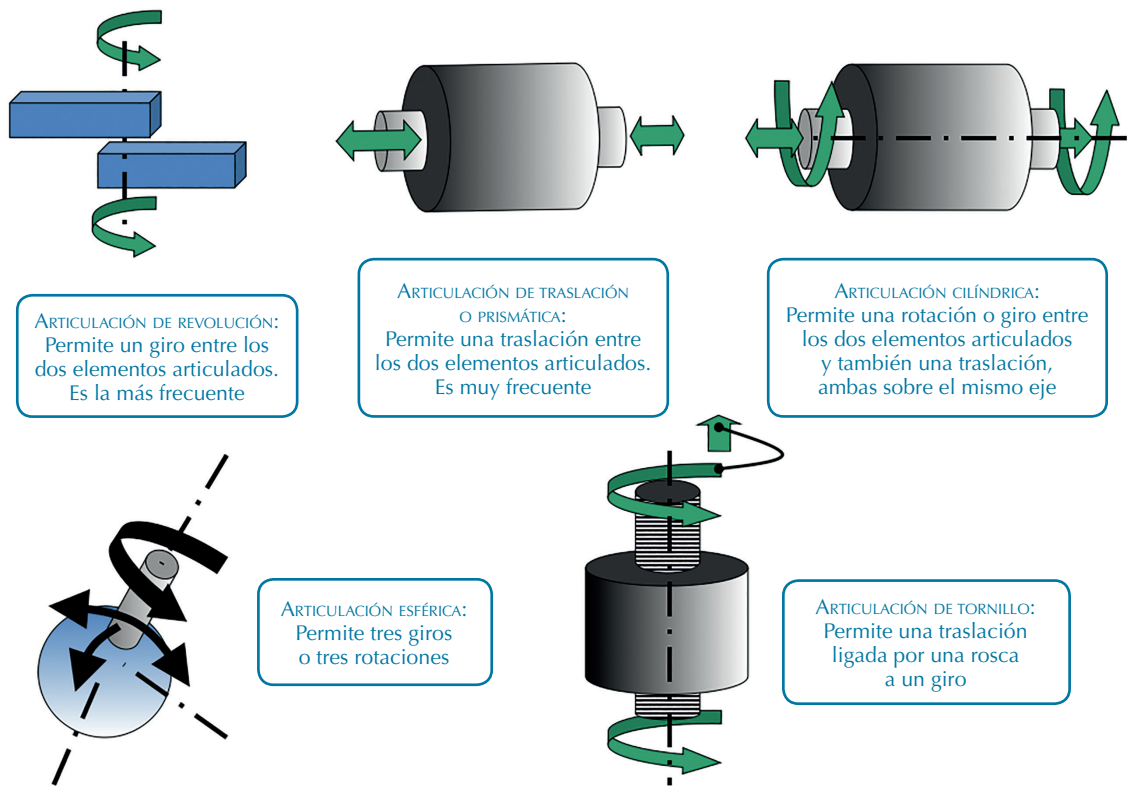


Figura 11.6
Tipos de articulación.

En la funcionalidad del robot, un aspecto fundamental es conseguir llevar y mover la punta del robot, donde habitualmente se ubica la herramienta de trabajo (soldadura, corte, pintado, etc.) o manipulador (pinza, ventosa, electroimán, etc.) a los puntos del espacio y con la orientación requeridos para la aplicación. Las trayectorias de estos movimientos hasta los puntos considerados objetivo se relacionan con las dimensiones y con los giros o traslaciones de las articulaciones que, en conjunto, forman al robot.

Esta relación debe conocerse en ambos sentidos: determinar el punto objetivo alcanzado a partir de determinados movimientos en las articulaciones o determinar los movimientos en las articulaciones para llegar a los puntos objetivo. Es lo que se denomina *cinemática directa* y *cinemática inversa*.

A) Cinemática directa

Consiste en obtener el punto en el que se encuentra la herramienta del robot (en su extremo o punto de trabajo) a partir de posiciones o ángulos de todas las articulaciones del robot. Este es un problema matemáticamente sencillo y con los sensores internos de posición, la controladora del robot puede saber en cada momento y de forma fácil en qué posición se encuentra la punta o herramienta del robot (siempre que los sensores y la calibración sean los correctos).

B) Cinemática inversa y motion planning

Obtener las posiciones o ángulos de todas las articulaciones a partir de un punto objetivo y orientación en el que desea situarse a la herramienta en cada instante de la tarea. Este es el problema habitual, pues lo lógico es que el programador defina el movimiento de un robot para que una secuencia de posiciones del extremo de la herramienta a lo largo del tiempo conformen las trayectorias y posiciones necesarias para la tarea. Este diseño es lo que se denomina *motion planning* o *planificación del movimiento*. La cinemática inversa transforma la planificación del movimiento en exigencias de movimientos a los actuadores del robot en cada articulación.

Este es un problema matemáticamente complejo que emplea métodos matriciales y otros con ecuaciones cinemáticas que, antiguamente, eran un desafío para la potencia de cálculo de los primeros robots. Además, una misma posición puede obtenerse muchas veces con varias combinaciones de ángulos o posiciones del robot, así que ¿cuál escoger?

Hoy en día, la controladora de la que disponen los robots y el software de configuración tienen capacidad de cálculo para realizar los cálculos de cinemática inversa. Además, en la configuración, se mostrarán las alternativas existentes si hay más de una y el programador escogerá la que crea más adecuada.

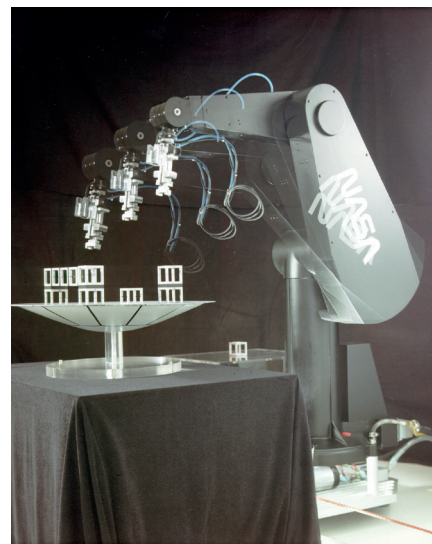


Figura 11.7
Trayectoria de un robot Puma.

C) Coordinación de motion planning y accionamiento de herramienta

Aparte de trayectorias, velocidades y posiciones y orientación de la punta del robot en cada momento, el programador en primera instancia y (una vez terminado el programa) el sistema de control deben determinar los puntos de accionamiento de la pinza para la ejecución correcta de la tarea.

Actividad propuesta 11.1



Indica en el robot que se muestra a continuación las articulaciones y sus tipos y el total de grados de libertad del robot.



11.3.2. Espacio, volumen o área de trabajo

Suele definirse como todos los puntos del espacio que el robot es capaz de alcanzar con la punta de su herramienta. También se define como el volumen en el que el robot es capaz de trabajar o realizar operaciones con un 100% de funcionalidad, pero esta segunda definición implica un volumen mucho menor y es menos empleada.

Es una característica fundamental para su selección según la función que deba cumplir, que ha de contrastarse con las trayectorias y distancias que han de recorrerse en los trabajos y el tamaño de las piezas objetivo.

En los manuales, suele especificarse con vistas proyectadas del volumen de trabajo en planta y perfil y también con los rangos angulares o lineales de las articulaciones.

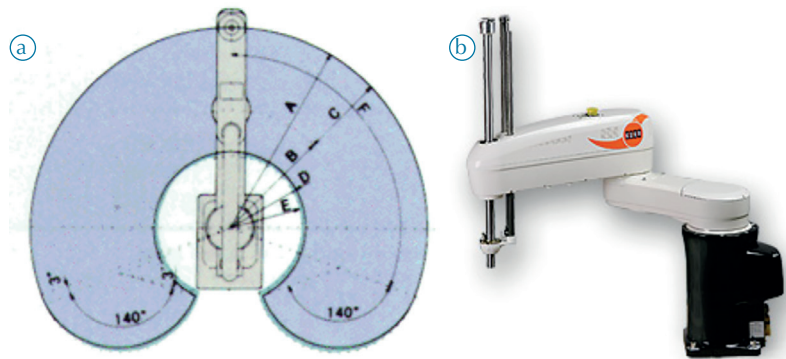


Figura 11.8
Volumen de trabajo (proyección en planta) de robot tipo scara (a) y robot scara Kuka KR 10 (b).

Por ejemplo las rotaciones de cada eje o articulación indicadas en el manual para un robot ABB IRB 120 son:

- Axis (eje) 1 + 165° to -165° .
- Axis 2 Arm (brazo) + 110° to -110° .

- Axis 3 Arm + 70° to -110°.
- Axis 4 Wrist (muñeca) + 160° to -160°.
- Axis 5 Bend (doblado) + 120° to -120°.
- Axis 6 Turn (giro) + 400° to -400°.

11.3.3. Precisión de los movimientos

Se trata del error máximo de posicionado que cometerá el robot frente a su objetivo programado o teórico entre distintos movimientos a la misma posición (repetibilidad).

De nuevo, según la precisión requerida, se determinará lo adecuado de un robot u otro. En las características de un pequeño robot ABB IRB 120, puede leerse:

Position repeatability (repetibilidad de posición): 0,01 mm

Los robots tienen una tremenda precisión y, por ello, requieren una calibración periódica que debe realizarse para mantener los valores de error máximos y la relación entre la posición enviada desde el sistema de control y la posición real en la que el robot sitúa a la herramienta.

