
title: "ELECTRICIDAD PARA MECATRÓNICA INDUSTRIAL"
subtitle: "Manual Completo de Estudio - Desde Cero hasta Control Industrial"
author: "Mecatrónica Industrial"
keywords: "electricidad, mecatrónica, PLC, automatización, sensores, motores"
papersize: a4
toc: true
toc-depth: 2
number-sections: true

\newpage

ELECTRICIDAD PARA MECATRÓNICA INDUSTRIAL

Manual Completo de Estudio - Desde Cero hasta Control Industrial

Autor: Este libro está diseñado para estudiantes de mecatrónica industrial que comienzan desde cero. No se requieren conocimientos previos de electricidad. El contenido progresa desde conceptos fundamentales hasta aplicaciones industriales avanzadas, proporcionando una base sólida para el estudio y la práctica profesional.

Objetivo: Proporcionar un recurso de estudio completo y autodidacta que cubra todos los aspectos fundamentales de la electricidad aplicados a la mecatrónica

industrial, permitiendo al lector desarrollar competencias teóricas y prácticas para su formación profesional.

Cómo usar este libro: Se recomienda leer los capítulos en orden secuencial, ya que cada tema construye sobre los anteriores. Realiza los ejercicios y problemas al final de cada capítulo. Los proyectos prácticos integran conocimientos de múltiples capítulos y son esenciales para consolidar el aprendizaje.

\newpage

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LA ELECTRICIDAD

1.1 ¿Qué es la Electricidad?

La electricidad es una forma de energía fundamental en la naturaleza, resultado del movimiento de partículas subatómicas llamadas electrones. Es una de las fuerzas más versátiles y controlables que conocemos, formando la base de prácticamente toda la tecnología moderna. En el contexto de la mecatrónica industrial, la electricidad es el lenguaje común que conecta sensores, controladores, actuadores y máquinas, permitiendo la automatización de procesos productivos.

La palabra electricidad proviene del griego “elektron”, que significa ámbar. Los antiguos griegos observaron que al frotar ámbar con una piel, este adquiría la capacidad de atraer objetos pequeños como plumas o cabellos. Este fenómeno, conocido hoy como electrificación por fricción, fue el primer contacto documentado de la humanidad con la electricidad estática. Desde aquellos experimentos iniciales hasta nuestros días, la comprensión y el dominio de la electricidad han transformado radicalmente la civilización.

En la mecatrónica industrial, la electricidad cumple funciones esenciales:

- Transporta energía desde las fuentes de alimentación hasta los motores y actuadores que realizan trabajo mecánico.
- Transmite información a través de sensores que convierten variables físicas en señales eléctricas.
- Permite el procesamiento de datos en controladores lógicos programables (PLC) y microcontroladores.
- Activa dispositivos de potencia como contactores, relés y variadores de frecuencia.
- Proporciona el medio para el control preciso de movimiento en servosistemas y motores paso a paso.

1.2 Breve Historia de la Electricidad

El desarrollo del conocimiento eléctrico es una historia de descubrimiento gradual que abarca más de dos milenios. Comprender esta historia ayuda a contextualizar los conceptos que aprenderemos.

Siglo XVII y XVIII: William Gilbert, médico de la reina Isabel I, realizó estudios sistemáticos sobre magnetismo y electricidad, acuñando el término “eléctrico”. En 1752, Benjamin Franklin demostró la naturaleza eléctrica de los rayos mediante su famoso experimento con una cometa, introduciendo los conceptos de carga positiva y negativa.

Siglo XIX: Alessandro Volta inventó la primera batería química en 1800, la pila voltaica, que proporcionaba una fuente continua de corriente eléctrica. Hans Christian Ørsted descubrió en 1820 que una corriente eléctrica produce un campo magnético, sentando las bases del electromagnetismo. André-Marie Ampère desarrolló las matemáticas del electromagnetismo. Michael Faraday descubrió la inducción electromagnética en 1831, principio fundamental de generadores y transformadores. James Clerk Maxwell unificó la electricidad, el magnetismo y la óptica en sus famosas ecuaciones en 1864.

Siglo XX: Thomas Edison desarrolló la primera red de distribución eléctrica comercial en 1882. Nikola Tesla perfeccionó el sistema de corriente alterna que hoy usamos globalmente. La invención del transistor en 1947 por Bardeen, Brattain y Shockley dio inicio a la era de la electrónica moderna.

1.3 La Electricidad en la Industria Moderna

La industria moderna depende completamente de la electricidad. Sin ella, las fábricas, plantas de procesamiento, sistemas de transporte y prácticamente toda la infraestructura productiva se detendría. En una planta industrial típica, la electricidad alimenta:

Sistemas de potencia: Motores eléctricos que accionan bombas, ventiladores, compresores, cintas transportadoras y maquinaria diversa. Los motores industriales consumen aproximadamente el 70% de la electricidad utilizada en la industria.

Sistemas de control: PLC, computadoras industriales, controladores de procesos y sistemas de supervisión que gestionan y coordinan las operaciones. Estos sistemas

procesan señales de entrada de sensores y generan señales de salida hacia actuadores.

Sistemas de instrumentación: Sensores de temperatura, presión, caudal, nivel, posición, velocidad y fuerza que convierten variables físicas en señales eléctricas para su procesamiento y control.

Sistemas de iluminación y climatización: Iluminación industrial de alta eficiencia, sistemas HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) que mantienen condiciones óptimas para la producción y el personal.

Sistemas de seguridad: Alarmas, detectores de incendio, sistemas de parada de emergencia y protecciones que garantizan la seguridad de personas y equipos.

1.4 Conceptos Fundamentales Previos

Antes de adentrarnos en los detalles técnicos, es importante establecer algunos conceptos básicos que usaremos a lo largo de todo el libro:

Materia: Todo lo que tiene masa y ocupa un espacio está compuesto de átomos. La materia puede existir en tres estados principales: sólido, líquido y gaseoso. La conductividad eléctrica de un material depende de su estructura atómica.

Energía: La capacidad de realizar trabajo. La energía existe en muchas formas: térmica, lumínica, química, nuclear, mecánica y eléctrica. La energía puede convertirse de una forma a otra. Por ejemplo, un motor eléctrico convierte energía eléctrica en energía mecánica.

Circuito eléctrico: Un camino cerrado por el que circulan electrones. Un circuito debe tener al menos una fuente de energía (como una batería) y una carga (como una lámpara) conectadas por conductores.

Sistema: Un conjunto de componentes interrelacionados que trabajan juntos para lograr un objetivo. En mecatrónica, los sistemas integran componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y de software.

Señal: Una representación física de información. Las señales pueden ser analógicas (continuas en el tiempo y amplitud) o digitales (discretas, con valores binarios).

1.5 Electricidad vs Electrónica

Es importante distinguir entre electricidad y electrónica, aunque están íntimamente relacionadas:

Electricidad: Se ocupa principalmente de la generación, transmisión, distribución y uso de energía eléctrica para realizar trabajo. Trabaja con altas corrientes y voltajes. Ejemplos: motores, generadores, sistemas de iluminación, calefacción eléctrica. En la industria, la electricidad se asocia con la “potencia” o “fuerza”.

Electrónica: Se ocupa del control del flujo de electrones en dispositivos semiconductores para procesar información o controlar señales. Trabaja con bajas corrientes y voltajes en muchos casos. Ejemplos: computadoras, PLC, sensores, circuitos de control. En la industria, la electrónica se asocia con el “control” o “instrumentación”.

En mecatrónica industrial, ambas disciplinas se integran constantemente. Por ejemplo, un variador de frecuencia utiliza circuitos electrónicos (electrónica) para controlar la potencia entregada a un motor (electricidad). Por eso es fundamental dominar ambas áreas.

1.6 La Mecatrónica como Disciplina Integradora

La mecatrónica es una disciplina de ingeniería que integra mecánica, electrónica, informática y sistemas de control para el diseño y desarrollo de productos y procesos inteligentes. El término fue acuñado en Japón en la década de 1970 por la empresa Yaskawa Electric Corporation.

Un profesional en mecatrónica industrial debe comprender:

- Sistemas mecánicos: estructuras, mecanismos, transmisiones, elementos de máquinas.
- Sistemas eléctricos y electrónicos: circuitos, componentes, instrumentación.
- Sistemas de control: teoría de control, PLC, microcontroladores.
- Sistemas computacionales: programación, redes, procesamiento de datos.

La electricidad es el nexo que conecta todas estas áreas. Sin un sólido entendimiento de los principios eléctricos, no es posible diseñar, instalar, mantener ni solucionar problemas en sistemas mecatrónicos modernos.

1.7 Metodología de Estudio

Para aprovechar al máximo este libro, recomendamos la siguiente metodología:

1. Lectura comprensiva: Lee cada capítulo con atención, asegurándote de entender los conceptos antes de avanzar. No memorices sin comprender.
2. Ejercicios prácticos: Resuelve todos los ejercicios propuestos. La práctica es esencial para fijar conocimientos.
3. Experimentación: Siempre que sea posible, construye circuitos simples y realiza mediciones. La experiencia práctica es insustituible.
4. Visualización: Intenta imaginar lo que está sucediendo a nivel atómico o de flujo de electrones cuando trabajas con circuitos.
5. Relacionar conceptos: Conecta los nuevos aprendizajes con conocimientos previos y con aplicaciones del mundo real.
6. Repaso periódico: Revisa regularmente conceptos anteriores, especialmente las fórmulas y leyes fundamentales.

1.8 Panorama del Libro

Este libro está estructurado en doce partes que cubren desde los fundamentos más básicos de la electricidad hasta aplicaciones avanzadas en automatización industrial. La progresión es secuencial y cada capítulo sienta las bases para el siguiente.

Comenzaremos con los conceptos fundamentales de carga eléctrica, corriente, voltaje y resistencia. Luego exploraremos el electromagnetismo, base de motores y generadores. Estudiaremos los componentes electrónicos que permiten el control de señales y potencia. Abordaremos la instrumentación, los sensores y los sistemas de control industrial como PLC y SCADA. Finalmente, integraremos todos los conocimientos en proyectos prácticos y aplicaciones reales de la mecatrónica.

Cada capítulo incluye definiciones claras, ejemplos numéricos, diagramas conceptuales y ejercicios de autoevaluación. Los apéndices proporcionan tablas de referencia rápida y un glosario completo de términos técnicos.

Ejercicios del Capítulo 1

1. Investiga y escribe un párrafo sobre la contribución de Nikola Tesla a la electricidad moderna.
2. Explica con tus propias palabras la diferencia entre electricidad y electrónica.
3. Menciona tres aplicaciones de la electricidad en la industria que no se mencionen en este capítulo.
4. ¿Por qué crees que el conocimiento de electricidad es importante para un ingeniero en mecatrónica?
5. Investiga qué es la “Ley de Coulomb” y escríbela en una frase.
6. Describe brevemente el experimento de la cometa de Benjamin Franklin y su importancia.
7. ¿Qué diferencia hay entre energía y potencia? Investiga y anota tu respuesta.
8. ¿Qué industrias en tu país o región dependen más de la electricidad? ¿Por qué?

\newpage

CAPÍTULO 2: EL ÁTOMO Y LA CARGA ELÉCTRICA

2.1 Estructura del Átomo

Para comprender la electricidad, debemos comenzar por el nivel más fundamental: el átomo. El átomo es la unidad básica de la materia, la partícula más pequeña que conserva las propiedades químicas de un elemento. Todo en el universo físico está compuesto de átomos.

Un átomo está formado por tres tipos principales de partículas subatómicas:

Protones: Partículas con carga eléctrica positiva. Se encuentran en el núcleo del átomo, una región densa y compacta en el centro. La masa de un protón es aproximadamente 1.672×10^{-27} kilogramos. El número de protones en el núcleo determina el elemento químico. Por ejemplo, el hidrógeno tiene 1 protón, el carbono tiene 6, el cobre tiene 29.

Neutrones: Partículas sin carga eléctrica (neutras). También se encuentran en el núcleo junto con los protones. Tienen aproximadamente la misma masa que los protones. Los neutrones contribuyen a la estabilidad del núcleo y afectan la masa atómica, pero no la identidad química del elemento.

Electrones: Partículas con carga eléctrica negativa. Son mucho más ligeros que los protones y neutrones, con una masa de aproximadamente 9.109×10^{-31} kilogramos, cerca de 1836 veces menor que la de un protón. Los electrones orbitan alrededor del núcleo en regiones llamadas orbitales o capas electrónicas.

La estructura del átomo se asemeja a un pequeño sistema solar, donde el núcleo es el sol y los electrones son los planetas que orbitan a su alrededor. Sin embargo, esta analogía es limitada, ya que la mecánica cuántica describe el comportamiento de los electrones en términos de probabilidad y niveles de energía.

2.2 Carga Eléctrica

La carga eléctrica es una propiedad fundamental de la materia que determina cómo las partículas interactúan electromagnéticamente. Es una cantidad escalar que puede ser positiva o negativa.

Principios fundamentales de la carga eléctrica:

1. Ley de los signos: Las cargas del mismo signo se repelen. Las cargas de signo opuesto se atraen. Esta es la fuerza fundamental que impulsa todos los fenómenos eléctricos.
2. Cuantización: La carga eléctrica existe en múltiplos enteros de la carga elemental ($e = 1.602 \times 10^{-19}$ coulombs). No es posible tener una fracción de esta carga.
3. Conservación de la carga: La carga eléctrica total en un sistema aislado permanece constante. La carga no se crea ni se destruye, solo se transfiere de un objeto a otro.

La unidad de medida de la carga eléctrica en el Sistema Internacional (SI) es el **coulomb (C)**. Un coulomb equivale aproximadamente a 6.242×10^{18} electrones. Esta es una cantidad enorme de carga; un rayo típico transporta alrededor de 15 a 30 coulombs.

2.3 Conductores, Aislantes y Semiconductores

Los materiales se clasifican según su capacidad para conducir la corriente eléctrica, que depende directamente de su estructura atómica:

Conductores: Materiales que permiten el flujo fácil de electrones. Tienen electrones en sus capas externas que están débilmente unidos al núcleo y pueden moverse libremente. Estos electrones se llaman “electrones libres” o “electrones de conducción”. Los mejores conductores son los metales: plata (el mejor conductor), cobre, oro, aluminio. El cobre es el más utilizado en instalaciones eléctricas debido a su excelente relación conductividad/precio.

Aislantes: Materiales que resisten fuertemente el flujo de electrones. Sus electrones están firmemente unidos a los átomos y no pueden moverse libremente. Ejemplos: caucho, vidrio, plástico, cerámica, madera seca, aire. Los aislantes se utilizan para recubrir cables y separar conductores, evitando cortocircuitos y protegiendo a las personas.

Semiconductores: Materiales cuya conductividad se encuentra entre la de los conductores y la de los aislantes. Su conductividad puede controlarse mediante la adición de impurezas (dopaje) o la aplicación de campos eléctricos. Los semiconductores más importantes son el silicio y el germanio. Son la base de todos los dispositivos electrónicos modernos: diodos, transistores, circuitos integrados.

Superconductores: Materiales que, por debajo de cierta temperatura crítica, presentan resistencia eléctrica cero. La superconductividad permite el flujo de corriente sin pérdidas de energía. Aunque aún no es práctica para la mayoría de aplicaciones industriales, tiene usos especializados en resonancia magnética (MRI) y aceleradores de partículas.

2.4 Electrización de los Cuerpos

Un cuerpo puede adquirir carga eléctrica mediante tres procesos principales:

Electrización por frotamiento (fricción): Al frotar dos materiales diferentes, los electrones pueden transferirse de uno a otro. El material que pierde electrones queda cargado positivamente, y el que los gana queda cargado negativamente. El ejemplo clásico es frotar una barra de vidrio con seda: el vidrio pierde electrones y se carga positivamente.