11.3.4. Capacidad de carga máxima y velocidad de movimientos

A continuación, se indican las características relacionadas con carga máxima y velocidad de movimientos, pero antes es interesante puntualizar lo siguiente:

1. Si se dispone ya del robot, normalmente, el software dispone de herramientas de simulación que, con las características de este, puede indicar cargas máximas, velocidades máximas y, para una trayectoria, el tiempo de ciclo para una nueva tarea deseada por el usuario.
2. Si no se dispone del robot y desea saberse si sería válido para una tarea o proceso, es posible que tampoco se disponga del software, por lo que estos datos pueden ofrecer una idea del modelo que conviene adquirir. De cualquier forma, dada la inversión que supone, los comerciales técnicos de los fabricantes deben dar un asesoramiento adecuado.

Carga máxima y velocidad de movimientos están aquí definidas a la vez, pues se encuentran relacionadas. Potencia es el producto de la fuerza por la velocidad y la potencia de los actuadores es limitada.

Las fuerzas que debe realizar el robot se incrementan con cargas elevadas (gravedad e inercias por masas del elemento manipulado y de la propia estructura del robot) que hay que levantar (gravedad) y cambiar de trayectoria, frenar y acelerar (fuerzas debidas a inercias). Cuando, por estos motivos, las fuerzas son elevadas, la velocidad deberá ser baja. Para la misma potencia de actuador, una carga pequeña podrá ser manipulada a altas velocidades.

De cualquier modo, con cargas muy livianas, también hay una limitación de velocidad máxima inherente al diseño del robot, el peso de sus propios elementos y la velocidad máxima de sus actuadores. En la ficha técnica del robot, habrá que considerar estos datos:

1. *Capacidad de carga máxima o payload*: carga máxima que el robot puede mover dentro de todo su espacio de trabajo. No puede excederse esta carga y, de alcanzarse, se trabajará a velocidades bajas.
2. *Velocidades máximas de cada eje*: estas velocidades son sin carga útil, por lo que pueden parecer poco importantes. Sin embargo, gran parte de los movimientos del robot se harán sin carga y estos desplazamientos consumirán menos tiempo de ciclo cuanto más rápidos sean, por lo que sí tienen importancia. Para el robot ABB IRB 120 (velocidad de giro en grados por segundo):
 - Axis 1: 250°/s.
 - Axis 2 Arm: 250°/s.
 - Axis 3 Arm: 250°/s.
 - Axis 4 Wrist: 320°/s.
 - Axis 5 Bend: 320°/s.
 - Axis 6 Turn: 420°/s.
3. *Tiempos de ciclo de trabajo*: la velocidad de una aplicación práctica se define a partir de un determinado ciclo de trabajo. Así, el tiempo empleado para manipular una carga determinada llevándola de una posición a otra. Si se desea un ciclo de trabajo más rápido para dicha carga, habrá que seleccionar un robot más potente o con mayor capacidad de carga (que, normalmente, significará poder realizar el trabajo a mayor velocidad). Por ejemplo, para el mismo robot ABB IRB 120, se define un ciclo con desplazamientos de una operación de *picking* o recogida (levantamiento, desplazamiento horizontal y deposición) y el tiempo empleado.

1 kg *picking cycle* (25 × 300 × 25 mm): 0,58 s

11.3.5. Tipos de actuadores

Se cataloga al tipo de actuadores, entre otras cosas, por la tecnología empleada para proporcionar la potencia de movimientos mecánicos, incluyendo fuerza y velocidad. En función de las necesidades, puede haber robots cuyo coste o rentabilidad sea mayor empleando unas tecnologías frente a otras.

- Para gran velocidad, puede ser adecuado un actuador neumático, pero su precisión y libertad de movimientos es limitada. Esta tecnología se emplea mucho en la pinza para prensión de piezas y también por succión (ventosas).
- Para grandes fuerzas, convendrán actuadores hidráulicos, pero con bajas velocidades.
- Para mayor versatilidad, aunando velocidad, control y fuerza, se emplearán motores eléctricos, que es la tecnología presente en la mayoría de robots.

11.3.6. Especialidad (diseño y pinza) y programabilidad (software)

La capacidad de integración y configuración puede determinar también la idoneidad de un robot frente a otros. Hay robots especialistas, cuyas interfaces de comunicación, configuración

y programación estarán más desarrolladas en una dirección que en otras y, por tanto, tendrán mejor rendimiento en ellas. Por ejemplo, no se seleccionaría la interfaz de software de diseño de tareas de un robot especialista en pintura para configurar un robot de transporte o manipulado de cargas.

La especialidad del robot para la aplicación deseada se define en gran parte (aparte de por la orientación de producto del fabricante y por el enfoque del software), por la elección de la pinza. Un robot de soldadura, muy probablemente, podrá reubicarse en procesos de manipulado o aplicación de cordón adhesivo, con una adaptación que consista en cambiar la herramienta de soldadura por una pinza manipuladora o por una herramienta con aplicadora de cola.

11.4. Tipos de robots industriales

En función de todo lo visto previamente, se establecen diversas clasificaciones de robots dependiendo de su movilidad o de la configuración de sus movimientos y morfología, como se explica en los siguientes apartados.

11.4.1. Según su movilidad

En función de su movilidad, los robots industriales pueden ser:

1. *Fijos*: se encuentran anclados de modo seguro a una cimentación o anclajes fijos. Su radio de acción tiene como origen su posición fija. La mayoría de robots industriales son de este tipo.
2. *Móviles*: son capaces de desplazarse mediante raíles o ruedas. Su capacidad de carga y de soportar inercias se verá limitada por la estabilidad de su base desplazable. En la industria, en la mayoría de los casos, se trata de robots de transporte, pero también puede haberlos de otro tipo con capacidad de desplazarse.



Figura 11.9

Robot móvil con ruedas omnidireccionales (a) y robot móvil que manipula piezas en un minicentro de mecanizado con torno y fresa, desplazándose a lo largo de una guía (b).

WWW

Recursos web

En el vídeo accesible mediante el primer QR, se observa una aplicación interesante de gestión de almacenes de Amazon con robots móviles de transporte y manipulación de estanterías (en inglés). Y, en el del segundo QR, se observa un robot móvil de limpieza de aviones y grandes piezas aunando una plataforma móvil y un brazo antropomórfico acoplado a una herramienta de limpieza.



11.4.2. Según la configuración de sus movimientos y morfología

En función de los movimientos y morfología de un robot, se establece la siguiente clasificación:

1. *Robot cartesiano*: combina movimientos lineales a lo largo de o según dos o tres ejes cartesianos (x , y y z). Por ejemplo, con tres ejes con igual recorrido cada uno, su espacio o volumen de trabajo será un cubo (figura 11.10a).
2. *Robot cilíndrico*: tiene tres grados de libertad, un giro sobre el eje vertical z y dos lineales, una traslación vertical y otra radial (en el plano horizontal). Esto le permite describir un volumen de trabajo con forma cilíndrica (figura 11.10b).

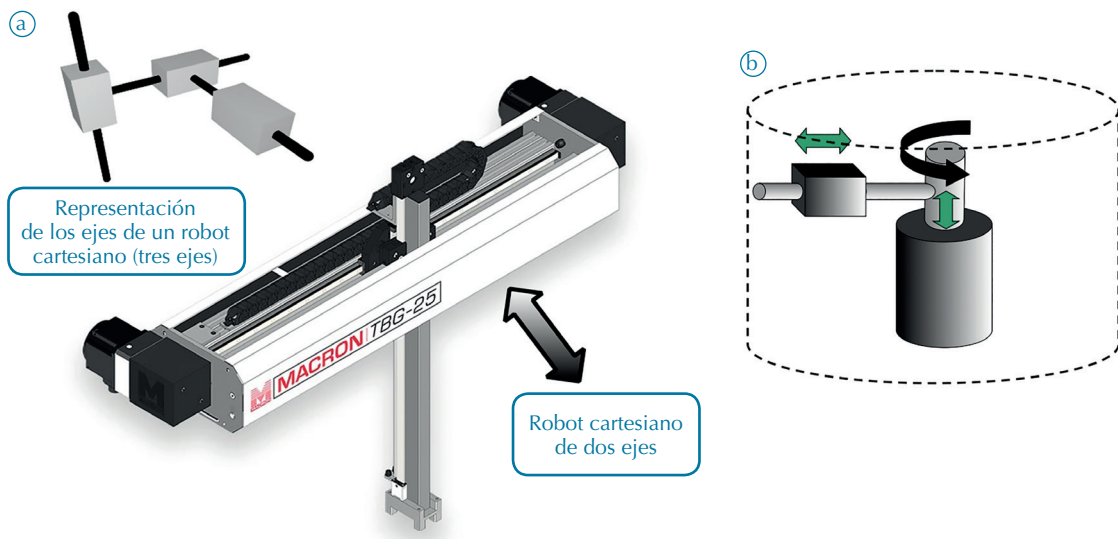


Figura 11.10

Robot cartesiano (a) y robot cilíndrico (una rotación y dos traslaciones) (b).

3. *Robot esférico o polar*: sus ejes forman un sistema polar de coordenadas. Tienen tres grados de libertad, dos de giro uno en el eje z y otro en un eje horizontal, más una traslación radial. Se sustituye la traslación vertical por un giro respecto al robot cilíndrico y es capaz de describir una esfera como volumen de trabajo (figura 11.11a).

4. *Robot scara*: acrónimo de su definición en inglés “selective compliance assembly robot arm” o “selective compliance articulated robot arm”. Se trata de un brazo articulado con dos o tres articulaciones giratorias en el eje z y una articulación de traslación vertical en el extremo. Puede alcanzar cualquier punto en el plano XY y barre el espacio con un cierto recorrido vertical (eje Z). Son fundamentalmente robots manipuladores de piezas de pequeño tamaño capaces de alcanzar grandes velocidades (figura 11.11b).
5. *Robot delta*: de introducción más reciente (años ochenta), se basan en una cinemática más compleja donde la herramienta se sitúa en la unión de los extremos de tres o más brazos paralelos, que cuentan con un hombro y un codo (articulaciones de giro), para conseguir, fundamentalmente, velocidades de acción altísimas para *picking* (manipulado) de pequeñas piezas (figura 11.11c). También en inglés denominados *parallel robot*.

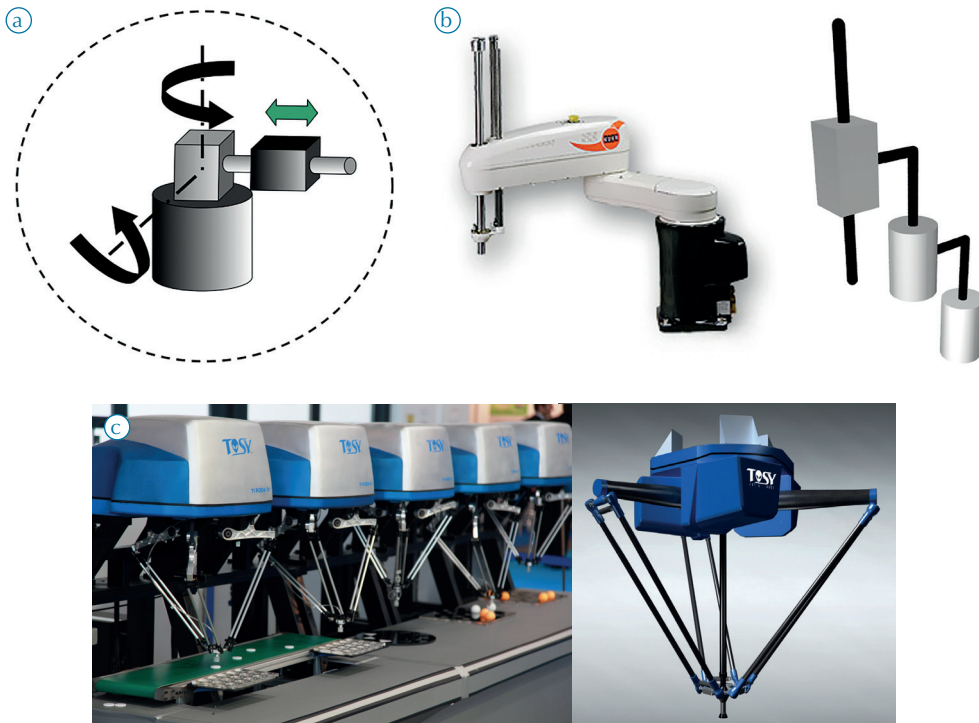


Figura 11.11
Robot esférico (a) y robot *scara* y su configuración (dos giros y una traslación vertical) (b) y robot *delta* (c).

6. *Robot antropomórfico*: se trata de un robot con un brazo de múltiples articulaciones giratorias en distintas orientaciones, similar al brazo humano. Es el tipo más versátil y flexible de movimientos, potente y también el más extendido con diferencia y la primera imagen que se visualiza al hablar de un robot industrial (figura 11.12a).
7. *Antropomórficos colaborativos*: es la familia de robots industriales de más reciente incorporación (durante los últimos cinco años). La inteligencia y la sensorica están permitiendo integrar a los robots en el trabajo junto a humanos sin jaula. Son robots diseñados para ser seguros frente a las colisiones con personas (sin necesidad de jaulas) y de fácil programación y versátiles, a menudo con dos brazos. Su configuración se ha simplificado para facilitar su integración en el trabajo (figura 11.12b).

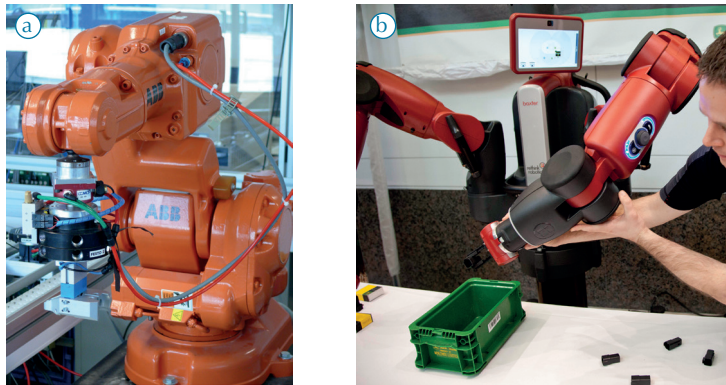


Figura 11.12
Robot antropomórfico (a) y robot antropomórfico colaborativo (b).

WWW

Recursos web

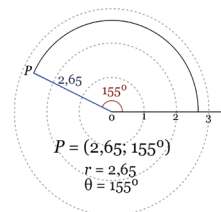
En los siguientes QR, encontrarás vídeos que muestran un robot polar en movimiento, un robot *scara* de ABB y sus características y robots delta en aplicaciones de *picking* y empaquetado (en ocasiones, asistidos por sistemas de visión).



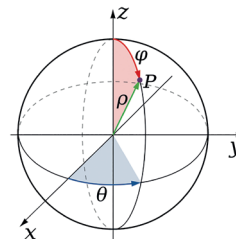
PARA SABER MÁS

En matemáticas, el sistema de coordenadas polares es un sistema de coordenadas bidimensional en el que cada punto en un plano está determinado por una distancia radial desde un punto de referencia u origen y un ángulo desde una dirección de referencia de la dirección del radio. El punto de referencia (análogo al origen de un sistema cartesiano) se denomina *origen o polo* y un eje de coordenadas horizontal que pasa por el origen en la dirección de referencia, *eje polar*. La distancia desde el polo se denomina *coordenada radial o radio* y el ángulo se llama *coordenada angular, ángulo polar o azimuth*. Las coordenadas polares bidimensionales son la pareja de datos compuesta por la distancia radial o radio y el ángulo. Para cubrir un espacio tridimensional, se añade un ángulo de giro del plano de coordenadas bidimensionales, con lo que se genera una esfera cuyas coordenadas son el radio y los dos ángulos.

Coordenadas polares bidimensionales



Coordenadas polares tridimensionales



Recursos web

www

En el primer QR, encontrarás el vídeo de un robot colaborativo y, en el segundo, diversas escenas de la línea de fabricación del BMW 13 que muestran diversos robots antropomórficos:



11.5. Funciones de los robots industriales

Variando según el tamaño, la capacidad y la fuerza de sus actuadores, así como su movilidad, velocidad, inteligencia, capacidad de integración y las herramientas que monten, los trabajos automatizables más habituales mediante un sistema robótico industrial son:

1. *Manipulación para desplazamiento o selección, picking.* A menudo, coordinados con sistemas de visión (con la cámara montada, a veces, en el propio brazo del robot) para la identificación de piezas y geometrías o la detección de defectos. Tras la identificación de los elementos y su orientación o de las piezas defectuosas por un sistema de visión al que están conectados, el robot calculará la trayectoria y recogerá el objeto, orientando (o no según el diseño) la pinza o herramienta de manipulado, y lo llevará al lugar objetivo con la orientación adecuada. En alimentación, un ejemplo típico es el uso de robots delta para clasificar a gran velocidad en blísteres, por ejemplo, galletas que vienen en cualquier orden y posición por una cinta transportadora.
2. *Manipulación para ensamblaje.* También pueden estar asistidos por sistemas de visión o sensores de distancia y realizan labores de colocación en conjuntos ensamblados. Por ejemplo, el manipulado y la colocación de las lunas de cristal en los automóviles.
3. *Aplicación de pintura.* Con la particularidad de que la aplicación es en cabinas y con una tecnología específica basada en cargas eléctricas. Para conseguir la deposición de la pintura en la pieza, el robot realizará la trayectoria óptima para la correcta aplicación y distribución del pintado. En automoción, el pintado de carrocerías está sistemáticamente robotizado.
4. *Aplicación de adhesivos.* En muchos productos, es necesaria la aplicación de un cordón de adhesivo, que se consigue con un sistema de alimentación del cordón acoplado al robot y al automatismo y una pistola de aplicación como herramienta en el extremo del robot.
5. *Soldadura.* Con distintas tecnologías, los robots pueden aplicar soldadura a lo largo de trayectorias con puntos o aplicando cordón (figura 11.13).

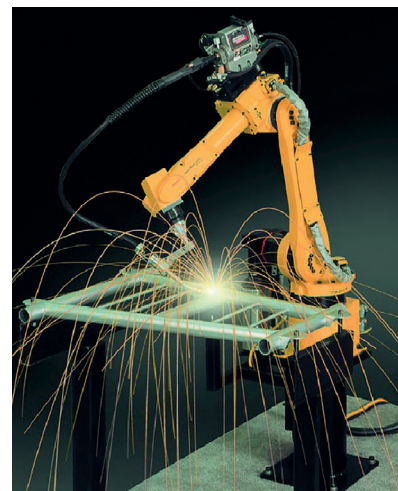


Figura 11.13
Robot de soldadura por arco.

6. *Corte (por láser, plasma o chorro de agua)*. Las máquinas específicas de corte suelen ser robots cartesianos, que, teniendo el dispositivo de corte en su cabezal, activan el corte a lo largo de trayectorias programadas a conveniencia para obtener piezas con geometrías planas a partir de un producto bruto plano (planchas).
7. *Robots colaborativos integrados con el trabajo humano*. Las tareas que pueden realizar son muy diversas, pero la aplicación habitual es el manipulado cuando hace falta la colaboración o supervisión cercana de un operario humano.
8. *Transporte*. Hace ya décadas que se emplea el transporte automatizado dentro de las plantas. Se trata de carros autoguiados y, aunque se emplean en la industria, estos dispositivos no se identifican como robots, pues no responden al concepto clásico de robot industrial.
9. *Mecanizado*. La rigidez de un brazo robótico es muy inferior a la de una fresadora o un torno CNC, pero, para aplicaciones de esfuerzos de mecanizado no elevados (aceptables para el portaherramientas y para las flexiones del robot), un brazo robótico presenta una destreza superior.