Electrización por contacto: Cuando un cuerpo cargado toca a otro neutro, los electrones se redistribuyen entre ambos. El cuerpo neutro adquiere carga del mismo signo que el cuerpo cargado. Después del contacto, ambos cuerpos quedan con cargas del mismo signo.

Electrización por inducción: Un cuerpo cargado puede inducir una separación de cargas en un cuerpo cercano sin tocarlo. Si el cuerpo cargado es positivo, atrae electrones hacia el lado cercano del conductor neutro, dejando el lado lejano con déficit de electrones (carga positiva). Si luego se conecta a tierra el lado lejano, los electrones fluyen hacia tierra y el conductor queda cargado positivamente.

2.5 Campo Eléctrico

El campo eléctrico es una región del espacio donde una carga eléctrica experimenta una fuerza. Es un concepto fundamental que nos ayuda a entender cómo las cargas interactúan a distancia sin contacto físico.

La intensidad del campo eléctrico (E) en un punto se define como la fuerza (F) que experimentaría una carga de prueba positiva (q_0) colocada en ese punto:

$$E = F / q_0$$

La unidad del campo eléctrico en el SI es el newton por coulomb (N/C) o, más comúnmente, el voltio por metro (V/m).

Las líneas de campo eléctrico son líneas imaginarias que representan la dirección y magnitud del campo:

- Salen de las cargas positivas y entran en las cargas negativas.
- Son perpendiculares a la superficie de los conductores.
- Nunca se cruzan entre sí.
- Su densidad indica la intensidad del campo (más densas = campo más intenso).

2.6 Potencial Eléctrico y Diferencia de Potencial

El potencial eléctrico (V) en un punto es la energía potencial por unidad de carga necesaria para mover una carga de prueba desde el infinito hasta ese punto. Es una magnitud escalar que se mide en voltios (V).

La diferencia de potencial (ddp) o voltaje entre dos puntos A y B es el trabajo necesario para mover una unidad de carga desde A hasta B. Matemáticamente:

$$V_{AB} = V_A - V_B = W / q$$

donde W es el trabajo realizado y q es la carga. La diferencia de potencial se mide en voltios (V), en honor a Alessandro Volta.

El voltaje es la “presión eléctrica” que impulsa a los electrones a moverse a través de un circuito. Es análogo a la diferencia de presión en un sistema hidráulico: el agua fluye de alta presión a baja presión, de la misma manera que los electrones fluyen de un potencial más bajo a un potencial más alto (o, por convención, la corriente fluye de potencial más alto a más bajo).

2.7 Energía Potencial Eléctrica

La energía potencial eléctrica es la energía almacenada que posee una carga debido a su posición en un campo eléctrico. Cuando movemos una carga dentro de un campo eléctrico, realizamos trabajo que se almacena como energía potencial.

La relación entre energía potencial eléctrica (U), carga (q) y potencial (V) es:

$$U = q \times V$$

Esta energía puede convertirse en otras formas. Por ejemplo, cuando un rayo cae, la energía potencial eléctrica acumulada en las nubes se convierte en luz, calor y sonido. En un circuito, la energía potencial de las cargas se convierte en calor en una resistencia, en movimiento en un motor, o en luz en un LED.

2.8 Aplicaciones en Mecatrónica

El entendimiento de la carga eléctrica y el potencial es fundamental para:

Sensores capacitivos: Detectan la presencia de objetos midiendo cambios en la capacitancia, que depende de la distribución de carga.

Sensores piezoeléctricos: Generan una diferencia de potencial cuando se deforman mecánicamente, usados para medir presión, fuerza y aceleración.

Electrostática en procesos industriales: La pintura electrostática utiliza cargas para atraer partículas de pintura a superficies metálicas. Los precipitadores electrostáticos eliminan partículas de gases de escape industriales.

Protección electrostática (ESD): En la manipulación de componentes electrónicos sensibles, es crucial controlar las cargas electrostáticas que pueden dañar circuitos integrados.

Ejercicios del Capítulo 2

1. ¿Cuáles son las tres partículas subatómicas principales y sus cargas?
2. Explica la Ley de Coulomb y escribe su fórmula.
3. ¿Qué diferencia hay entre un conductor y un aislante? Da tres ejemplos de cada uno.
4. Calcula cuántos electrones hay en una carga de $-3 \mu\text{C}$.
5. Describe el proceso de electrización por inducción.
6. ¿Qué es el campo eléctrico y cómo se representa?
7. Si se requieren 12 J de trabajo para mover una carga de 3 C entre dos puntos, ¿cuál es la diferencia de potencial entre ellos?
8. Investiga qué materiales se usan como semiconductores y por qué el silicio es el más común.

\newpage

CAPÍTULO 3: TENSION, CORRIENTE Y RESISTENCIA

3.1 Tensión Eléctrica (Voltaje)

La tensión eléctrica, también llamada voltaje o diferencia de potencial, es la magnitud que impulsa el movimiento de los electrones en un circuito eléctrico. Se define como la energía por unidad de carga necesaria para mover los electrones entre dos puntos. Su unidad de medida es el voltio (V), nombrada en honor a Alessandro Volta.

El voltaje es análogo a la presión en un sistema hidráulico. Así como el agua fluye desde un punto de alta presión a uno de baja presión, los electrones fluyen desde un punto de menor potencial eléctrico a uno de mayor potencial. Por convención histórica, se dice que la corriente eléctrica fluye desde el potencial más alto (+) al más bajo (-), aunque los electrones en realidad se mueven en dirección opuesta.

Tipos de tensión según su naturaleza:

Tensión continua (DC - Direct Current): Es aquella que mantiene una polaridad constante en el tiempo. La proporcionan baterías, pilas, paneles solares y fuentes de alimentación reguladas. En una gráfica de voltaje versus tiempo, la tensión continua ideal aparece como una línea recta horizontal. Ejemplos: batería de automóvil (12 V), pila AA (1.5 V), bus USB (5 V).

Tensión alterna (AC - Alternating Current): Es aquella que cambia periódicamente de polaridad y magnitud. La generan los alternadores en centrales eléctricas y es la forma en que se distribuye la energía eléctrica a hogares e industrias. En una gráfica, la tensión alterna típica tiene forma de onda senoidal. En Europa y gran parte del mundo, la tensión doméstica es de 230 V a 50 Hz. En América del Norte, es de 120 V a 60 Hz.

Tensión nominal y tensión de trabajo: La tensión nominal es el valor para el cual un dispositivo fue diseñado. La tensión de trabajo real puede variar dentro de ciertos límites sin dañar el equipo. Por ejemplo, un motor etiquetado a 230 V puede funcionar correctamente entre 207 V y 253 V (variación de $\pm 10\%$).

3.2 Corriente Eléctrica

La corriente eléctrica es el flujo ordenado de electrones a través de un conductor. Se mide en amperios (A), unidad nombrada en honor a André-Marie Ampère. Un amperio equivale al flujo de un coulomb de carga por segundo:

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C} / \text{s}$$

La corriente eléctrica puede clasificarse según su naturaleza:

Corriente continua (DC): Los electrones fluyen siempre en la misma dirección, del terminal negativo al positivo de la fuente. Es característica de baterías, pilas y fuentes de alimentación de dispositivos electrónicos. En un gráfico de corriente versus tiempo, aparece como una línea recta si es constante.

Corriente alterna (AC): Los electrones cambian periódicamente su dirección de flujo. En cada ciclo, la corriente aumenta desde cero hasta un máximo en una dirección, disminuye a cero, y luego aumenta al máximo en la dirección opuesta. La frecuencia (medida en hercios, Hz) indica cuántos ciclos completos ocurren por segundo.

Relación entre corriente y carga:

$$I = Q / t$$

donde I es la corriente en amperios, Q es la carga en coulombs, y t es el tiempo en segundos.

Efectos de la corriente eléctrica:

Efecto térmico: Al circular por un conductor, los electrones chocan con los átomos del material, generando calor. Este efecto se aprovecha en estufas eléctricas, soldadores y fusibles, pero también representa pérdidas en cables y componentes.

Efecto magnético: Una corriente eléctrica genera un campo magnético a su alrededor. Este es el principio de funcionamiento de electroimanes, motores y relés.

Efecto químico: La corriente puede descomponer sustancias químicas. Se utiliza en electrodeposición (cromado, niquelado) y en la carga de baterías.

Efecto luminoso: En ciertos materiales, la corriente produce luz. Ejemplos: lámparas incandescentes (calor que genera luz), LED (electroluminiscencia).

Efecto fisiológico: La corriente que atraviesa el cuerpo humano puede causar desde una leve sensación hasta la muerte, dependiendo de su intensidad, trayectoria y duración.

3.3 Resistencia Eléctrica

La resistencia eléctrica es la oposición al flujo de electrones en un material. Se mide en ohmios (Ω), en honor a Georg Simon Ohm. Un ohmio es la resistencia que permite el paso de un amperio cuando se aplica un voltio:

$$1 \Omega = 1 \text{ V} / \text{A}$$

Factores que determinan la resistencia de un conductor:

Longitud (L): La resistencia es directamente proporcional a la longitud del conductor. Un cable más largo ofrece mayor resistencia porque los electrones tienen que recorrer más distancia y sufrirán más colisiones.

Área de sección transversal (A): La resistencia es inversamente proporcional al área. Un cable más grueso ofrece menor resistencia porque hay más espacio para que fluyan los electrones. Esto es como una tubería de agua: una tubería más ancha permite mayor flujo.

Resistividad (ρ): Es una propiedad intrínseca del material que indica cuánto se opone al flujo de electrones. Los metales tienen baja resistividad (buenos conductores), mientras que los aislantes tienen alta resistividad. La resistividad también varía con la temperatura.

Temperatura: En la mayoría de los conductores metálicos, la resistencia aumenta con la temperatura. Esto se debe a que el calor hace que los átomos vibren más, dificultando el flujo de electrones. En los semiconductores, la resistencia disminuye al aumentar la temperatura.

La fórmula que relaciona estos factores es:

$$R = \rho \times L / A$$

donde R es la resistencia en ohmios, ρ es la resistividad en ohmios-metro, L es la longitud en metros, y A es el área en metros cuadrados.

3.4 Conductancia

La conductancia (G) es el recíproco de la resistencia y mide la facilidad con que fluye la corriente. Su unidad es el siemens (S):

$$G = 1 / R$$

La conductancia es útil cuando se trabaja con circuitos en paralelo, donde las conductancias se suman.

3.5 El Código de Colores de Resistencias

Las resistencias fijas se identifican mediante bandas de colores que indican su valor. El código estándar utiliza 4, 5 o 6 bandas:

Para resistencias de 4 bandas:

- 1ª banda: primera cifra significativa
- 2ª banda: segunda cifra significativa
- 3ª banda: multiplicador (potencia de 10)
- 4ª banda: tolerancia (oro = $\pm 5\%$, plata = $\pm 10\%$, sin banda = $\pm 20\%$)

Colores y valores: Negro=0, Marrón=1, Rojo=2, Naranja=3, Amarillo=4, Verde=5, Azul=6, Violeta=7, Gris=8, Blanco=9.

El multiplicador sigue el mismo código: Marrón= $\times 10$, Rojo= $\times 100$, Naranja= $\times 1000$, etc.

Por ejemplo, una resistencia con bandas: Rojo, Violeta, Naranja, Oro = $27 \times 1000 = 27000 \Omega = 27 \text{ k}\Omega$ con $\pm 5\%$ de tolerancia.

3.6 Potencia Disipada en Resistencias

Cuando la corriente circula por una resistencia, se disipa energía en forma de calor. La potencia disipada se calcula como:

$$P = I^2 \times R = V^2 / R = V \times I$$

Es importante seleccionar resistencias con la potencia nominal adecuada para evitar sobrecalentamiento. Las potencias típicas son 1/8 W, 1/4 W, 1/2 W, 1 W, 2 W, 5 W, 10 W, etc. Usar una resistencia con potencia insuficiente causará que se queme.

3.7 Analogía Hidráulica

Para facilitar la comprensión de estos conceptos, utilizamos la analogía hidráulica:

- Voltaje (V) es como la presión del agua (diferencia de altura)
- Corriente (I) es como el caudal de agua
- Resistencia (R) es como la estrechez de una tubería o un obstáculo
- Potencia (P) es como la energía hidráulica disponible

En esta analogía, una batería sería una bomba que eleva el agua, los cables serían tuberías, una resistencia sería un estrechamiento, y un motor sería una turbina que aprovecha el flujo.

3.8 Aplicaciones en Mecatrónica

La comprensión de tensión, corriente y resistencia es esencial para:

- Dimensionar correctamente los cables en instalaciones industriales
- Seleccionar fuentes de alimentación para PLC y sensores
- Diseñar circuitos de protección (fusibles, disyuntores)
- Diagnosticar fallas en sistemas eléctricos
- Interpretar especificaciones técnicas de componentes
- Realizar mediciones con multímetro para verificar circuitos

Ejercicios del Capítulo 3

1. Explica con tus palabras la diferencia entre tensión y corriente.
2. ¿Qué resistencia tiene un cable de cobre de 100 metros con sección de 2.5 mm²?
(ρ del cobre = $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$)
3. Calcula la corriente que circula por una resistencia de 470 Ω conectada a una batería de 9 V.
4. Determina el valor de una resistencia con bandas: Marrón, Negro, Rojo, Oro.
5. ¿Cuánta potencia disipa una resistencia de 100 Ω por la que circulan 500 mA?
6. ¿Por qué los cables de transmisión de energía se fabrican con grandes diámetros?
7. Investiga qué es un potenciómetro y para qué se utiliza en la industria.
8. Si la temperatura de un conductor de cobre aumenta, ¿qué sucede con su resistencia? ¿Por qué?

\newpage

CAPÍTULO 4: LEY DE OHM

4.1 Enunciado de la Ley de Ohm

La Ley de Ohm es la relación fundamental entre tensión, corriente y resistencia en un circuito eléctrico. Fue formulada por el físico y matemático alemán Georg Simon Ohm en 1827, quien descubrió experimentalmente que la corriente que circula por un conductor es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del conductor.

El enunciado matemático de la Ley de Ohm es:

$$V = I \times R$$

Donde:

- V es la tensión o diferencia de potencial en voltios (V)
- I es la corriente eléctrica en amperios (A)
- R es la resistencia eléctrica en ohmios (Ω)

A partir de esta fórmula principal, podemos despejar cualquiera de las tres variables:

- Para calcular corriente: $I = V / R$
- Para calcular resistencia: $R = V / I$
- Para calcular tensión: $V = I \times R$

4.2 Interpretación de la Ley de Ohm

La Ley de Ohm nos dice que, para una resistencia fija, si aumentamos el voltaje, la corriente aumentará proporcionalmente. De manera inversa, si mantenemos el voltaje constante y aumentamos la resistencia, la corriente disminuirá.

Es importante entender que no todos los materiales y componentes cumplen la Ley de Ohm. Los materiales que la cumplen se llaman "óhmicos" y presentan una relación lineal entre voltaje y corriente. Ejemplos: los metales a temperatura constante, las resistencias de carbón y de película metálica.

Los materiales que no la cumplen se llaman “no óhmicos”. En estos, la resistencia varía con el voltaje o la corriente. Ejemplos: diodos, transistores, termistores (su resistencia cambia con la temperatura), varistores (su resistencia cambia con el voltaje).