11.5.1. Funciones de robots no industriales

La penetración de los robots no industriales es exponencial en los últimos años y seguirá al alza dentro del área industrial y también en el sector servicios. Surgen nuevas aplicaciones al tiempo que los robots mejoran sus prestaciones, entre las que destacan actualmente las siguientes:

1. Asistencia quirúrgica (robots cirujanos).
2. Asistencia biomecánica o protésica (exoesqueletos).
3. Telepresencia.
4. Vigilancia.
5. Transporte de todo tipo en el área de servicios y también en las carreteras para el transporte de humanos y mercancías.
6. Policial o militar: desactivación de explosivos, vigilancia y bombardeo (drones).
7. Atención e información pública: sustituyen a quioscos de información en aeropuertos, centros comerciales, ferias, etc.
8. Entretenimiento: juguetes y robots de compañía.

Actividad resuelta 11.1



Indica al menos cinco robots de servicios (no industriales) que, actualmente, estén disponibles en el mercado.

- Robot aspirador: la línea Roomba de iRobot.
- Robot limpiacristales: el robot Winbot de Ecovacs Robotics.
- Robots de vigilancia: el robot K5 de Knightscope.
- Robots cirujanos: el robot Da Vinci de Intuitive Surgical.
- Robot de asistencia médica: la aplicación del robot NAO para terapias con niños autistas.
- Robot militar: el RQ-180 dron de vigilancia para la CIA y fuerza aérea estadounidense de Northrop Grumman.

11.5.2. Riesgos derivados de los robots industriales

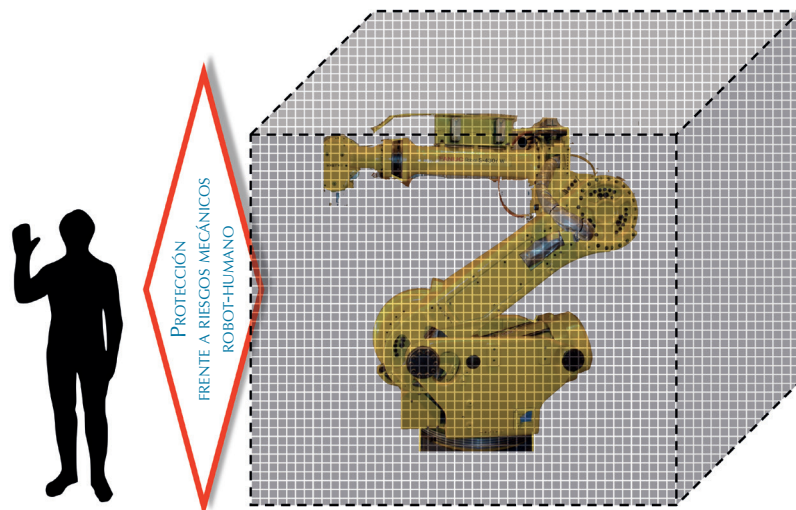
Los robots y las máquinas automatizadas realizan movimientos mecánicos y manejan muchas energías que, al igual que sucede con las máquinas convencionales, generan riesgos para las personas. Existirán, pues, los mismos riesgos que los de cualquier zona peligrosa de trabajo de una máquina industrial: mecánicos (impactos, punzamientos, cortes, desgarros, atrapamientos, amputación, aplastamientos, cortes, etc.), eléctricos (electrocución), térmicos (quemaduras), etc., pero dentro de todo el volumen de trabajo del robot.

Los robots, al igual que las grandes máquinas, emplean fuerzas, inercias y velocidades que son muy peligrosas y, habitualmente, no perciben la proximidad de las personas. Por ello, los accidentes relacionados con robots suelen ser mortales o de extrema gravedad y la seguridad es un aspecto muy importante a la hora de instalarlos, trabajar con ellos y mantenerlos.

A) Medidas de seguridad que implementar en la robotización

Para un trabajo seguro en entornos robotizados, debe aplicarse un conjunto de medidas de seguridad en la instalación del robot y diseño del proceso en el que se integra que estén encaminadas a evitar posible accidentes. Estas medidas son:

1. *Jaula de protección*: cuando el robot está en una zona transitada por humanos, es imprescindible su instalación dentro de jaulas o zonas inaccesibles para las personas durante el tiempo de operación (figura 11.14). El control de acceso a dicha zona y operación restringida durante la marcha con personal en el interior también son medidas necesarias.
2. *Acesos restringidos y controlados*: el acceso a la jaula, la unidad de control y el arranque, parada y modificación del programa estarán limitados mediante el empleo de llaves, códigos de seguridad, etc.



JAUJA DE PROTECCIÓN DE ROBOTS INDUSTRIALES: Cuando sea necesario por la cercanía de personas, el robot industrial no puede ponerse en marcha sin la instalación de una jaula de características según dicte la normativa de seguridad (dimensiones, tamaño de malla de la rejilla, acceso...)

Figura 11.14
Jaula de protección.

3. *Velocidad máxima limitada con personal dentro de una jaula*: el sistema de control asegurará que la velocidad de los movimientos sea mínima cuando una persona se encuentra en las proximidades del robot (mantenimiento o programación, por ejemplo).
4. *Detectores de sobreesfuerzo*: deben detectar sobreesfuerzo en los accionamientos y desactivarlos cuando se sobrepase un valor excesivo (colisión o atrapamiento de una persona).
5. *Paradas de emergencia*: deben disponerse paradas de emergencia que desenergicen completamente el robot con un número adecuado de botones o interruptores de parada de emergencia para el operador y en puntos críticos dentro y alrededor del volumen de trabajo.
6. *Frenos mecánicos adicionales*: si el robot maneja grandes cargas, deberá incluir frenos mecánicos adicionales que detengan las masas e inercias cuando se corte la alimentación de los accionadores.
7. *Comprobación de señales de autodiagnóstico en la unidad de control previamente al primer funcionamiento* (niveles de tensión de las fuentes de alimentación, diagnóstico de los elementos de seguridad, leds indicadores, mensajes de error, etc.).
8. *Supervisión del sistema de control*: el sistema de control debe estar diseñado para realizar una continua supervisión de su propio funcionamiento y de los subsistemas que gobierna (*watchdog*) para evitar errores que pudieran generar una situación insegura.
9. *Señalización adecuada del funcionamiento del robot*: toda la zona de la instalación estará correctamente señalizada, indicando el estado del robot o línea robotizada mediante señales luminosas y acústicas.
10. *Identificar claramente el volumen o área de trabajo en el que se produce el movimiento del robot*: con marcas en el suelo, señales y barreras especiales.
11. *Formación adecuada*: de todo el personal que manejará el robot, así como la prohibición de su manejo y el acceso a personal no formado.
12. *No confiar el software como elemento principal de seguridad*: debe haber un circuito o sistema de hardware capaz de realizar la desenergización con la emergencia no dependiente únicamente del software.

Actividad propuesta 11.2



Busca y resume una noticia relacionada con un accidente con robots industriales y argumenta si son habituales, y su gravedad cuando se dan, apoyándote en el resultado de tu investigación.

B) Nuevos riesgos derivados de la implantación de sistemas automáticos y robotizados

Además, en el cambio de procesos, cuando se introduce automatización por robots, los humanos están expuestos a algunos riesgos de nueva naturaleza:

1. Mayor nivel de estrés y presión psíquica derivados de:
 - a) El aumento de la carga y ritmo de trabajo del robot (mayores esfuerzos y velocidades).
 - b) Tareas añadidas y aumento de las responsabilidades en la toma de decisiones.

2. En la sustitución de tareas, riesgo de accidentes más graves derivados de las altas capacidades de ejercer fuerzas y energía de los robots. Si, por ejemplo, debe alimentarse la línea de un robot capaz de manipular rápidamente el bloque motor de un automóvil, un fallo en su sujeción hará que salga proyectado, mientras que, probablemente, antes se desplazaba lentamente con ayuda de una grúa.

11.5.3. Configuración y programación de los robots industriales

Cuando se introduce a un operario cualificado en un trabajo, es decir, con una formación sobre las aplicaciones, dispositivos, procesos y los requisitos generales sobre el producto fabricado, podría ejecutar la tarea de forma inmediata. El operario asimila fácilmente la información, pero, a la hora de introducir un robot en un proceso, es necesario que el robot disponga de toda la información que se requiere para que sus acciones realicen las funciones necesarias. Aunque, poco a poco, la inteligencia artificial avanza y, seguramente, en un futuro no muy lejano, los robots sean capaces de asimilar la información de modo similar a como lo hace un ser humano, todavía no se da el caso y no puede instruirse a un robot de la misma manera en la que se instruye a un trabajador humano.

A) Configuración de la tarea en el robot y entorno (software y lenguaje) de programación

En la práctica, se pretende que los sistemas de programación de robots se asemejen a la instrucción de un trabajador, explicando con precisión cómo se realiza cada aspecto de la tarea. En los entornos de programación o *suite* de configuración que aportan los fabricantes, estos intentan que pueda instruirse al robot en la tarea que ha de realizar de forma completa y explícita (con todos los detalles), pero de un modo que resulte fácil para el programador. Existen herramientas incluidas habitualmente en el software o en las funciones del robot que ayudan en este sentido:

1. Grabado de trayectorias deseadas y posiciones de interés con guiado manual del robot si la precisión humana (al guiarlo) es suficiente.
2. Que puedan almacenarse y relacionarse tareas o movimientos individuales para componer con ellos tareas complejas, por ejemplo con bucles y condiciones, sin necesidad de elevadas capacidades de programación.
3. Que pueda definirse fácilmente cuáles son las desviaciones esperadas o normales de la trayectoria nominal para que el robot conozca su margen de maniobra al realizar los movimientos.
4. Cómo relacionar sus rutinas de movimientos con los estímulos de sensores externos e internos a la hora de variaciones en el proceso, manipulado de piezas (sensores en la pinza), posibilidad de colisiones, etc.
5. Proporcionar una interfaz o módulo de software CAD que sea una herramienta visual tridimensional capaz de integrar al robot en una simulación fiel al funcionamiento real, a la vez que se calculan y definen trayectorias, velocidades y posiciones para la tarea objetivo. Esta interfaz CAD también debe ser compatible con formatos externos de archivos 3D

para poder importar e insertar geometrías generadas con otros programas de diseño 3D en el modelo y poder simular el funcionamiento de una célula. También ha de poder generar trayectorias y programas de robots desde datos geométricos a partir de archivos CAD.

Un aspecto importante es que el software podrá establecer la relación entre la programación visual de la tarea y las líneas de código del lenguaje de programación que son equivalentes, con lo que puede trabajarse en paralelo sobre ambos entornos a conveniencia del programador. En cualquier caso, habrá que seleccionar adecuadamente los sistemas de coordenadas de referencia con los que va a trabajarse, por ejemplo, definiendo los orígenes de coordenadas posibles de cada tarea que pueden estar en la base del robot o en elementos externos como una mesa de trabajo de la célula de fabricación, la propia pieza, etc.

Al final, se trata de proporcionar al usuario un entorno de simulación 3D potente (figura 11.15) y una programación de la tarea y que los operadores humanos se olviden de los aspectos de bajo nivel (código o programa cercano al lenguaje de la máquina) requeridos para el funcionamiento del robot.

6. Poder utilizar una comunicación más humana entre el programador y el robot como el habla y los gestos. Algunos robots colaborativos incorporan estas nuevas vías de comunicación que, como se ha comentado antes, seguirán mejorando en funcionalidad con el crecimiento de la inteligencia artificial y contando con la visión artificial.

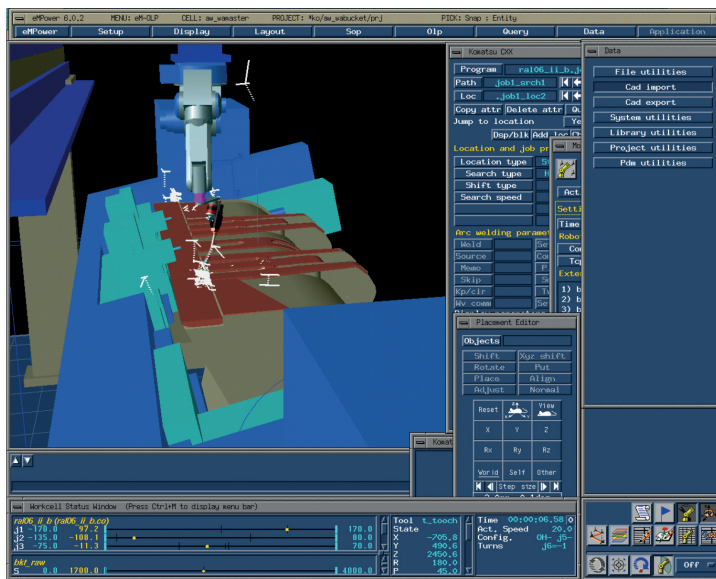


Figura 11.15
Entorno 3D de configuración de robots Komatsu.

Es posible que el programador del robot conozca muy bien el proceso de producción, pero que no sea un programador experto. La tendencia en el software de fabricante es centrarse en la herramienta final (extremo de trabajo o manipulador) y en las trayectorias requeridas y programación de la tarea. Se busca facilitar la configuración para que el operador exprese la tarea del robot en tales términos: herramienta y tarea más trayectorias. Intenta incluirse en el software todo lo que deba ejecutar el robot que no sean estos aspectos claves del proceso, para ahorrar al usuario horas de programación y complejidad, con el objetivo de simplificar la configuración.

Por otro lado, los lenguajes y entornos de programación de robots han sido tradicionalmente separados en:

1. *Programación online*: en conexión con el robot y utilizándolo *in situ*.
2. *Programación offline*: sin conexión con el robot, sin disponer de él y utilizando herramientas de software.

Los lenguajes de robot y las herramientas de simulación por software deben proporcionar siempre ambos métodos de programación.

B) Teach pendant

Para la programación o configuración *online* (incluyendo mantenimientos y modificación de programas), los robots de cierto tamaño suelen venir acompañados de un apéndice cableado terminado en una pantalla (a menudo táctil) con botones y mandos sensibles (mandos de seguridad que deben permanecer pulsados para el movimiento del robot) que sirve para manejar el robot e incluso configurar y programar *online* o modificar el programa contenido en la controladora.



Figura 11.16
Teach pendant de un robot de pintura Stäubli RX Paint.

Con la creciente potencia de las herramientas de programación *offline* con los mencionados entornos 3D y herramientas de simulación, su capacidad para conectarse fácilmente al robot físico y la cantidad creciente de funciones que están incluidas en el sistema de control del robot (funciones que no hay que programar al estar ya incluidas), la programación *online* ocupa actualmente mucho menos tiempo.

La programación *online* se justifica:

1. En la verificación y ajuste final de los programas generados *offline*.
2. En aquellos casos en los que las tareas presenten mucha interacción con el entorno, con sensores externos y sean demasiado difíciles de desarrollar sin acceso a la verdadera dinámica de la célula de trabajo física: en el trabajo continuo con otros robots, otras máquinas, sistemas externos de visión, etc.
3. En tareas de mantenimiento y calibración del hardware del robot: la calibración periódica requerida o una modificación en la herramienta, reparaciones, etc.

El elevado coste de un robot parado hace que sea lógico minimizar al máximo el tiempo de inactividad del robot para su programación.

C) Unificación de lenguajes de programación

A pesar de que los lenguajes de robots de diferentes fabricantes son similares, hay diferencias semánticas en los comandos que modifican la ejecución del programa. Por ello, es necesaria una formación específica para garantizar que la configuración del robot es correcta.

La necesidad de asegurar que los programas y el software de configuración de robots existentes puedan operar con robots antiguos y también el uso de los conocimientos existentes de programadores veteranos requieren que los fabricantes den (o lo intenten) soporte a sus lenguajes propietarios antiguos, y esto dificulta una estandarización.

Por supuesto, las características dinámicas y cinemáticas, declaraciones de movimiento y restricciones hacen que los lenguajes de programación de robots sean diferentes de los convencionales de programación informáticos.

11.6. Visión artificial

11.6.1. Definición y funciones de la visión artificial

Se ha mencionado varias veces la importancia presente y futura de la inteligencia artificial (IA) con algoritmos actuales resolviendo problemas y optimizando procesos más allá de lo posible hasta ahora. La visión artificial es una parte de la IA que viene empleándose en la industria desde hace muchos años, pero que ha adquirido un protagonismo creciente gracias al tremendo avance en la potencia del hardware (la IA y la visión artificial requieren elevada capacidad de procesamiento).

La visión artificial como disciplina de la inteligencia artificial engloba todos los procesos y elementos que proporcionan el sentido de la vista a una máquina, con el objetivo de interactuar con su entorno para realizar una función definida.

WWW

Recursos web

Los siguientes QR enlazan con vídeos en los que se muestra cómo la visión artificial se aplica en diferentes tareas como la soldadura robotizada, la inspección de piezas y el manipulado robotizado.



A partir de las imágenes captadas, el sistema de visión artificial realiza las operaciones requeridas para que la máquina identifique e interprete características de los objetos visionados (propiedades geométricas, de color, superficiales, dimensionales, posición, movimiento, etc.) y pueda tomar decisiones respecto a las acciones y movimientos exigidos por el proceso.

Las principales funciones de la visión artificial se describen en el cuadro 11.2.

CUADRO 11.2 Funciones de la visión artificial

Reconocimiento de objetos para manipulado en picking, packing, montaje y clasificado	A partir de algunas de sus características, el sistema reconoce uno o varios objetos preespecificados o aprendidos. A partir de este reconocimiento, un robot realizará la clasificación, posicionado o empaquetado. También puede incluir el reconocimiento de la posición del objeto para su manipulado por parte de la pinza del robot y posicionado posterior.
Detección de defectos	Se inspecciona una característica específica del producto y se compara con un patrón. Puede ser una forma, dimensión, color, defecto superficial, etc., si el elemento leído se encuentra fuera de unos parámetros preestablecidos de aceptación, la pieza será rechazada.
Aplicaciones robóticas con posicionado por visión	En los casos en los que la visión puede ayudar a <i>seguir</i> contornos para procesos de soldadura o aplicación de sellantes o adhesivos, la detección por parte del sistema guiará los movimientos del robot en el proceso.



Actividad propuesta 11.3

Cita cinco aplicaciones no industriales en las que se emplee la visión artificial.

11.6.2. Etapas en el proceso de visión artificial

A) Captación de imagen

En esta etapa, intervienen elementos físicos y ópticos o electrónicos:

1. *Iluminación de escena y objeto.* Una fuente de luz emite la luz con una determinada intensidad. La luz se refleja también con una intensidad en los objetos que desean visualizarse. Ambas intensidades son la iluminación y reflectancia respectivamente. La luz reflejada debe dirigirse a la cámara. Uno de los requisitos fundamentales para el éxito de una aplicación de visión artificial es la correcta iluminación.
1. *Cámara con óptica y sensor.* La cámara y óptica deben disponer de la posición, enfoque y parámetros ópticos adecuados, así como un sensor con una resolución que resulte satisfactoria para la aplicación deseada. El sensor convertirá la luz incidente en su superficie en información digital relacionada para su tratamiento por el sistema e incluye la electrónica de digitalización. En este punto, es importante indicar un concepto: ROI, del inglés *region of interest*, que es la zona que desea ser visualizada o inspeccionada del objeto o la imagen que desea captarse. Para la aplicación, no es necesario que el espectro de radiación de luz emitida o captada esté en el rango que resulta visible para los humanos.