4.3 Aplicaciones Prácticas de la Ley de Ohm

La Ley de Ohm se aplica constantemente en el diseño y análisis de circuitos:

Ejemplo 1: Cálculo de corriente

Tenemos una resistencia de 220Ω conectada a una fuente de 12 V . ¿Qué corriente circula?

$$I = V / R = 12 \text{ V} / 220 \Omega = 0.0545 \text{ A} = 54.5 \text{ mA}$$

Ejemplo 2: Cálculo de resistencia necesaria

Necesitamos limitar la corriente a 20 mA en un LED conectado a 5 V . ¿Qué resistencia debemos usar?

$$R = V / I = 5 \text{ V} / 0.020 \text{ A} = 250 \Omega \text{ (valor comercial: } 270 \Omega \text{)}$$

Ejemplo 3: Cálculo de caída de tensión

Por un cable de 0.5Ω circulan 10 A . ¿Qué tensión cae en el cable?

$$V = I \times R = 10 \text{ A} \times 0.5 \Omega = 5 \text{ V}$$

Esta caída de tensión es importante en instalaciones eléctricas, donde cables largos o delgados pueden causar caídas de tensión excesivas que afectan el funcionamiento de los equipos.

4.4 Relación V-I en Componentes Óhmicos

En un componente óhmico, la gráfica de voltaje versus corriente es una línea recta que pasa por el origen. La pendiente de esta línea es la resistencia. Cuanto mayor es la resistencia, más inclinada es la línea (menor corriente para el mismo voltaje).

La relación lineal significa que si duplicamos el voltaje, la corriente también se duplica. Por ejemplo, para una resistencia de 100Ω :

- A 5 V : $I = 5/100 = 0.05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$

- A 10 V : $I = 10/100 = 0.10 \text{ A} = 100 \text{ mA}$

- A 15 V : $I = 15/100 = 0.15 \text{ A} = 150 \text{ mA}$

- A 20 V : $I = 20/100 = 0.20 \text{ A} = 200 \text{ mA}$

4.5 Limitaciones de la Ley de Ohm

Es crucial entender el contexto de aplicación de la Ley de Ohm:

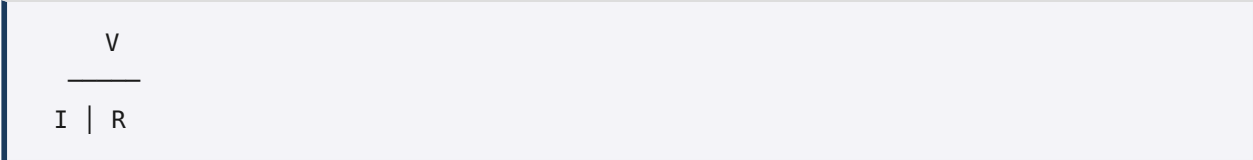
Temperatura: La Ley de Ohm asume temperatura constante. En la práctica, al circular corriente, la resistencia se calienta y su valor puede cambiar. En conductores metálicos, la resistencia aumenta con la temperatura. Para la mayoría de los cálculos prácticos, asumimos condiciones de temperatura ambiente y corrientes moderadas.

Frecuencia: A altas frecuencias, los efectos capacitivos e inductivos de los componentes alteran la relación simple $V = IR$. La Ley de Ohm en su forma básica se aplica a circuitos DC y AC de baja frecuencia.

Componentes no lineales: Diodos, transistores, tiristores y otros componentes semiconductores no siguen la Ley de Ohm. Su análisis requiere modelos más complejos.

4.6 El Triángulo de la Ley de Ohm

Una forma práctica de recordar las tres fórmulas es mediante el triángulo de la Ley de Ohm:


$$\begin{array}{c} V \\ \hline I \mid R \end{array}$$

- Cubriendo V: queda $I \times R$
- Cubriendo I: queda V / R
- Cubriendo R: queda V / I

4.7 Ley de Ohm en Circuitos Industriales

En la industria, la Ley de Ohm se aplica en múltiples situaciones cotidianas:

Verificación de bobinas de contactores: Midiendo la resistencia de una bobina y conociendo el voltaje de operación, podemos calcular la corriente que consumirá.

Cálculo de caídas de tensión en cables: Para determinar si un cable es adecuado para una determinada distancia y carga.

Dimensionamiento de resistencias de frenado: En variadores de frecuencia, se usan resistencias de frenado para disipar la energía regenerativa. La Ley de Ohm determina la corriente y potencia necesarias.

Selección de fusibles: Conociendo la corriente nominal de un circuito, seleccionamos fusibles que protejan adecuadamente los conductores.

Diagnóstico de fallas: Una resistencia medida que no corresponde al valor esperado indica un problema (cortocircuito si es muy baja, circuito abierto si es infinita).

4.8 Ley de Ohm y Potencia

Combinando la Ley de Ohm con la fórmula de potencia, obtenemos expresiones útiles:

$$P = V \times I$$

$$\text{Sustituyendo } V = I \times R: P = I^2 \times R$$

$$\text{Sustituyendo } I = V / R: P = V^2 / R$$

Estas fórmulas son especialmente útiles:

- $P = I^2 \times R$: Para calcular pérdidas por calor en cables y resistencias

- $P = V^2 / R$: Para calcular la potencia que disipará una resistencia conectada a una tensión conocida

Ejemplo: Una resistencia de 100Ω se conecta a 12 V . ¿Qué potencia debe soportar?

$$P = V^2 / R = (12 \text{ V})^2 / 100 \Omega = 144 / 100 = 1.44 \text{ W}$$

Debemos usar una resistencia de al menos 2 W para tener margen de seguridad.

Ejercicios del Capítulo 4

1. Una plancha eléctrica tiene una resistencia de 24Ω y se conecta a 220 V . ¿Qué corriente circula por ella?
2. Calcula la resistencia de una lámpara que consume 0.5 A a 230 V .
3. ¿Qué voltaje se necesita para que circulen 2 A por una resistencia de 33Ω ?
4. Por un cable de 1.5 mm^2 de sección y 50 m de largo circulan 15 A . ¿Qué caída de tensión se produce? (ρ cobre = $0.0172 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)

5. Una resistencia de $470\ \Omega$ disipa $0.5\ \text{W}$. ¿Cuál es la corriente máxima que puede circular?
6. Explica por qué un diodo no cumple la Ley de Ohm.
7. ¿Qué potencia disipa una resistencia de $10\ \text{k}\Omega$ conectada a $24\ \text{V}$?
8. Si duplicamos el voltaje en una resistencia óhmica, ¿qué sucede con la corriente? ¿Y con la potencia?

\newpage

CAPÍTULO 5: POTENCIA Y ENERGÍA ELÉCTRICA

5.1 Concepto de Potencia Eléctrica

La potencia eléctrica es la cantidad de energía eléctrica transformada o transferida por unidad de tiempo. En términos simples, indica qué tan rápido un dispositivo consume o genera energía eléctrica. Su unidad en el Sistema Internacional es el vatio (W), nombrado en honor a James Watt.

La fórmula fundamental de la potencia eléctrica es:

$$P = V \times I$$

Donde:

- P = Potencia en vatios (W)
- V = Tensión en voltios (V)
- I = Corriente en amperios (A)

Esta fórmula nos dice que la potencia es el producto del voltaje y la corriente. Por ejemplo, un dispositivo que funciona a 12 V y consume 2 A tiene una potencia de 24 W.

5.2 Potencia en Componentes Específicos

Potencia en resistencias: Como vimos al combinar con la Ley de Ohm:

$$P = I^2 \times R \text{ (útil cuando conocemos corriente y resistencia)}$$

$$P = V^2 / R \text{ (útil cuando conocemos voltaje y resistencia)}$$

Potencia en motores: La potencia mecánica de salida de un motor es siempre menor que la potencia eléctrica de entrada debido a pérdidas. La eficiencia (η) de un motor es:

$$\eta = P_{\text{mecánica}} / P_{\text{eléctrica}}$$

Un motor típico tiene eficiencia entre 70% y 95%. Las pérdidas se deben a:

- Pérdidas por efecto Joule en los devanados (calor)

- Pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault en el núcleo
- Pérdidas mecánicas por fricción y ventilación

Potencia en transformadores: La potencia nominal de un transformador se expresa en VA (voltamperios) o kVA. Para una carga resistiva pura, la potencia activa en VA es igual a la potencia en W. Para cargas inductivas (motores), se requiere considerar el factor de potencia.

5.3 Energía Eléctrica

La energía eléctrica es la capacidad de realizar trabajo durante un tiempo determinado. Mientras la potencia es una tasa instantánea, la energía es la integral de la potencia en el tiempo:

$$E = P \times t$$

Donde:

- E = Energía en julios (J) o vatios-hora (Wh)
- P = Potencia en vatios (W)
- t = Tiempo en segundos (para julios) u horas (para Wh)

La unidad práctica más común es el kilovatio-hora (kWh), que utilizan las compañías eléctricas para facturar el consumo. 1 kWh equivale a 3.6 millones de julios.

Ejemplo: Un motor de 2 HP (aproximadamente 1492 W) funciona durante 8 horas. ¿Qué energía consume?

$$E = P \times t = 1492 \text{ W} \times 8 \text{ h} = 11936 \text{ Wh} = 11.936 \text{ kWh}$$

Si el costo del kWh es de \$0.12, el costo de operación es: $11.936 \times \$0.12 = \1.43

5.4 Múltiplos y Submúltiplos

En la práctica industrial, se manejan potencias muy variadas:

- mW (milivatio): 10^{-3} W, señales electrónicas de baja potencia
- W (vatio): unidades básicas, electrodomésticos pequeños
- kW (kilovatio): 10^3 W, motores industriales medianos
- MW (megavatio): 10^6 W, plantas industriales grandes
- GW (gigavatio): 10^9 W, centrales eléctricas

- HP (caballo de fuerza): 746 W (o 736 W en HP métrico), común en motores

5.5 Factor de Potencia

En circuitos de corriente alterna, no toda la potencia aparente ($S = V \times I$) se convierte en trabajo útil. El factor de potencia (FP) es la relación entre la potencia activa (P, que realiza trabajo) y la potencia aparente (S):

$$FP = P / S = \cos \varphi$$

Donde φ es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente.

- FP = 1 (carga resistiva pura): corriente y voltaje en fase
- FP = 0 (carga inductiva o capacitiva pura): corriente desfasada 90°
- FP típico en motores: 0.75 a 0.90

Un bajo factor de potencia significa que se necesita más corriente para entregar la misma potencia activa, lo que causa mayores pérdidas en cables y requiere transformadores y equipos de mayor capacidad. Las compañías eléctricas penalizan el bajo factor de potencia.

Corrección del factor de potencia: Se realiza conectando bancos de capacitores en paralelo con las cargas inductivas (motores). Los capacitores suministran la potencia reactiva capacitiva que compensa la potencia reactiva inductiva.

5.6 Potencia en Sistemas Trifásicos

La mayoría de la maquinaria industrial utiliza sistemas trifásicos. La potencia en un sistema trifásico balanceado es:

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times FP$$

Donde:

- V_L = Tensión de línea (entre fases)
- I_L = Corriente de línea
- FP = Factor de potencia

Para un motor trifásico de 400 V que consume 50 A con FP = 0.85:

$$P = 1.732 \times 400 \times 50 \times 0.85 = 29,444 \text{ W} \approx 29.4 \text{ kW}$$

5.7 Eficiencia Energética

La eficiencia energética es la relación entre la energía útil obtenida y la energía total consumida. En la industria, mejorar la eficiencia energética reduce costos operativos y el impacto ambiental.

Estrategias de eficiencia:

1. Motores de alta eficiencia (IE3, IE4): Reducen pérdidas hasta un 30% comparados con motores estándar.
2. Variadores de frecuencia: Ajustan la velocidad del motor a la demanda real, reduciendo consumo en bombas, ventiladores y compresores.
3. Corrección del factor de potencia: Reduce pérdidas en cables y transformadores.
4. Iluminación LED: Consume hasta 80% menos que iluminación incandescente.
5. Sistemas de gestión energética: Monitorean y optimizan el consumo en tiempo real.

5.8 Pérdidas por Efecto Joule

El efecto Joule describe la disipación de energía en forma de calor cuando la corriente circula por un conductor. Las pérdidas son:

$$P_{\text{pérdida}} = I^2 \times R$$

Estas pérdidas son inevitables pero pueden minimizarse:

- Usando conductores de mayor sección (menor R)
- Usando materiales de menor resistividad (cobre en lugar de aluminio)
- Reduciendo la corriente (aumentando el voltaje): por eso la transmisión de energía se hace a altos voltajes

Ejemplo de transmisión de energía:

Para transmitir 1 MW a 10 km usando cables de 0.1Ω :

- A 1000 V: $I = 1000 \text{ A}$, Pérdida = $(1000)^2 \times 0.1 = 100,000 \text{ W} = 10\%$ de pérdida
- A 100,000 V: $I = 10 \text{ A}$, Pérdida = $(10)^2 \times 0.1 = 10 \text{ W} = 0.001\%$ de pérdida

Ejercicios del Capítulo 5

1. Un calentador eléctrico de 1500 W se conecta a 230 V. ¿Qué corriente consume?
2. ¿Cuánta energía consume una lámpara de 100 W encendida 24 horas? Expresa el resultado en kWh y en julios.

3. Un motor trifásico de 15 kW con $FP = 0.82$ se conecta a 400 V. Calcula la corriente de línea.
4. Explica qué es el factor de potencia y por qué es importante corregirlo.
5. ¿Qué significa que un motor tenga eficiencia del 90%?
6. Calcula las pérdidas por efecto Joule en un cable de 0.5Ω que transporta 30 A.
7. ¿Cuánto cuesta operar una máquina de 5 kW durante 160 horas al mes si el kWh cuesta \$0.15?
8. Investiga las clases de eficiencia de motores eléctricos (IE1, IE2, IE3, IE4) y sus diferencias.

\newpage

CAPÍTULO 6: CIRCUITOS SERIE, PARALELO Y MIXTO

6.1 Circuito Serie

Un circuito serie es aquel en el que los componentes están conectados uno después del otro, formando un único camino para el flujo de corriente. Esto significa que la misma corriente circula a través de todos los componentes.

Características del circuito serie:

1. Corriente: La corriente es la misma en todos los componentes del circuito serie.

$$I_{\text{total}} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

2. Voltaje: El voltaje total se divide entre los componentes. La suma de las caídas de voltaje individuales es igual al voltaje total aplicado.

$$V_{\text{total}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

3. Resistencia: La resistencia total es la suma de todas las resistencias individuales.

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

4. Potencia: La potencia total es la suma de las potencias individuales.

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

Ejemplo de cálculo de circuito serie:

Tres resistencias de 100 Ω , 220 Ω y 330 Ω se conectan en serie a una batería de 24 V.

$$R_{\text{total}} = 100 + 220 + 330 = 650 \Omega$$

$$I_{\text{total}} = V / R_{\text{total}} = 24 / 650 = 0.0369 \text{ A} = 36.9 \text{ mA}$$

Caídas de voltaje:

$$V_1 = I \times R_1 = 0.0369 \times 100 = 3.69 \text{ V}$$

$$V_2 = I \times R_2 = 0.0369 \times 220 = 8.12 \text{ V}$$

$$V_3 = I \times R_3 = 0.0369 \times 330 = 12.18 \text{ V}$$

$$\text{Verificación: } 3.69 + 8.12 + 12.18 = 23.99 \text{ V} \approx 24 \text{ V} \checkmark$$

Aplicaciones del circuito serie:

- Luces decorativas navideñas (aunque si una se quema, todas se apagan)
- Divisores de voltaje
- Protección con fusibles (el fusible está en serie con la carga)
- Resistencia limitadora para LEDs

6.2 Circuito Paralelo

Un circuito paralelo es aquel en el que los componentes están conectados entre los mismos dos puntos, formando múltiples caminos para la corriente. La corriente total se divide entre las ramas.