B) Preprocesamiento de la imagen

Se trata de manipular la información obtenida en la imagen enfatizando aquellos aspectos que sean necesarios para el éxito de aplicación buscada: modificación de contraste, enfoque, obtención de bordes, manipulación de colores o identificación de regiones con el mismo color, corrección de parámetros de luminosidad, reducción de ruido, etc. Estas operaciones también consumen recursos importantes y, por tanto, la resolución (más recursos empleados a mayor resolución) sigue siendo una limitación, sobre todo si se pretende el análisis en tiempo real o a ritmo de producción industrial como va a ser casi siempre.

Cuando a nivel doméstico se dispone de un software de tratamiento de imágenes y se realiza una manipulación sobre una imagen grande, se observa que, para algunos dispositivos habituales, exige un tiempo realizarla. Un sistema de visión que deba analizar en tiempo real objetos en movimiento en una línea transportadora, por ejemplo, debe realizar esta etapa (y las otras) muchas veces por segundo.

Para salvar la dificultad que supone procesar imágenes con mucha información que no es necesariamente útil, se explican dos conceptos básicos:

1. *Muestreo*. El muestreo de una imagen tiene el efecto de reducir su resolución. La resolución del sensor define en cada uno de los puntos de captación de esta la entrada de una matriz captada con posiciones, que se denomina *píxel*. Un sensor con mucha resolución genera una matriz de muchas entradas (millones). El muestreo reduce el número de píxeles para facilitar el procesado de la imagen a cambio de perder información. En la figura 11.17, puede verse la pérdida de información introducida con el aumento del paso de muestreo.



Figura 11.17
Muestreo de una imagen para realizar la disminución de la carga de procesamiento a costa de la información.

2. *Cuantificación o rango dinámico*. En cuanto a la cuantificación, el sistema de digitalización no puede almacenar un rango infinito de valores de intensidad luminosa, sino un rango limitado. Se cuantifica en una resolución de grises indicando la longitud de una cadena en bits. Las combinaciones que proporciona dicha cadena son el conjunto de niveles de gris disponibles de intensidad luminosa. Este conjunto también se denomina *rango*

dinámico. Por ejemplo, 8 bits de resolución de intensidad luminosa equivalen a disponer de 256 niveles de gris codificables (incluyendo el blanco). Cuatro bits son 16; 3 bits, 8; 2 bits, 4, etc., y, en el extremo con 1 único bit, puede llegarse a una resolución binaria de blanco y negro. En este caso extremo, todo píxel con un nivel de gris por encima del gris intermedio será convertido en negro y, por debajo, convertirá el píxel en blanco (figura 11.18).

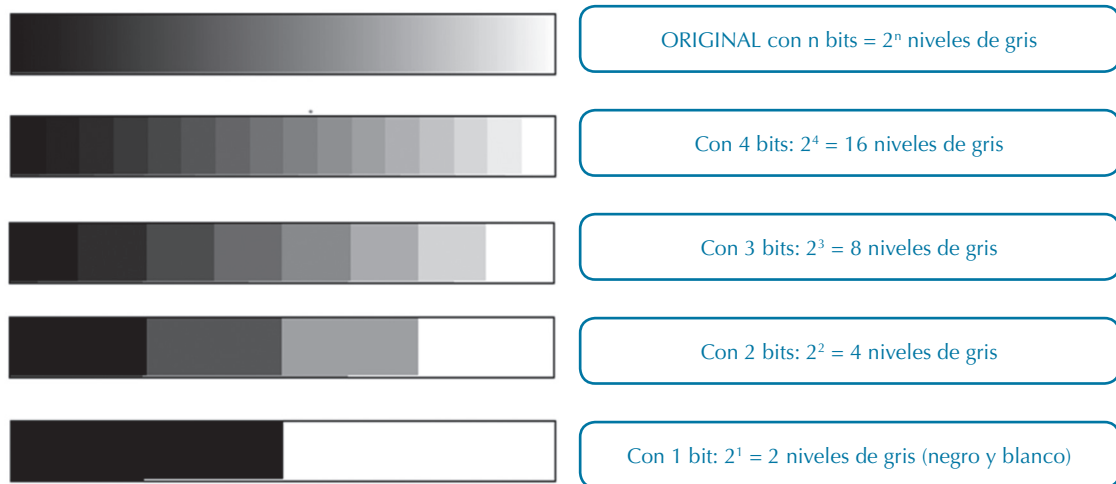


Figura 11.18
Ilustración de la cuantificación.

A menudo, los niveles de gris se representan en un histograma de frecuencias que indica la ocurrencia de cada nivel de gris en la imagen.

El muestreo y cuantificación permiten procesar con pérdidas de información imágenes con menor capacidad de cálculo de hardware. ¿Hasta cuándo puede perderse información con unos resultados fiables? Si se elimina demasiada información, la imagen va a resultar inútil para la etapa posterior. Si hay excesiva información, el hardware puede tener dificultades para realizar la etapa posterior. No hay un valor universal, sino que dependerá de la aplicación con una exigencia y dificultad determinada. Lo que es evidente es lo siguiente:

1. Determinadas situaciones no ofrecen mejores resultados con mayores resoluciones de píxeles e intensidad luminosa a partir de cierto nivel.
2. Por debajo de determinado nivel de resolución, cualquier imagen deja de ser útil.
3. Dados los avances en la potencia de procesamiento y como conclusión, cuanto mayor resolución y calidad posible, mejor.

Se ha visto el muestreo y la cuantificación como métodos para *ajustar* el peso de la imagen en cuanto a la resolución en píxeles y niveles de grises. Pero hay muchas otras operaciones de preprocesamiento. Algunas de ellas son las siguientes:

1. *Disminución o aumento del contraste*: se trata de acercar los valores existentes de grises en todos los píxeles a un valor cercano al intermedio (disminuir contraste) o acercarlos a los extremos blanco y negro (aumentar contraste).

2. *Segmentación*: se trata de realizar la partición de una imagen o volumen en distintas regiones diferenciables, que, por lo general, pueden discriminarse entre sí, pues no se superponen en sus características (brillo, color, etc.) de una forma que resulte significativa. Identifica objetos separados dentro de una imagen. Encuentra regiones de píxeles conectados por propiedades similares. Encuentra fronteras entre regiones. Elimina regiones no deseadas. Un tipo de segmentación es el denominado *umbralización* o *thresholding*. Se basa en las diferencias de intensidad entre estructuras dentro de una imagen.
3. *Ecuilización*: manipula los niveles de gris presentes en la imagen para intentar que todos los niveles tengan un protagonismo similar (que haya más o menos la misma cantidad de píxeles de cada nivel de gris).
4. *Filtros sobre la frecuencia*: suelen manipular la distribución de frecuencias (grado de ocurrencia de cada gris) de los niveles de gris de distintas formas.
5. *Filtros de nivel sobre intensidades*: pueden emplearse para la reducción de ruido. El filtro de paso alto reemplaza todos los píxeles de intensidad inferior a un valor especificado y el filtro de paso bajo reemplaza todos los píxeles de intensidad superior a un valor especificado. El filtro de banda reemplaza todos los píxeles de intensidad inferior a un valor especificado y superior a otro (solo permanecen los píxeles en una banda de intensidad). En muchas ocasiones, lo que se consigue es emborronar la imagen. También hay filtros que eliminan los píxeles estadísticamente muy alejados de su entorno (comparando con la media o mediana de una región cercana).
6. *Filtros de gradiente sobre intensidades*: se realiza un filtro en el que cada píxel resultante de la imagen procesada mide el cambio de intensidad de ese mismo punto en la imagen original en una dirección dada. Para obtener el rango completo de dirección, se calculan las imágenes de gradiente en las direcciones X e Y. Se emplea mucho para la detección de bordes.

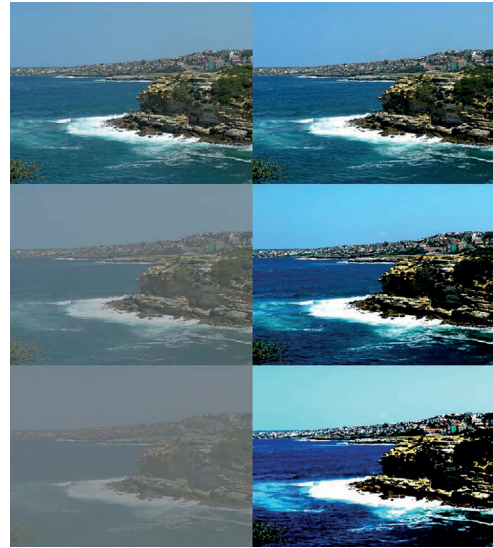


Figura 11.19
Manipulación del contraste en una imagen.

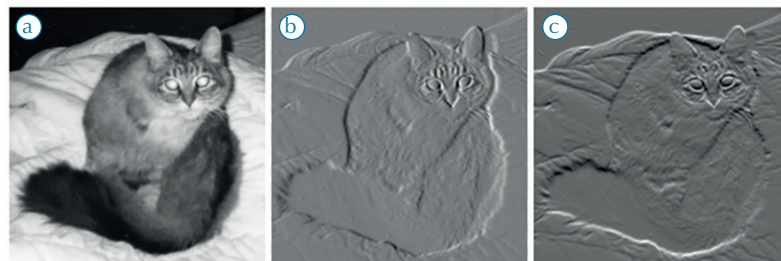


Figura 11.20
Imagen original (a), filtro de gradiente en dirección X (b) y filtro de gradiente en dirección Y (c).