Características del circuito paralelo:

1. Voltaje: El voltaje es el mismo en todos los componentes conectados en paralelo.

$$V_{\text{total}} = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

2. Corriente: La corriente total es la suma de las corrientes en cada rama.

$$I_{\text{total}} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

3. Resistencia: La resistencia total se calcula con la fórmula:

$$1/R_{\text{total}} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n$$

Para dos resistencias: $R_{\text{total}} = (R_1 \times R_2) / (R_1 + R_2)$

Nota importante: La resistencia total en un circuito paralelo siempre es menor que la resistencia más pequeña del conjunto.

1. Potencia: La potencia total es la suma de las potencias individuales.

Ejemplo de cálculo de circuito paralelo:

Tres resistencias de 100 Ω , 220 Ω y 330 Ω se conectan en paralelo a una batería de 24 V.

$$1/R_{\text{total}} = 1/100 + 1/220 + 1/330 = 0.01 + 0.00455 + 0.00303 = 0.01758$$

$$R_{\text{total}} = 1 / 0.01758 = 56.88 \Omega$$

Corrientes en cada rama:

$$I_1 = V / R_1 = 24 / 100 = 0.24 \text{ A} = 240 \text{ mA}$$

$$I_2 = V / R_2 = 24 / 220 = 0.109 \text{ A} = 109 \text{ mA}$$

$$I_3 = V / R_3 = 24 / 330 = 0.0727 \text{ A} = 72.7 \text{ mA}$$

$$I_{\text{total}} = 240 + 109 + 72.7 = 421.7 \text{ mA}$$

$$\text{Verificación con } R_{\text{total}}: I = 24 / 56.88 = 0.422 \text{ A} \checkmark$$

Aplicaciones del circuito paralelo:

- Instalaciones eléctricas domésticas e industriales (todos los enchufes están en paralelo)
- Conexión de baterías para mayor corriente
- Sistemas de iluminación (cada lámpara recibe el voltaje completo)

6.3 Circuito Mixto (Serie-Paralelo)

Un circuito mixto combina conexiones en serie y en paralelo dentro del mismo circuito. Para analizarlo, se deben simplificar grupos de resistencias paso a paso.

Método de resolución:

1. Identificar grupos de resistencias en serie o paralelo
2. Simplificar cada grupo a una resistencia equivalente
3. Repetir hasta obtener una sola resistencia equivalente
4. Calcular la corriente total
5. Reconstruir el circuito paso atrás para calcular voltajes y corrientes individuales

Ejemplo de circuito mixto:

$R_1 = 100 \Omega$ en serie con el paralelo de $R_2 = 200 \Omega$ y $R_3 = 300 \Omega$, conectado a 24 V.

Paso 1: Simplificar el paralelo $R_2 \parallel R_3$

$$R_{\text{paralelo}} = (200 \times 300) / (200 + 300) = 60000 / 500 = 120 \Omega$$

Paso 2: Calcular resistencia total ($R_1 + R_{\text{paralelo}}$)

$$R_{\text{total}} = 100 + 120 = 220 \Omega$$

Paso 3: Calcular corriente total

$$I_{\text{total}} = V / R_{\text{total}} = 24 / 220 = 0.109 \text{ A} = 109 \text{ mA}$$

Paso 4: Calcular caída en R_1

$$V_1 = I_{\text{total}} \times R_1 = 0.109 \times 100 = 10.9 \text{ V}$$

Paso 5: Calcular voltaje en el paralelo

$$V_{\text{paralelo}} = V_{\text{total}} - V_1 = 24 - 10.9 = 13.1 \text{ V}$$

Paso 6: Calcular corrientes en las ramas paralelas

$$I_2 = V_{\text{paralelo}} / R_2 = 13.1 / 200 = 0.0655 \text{ A} = 65.5 \text{ mA}$$

$$I_3 = V_{\text{paralelo}} / R_3 = 13.1 / 300 = 0.0437 \text{ A} = 43.7 \text{ mA}$$

Verificación: $I_2 + I_3 = 65.5 + 43.7 = 109.2 \text{ mA} \approx I_{\text{total}} \checkmark$

6.4 Divisores de Voltaje

Un divisor de voltaje es un circuito serie que produce un voltaje de salida que es una fracción del voltaje de entrada. Es uno de los circuitos más utilizados en electrónica.

Para dos resistencias R_1 y R_2 en serie con voltaje de entrada V_{in} :

$$V_{out} = V_{in} \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

Aplicaciones de divisores de voltaje:

- Reducir voltajes para medición
- Establecer voltajes de referencia
- Polarización de transistores
- Acondicionamiento de señales de sensores

Es importante que la corriente extraída de la salida (carga conectada) sea mucho menor que la corriente que circula por el divisor, para no afectar el voltaje de salida.

6.5 Divisores de Corriente

En un circuito paralelo, la corriente se divide entre las ramas en proporción inversa a sus resistencias:

$$I_1 = I_{total} \times R_{total} / R_1$$

O para dos resistencias:

$$I_1 = I_{total} \times R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$I_2 = I_{total} \times R_1 / (R_1 + R_2)$$

Aplicaciones de divisores de corriente:

- Distribuir corriente entre múltiples cargas
- Diseño de circuitos de medición
- Protección de instrumentos (shunts para amperímetros)

Ejercicios del Capítulo 6

1. Calcula la resistencia total de: $100 \Omega + 220 \Omega + 470 \Omega$ en serie.
2. Calcula la resistencia total de: $100 \Omega || 220 \Omega || 470 \Omega$ (paralelo).

3. En un circuito serie con $R_1 = 330 \Omega$, $R_2 = 560 \Omega$ y $V = 15 \text{ V}$, calcula la corriente y las caídas de voltaje.
4. Tres resistencias de 120Ω , 180Ω y 270Ω están en paralelo a 12 V . Calcula la corriente total y la corriente en cada rama.
5. Diseña un divisor de voltaje que entregue 5 V a partir de una fuente de 12 V usando resistencias comerciales.
6. En un circuito mixto, $R_1 = 47 \Omega$ está en serie con el paralelo de $R_2 = 100 \Omega$ y $R_3 = 150 \Omega$. La fuente es de 9 V . Calcula todas las corrientes y voltajes.
7. ¿Por qué las instalaciones eléctricas domésticas se conectan en paralelo y no en serie?
8. Explica qué sucede en un circuito serie si uno de los componentes se abre (falla).

\newpage

CAPÍTULO 7: LEYES DE KIRCHHOFF

7.1 Introducción a Gustav Kirchhoff

Gustav Robert Kirchhoff fue un físico alemán que realizó contribuciones fundamentales a la teoría de circuitos eléctricos. En 1845, cuando aún era estudiante universitario, formuló dos leyes que permiten analizar circuitos de cualquier complejidad. Estas leyes, junto con la Ley de Ohm, forman la base del análisis de circuitos eléctricos.

Las leyes de Kirchhoff son especialmente útiles cuando el circuito tiene múltiples fuentes y configuraciones que no pueden simplificarse fácilmente con las reglas básicas de circuitos serie y paralelo.

7.2 Primera Ley de Kirchhoff: Ley de Corrientes (LCK)

La Primera Ley de Kirchhoff, también conocida como Ley de Corrientes o Ley de Nodos, establece:

“La suma algebraica de todas las corrientes que entran a un nodo es igual a cero.”

En otras palabras: “La suma de las corrientes que entran a un nodo es igual a la suma de las corrientes que salen del mismo.”

Un nodo es un punto del circuito donde se conectan dos o más elementos.

Matemáticamente: $\sum I_{\text{entrada}} = \sum I_{\text{salida}}$, o $\sum I = 0$ (considerando signos)

Ejemplo práctico: En un nodo donde entran 3 A y 2 A, y salen 4 A hacia una rama, la corriente que sale por la otra rama debe ser:

$$I_{\text{entrada}} = I_{\text{salida}}$$

$$3 + 2 = 4 + I_x$$

$$5 = 4 + I_x$$

$$I_x = 1 \text{ A}$$

Aplicaciones de la LCK:

- Análisis de circuitos con múltiples ramas

- Verificación de cálculos en circuitos paralelos
- Diseño de redes de distribución de corriente
- Análisis de fallas (una corriente anormal indica un problema)

7.3 Segunda Ley de Kirchhoff: Ley de Voltajes (LVK)

La Segunda Ley de Kirchhoff, también conocida como Ley de Voltajes o Ley de Mallas, establece:

“La suma algebraica de todas las diferencias de potencial (voltajes) alrededor de cualquier trayectoria cerrada en un circuito es igual a cero.”

Una malla o lazo es cualquier trayectoria cerrada en un circuito.

Matemáticamente: $\sum V = 0$ alrededor de una malla cerrada

Para aplicar esta ley, se asigna un signo positivo a las subidas de voltaje (fuentes) y negativo a las caídas de voltaje (resistencias, cargas), siguiendo la dirección de recorrido de la malla.

Ejemplo práctico: En un circuito serie con una batería de 12 V y dos resistencias R_1 y R_2 :

Recorriendo la malla: $+12 \text{ V} - V_1 - V_2 = 0$

Por lo tanto: $V_1 + V_2 = 12 \text{ V}$

Aplicaciones de la LVK:

- Verificar la distribución de voltajes en circuitos serie
- Analizar circuitos con múltiples fuentes de voltaje
- Calcular voltajes en puntos específicos del circuito
- Diseñar circuitos de polarización

7.4 Método Sistemático de Análisis

Para analizar circuitos complejos, se sigue un procedimiento sistemático:

1. Identificar y nombrar todos los nodos del circuito.
2. Asignar direcciones de corriente (pueden ser arbitrarias; si el resultado es negativo, la dirección real es opuesta).
3. Aplicar la LCK a cada nodo (excepto uno que se toma como referencia).
4. Aplicar la LVK a cada malla independiente.

5. Resolver el sistema de ecuaciones resultante.

6. Verificar los resultados.

Ejemplo paso a paso:

Circuito con dos mallas: Fuente $V_1 = 10 \text{ V}$ con $R_1 = 100 \Omega$ en una malla, y fuente $V_2 = 5 \text{ V}$ con $R_2 = 200 \Omega$ en otra malla, compartiendo $R_3 = 50 \Omega$.

Para resolver este circuito, necesitamos tres ecuaciones (una LCK y dos LVK), o usar el método de corrientes de malla.

Usando corrientes de malla (I_1 en malla 1, I_2 en malla 2):

$$\text{Malla 1: } V_1 = I_1 \times R_1 + (I_1 - I_2) \times R_3$$

$$\text{Malla 2: } -V_2 = (I_2 - I_1) \times R_3 + I_2 \times R_2$$

Sustituyendo valores:

$$10 = 100I_1 + 50(I_1 - I_2) \rightarrow 10 = 150I_1 - 50I_2$$

$$-5 = 50(I_2 - I_1) + 200I_2 \rightarrow -5 = -50I_1 + 250I_2$$

Resolviendo: $I_1 = 0.0625 \text{ A} = 62.5 \text{ mA}$, $I_2 = -0.0075 \text{ A} = -7.5 \text{ mA}$

(I_2 negativa significa que la corriente real circula en dirección opuesta a la supuesta)

7.5 Análisis por Nodos

El análisis por nodos utiliza la LCK para resolver circuitos. Se elige un nodo como referencia (tierra, 0 V) y se escriben las ecuaciones de corrientes para los demás nodos.

Procedimiento:

1. Seleccionar un nodo de referencia (tierra).
2. Asignar variables de voltaje a los demás nodos (V_1 , V_2 , etc.).
3. Aplicar LCK a cada nodo no referencia.
4. Expresar cada corriente en términos de voltajes usando la Ley de Ohm.
5. Resolver el sistema de ecuaciones.

7.6 Análisis por Mallas

El análisis por mallas utiliza la LVK y es especialmente útil para circuitos con múltiples fuentes de voltaje.

Procedimiento:

1. Identificar todas las mallas del circuito.
2. Asignar una corriente de malla a cada malla.
3. Aplicar LVK a cada malla.
4. Resolver el sistema de ecuaciones para las corrientes de malla.
5. Calcular otras variables de interés (voltajes, potencias).

7.7 Teorema de Superposición

El teorema de superposición establece que en un circuito lineal con múltiples fuentes independientes, la respuesta (corriente o voltaje) en cualquier elemento es la suma algebraica de las respuestas producidas por cada fuente actuando independientemente.

Procedimiento:

1. Seleccionar una fuente y reemplazar todas las demás fuentes independientes:
 - Fuentes de voltaje: reemplazar por cortocircuitos
 - Fuentes de corriente: reemplazar por circuitos abiertos
2. Calcular la contribución de la fuente seleccionada.
3. Repetir para cada fuente.
4. Sumar algebraicamente todas las contribuciones.

Ventaja: Simplifica circuitos con múltiples fuentes.

Limitación: Solo aplica a circuitos lineales (con componentes óhmicos).

7.8 Teorema de Thévenin

El teorema de Thévenin establece que cualquier circuito lineal de dos terminales puede reemplazarse por una fuente de voltaje equivalente (V_{th}) en serie con una resistencia equivalente (R_{th}).

Esto es extremadamente útil cuando se quiere analizar el efecto de conectar diferentes cargas a un circuito.

Procedimiento para encontrar el equivalente Thévenin:

1. Identificar los terminales de interés (donde se conectará la carga).
2. Calcular V_{th} : voltaje en circuito abierto entre los terminales.
3. Calcular R_{th} : resistencia equivalente vista desde los terminales con todas las fuentes independientes apagadas.
4. El circuito equivalente es V_{th} en serie con R_{th} .

7.9 Teorema de Norton

El teorema de Norton es el dual del teorema de Thévenin: cualquier circuito lineal de dos terminales puede reemplazarse por una fuente de corriente (I_N) en paralelo con una resistencia (R_N).

I_N = corriente de cortocircuito entre los terminales

$R_N = R_{th}$ (la misma resistencia equivalente)

La relación entre ambos equivalentes: $V_{th} = I_N \times R_N$

Ejercicios del Capítulo 7

1. En un nodo entran corrientes de 2 A, 3 A y salen 1.5 A y otra corriente desconocida. Calcula la corriente desconocida.
2. Aplica la LVK a un circuito serie con $V = 24$ V, $R_1 = 100$ Ω , $R_2 = 200$ Ω , $R_3 = 300$ Ω y verifica la suma de voltajes.
3. Calcula las corrientes de malla en un circuito con $V_1 = 12$ V, $R_1 = 50$ Ω , $R_2 = 100$ Ω , $R_3 = 150$ Ω (R_1 y R_2 en serie con V_1 , y R_3 conectada entre el nodo común y tierra).
4. Explica en qué casos es más conveniente usar el análisis por nodos versus el de mallas.
5. Encuentra el equivalente Thévenin visto desde los terminales de R_3 en un circuito con $V = 15$ V, $R_1 = 220$ Ω , $R_2 = 330$ Ω , $R_3 = 470$ Ω (R_1 y R_2 en serie, R_3 en paralelo con R_2).
6. Demuestra que los equivalentes Thévenin y Norton de un circuito dado son equivalentes entre sí.
7. Aplica el teorema de superposición para calcular la corriente en R_3 de un circuito con dos fuentes.
8. ¿Por qué las leyes de Kirchhoff son importantes en el análisis de circuitos industriales?

\newpage

CAPÍTULO 8: ANÁLISIS DE CIRCUITOS DC

8.1 Introducción al Análisis de Circuitos DC

El análisis de circuitos de corriente continua (DC) es la base sobre la que se construye todo el conocimiento eléctrico. Aunque muchos sistemas industriales utilizan corriente alterna, los principios fundamentales de DC se aplican también a AC, y muchos dispositivos electrónicos y de control funcionan internamente con DC.

En este capítulo integraremos todos los conceptos aprendidos: Ley de Ohm, leyes de Kirchhoff, circuitos serie-paralelo, y los teoremas de análisis para resolver circuitos DC de complejidad creciente.

8.2 Circuitos con Fuentes Dependientes

Las fuentes dependientes (o controladas) son fuentes cuyo valor depende de una tensión o corriente en otra parte del circuito. Son fundamentales para modelar transistores, amplificadores operacionales y otros dispositivos electrónicos.

Tipos de fuentes dependientes:

- Fuente de voltaje controlada por voltaje (VCVS)
- Fuente de voltaje controlada por corriente (CCVS)
- Fuente de corriente controlada por voltaje (VCCS)
- Fuente de corriente controlada por corriente (CCCS)

En el análisis, se tratan como fuentes independientes durante la aplicación de las leyes de Kirchhoff, pero su valor se expresa en términos de las variables del circuito.

8.3 Puentes de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito utilizado para medir resistencias desconocidas con gran precisión. Consiste en cuatro resistencias dispuestas en

forma de diamante, con una fuente de voltaje conectada entre dos nodos opuestos y un detector entre los otros dos.

El puente está “balanceado” cuando el voltaje entre los nodos del detector es cero. En esta condición:

$$R_1 / R_2 = R_3 / R_4$$

Si conocemos tres resistencias, podemos calcular la cuarta. En los instrumentos modernos, el detector es un amplificador que permite detectar desbalances mínimos.

Aplicaciones industriales:

- Galgas extensométricas (medición de deformación): la resistencia cambia con la deformación mecánica
- RTD (detectores de temperatura resistivos): la resistencia cambia con la temperatura
- Celdas de carga: miden peso mediante galgas extensométricas en configuración de puente

8.4 Circuitos RC en DC

Un circuito RC contiene resistencias y capacitores. Aunque los capacitores son componentes que almacenan energía en un campo eléctrico, su comportamiento en DC es crucial para entender temporizadores, filtros y circuitos de retardo.

Carga del capacitor:

Cuando se conecta un capacitor descargado a una fuente de voltaje DC a través de una resistencia, el capacitor se carga gradualmente siguiendo una curva exponencial:

$$V_c(t) = V_{\text{fuente}} \times (1 - e^{-(t/RC)})$$

Donde $\tau = RC$ es la constante de tiempo del circuito.

- En $t = \tau$ (una constante de tiempo), el capacitor alcanza el 63.2% de la carga total
- En $t = 5\tau$, el capacitor está prácticamente cargado al 99.3%

Descarga del capacitor:

$$V_c(t) = V_{\text{inicial}} \times e^{-(t/RC)}$$

Aplicaciones en mecatrónica:

- Filtros de alimentación: suavizan el voltaje rectificado

- Temporizadores: el tiempo de carga determina retardos
- Circuitos de arranque suave: limitan la velocidad de cambio de voltaje
- Supresores de transitorios: absorben picos de voltaje

8.5 Circuitos RL en DC

Un circuito RL contiene resistencias e inductores. Los inductores almacenan energía en un campo magnético y se oponen a los cambios en la corriente.

Cuando se aplica voltaje a un circuito RL serie, la corriente aumenta gradualmente:

$$I(t) = I_{\text{máxima}} \times (1 - e^{-(t/(L/R))})$$

Donde la constante de tiempo $\tau = L/R$.

- La corriente alcanza el 63.2% de su valor final en $t = \tau$
- En $t = 5\tau$, la corriente es prácticamente el valor máximo

Comportamiento en DC:

- En DC estable, un inductor se comporta como un cortocircuito (idealmente, resistencia cero)
- Durante cambios (conexión/desconexión), el inductor se opone al cambio, generando voltajes inducidos

Aplicaciones en mecatrónica:

- Bobinas de contactores y relés
- Devanados de motores
- Filtros en fuentes de alimentación
- Supresión de interferencias electromagnéticas

8.6 Transitorios en Circuitos DC

Los transitorios son fenómenos que ocurren durante el cambio entre estados estables. Son críticos en la industria porque pueden causar:

- Picos de voltaje que dañan equipos
- Arcos eléctricos en contactos
- Interferencias electromagnéticas
- Disparos intempestivos de protecciones

Transitorios inductivos: Cuando se desconecta una carga inductiva (bobina de contactor, motor), la energía almacenada en el campo magnético se libera como un

pico de alto voltaje. Este pico puede ser varias veces el voltaje nominal y causa arcos en los contactos del interruptor.

Supresión de transitorios: Se utilizan diodos de rueda libre (en DC), varistores (MOV), circuitos RC (snubbers) y supresores de sobretensión transitoria (TVS) para absorber o desviar estos picos.

8.7 Análisis por Computadora

Para circuitos complejos, el análisis manual puede ser tedioso. Existen herramientas computacionales:

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis): Es el estándar industrial para simulación de circuitos. Versiones modernas incluyen LTspice, PSpice, Multisim.

MATLAB/Simulink: Utilizado para análisis de sistemas de control que incluyen circuitos eléctricos.

Software de diseño de PLC: Siemens TIA Portal, Rockwell Studio 5000 incluyen herramientas de simulación de circuitos de control.

Aunque estas herramientas son poderosas, es esencial comprender los fundamentos teóricos para verificar resultados y diagnosticar problemas.

8.8 Resolución Sistemática de Problemas

Para resolver cualquier problema de análisis de circuitos, recomendamos:

1. Dibujar el circuito claramente, etiquetando todos los componentes y variables.
2. Identificar el tipo de circuito (serie, paralelo, mixto, puente, etc.).
3. Elegir el método de análisis apropiado.
4. Simplificar el circuito paso a paso cuando sea posible.
5. Aplicar las leyes y teoremas correspondientes.
6. Verificar unidades y dimensiones en cada paso.
7. Comprobar que los resultados sean físicamente razonables.
8. Verificar con la Ley de Kirchhoff o balance de potencias.

Regla de verificación: La potencia entregada por las fuentes debe ser igual a la potencia consumida por las cargas (principio de conservación de la energía).

Ejercicios del Capítulo 8

1. Diseña un circuito RC con constante de tiempo de 1 segundo usando un capacitor de 100 μF . ¿Qué resistencia necesitas?
2. Calcula el voltaje en un capacitor de 47 μF después de 0.5 segundos de conectarlo a 12 V a través de una resistencia de 10 k Ω .
3. En un circuito RL con $R = 100 \Omega$ y $L = 200 \text{ mH}$, ¿cuánto tiempo tarda la corriente en alcanzar el 90% de su valor final?
4. Explica el funcionamiento del puente de Wheatstone y su aplicación en medición de temperatura.
5. ¿Qué sucede cuando se desconecta una bobina de contactor energizada? ¿Cómo se protegen los contactos?
6. Dibuja un circuito con dos fuentes de voltaje y tres resistencias, y resuélvelo usando el método de mallas.
7. Investiga qué es un snubber RC y cómo protege los contactos de un relé.
8. Simula en LTspice (o cualquier software similar) un circuito RC y compara los resultados con los cálculos teóricos.

\newpage

CAPÍTULO 9: MAGNETISMO

9.1 Naturaleza del Magnetismo

El magnetismo es un fenómeno físico por el cual ciertos materiales ejercen fuerzas de atracción o repulsión sobre otros materiales. Es, junto con la electricidad, una manifestación de la fuerza electromagnética, una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza.

El magnetismo ha sido conocido desde la antigüedad. Los griegos descubrieron la magnetita (Fe_3O_4), un mineral que atrae naturalmente al hierro. El nombre “magnetismo” proviene de Magnesia, una región de Grecia donde se encontraba este mineral.

Hoy sabemos que el magnetismo es un fenómeno intrínsecamente ligado al movimiento de cargas eléctricas. Todos los efectos magnéticos tienen su origen en corrientes eléctricas, ya sean microscópicas (movimiento de electrones en átomos) o macroscópicas (corriente en un cable).

9.2 Imanes y sus Propiedades

Un imán es un objeto que produce un campo magnético. Los imanes pueden ser naturales (magnetita) o artificiales (imanes de ferrita, neodimio, alnico, etc.).

Propiedades fundamentales de los imanes:

1. Polaridad: Todo imán tiene dos polos, norte (N) y sur (S). No es posible tener un monopolio magnético.
2. Atracción y repulsión: Polos iguales se repelen, polos opuestos se atraen.
3. Zona neutra: En el centro del imán, la fuerza magnética es prácticamente nula.
4. Penetración: El campo magnético atraviesa la mayoría de los materiales no magnéticos (plástico, madera, aluminio, cobre).
5. Conservación: Los polos magnéticos siempre existen en pares. Si se parte un imán por la mitad, cada mitad es un imán completo con sus dos polos.

Tipos de imanes:

- Imanes permanentes: Mantienen su magnetismo indefinidamente (neodimio, ferrita, alnico, samario-cobalto).
- Imanes temporales: Se magnetizan solo en presencia de un campo magnético externo (hierro dulce).
- Electroimanes: Generan campo magnético solo cuando circula corriente por una bobina.

9.3 Campo Magnético

El campo magnético es la región del espacio donde se manifiestan las fuerzas magnéticas. Se representa mediante líneas de campo (o líneas de flujo) con las siguientes características:

- Son líneas cerradas que salen del polo norte y entran por el polo sur.
- La tangente a una línea en cualquier punto indica la dirección del campo en ese punto.
- La densidad de las líneas indica la intensidad del campo.
- Nunca se cruzan entre sí.
- Tienden a seguir el camino de menor resistencia magnética (permeabilidad).

La intensidad del campo magnético se mide en:

- Tesla (T): Unidad SI para la densidad de flujo magnético (B). $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$
- Gauss (G): Unidad CGS. $1 \text{ T} = 10000 \text{ G}$
- El campo magnético terrestre es de aproximadamente $0.5 \text{ G} = 50 \mu\text{T}$

La fuerza magnetomotriz (F) es análoga al voltaje en circuitos eléctricos:

$$F = N \times I \text{ (amperios-vuelta)}$$

Donde N es el número de espiras de una bobina e I es la corriente.

9.4 Materiales Magnéticos

Los materiales se clasifican según su comportamiento magnético:

Ferromagnéticos: Son fuertemente atraídos por un imán y pueden magnetizarse permanentemente. Tienen dominios magnéticos que se alinean con el campo externo. Ejemplos: hierro, níquel, cobalto y sus aleaciones. Son esenciales para construir núcleos de transformadores, motores y electroimanes.

Paramagnéticos: Son débilmente atraídos por un imán. Sus átomos tienen momento magnético pero los dominios no están alineados. Ejemplos: aluminio, platino, oxígeno líquido.

Diamagnéticos: Son débilmente repelidos por un imán. No tienen momento magnético permanente. Ejemplos: bismuto, cobre, agua, carbono (grafito). El superconductor es un diamagnético perfecto (efecto Meissner).

Materiales magnéticos blandos: Se magnetizan fácilmente pero también se desmagnetizan fácilmente. Baja coercitividad. Usados en núcleos de transformadores, motores, electroimanes. Ejemplo: acero al silicio, ferritas blandas.

Materiales magnéticos duros: Difíciles de magnetizar pero retienen la magnetización. Alta coercitividad. Usados en imanes permanentes. Ejemplo: neodimio (NdFeB), samario-cobalto (SmCo), ferritas duras.

9.5 Ciclo de Histéresis

La histéresis magnética describe el comportamiento de un material ferromagnético cuando se somete a un campo magnético variable. Al graficar la densidad de flujo (B) versus la intensidad de campo magnético (H), se obtiene un lazo de histéresis.

Características del ciclo de histéresis:

1. Saturación: Punto donde aumentar H ya no aumenta significativamente B.
2. Remanencia (B_r): Flujo remanente cuando H vuelve a cero (memoria magnética).
3. Coercitividad (H_c): Campo necesario para reducir B a cero.
4. Área del lazo: Representa las pérdidas por histéresis (calor).

Importancia en mecatrónica:

- Núcleos de transformadores: Se buscan materiales con lazo estrecho (bajas pérdidas).
- Imanes permanentes: Se buscan materiales con lazo ancho (alta remanencia y coercitividad).
- Memorias magnéticas: La remanencia permite almacenar información (discos duros, cintas magnéticas).

9.6 Blindaje Magnético

El blindaje magnético desvía las líneas de campo magnético para proteger equipos sensibles. A diferencia del blindaje eléctrico (que usa conductores), el blindaje magnético requiere materiales ferromagnéticos de alta permeabilidad (como mu-metal o permalloy).

Aplicaciones:

- Protección de tubos de rayos catódicos (CRT) de campos externos
- Aislamiento de transformadores que interfieren con circuitos sensibles
- Protección de sensores magnéticos en entornos industriales
- Salas de resonancia magnética en hospitales

9.7 Aplicaciones del Magnetismo en Mecatrónica

El magnetismo está presente en prácticamente todos los sistemas mecatrónicos industriales:

Motores eléctricos: Utilizan campos magnéticos para convertir energía eléctrica en movimiento. La interacción entre el campo del estator y el campo del rotor produce el par motor.

Generadores: Convierten energía mecánica en eléctrica mediante inducción electromagnética.

Sensores magnéticos: Efecto Hall, magnetorresistivos, fluxgate, utilizados para medir posición, velocidad, corriente.

Actuadores: Solenoides, válvulas proporcionales, actuadores lineales.

Separación magnética: Eliminación de partículas ferrosas de materiales en procesos industriales.

Frenos y embragues magnéticos: Transmisión de torque sin contacto físico.

Resonancia Magnética: Imágenes médicas y análisis de materiales.

Ejercicios del Capítulo 9

1. Explica la diferencia entre materiales ferromagnéticos, paramagnéticos y diamagnéticos. Da ejemplos.

2. ¿Qué es el ciclo de histéresis y qué información proporciona sobre un material magnético?
3. Calcula la fuerza magnetomotriz de una bobina con 500 espiras y corriente de 2 A.
4. ¿Por qué el hierro dulce se usa en núcleos de electroimanes mientras que el acero al carbono se usa en imanes permanentes?
5. ¿Cómo se puede desmagnetizar un imán permanente?
6. Explica el principio de funcionamiento de un sensor de efecto Hall.
7. ¿Qué aplicaciones tiene el blindaje magnético en la industria?
8. Investiga las propiedades del neodimio (NdFeB) y por qué es el imán permanente más potente disponible comercialmente.

\newpage

CAPÍTULO 10: ELECTROMAGNETISMO

10.1 Relación entre Electricidad y Magnetismo

El electromagnetismo es la rama de la física que estudia la relación entre los fenómenos eléctricos y magnéticos. El descubrimiento fundamental que unifica ambas fuerzas ocurrió en 1820 cuando Hans Christian Ørsted demostró que una corriente eléctrica desvía la aguja de una brújula, probando que la electricidad produce magnetismo.

Este descubrimiento abrió las puertas a un campo completamente nuevo de la ciencia y la tecnología. Hoy sabemos que:

- Una corriente eléctrica siempre genera un campo magnético a su alrededor.
- Un campo magnético variable puede generar una corriente eléctrica.
- La luz es una onda electromagnética.

10.2 Campo Magnético de una Corriente

Cuando circula corriente por un conductor rectilíneo, se genera un campo magnético alrededor del conductor. Las líneas de campo son círculos concéntricos alrededor del cable. La dirección del campo se determina mediante la regla de la mano derecha:

Regla de la mano derecha: Si el pulgar apunta en la dirección de la corriente (de + a -), los dedos curvados indican la dirección de las líneas de campo magnético.