7. *Filtros morfológicos*: trabajan modificando la geometría y forma de las imágenes para simplificarlas. Suavizar bordes, erosionar (para eliminar elementos pequeños), unir regiones separadas o separarlas según la imagen, ensanchado o estrechamiento de líneas y otras. Están basados en algoritmos matemáticos.

C) Interpretación de la imagen

Se trata de relacionar los elementos de la imagen preprocesada con formas, objetos o partes preestablecidas a través de características que se encuentran tanto en la imagen captada como en los objetos preestablecidos y memorizados. Por lo tanto, incorpora:

- a) Algoritmos de identificación de características en la imagen.
- b) Base de datos de las características que han de compararse y su etiquetado con clases a las que asociar los elementos de la imagen. A menudo, esta base de datos se denomina *base de conocimiento*.

Por ejemplo, si un producto sobre una cinta tiene un contorno y dimensiones que coinciden en cierto porcentaje con el objeto almacenado, se identificará como tal. Esta etapa es muy exigente con la capacidad de cálculo, pues existe multitud de algoritmos matemáticos para buscar e identificar en la imagen patrones de colores, formas y contornos, elementos repetitivos y características y, posteriormente, compararlos con los de los objetos preestablecidos y almacenados y realizar una estimación de coincidencia para decidir la identificación.

Igualmente, se requieren recursos de almacenamiento de los patrones memorizados y capacidad para mover gran cantidad de datos en poco tiempo. La exigencia a nivel de hardware en esta etapa es la que, hasta ahora, ha convertido en un aspecto fundamental la simplificación de las imágenes en la etapa previa (preprocesado) de la forma adecuada para quedarse con las características necesarias para la aplicación. Por ejemplo, no tiene sentido dedicar recursos a interpretar colores si solo quiere analizarse un contorno. No eliminar la información relativa a los colores supone procesar y mover información que es inútil para este propósito.

La eficacia de esta etapa la definen:

1. La calidad e idoneidad de los algoritmos diseñados y empleados.
2. El conjunto y calidad de patrones disponibles de comparación.
3. La calidad del preprocesado para que este enfatice los rasgos de la imagen requeridos para la identificación en la aplicación.
4. El calibrado o el aprendizaje a los que ha sido sometida la máquina por parte del usuario, que define las ROI, las características que han de analizarse y los umbrales de detección.

Las subetapas de la interpretación de una imagen son:

- a) La extracción de características buscadas en la imagen.
- b) La asociación de características con los patrones almacenados: identificación de objetos.

La complejidad de los algoritmos empleados en la etapa de interpretación, a menudo, llevan a identificar esta etapa totalmente con el concepto de *inteligencia artificial*. Se consigue, por

ejemplo, que un software de redes sociales sea capaz de proponer el etiquetado de una persona con un perfil a partir del reconocimiento facial de una imagen, que un buscador sea capaz de buscar imágenes a partir de otras imágenes o que un automóvil de conducción autónoma sea capaz, contando con las cámaras que incorpora, de prever una colisión con un objeto presente.

RECUERDA

- ✓ Las etapas del proceso de visión artificial son:
 1. La captación de la imagen.
 2. El preprocesamiento de la imagen.
 3. La interpretación de la imagen.



RECURSO ELECTRÓNICO 11.1

En el anexo web 11.1, disponible en www.sintesis.com y accesible con el código indicado en la primera página del libro, encontrarás varias actividades resueltas y definiciones que te ayudarán a comprender mejor los contenidos estudiados en este capítulo.

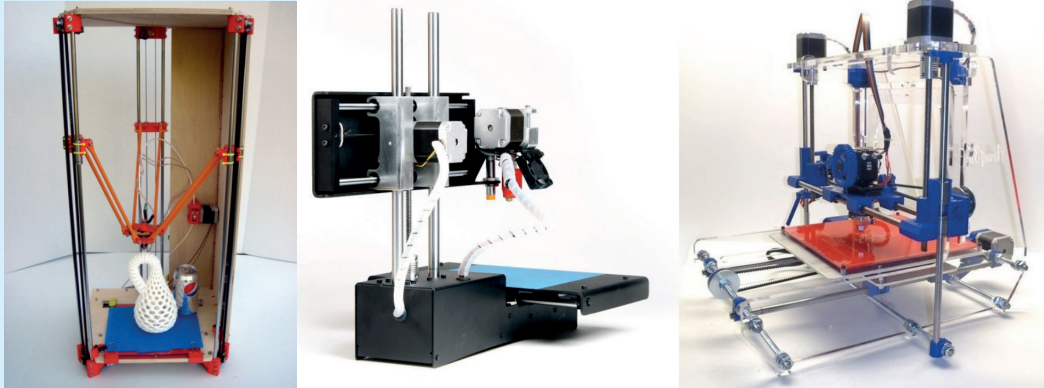
Resumen

- En este capítulo, se ha hecho una introducción a la robótica industrial donde, aparte de definir lo que se entiende como *robot industrial*, se ha matizado en qué se diferencia un robot de una máquina automatizada. También se han indicado los componentes del sistema que constituye un robot industrial y que no solo es la parte mecánica que habitualmente se visualiza.
- Se han estudiado los fundamentos de los robots industriales, incluyendo:
 - Sus características principales, siendo una de ellas los tipos de articulaciones en función de los grados de libertad que permiten entre los dos elementos articulados.
 - La importancia del control para la creación de trayectorias y gestión de la herramienta.
 - Los tipos principales de robots existentes a partir de sus articulaciones y su morfología.
 - Sus aplicaciones en la industria y la mención de aquellas que pueden desempeñar en servicios.
 - Riesgos y medidas de seguridad relacionadas con los robots industriales.
 - La dinámica de trabajo y filosofía de los entornos de configuración y programación que proporcionan los fabricantes.
- Por último, se ha detallado la importancia de los conceptos básicos de la visión artificial.

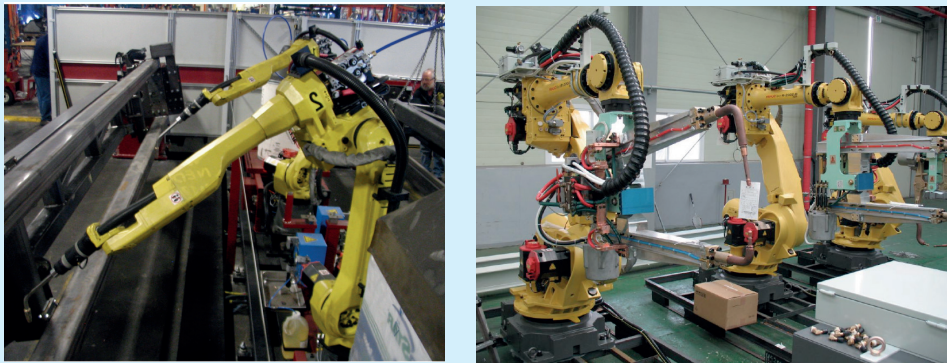
Ejercicios propuestos



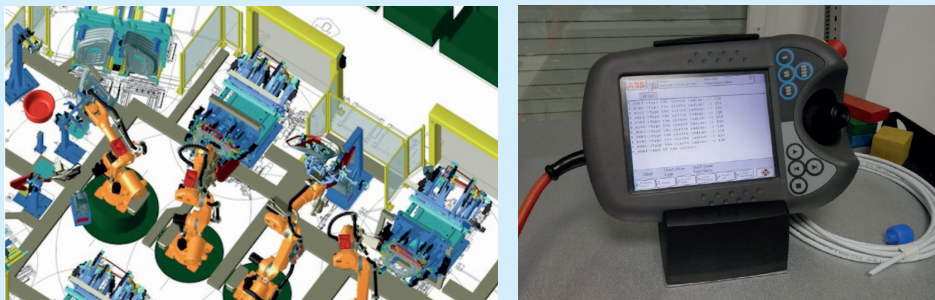
1. Señala cuál es el espacio o volumen de trabajo de un robot antropomórfico.
2. Indica con qué tipo de robot se corresponden las estructuras mecánicas de las siguientes impresoras 3D y busca impresoras 3D con otras configuraciones.



3. Identifica los robots mostrados en las siguientes imágenes, las articulaciones (señalando su tipo y grados de libertad), los GDL totales del robot y la herramienta y comenta para qué puede servir.



4. Explica qué se muestra en las siguientes imágenes:



5. Describe todo lo que sepas sobre el siguiente robot: tipo, GDL, función y herramienta.



Caso práctico

Se plantea un caso de automatización con robots de un proceso de manipulado, grabado láser y embalado posterior de placas metálicas cuadradas. El caso se describe literalmente, con datos limitados, sin herramientas de simulación y con un rigor escaso. De cualquier modo, las diferencias resultantes de las alternativas pueden ayudar a entender la potencia de la robotización de un proceso manual en lo que respecta a productividad y rendimiento económico y, en conjunto, competitividad.

El proceso, actualmente, se realiza de la siguiente forma:

1. Desde una rampa de rodillos 1, situada a la derecha del operario, se deslizan cajones plásticos con placas metálicas rectangulares de acero inoxidable amontonadas a granel hasta un tope de baja altura (20 mm). Sus dimensiones son 120 mm de largo, 80 mm de ancho y 12 mm de espesor. En cada cajón, vienen 70 placas aproximadamente y, cuando se queda vacío, es ne-

cesario tirar de él hacia otra rampa de rodillos 2, conectada con la primera y situada perpendicularmente. Este cajón tiene una altura considerable de unos 450 mm.

2. El operario coge una placa y la coloca (de forma manual) sobre una mesa deslizante que hay debajo de un cabezal de grabado láser (5,2 s de promedio). El recorrido entre la toma de la placa del cajón a granel y su colocación en la mesa es, en promedio, de 650 mm. La distancia entre el operario y el cajón es de unos 580 mm y, entre el operario y la colocación de pieza en la mesa, de 400 mm. El cabezal de grabado láser es pequeño y solo puede grabar una pieza cada vez. No es posible instalar un cabezal que pueda grabar más de una pieza por operación y tiene una altura considerable de 600 mm. Incluida en esta operación, está una revisión visual (1,4 s ya incluidos en los 5,2 s) y, si hay algún defecto evidente en la cara

- de grabado de la pieza, deberá retirarla a un cajón en el lateral. Esto sucede cada 10 000 piezas y, por tanto, el tiempo empleado en retirar la pieza defectuosa se desprecia.
3. Una vez situada la pieza, cierra una compuerta que cubre el frontal del cabezal de grabado (para evitar radiación láser, 1,2 s) pulsa un botón (0,6 s) y espera 1,4 s de tiempo de grabado (total 3,4 s). Entre el cabezal y la mesa, hay 40 mm de distancia.
 4. Cuando el cabezal termina, emite una señal que activa un piloto y el operario abre la compuerta, extrae la placa y la sitúa ordenadamente sobre un cajón ubicado sobre una mesa de bolas a su izquierda (5,8 s). El recorrido entre la salida de la placa y su colocación en el cajón es, en promedio, de 710 mm. La distancia entre el operario y el cajón es de unos 600 mm. La mesa de bolas se alimenta de una rampa de rodillos 4, también a su izquierda, y tiene dos topes y guías para situar siempre en la misma posición al cajón vacío desde la rampa de rodillos.
 5. En el cajón de piezas grabadas, caben con cierto margen 6 capas de 8 placas cada capa. Cuando el cajón está lleno, se empuja hacia una rampa de rodillos (en hacer esto, tarda 3,4 s). La altura de este cajón es tan solo de 100 mm.
- La revisión de cada pieza y la colocación ordenada hacen que el manipulado deba hacerse en cualquier caso pieza a pieza (el operario no puede coger varias placas a la vez).
- La mesa puede sustituirse por una cinta transportadora (velocidad de 200 mm/s) y puede recurrirse a robots y a la visión artificial. La sujeción factible y óptima de la pieza (herramienta) sería con ventosa de succión. La colocación de la base del robot coincidiría con la posición del operario. Según la disposición mostrada:
- Describe dos propuestas de automatización, primero, solo con cinta transportadora y, después, añadiendo un robot con ventosa y visión artificial sin alterar las posiciones de las rampas de rodillos.

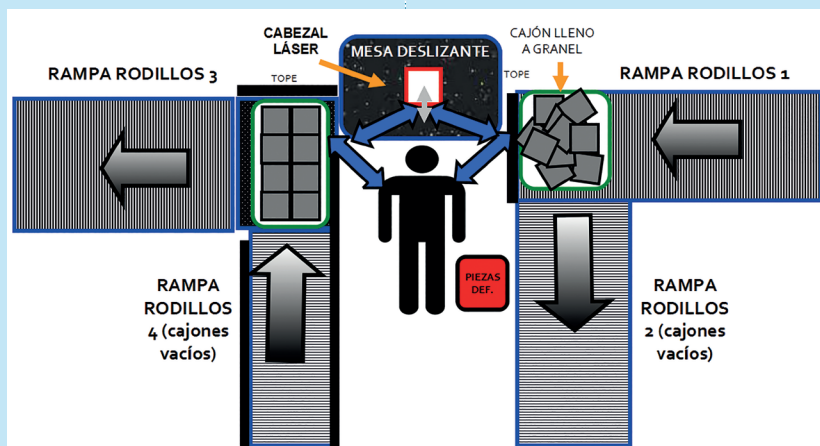


Figura 11.21
Proceso manual.

- Con una velocidad media sin carga útil del robot escogido de 2 m/s y de 1,6 m/s con las placas (peso reducido y sujeción inmediata con potente ventosa), calcula de forma aproximada el tiempo de ciclo de la opción sin automatizar y el tiempo de ciclo de la opción automatizada.
- Supongamos que se trabaja a tres turnos y fines de semana también, pero cada día los operarios humanos emplean 1 hora para descansos y cambios de turno (durante la cual se para la pro-

ducción) y que la línea automatizada es capaz de trabajar todo el tiempo con tiempos de mantenimiento despreciables. Sin considerar el ahorro por el operario y los gastos energéticos y de mantenimiento del robot, si el coste de la inversión con cinta, visión y robot ha sido de 142 800 € (cinta 2000 € + 800 € de instalación) y cada pieza extra fabricada frente a la opción actual proporciona un beneficio neto de 5 céntimos, averigua cuánto tardará en amortizarse cada propuesta.

ACTIVIDADES DE AUTOEVALUACIÓN

1. ¿Cómo es la tendencia actual de los robots industriales a nivel mundial?
 - a) Hay cierto decrecimiento del número de robots instalados y solo se venden para sustitución.
 - b) Hay un crecimiento mínimo del número de robots industriales instalados, se ha llegado a un grado estable de automatización robotizada.
 - c) Sigue creciendo la cifra de robots industriales instalados y la previsión futura es la de que se mantenga el crecimiento.
 - d) El crecimiento de robots instalados se da únicamente en los países de alta automatización (Japón, China, Alemania, etc.).
2. ¿Cuáles son los componentes del sistema robótico?
 - a) La parte mecánica, la parte de potencia, el software, el entorno inmediato y la controladora.
 - b) La parte mecánica, la herramienta, el entorno inmediato y la controladora.
 - c) La parte mecánica, el humano, el entorno inmediato y la controladora.
 - d) La parte mecánica, la herramienta, el software, el entorno inmediato y la controladora.
3. ¿Cuál de las siguientes opciones sobre la herramienta es verdadera?
 - a) Está ligada al robot desde la fábrica para su funcionalidad.
 - b) Tiene una importancia relativa para el proceso robotizado.

- c) Tiene una activación que debe ser dependiente del *motion planning*.
 - d) Ninguna de las opciones anteriores es verdadera.
4. ¿Cuál de las siguientes frases menciona un elemento no incluido en las características principales de un robot industrial?
- a) GDL, espacio de trabajo y tipo de actuadores.
 - b) GDL, tipo de actuadores, herramienta (especialización) y precisión de movimientos.
 - c) Capacidad de carga máxima, velocidad de movimientos y programabilidad.
 - d) GDL, tipo de actuadores, programabilidad y compatibilidad de conexión.
5. ¿Cuántos GDL tendría un robot con dos articulaciones esféricas y dos cilíndricas?
- a) Tendría 10 GDL.
 - b) Tendría 4 GDL.
 - c) Tendría 8 GDL.
 - d) Ninguna de las anteriores respuestas anteriores es correcta.
6. ¿Cuál de los siguientes enunciados es falso?
- a) Conocer el volumen de trabajo de un robot es fundamental para saber si podrá realizar una aplicación determinada.
 - b) Los robots requieren una calibración periódica para mantener su precisión.
 - c) La velocidad de movimientos y la capacidad de carga están relacionadas por la potencia de los actuadores.
 - d) Las velocidades máximas en vacío (sin carga útil) del robot no tienen importancia.
7. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre los robots es falsa?
- a) Con tres grados de libertad, un giro sobre el eje vertical z y dos lineales, una traslación vertical y otra radial, se trata de un robot cilíndrico.
 - b) Con movimientos lineales a lo largo de o según dos o tres ejes cartesianos (x, y y z), se trata de un robot delta.
 - c) Con tres grados de libertad, dos de giro uno en el eje z y otro en un eje horizontal, más una traslación radial, se trata de un robot esférico.
 - d) Si tiene un brazo articulado con dos o tres articulaciones giratorias en el eje z y una articulación de traslación vertical en el extremo, se trata de un robot *scara*.
8. ¿Cuál de las siguientes proposiciones incluye una medida de seguridad que no corresponde con la lista estudiada aplicable al trabajo con robots?
- a) Velocidad máxima limitada con personal dentro de jaula, detectores de sobreesfuerzo y paradas de emergencia.
 - b) Jaula de protección, tensiones de seguridad y accesos restringidos y controlados.
 - c) Señalización adecuada del funcionamiento del robot, identificar claramente el volumen o área de trabajo y no confiar el software como elemento principal de seguridad.
 - d) Frenos mecánicos adicionales, comprobación de señales de autodiagnóstico en la unidad de control previamente al primer funcionamiento y formación adecuada.

9. ¿Cuál de las siguientes no es una herramienta incorporada al software y sistema del robot para intentar ayudar en la programación de la tarea?
- a) Grabado de trayectorias deseadas y posiciones de interés con guiado manual del robot.
 - b) Exigir elevadas capacidades de programación para relacionar tareas o movimientos individuales y generar tareas complejas.
 - c) Que puedan definirse fácilmente cuáles son las desviaciones esperadas o normales de la trayectoria nominal para que el robot conozca su margen de maniobra al realizar los movimientos.
 - d) Proporcionar una interfaz o módulo de software CAD que sea una herramienta visual tridimensional capaz de integrar al robot en una simulación fiel al funcionamiento real
10. ¿Cuál de las siguientes opciones indica las etapas del proceso de visión artificial?
- a) Captación, muestreo e interpretación.
 - b) Captación, cuantificación e interpretación.
 - c) Captación, ecualización e interpretación.
 - d) Captación, preprocesamiento e interpretación.

SOLUCIONES:

1. a b c d

2. a b c d

3. a b c d

4. a b c d

5. a b c d

6. a b c d

7. a b c d

8. a b c d

9. a b c d

10. a b c d