La intensidad del campo magnético (H) a una distancia r de un conductor rectilíneo es:

$$H = I / (2\pi r)$$

Donde I es la corriente en amperios y r la distancia en metros.

10.3 Bobinas y Solenoides

Una bobina o solenoide se forma enrollando un conductor en forma de hélice. Cuando circula corriente, el campo magnético de cada espira se suma, creando un campo similar al de un imán de barra.

Características del campo magnético de un solenoide:

- En el interior, el campo es prácticamente uniforme y paralelo al eje.
- En el exterior, el campo se asemeja al de un imán de barra.
- Un extremo actúa como polo norte y el otro como polo sur.

Intensidad del campo magnético en un solenoide ideal:

$$H = N \times I / L$$

Donde N es el número de espiras, I la corriente y L la longitud del solenoide.

Densidad de flujo magnético (B) en el núcleo:

$$B = \mu \times H = \mu_0 \times \mu_r \times H$$

Donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (permeabilidad del vacío) y μ_r es la permeabilidad relativa del material del núcleo.

10.4 Electroimanes

Un electroimán es un dispositivo que genera un campo magnético controlable mediante corriente eléctrica. Consiste en un núcleo ferromagnético (generalmente hierro dulce) rodeado por una bobina.

Ventajas sobre los imanes permanentes:

- El campo puede activarse y desactivarse (control ON/OFF)
- La intensidad del campo es regulable mediante la corriente
- La polaridad puede invertirse cambiando la dirección de la corriente
- Pueden diseñarse para producir campos muy intensos

Aplicaciones en mecatrónica industrial:

- Relés y contactores: Apertura y cierre de contactos eléctricos
- Válvulas solenoide: Control de flujo de fluidos
- Frenos y embragues electromagnéticos
- Levantamiento y manipulación de materiales ferrosos
- Separadores magnéticos
- Aceleradores de partículas

Fuerza de un electroimán:

$$F = (B^2 \times A) / (2\mu_0)$$

Donde B es la densidad de flujo, A es el área de la sección transversal del núcleo y μ_0 es la permeabilidad del vacío.

10.5 Fuerza de Lorentz

La fuerza de Lorentz describe la fuerza que experimenta una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo magnético:

$$F = q \times v \times B \times \text{sen}(\theta)$$

Donde:

- q es la carga eléctrica
- v es la velocidad de la carga
- B es la densidad de flujo magnético
- θ es el ángulo entre el vector velocidad y el campo magnético

La dirección de la fuerza es perpendicular tanto a la velocidad como al campo magnético, determinada por la regla de la mano izquierda (o regla del tornillo).

Aplicación en motores: La fuerza de Lorentz es el principio fundamental de los motores eléctricos. Cuando una corriente circula por un conductor dentro de un campo magnético, se genera una fuerza que produce movimiento.

10.6 Fuerza entre Conductores Paralelos

Dos conductores paralelos por los que circulan corrientes eléctricas experimentan una fuerza mutua:

- Si las corrientes circulan en la misma dirección, los conductores se atraen.
- Si las corrientes circulan en direcciones opuestas, los conductores se repelen.

La fuerza por unidad de longitud es:

$$F/L = (\mu_0 \times I_1 \times I_2) / (2\pi \times d)$$

Donde d es la distancia entre conductores.

Esta fuerza es importante en instalaciones eléctricas industriales, donde altas corrientes en cables cercanos pueden generar fuerzas mecánicas significativas, especialmente durante cortocircuitos.

10.7 Circuitos Magnéticos

Un circuito magnético es análogo a un circuito eléctrico. Los conceptos se corresponden:

Circuito eléctrico: Voltaje (V) → Corriente (I) → Resistencia (R)

Circuito magnético: Fuerza magnetomotriz ($F = NI$) → Flujo (Φ) → Reluctancia (\mathcal{R})

La ley de Ohm para circuitos magnéticos:

$$\Phi = F / \mathcal{R} = NI / \mathcal{R}$$

La reluctancia depende del material y la geometría:

$$\mathcal{R} = L / (\mu \times A)$$

Donde L es la longitud media del camino magnético y A es el área de la sección transversal.

Importancia: El diseño de transformadores, motores y electroimanes requiere el análisis de circuitos magnéticos para determinar la corriente necesaria para producir el flujo deseado, considerando la saturación del material.

10.8 Pérdidas en Materiales Magnéticos

En componentes magnéticos que operan con campos variables (transformadores, motores AC), se producen pérdidas:

Pérdidas por histéresis: Relacionadas con el área del lazo de histéresis. Dependen de la frecuencia y del material. Se reducen usando acero al silicio de grano orientado.

Pérdidas por corrientes de Foucault (parásitas): Corrientes inducidas en el núcleo magnético que circulan generando calor. Se reducen laminando el núcleo (chapas delgadas aisladas entre sí) o usando núcleos de ferrita.

Pérdidas totales en el núcleo: $P_{\text{núcleo}} = P_{\text{histéresis}} + P_{\text{Foucault}}$

Estas pérdidas se manifiestan como calor y deben ser disipadas adecuadamente, especialmente en motores y transformadores de gran potencia.

Ejercicios del Capítulo 10

1. Explica el experimento de Ørsted y su importancia para el electromagnetismo.
2. Calcula la intensidad del campo magnético en el interior de un solenoide de 20 cm de longitud con 800 espiras y corriente de 3 A.
3. ¿Cuál es la fuerza magnética sobre un conductor de 2 m de longitud con corriente de 10 A dentro de un campo magnético de 0.5 T perpendicular al conductor?
4. Compara las ventajas y desventajas de los electroimanes frente a los imanes permanentes.
5. Explica qué son las corrientes de Foucault y cómo se minimizan en los núcleos de transformadores.
6. Calcula la reluctancia de un circuito magnético de acero al silicio con longitud media de 30 cm, sección de 5 cm² y $\mu_r = 4000$.
7. ¿Qué es la fuerza magnetomotriz y cómo se calcula?
8. Investiga el funcionamiento de un horno de inducción y su relación con el electromagnetismo.

\newpage

CAPÍTULO 11: INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

11.1 Descubrimiento de la Inducción

Michael Faraday descubrió la inducción electromagnética en 1831, uno de los descubrimientos más importantes en la historia de la ciencia y la tecnología. Faraday demostró que un campo magnético variable puede generar (inducir) una corriente eléctrica en un conductor cercano.

Sus experimentos fundamentales fueron:

1. Al mover un imán dentro de una bobina, se generaba una corriente en la bobina.
2. Al mover la bobina alrededor del imán, también se generaba corriente.
3. Al conectar y desconectar la corriente en una bobina, se inducía corriente en otra bobina cercana.

El descubrimiento de Faraday es el principio de funcionamiento de generadores eléctricos, transformadores, alternadores y muchos otros dispositivos. Sin la inducción electromagnética, la generación masiva de electricidad sería imposible.

11.2 Ley de Faraday-Lenz

La Ley de Faraday establece que la fuerza electromotriz (FEM) inducida en un circuito es igual a la tasa de cambio del flujo magnético que atraviesa el circuito:

$$\varepsilon = -d\Phi/dt$$

Donde ε es la FEM inducida en voltios y Φ es el flujo magnético en webers.

Forma práctica con N espiras:

$$\varepsilon = -N \times d\Phi/dt$$

El signo negativo es la Ley de Lenz, que establece que la FEM inducida siempre se opone al cambio que la produce. Esto significa:

- Si el flujo magnético aumenta, la corriente inducida genera un campo que se opone al aumento.

- Si el flujo magnético disminuye, la corriente inducida genera un campo que se opone a la disminución.

La Ley de Lenz es una manifestación del principio de conservación de la energía: la energía necesaria para inducir la corriente proviene del trabajo realizado para vencer la fuerza de oposición.

11.3 Formas de Inducir FEM

La FEM puede inducirse de tres maneras principales:

1. **Movimiento relativo:** Moviendo un conductor dentro de un campo magnético estático (generador en movimiento). La FEM inducida en un conductor que se mueve perpendicularmente a un campo magnético es:

$$\varepsilon = B \times L \times v$$

Donde B es la densidad de flujo, L la longitud del conductor y v la velocidad.

1. **Variación del campo:** Variando la intensidad del campo magnético mientras el conductor permanece estático (transformador). La FEM inducida en una bobina es:

$$\varepsilon = N \times A \times dB/dt$$

Donde N es el número de espiras, A el área y dB/dt la tasa de cambio del campo.

1. **Variación del área o ángulo:** Cambiando el área o la orientación del circuito respecto al campo. Este es el principio de los alternadores.

11.4 FEM inducida en un Conductor en Movimiento

Cuando un conductor rectilíneo se mueve dentro de un campo magnético, los electrones libres en el conductor experimentan la fuerza de Lorentz, separándose y creando una diferencia de potencial entre los extremos del conductor.

$$\varepsilon = B \times L \times v \times \text{sen}(\theta)$$

Donde θ es el ángulo entre la dirección del movimiento y el campo magnético. La FEM máxima se obtiene cuando el movimiento es perpendicular al campo ($\theta = 90^\circ$).

Aplicación en sensores: Los sensores de velocidad lineales y los tacómetros generadores utilizan este principio para medir velocidad.

11.5 Autoinducción e Inductancia

La autoinducción es el fenómeno por el cual un cambio de corriente en una bobina induce una FEM en la misma bobina. Esto ocurre porque la corriente que circula produce un campo magnético, y al cambiar la corriente, cambia el campo, induciendo una FEM que se opone al cambio.

La inductancia (L) es la propiedad que cuantifica esta oposición al cambio de corriente:

$$\varepsilon = -L \times dI/dt$$

La inductancia se mide en henrios (H). Una bobina tiene una inductancia de 1 H cuando una variación de corriente de 1 A/s induce una FEM de 1 V.

Factores que determinan la inductancia:

- Número de espiras ($L \propto N^2$)
- Área de la sección transversal
- Longitud de la bobina
- Permeabilidad del núcleo (los núcleos ferromagnéticos aumentan enormemente la inductancia)

$$L = \mu_0 \times \mu_r \times N^2 \times A / l$$

11.6 Inductancia Mutua

La inductancia mutua (M) describe la capacidad de una bobina para inducir FEM en otra bobina cercana. Es el principio fundamental de los transformadores.

$$M = k \times \sqrt{L_1 \times L_2}$$

Donde k es el coeficiente de acoplamiento (0 a 1). En transformadores ideales, k = 1.

La FEM inducida en la bobina secundaria debido a un cambio de corriente en la bobina primaria es:

$$\varepsilon_2 = -M \times dI_1/dt$$

11.7 Aplicaciones de la Inducción

Generadores y alternadores:

- Generador DC: Convierte energía mecánica en eléctrica mediante escobillas y

conmutador.

- Alternador: Genera corriente alterna mediante anillos rozantes.
- Ambos utilizan el movimiento relativo entre conductores y campos magnéticos.

Transformadores:

- Transfieren energía entre circuitos mediante inducción mutua.
- Permiten cambiar niveles de voltaje.
- Aíslan galvánicamente circuitos.
- Esenciales para la distribución de energía eléctrica.

Sensores inductivos:

- Detectan metales sin contacto físico.
- Miden posición, proximidad y velocidad.
- Ampliamente utilizados en automatización industrial.

Calentamiento por inducción:

- Calienta conductores metálicos mediante corrientes inducidas (Foucault).
- Usado en hornos de inducción, cocinas de inducción, endurecimiento superficial.

Frenos por inducción:

- Frenos electromagnéticos sin desgaste mecánico.
- Usados en vehículos pesados, trenes, montañas rusas.

Carga inalámbrica:

- Transfiere energía a dispositivos sin conexión física.
- Base de cargadores para teléfonos, cepillos eléctricos, vehículos eléctricos.

11.8 Energía Almacenada en un Campo Magnético

Una bobina ideal (sin pérdidas) almacena energía en su campo magnético:

$$E = \frac{1}{2} \times L \times I^2$$

Esta energía se libera cuando la corriente disminuye. Es la razón por la cual las bobinas pueden generar altos voltajes al desconectarlas: la energía almacenada debe disiparse rápidamente.

En aplicaciones industriales, esta característica se aprovecha en:

- Fuentes de alimentación conmutadas
- Sistemas de encendido de motores de combustión
- Bobinas de refuerzo (boost converters)
- Sistemas de soldadura por puntos

Ejercicios del Capítulo 11

1. Explica la Ley de Faraday y la Ley de Lenz con tus propias palabras.
2. Una bobina de 200 espiras experimenta un cambio de flujo de 0.05 Wb en 0.1 segundos. Calcula la FEM inducida.
3. ¿Qué es la autoinducción y de qué factores depende la inductancia?
4. Un conductor de 0.5 m se mueve a 20 m/s perpendicularmente a un campo de 0.3 T. Calcula la FEM inducida.
5. Explica el principio de funcionamiento de un transformador.
6. Calcula la inductancia de una bobina con núcleo de aire de 300 espiras, área de 2 cm^2 y longitud de 10 cm.
7. ¿Cuánta energía almacena una bobina de 500 mH con corriente de 4 A?
8. Describe tres aplicaciones industriales de la inducción electromagnética.

\newpage

CAPÍTULO 12: CORRIENTE ALTERNA (AC)

12.1 Naturaleza de la Corriente Alterna

La corriente alterna (AC) es aquella que cambia periódicamente de dirección y magnitud. Es la forma predominante de energía eléctrica en el mundo debido a su facilidad para transformarse a diferentes niveles de voltaje mediante transformadores.

Mientras que la corriente continua (DC) mantiene polaridad constante, la corriente alterna invierte su polaridad cíclicamente. En cada ciclo, la corriente aumenta desde cero hasta un valor máximo en una dirección, disminuye a cero, y luego aumenta al máximo en la dirección opuesta.

La forma de onda más común de la AC es la onda senoidal, aunque existen otras formas (cuadrada, triangular, diente de sierra) utilizadas en aplicaciones específicas (electrónica de potencia, inversores).

12.2 Parámetros de la Onda Senoidal

Una onda senoidal de voltaje se describe mediante:

$$v(t) = V_p \times \text{sen}(2\pi ft + \varphi)$$

Donde:

- $v(t)$: valor instantáneo del voltaje en el tiempo t
- V_p : voltaje pico (amplitud máxima)
- f : frecuencia en hercios (Hz)
- φ : ángulo de fase inicial (radianes)
- $\omega = 2\pi f$: frecuencia angular (rad/s)

Parámetros importantes:

Valor pico (V_p): Valor máximo que alcanza la onda. También llamado amplitud o valor máximo.

Valor pico a pico (V_{pp}): Diferencia entre el pico positivo y el pico negativo. $V_{pp} = 2 \times V_p$

Valor eficaz (RMS - Root Mean Square): Es el valor equivalente de DC que produciría la misma potencia en una carga resistiva. Para una onda senoidal: $V_{rms} = V_p / \sqrt{2} = 0.707 \times V_p$

La mayoría de las mediciones de AC se expresan en RMS. Cuando decimos que la red doméstica es de 230 V, nos referimos a 230 V RMS. Su valor pico es: $V_p = 230 \times \sqrt{2} = 325$ V y su valor pico a pico es 650 V.

Periodo (T): Tiempo necesario para completar un ciclo. $T = 1/f$. Para 50 Hz: $T = 1/50 = 0.02$ s = 20 ms.

Frecuencia (f): Número de ciclos por segundo. $f = 1/T$. En Europa y gran parte del mundo: 50 Hz. En América del Norte: 60 Hz.

12.3 Generación de Corriente Alterna

La corriente alterna se genera en alternadores, que son máquinas que convierten energía mecánica en energía eléctrica mediante inducción electromagnética.

Principio de funcionamiento: Una bobina gira dentro de un campo magnético. Al girar, el flujo magnético que atraviesa la bobina varía senoidalmente, induciendo una FEM también senoidal.

$$\varepsilon(t) = N \times B \times A \times \omega \times \text{sen}(\omega t)$$

Donde N es el número de espiras, B la densidad de flujo, A el área de la bobina y ω la velocidad angular.

Componentes de un alternador:

- Rotor: Parte móvil que contiene los polos magnéticos (imanes permanentes o electroimanes).
- Estator: Parte fija que contiene los devanados donde se induce la FEM.
- Excitatriz: Sistema que alimenta los electroimanes del rotor (en alternadores de gran potencia).
- Regulador de voltaje: Mantiene constante el voltaje de salida.

12.4 Sistemas Monofásicos y Trifásicos

Sistema monofásico: Un solo voltaje alterno. Tiene dos conductores: fase (L) y neutro (N). Es el sistema utilizado en hogares y pequeños comercios. Potencia típica: 3-10 kW.

Sistema trifásico: Tres voltajes alternos desfasados 120° entre sí. Tiene cuatro conductores: tres fases (L1, L2, L3) y neutro (N). Es el sistema estándar en la industria.

Ventajas del sistema trifásico:

- Transmite más potencia con menos conductores (3 cables en lugar de 6 para 3 sistemas monofásicos).
- Los motores trifásicos son más eficientes, compactos y tienen mejor par de arranque.
- El campo magnético giratorio se produce naturalmente (sin necesidad de capacitor de arranque).
- La potencia instantánea es constante (no pulsante), lo que reduce vibraciones en maquinaria.

Conexiones trifásicas:

- Estrella (Y): Los tres devanados comparten un punto común (neutro). Voltaje línea-neutro: V_{fase} . Voltaje línea-línea: $V_L = \sqrt{3} \times V_{\text{fase}}$. Ejemplo: 230/400 V (fase/ línea).
- Delta (Δ): Los devanados se conectan en triángulo. No hay neutro. El voltaje línea-línea es igual al voltaje de fase. Usado para motores y cargas trifásicas balanceadas.

12.5 Reactancia e Impedancia

En AC, además de la resistencia, aparecen dos nuevos efectos que se oponen al flujo de corriente:

Reactancia inductiva (X_L): Oposición de una bobina al cambio de corriente.

$$X_L = 2\pi fL = \omega L \text{ (ohmios)}$$

La reactancia inductiva aumenta con la frecuencia. Por eso las bobinas dejan pasar mejor las bajas frecuencias y bloquean las altas.

Reactancia capacitiva (X_C): Oposición de un capacitor al cambio de voltaje.

$$X_C = 1/(2\pi fC) = 1/(\omega C) \text{ (ohmios)}$$

La reactancia capacitiva disminuye con la frecuencia. Por eso los capacitores dejan pasar mejor las altas frecuencias y bloquean las DC.

Impedancia (Z): Es la oposición total al flujo de corriente en AC, combinando resistencia y reactancias.

$$Z = R + j(X_L - X_C) \text{ (notación fasorial)}$$

$$\text{El módulo de la impedancia: } |Z| = \sqrt{(R^2 + (X_L - X_C)^2)}$$

La Ley de Ohm en AC se expresa con impedancia:

$$V = I \times Z \text{ (con magnitudes fasoriales)}$$

$$V_{\text{rms}} = I_{\text{rms}} \times |Z| \text{ (con magnitudes RMS)}$$

12.6 Potencia en AC

En AC, existen tres tipos de potencia:

Potencia activa (P): Potencia que realiza trabajo útil. Se mide en vatios (W).

$$P = V \times I \times \cos(\varphi) \text{ (monofásico)}$$

$$P = \sqrt{3} \times V_L \times I_L \times \cos(\varphi) \text{ (trifásico)}$$

Potencia reactiva (Q): Potencia almacenada y devuelta por elementos reactivos (bobinas y capacitores). No realiza trabajo útil pero es necesaria para mantener campos magnéticos. Se mide en volt-amperios reactivos (VAR).

$$Q = V \times I \times \sin(\varphi)$$

Potencia aparente (S): Potencia total suministrada por la fuente. Es la combinación vectorial de P y Q. Se mide en volt-amperios (VA).

$$S = V \times I = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

Factor de potencia: $FP = P/S = \cos(\varphi)$

Un FP bajo (cerca de 0) significa que se necesita más corriente para la misma potencia activa, lo que requiere conductores de mayor sección y causa mayores pérdidas.

12.7 Resonancia en Circuitos AC

La resonancia ocurre en circuitos RLC cuando $X_L = X_C$, es decir, cuando las reactancias inductiva y capacitiva se cancelan mutuamente.

$$\text{Frecuencia de resonancia: } f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

En resonancia:

- La impedancia es puramente resistiva ($Z = R$)
- La corriente está en fase con el voltaje
- La corriente es máxima (para circuito serie) o mínima (para circuito paralelo)
- El factor de potencia es 1

Aplicaciones:

- Circuitos sintonizados de radio y televisión
- Filtros de armónicos en sistemas de potencia
- Balasto electrónico para lámparas fluorescentes
- Calentamiento por inducción

12.8 Armónicos en Sistemas Eléctricos

Los armónicos son componentes de frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental (50/60 Hz). Son causados por cargas no lineales (variadores de frecuencia, rectificadores, fuentes conmutadas, iluminación LED).

Efectos de los armónicos:

- Sobrecalentamiento de transformadores y motores
- Disparo intempestivo de protecciones
- Interferencias en sistemas de comunicación
- Reducción de la vida útil de equipos
- Errores en medición de energía

Mitigación:

- Filtros pasivos (LC sintonizados a frecuencias específicas)
- Filtros activos (electrónicos, cancelan armónicos dinámicamente)
- Transformadores de aislamiento con conexión especial
- Rectificadores de 12 o 24 pulsos

Ejercicios del Capítulo 12

1. Para una red de 230 V / 50 Hz, calcula: V_p , V_{pp} , período, frecuencia angular.
2. Explica las diferencias entre sistemas monofásico y trifásico.
3. ¿Qué es la impedancia? Calcula la impedancia de un circuito RLC serie con $R = 50 \Omega$, $L = 100 \text{ mH}$, $C = 47 \mu\text{F}$ a 60 Hz.
4. Calcula la reactancia inductiva de una bobina de 200 mH a 50 Hz y a 10 kHz.

5. ¿Qué es la potencia reactiva y por qué es necesaria en sistemas industriales?
6. Calcula la frecuencia de resonancia de un circuito con $L = 10 \text{ mH}$ y $C = 100 \text{ nF}$.
7. Una carga trifásica equilibrada consume 50 A a 400 V con $\text{FP} = 0.85$. Calcula P , Q y S .
8. Investiga qué tipos de cargas generan armónicos en la industria y cómo se mitigan.

\newpage

CAPÍTULO 13: CAPACITORES

13.1 Definición y Principio de Funcionamiento

Un capacitor (o condensador) es un componente eléctrico pasivo que almacena energía en forma de campo eléctrico. Está formado por dos conductores (placas) separados por un material aislante llamado dieléctrico.

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre las placas, se acumula carga positiva en una placa y negativa en la otra. La energía se almacena en el campo eléctrico creado entre las placas.

Proceso de carga:

1. Al conectar una fuente de DC, los electrones comienzan a acumularse en la placa negativa.
2. La placa positiva pierde electrones (queda con carga positiva neta).
3. A medida que se acumula carga, se crea un campo eléctrico que se opone a la llegada de más electrones.
4. La corriente disminuye gradualmente hasta que el capacitor está completamente cargado.
5. En DC estable, el capacitor se comporta como un circuito abierto (no circula corriente).

Proceso de descarga:

1. Al conectar una carga entre los terminales, los electrones fluyen de la placa negativa a la positiva.
2. La corriente circula en dirección opuesta a la carga.
3. El voltaje entre las placas disminuye gradualmente hasta cero.

13.2 Capacitancia

La capacitancia (C) es la capacidad del capacitor para almacenar carga por unidad de voltaje:

$$C = Q / V$$

Donde C es la capacitancia en faradios (F), Q es la carga en coulombs (C) y V es el voltaje en voltios (V).

Un faradio es una unidad muy grande. Los valores típicos van desde picofaradios ($\text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$) hasta milifaradios ($\text{mF} = 10^{-3} \text{ F}$):

- $1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ (microfaradio)
- $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$ (nanofaradio)
- $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ (picofaradio)

Factores que determinan la capacitancia:

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_r \times A / d$$

Donde:

- $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ (permitividad del vacío)
- ϵ_r = permitividad relativa del dieléctrico
- A = área de las placas (m^2)
- d = distancia entre placas (m)

13.3 Tipos de Capacitores

Capacitores electrolíticos:

- Alta capacitancia (1 μF a 1 F)
- Polarizados (tienen positivo y negativo)
- Usados en filtros de fuentes de alimentación
- Tensión máxima limitada (6.3 V a 450 V)
- Mayor corriente de fuga y tolerancia amplia ($\pm 20\%$)

Capacitores cerámicos:

- Baja capacitancia (1 pF a 100 μF)
- No polarizados
- Alta estabilidad y baja corriente de fuga
- Amplio rango de voltajes
- Usados en desacoplo, filtros de alta frecuencia

Capacitores de poliéster/polipropileno:

- Capacitancia media (1 nF a 10 μF)
- No polarizados
- Alta estabilidad térmica
- Baja corriente de fuga
- Usados en circuitos de temporización, audio

Capacitores de tantalio:

- Alta capacitancia en tamaño pequeño
- Polarizados
- Muy estables
- Caros y sensibles a sobretensión
- Usados en equipos portátiles

Supercapacitores (EDLC):

- Capacitancia extremadamente alta (1 F a 5000 F)
- Bajo voltaje máximo (2.5-2.7 V por celda)
- Usados como respaldo de memoria, sistemas híbridos

13.4 Comportamiento en DC y AC

En DC:

- Inicialmente, el capacitor se comporta como un cortocircuito (descargado).
- Durante la carga, la corriente disminuye exponencialmente.
- En estado estable, el capacitor se comporta como un circuito abierto.
- Constante de tiempo: $\tau = RC$ (tiempo para cargarse al 63.2%)

En AC:

- El capacitor se carga y descarga continuamente.
- Permite el paso de corriente alterna (cuanto mayor frecuencia, menor oposición).
- La reactancia capacitiva: $X_C = 1/(2\pi fC)$
- El voltaje está retrasado 90° respecto a la corriente.

13.5 Conexión de Capacitores

Capacitores en serie:

$$1/C_{\text{total}} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots + 1/C_n$$

La capacitancia total es menor que la más pequeña. El voltaje se divide entre los capacitores.

$$\text{Para dos capacitores: } C_{\text{total}} = (C_1 \times C_2) / (C_1 + C_2)$$

Capacitores en paralelo:

$$C_{\text{total}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$$

La capacitancia total es la suma. Todos reciben el mismo voltaje.

13.6 Energía Almacenada

La energía almacenada en un capacitor cargado es:

$$E = \frac{1}{2} \times C \times V^2$$

Esta energía se libera durante la descarga. Por esta razón, los capacitores pueden ser peligrosos incluso después de desconectar la alimentación. Un capacitor electrolítico de 470 μF cargado a 400 V almacena:

$$E = 0.5 \times 470 \times 10^{-6} \times 400^2 = 37.6 \text{ J}$$

Suficiente para causar una descarga dolorosa o dañar componentes.

13.7 Aplicaciones en Mecatrónica Industrial

Filtros de alimentación: Suavizan el voltaje rectificado. Un capacitor grande (1000-10000 μF) reduce el rizado en fuentes DC.

Desacoplo: Capacitores pequeños (0.1 μF) cerca de circuitos integrados filtran ruido de alta frecuencia en las líneas de alimentación.

Temporizadores: Circuitos RC determinan retardos (555 timer, temporizadores industriales).

Arranque de motores: Capacitores de arranque proporcionan el desfase necesario para motores monofásicos.

Corrección del factor de potencia: Bancos de capacitores compensan la reactancia inductiva de motores y transformadores.

Sensores capacitivos: Detectan presencia de objetos midiendo cambios de capacitancia.

Supresión de interferencias: Capacitores en filtros EMI/RFI.

Circuitos de snubber: Capacitores en serie con resistencias protegen contactos de relés y tiristores.

13.8 Consideraciones Prácticas

Voltaje máximo: Nunca exceder el voltaje nominal del capacitor. Un margen de seguridad del 20-50% es recomendable.

Polaridad: Los capacitores electrolíticos y de tantalio son polarizados. Invertir la polaridad causa explosión.

Corriente de fuga: Todos los capacitores tienen alguna fuga de corriente. Es mínima en cerámicos y mayor en electrolíticos.

ESR (Equivalent Series Resistance): Resistencia serie equivalente que causa calentamiento. Importante en fuentes conmutadas.

Vida útil: Los electrolíticos tienen vida limitada (2000-10000 horas a temperatura máxima). La vida se duplica por cada 10°C de reducción.

Descarga segura: Siempre descargar capacitores grandes con una resistencia adecuada antes de manipularlos.

Ejercicios del Capítulo 13

1. Calcula la capacitancia de un capacitor de placas paralelas con $A = 10 \text{ cm}^2$, $d = 0.5 \text{ mm}$ y $\epsilon_r = 4$.
2. Conecta tres capacitores de $100 \mu\text{F}$, $220 \mu\text{F}$ y $470 \mu\text{F}$ en paralelo. Calcula la capacitancia total.
3. ¿Cuánto tiempo tarda en cargarse al 95% un capacitor de $100 \mu\text{F}$ a través de una resistencia de $10 \text{ k}\Omega$?
4. Calcula la energía almacenada en un capacitor de $1000 \mu\text{F}$ cargado a 24 V .
5. ¿Qué función tiene un capacitor en un filtro de fuente de alimentación?
6. Explica por qué los capacitores electrolíticos son polarizados y qué sucede si se conectan al revés.
7. Calcula la reactancia capacitiva de un capacitor de $1 \mu\text{F}$ a 50 Hz y a 10 kHz .
8. Investiga cómo se utilizan los capacitores para la corrección del factor de potencia en la industria.

\newpage

CAPÍTULO 14: INDUCTORES Y BOBINAS

14.1 Definición y Principio de Funcionamiento

Un inductor es un componente eléctrico pasivo que almacena energía en forma de campo magnético. Consiste típicamente en un conductor enrollado en forma de bobina, que puede tener o no un núcleo magnético (ferrita, hierro, aire).

Cuando circula corriente por la bobina, se genera un campo magnético. La energía se almacena en este campo. La propiedad fundamental del inductor es que se opone a los cambios en la corriente que circula por él.

Comportamiento básico:

- En DC estable: el inductor se comporta idealmente como un cortocircuito (resistencia muy baja).
- Durante cambios de corriente: el inductor genera una FEM que se opone al cambio (Ley de Lenz).
- En AC: ofrece una oposición que aumenta con la frecuencia.

14.2 Inductancia

La inductancia (L) es la propiedad que cuantifica la capacidad de un inductor para almacenar energía magnética y oponerse a cambios de corriente:

$$L = N \times \Phi / I$$

Donde L es la inductancia en henrios (H), N es el número de espiras, Φ es el flujo magnético en webers e I es la corriente en amperios.

Un henrio es la inductancia que induce 1 V cuando la corriente cambia a razón de 1 A/s. Los valores típicos van desde microhenrios ($\mu\text{H} = 10^{-6}$ H) hasta henrios (H):

- 1 mH = 10^{-3} H (milihenrio)
- 1 $\mu\text{H} = 10^{-6}$ H (microhenrio)

Factores que determinan la inductancia:

$$L = \mu_0 \times \mu_r \times N^2 \times A / l$$

Donde:

- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m (permeabilidad del vacío)
- μ_r = permeabilidad relativa del núcleo
- N = número de espiras
- A = área de la sección transversal (m²)
- l = longitud media de la bobina (m)

14.3 Tipos de Inductores

Inductores con núcleo de aire:

- Baja inductancia (μ H a mH)
- Sin pérdidas en el núcleo
- Sin saturación
- Usados en RF, altas frecuencias

Inductores con núcleo de ferrita:

- Media inductancia (μ H a mH)
- Bajas pérdidas a altas frecuencias
- Tamaño compacto
- Usados en fuentes conmutadas, filtros EMI

Inductores con núcleo de hierro:

- Alta inductancia (mH a H)
- Alta densidad de flujo (menos espiras necesarias)
- Pérdidas por histéresis y Foucault
- Usados en transformadores de potencia, filtros de audio

Bobinas de núcleo toroidal:

- Forma de dona, campo magnético confinado
- Mínima interferencia electromagnética
- Alta eficiencia
- Usadas en fuentes de alimentación, equipos de audio

Bobinas de choque (chokes):

- Diseñadas para bloquear altas frecuencias
- Usadas en filtros de líneas de alimentación

14.4 Comportamiento en DC y AC

En DC:

- Al conectar la fuente, la corriente aumenta gradualmente (no instantáneamente).
- $\tau = L/R$ es la constante de tiempo.
- La corriente se aproxima asintóticamente a $I = V/R$.
- En estado estable, el inductor es un cortocircuito ideal ($R = 0$).

En AC:

- La reactancia inductiva: $X_L = 2\pi fL$
- La corriente está retrasada 90° respecto al voltaje.
- Un inductor deja pasar DC y frecuencias bajas, pero bloquea frecuencias altas.

14.5 Conexión de Inductores

Inductores en serie:

$$L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n \text{ (sin acoplamiento mutuo)}$$

La inductancia total es mayor.

Inductores en paralelo:

$$1/L_{\text{total}} = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots + 1/L_n \text{ (sin acoplamiento mutuo)}$$

La inductancia total es menor.

Con acoplamiento mutuo (M):

Cuando los inductores están cerca, el campo magnético de uno afecta al otro:

Serie aditivo: $L_{\text{total}} = L_1 + L_2 + 2M$

Serie sustractivo: $L_{\text{total}} = L_1 + L_2 - 2M$

14.6 Energía Almacenada

La energía almacenada en el campo magnético de un inductor es:

$$E = \frac{1}{2} \times L \times I^2$$

Esta energía se libera cuando la corriente se interrumpe. Por eso las bobinas generan arcos y picos de voltaje al desconectarlas. La energía almacenada debe disiparse, y si no hay camino de descarga, el voltaje puede elevarse hasta causar una descarga disruptiva.

14.7 Aplicaciones en Mecatrónica Industrial

Filtros de alimentación: Los inductores (junto con capacitores) forman filtros pasa-bajos que suavizan la corriente en fuentes de poder.

Bobinas de relés y contactores: Crean el campo magnético necesario para accionar contactos mecánicos.

Balastos: En lámparas fluorescentes y HID, limitan la corriente y proporcionan el alto voltaje de arranque.

Transformadores: Dos o más bobinas acopladas magnéticamente para transferir energía entre circuitos.

Motores: Los devanados del estator y rotor son inductores.

Supresión de interferencias: Inductores en filtros EMI bloquean ruido de alta frecuencia.

Sensores inductivos: Detectan metales midiendo cambios en la inductancia de una bobina.

Variadores de frecuencia: Utilizan inductores en los circuitos de salida para suavizar la corriente.

Soldadura por inducción: Bobinas de alta frecuencia calientan metales sin contacto.

Sistemas de encendido: Las bobinas de encendido generan alto voltaje para las bujías.

14.8 Consideraciones Prácticas

Saturación: Todos los inductores con núcleo magnético se saturan a cierta corriente. Más allá de este punto, la inductancia cae drásticamente.

Resistencia en DC (DCR): Los inductores reales tienen resistencia en el bobinado, causando pérdidas y calentamiento.

Frecuencia de auto-resonancia (SRF): Debido a la capacitancia parásita entre espiras, los inductores tienen una frecuencia donde resuenan. Por encima de SRF, se comportan como capacitores.

Corriente nominal: La corriente máxima que puede circular sin saturar el núcleo ni exceder la temperatura máxima.

Apantallamiento: Algunos inductores tienen shields magnéticos para reducir interferencias con componentes cercanos.

14.9 Comparación: Capacitor vs Inductor

Propiedad	Capacitor	Inductor
Energía almacenada	Campo eléctrico: $\frac{1}{2}CV^2$	Campo magnético: $\frac{1}{2}LI^2$
DC estable	Circuito abierto	Cortocircuito
AC: relación V-I	I adelanta 90° a V	V adelanta 90° a I
Reactancia	$X_C = 1/(2\pi fC)$	$X_L = 2\pi fL$
Frecuencia	Alta f: baja reactancia	Alta f: alta reactancia
Conexión serie	Disminuye C total	Aumenta L total
Conexión paralelo	Aumenta C total	Disminuye L total

Ejercicios del Capítulo 14

1. Calcula la inductancia de una bobina con núcleo de ferrita ($\mu_r = 2000$), 100 espiras, área de 1 cm^2 y longitud de 5 cm.
2. ¿Cuánto tiempo tarda la corriente en alcanzar el 99% de su valor final en un circuito RL con $R = 100 \Omega$ y $L = 500 \text{ mH}$?
3. Calcula la reactancia inductiva de una bobina de 10 mH a 50 Hz y a 10 kHz.
4. ¿Cuánta energía almacena un inductor de 2 H con corriente de 3 A?
5. Explica por qué las bobinas generan picos de voltaje al desconectarlas.
6. Conecta tres inductores de 10 mH, 22 mH y 47 mH en serie y en paralelo. Calcula ambas inductancias totales.
7. ¿Qué es la saturación magnética y cómo afecta el comportamiento de un inductor?
8. Investiga las diferencias entre un inductor y un transformador en términos de construcción y aplicación.

\newpage

CAPÍTULO 15: TRANSFORMADORES

15.1 Principio de Funcionamiento

El transformador es una máquina eléctrica estática que transfiere energía entre dos o más circuitos mediante inducción electromagnética. Opera exclusivamente con corriente alterna (AC) y es uno de los componentes más importantes en sistemas eléctricos de potencia y en electrónica.

Componentes básicos:

- Núcleo magnético: Generalmente de acero al silicio laminado, proporciona un camino de baja reluctancia para el flujo magnético.
- Devanado primario: Bobina conectada a la fuente de alimentación.
- Devanado secundario: Bobina que entrega energía a la carga.

Principio de operación:

1. La corriente alterna en el primario crea un flujo magnético variable en el núcleo.
2. El flujo magnético, guiado por el núcleo, atraviesa el devanado secundario.
3. Por la Ley de Faraday, el flujo variable induce una FEM en el secundario.
4. La relación entre voltajes depende de la relación de espiras.

15.2 Relación de Transformación

La relación de transformación (a) determina cómo se transforman voltajes y corrientes:

$$a = N_1 / N_2 = V_1 / V_2 = I_2 / I_1$$

Donde:

- N_1, N_2 = número de espiras del primario y secundario
- V_1, V_2 = voltajes del primario y secundario
- I_1, I_2 = corrientes del primario y secundario

Tipos según relación:

- Transformador reductor: $N_1 > N_2, V_1 > V_2, I_1 < I_2$ (ejemplo: 230V a 24V)

- Transformador elevador: $N_1 < N_2$, $V_1 < V_2$, $I_1 > I_2$ (ejemplo: 230V a 400V)
- Transformador de aislamiento: $N_1 = N_2$, $V_1 = V_2$ (solo aislamiento galvánico)

Ejemplo de cálculo: Un transformador con 500 espiras en el primario y 50 en el secundario, conectado a 230 V:

$$a = 500/50 = 10$$

$$V_2 = V_1 / a = 230 / 10 = 23 \text{ V}$$

$$\text{Si la carga consume 5 A en el secundario: } I_1 = I_2 / a = 5 / 10 = 0.5 \text{ A}$$

15.3 Transformador Ideal vs Real

Transformador ideal (supuestos):

- Sin pérdidas en el núcleo ni en los devanados
- Permeabilidad infinita del núcleo
- Acoplamiento perfecto (todo el flujo atraviesa ambos devanados)
- Sin corriente de magnetización
- Eficiencia del 100%: $P_1 = P_2$, $V_1 \times I_1 = V_2 \times I_2$

Transformador real (consideraciones):

- Pérdidas en el cobre: Resistencia de los devanados (I^2R).
- Pérdidas en el núcleo: Histéresis y corrientes de Foucault.
- Corriente de magnetización: Corriente necesaria para establecer el flujo en el núcleo.
- Reactancia de dispersión: Flujo que no enlaza ambos devanados.
- Eficiencia típica: 95-99% para transformadores de potencia.

15.4 Clasificación de Transformadores

Por aplicación:

Transformadores de potencia: Grandes transformadores en subestaciones eléctricas (hasta 1000 MVA). Transforman voltajes de transmisión (400 kV, 220 kV) a voltajes de distribución (33 kV, 11 kV).

Transformadores de distribución: Transforman voltajes de distribución a voltajes de utilización (400/230 V). Potencias hasta 2500 kVA.

Transformadores de instrumentación:

- Transformadores de corriente (TC): Reducen altas corrientes para medición.
- Transformadores de potencial (TP): Reducen altos voltajes para medición.

Transformadores de aislamiento: Aíslan galvánicamente circuitos por seguridad o para romper lazos de tierra.

Autotransformadores: Un solo devanado con derivaciones. Más compactos pero sin aislamiento galvánico.

Transformadores de señal: Para acoplamiento de señales en audio, RF, telecomunicaciones.

Por construcción:

- Tipo seco: Refrigeración por aire. Para interiores, baja potencia.
- Tipo aceite: Refrigeración por aceite dieléctrico. Para exteriores, alta potencia.
- Encapsulado: Resina epóxica. Para entornos agresivos.

15.5 Conexiones Trifásicas

Para sistemas trifásicos, se usan tres transformadores monofásicos o un transformador trifásico con tres columnas.

Conexiones:

- Estrella-Estrella (Y-Y): Relación de voltajes 1:1, adecuada para cargas balanceadas.
- Delta-Delta (Δ - Δ): No tiene neutro, tolera desbalances.
- Estrella-Delta (Y- Δ): Reduce armónicos de tercer orden.
- Delta-Estrella (Δ -Y): El más común en distribución (primario en Δ , secundario en Y con neutro).

Desplazamiento angular: Según la conexión, los voltajes del secundario pueden estar desfasados respecto al primario (30° , 0° , etc.).

15.6 Polaridad y Marcas de Derivación

La polaridad de los devanados (marcas de polaridad o puntos) indica la dirección relativa de los voltajes inducidos. Cuando la corriente entra por el terminal marcado en el primario, la corriente sale por el terminal marcado en el secundario.

Determinación práctica: Conectando un voltímetro AC entre primario y secundario, se puede determinar si la conexión es aditiva o sustractiva.

15.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Fuentes de alimentación: Transformadores reducen el voltaje de red (230 V) a voltajes seguros y adecuados para circuitos electrónicos (5 V, 12 V, 24 V).

Aislamiento galvánico: Separación eléctrica entre circuitos de potencia y control, esencial para seguridad en equipos industriales.

Adaptación de impedancias: Máxima transferencia de potencia cuando la impedancia de la carga se iguala a la impedancia de la fuente (audio, RF).

Sensores: Transformadores diferenciales de desplazamiento lineal (LVDT) miden posición con alta precisión.

Medición: Transformadores de corriente (TC) permiten medir altas corrientes de forma segura.

Soldadura: Transformadores de soldadura proporcionan alta corriente a bajo voltaje.

Cargadores de baterías: Transformadores con rectificadores para carga de baterías industriales.

Variadores de frecuencia: Transformadores de salida (en algunos diseños) para adaptar voltajes.

15.8 Mantenimiento y Seguridad

Pruebas comunes:

- Medición de resistencia de aislamiento (megger)
- Relación de transformación (TTR)
- Resistencia de devanados
- Análisis de aceite dieléctrico (transformadores de aceite)
- Prueba de factor de potencia
- Termografía infrarroja

Precauciones de seguridad:

- Nunca cortocircuitar los terminales de un transformador energizado
- Descargar capacitancia parásita antes de tocar terminales
- Verificar que la frecuencia coincida con la nominal
- Respetar la potencia nominal (no sobrecargar)
- Mantener ventilación adecuada

- Los transformadores pueden tener voltajes peligrosos incluso apagados (efecto de “ganancia”)

Ejercicios del Capítulo 15

1. Un transformador tiene 800 espiras en el primario y 120 en el secundario. Conectado a 230 V, ¿qué voltaje entrega? Si la carga consume 8 A, ¿qué corriente circula por el primario?
2. Explica las diferencias entre un transformador reductor, elevador y de aislamiento.
3. ¿Qué son las pérdidas en el cobre y en el núcleo de un transformador?
4. Calcula la eficiencia de un transformador que entrega 950 W con una entrada de 1000 W.
5. ¿Por qué los transformadores solo funcionan con corriente alterna y no con continua?
6. Explica la función de un transformador de corriente (TC) en mediciones industriales.
7. ¿Qué ventajas tiene la conexión Delta-Estrella en transformadores de distribución?
8. Investiga el mantenimiento preventivo de transformadores de potencia en la industria.

\newpage

CAPÍTULO 16: SEMICONDUCTORES

16.1 Introducción a los Semiconductores

Los semiconductores son materiales cuya conductividad eléctrica se encuentra entre la de los conductores (metales) y la de los aislantes. Su conductividad puede controlarse mediante la adición de impurezas (dopaje), temperatura, luz o campos eléctricos, lo que los hace increíblemente versátiles para aplicaciones electrónicas.

El semiconductor más utilizado es el silicio (Si), seguido del germanio (Ge) y compuestos como el arseniuro de galio (GaAs). El silicio es abundante (componente principal de la arena) y su proceso de fabricación está altamente desarrollado, lo que lo convierte en la base de la industria electrónica mundial.

16.2 Estructura Cristalina y Enlaces

Los semiconductores forman estructuras cristalinas donde cada átomo comparte electrones de valencia con sus vecinos mediante enlaces covalentes. En el silicio, cada átomo tiene 4 electrones de valencia y forma 4 enlaces covalentes con átomos vecinos, creando una estructura tetraédrica.

A temperatura ambiente, algunos electrones tienen suficiente energía para romper sus enlaces covalentes, dejando "huecos" (vacantes de electrones) y convirtiéndose en electrones libres. Cada electrón libre deja atrás un hueco con carga positiva efectiva.

Este proceso de generación de pares electrón-hueco es la base de la conductividad en semiconductores intrínsecos. A medida que aumenta la temperatura, más electrones se liberan y la conductividad aumenta (a diferencia de los metales, donde la conductividad disminuye con la temperatura).

16.3 Semiconductores Intrínsecos y Extrínsecos

Semiconductor intrínseco: Es un semiconductor puro, sin impurezas. En equilibrio térmico, el número de electrones libres (n) es igual al número de huecos (p): $n = p = n_i$ (concentración intrínseca). Para el silicio a 300 K: $n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Semiconductor extrínseco: Es un semiconductor al que se han añadido impurezas (dopaje) para modificar sus propiedades eléctricas. Dependiendo del tipo de impureza, se obtiene:

Tipo N (negativo): Se añaden impurezas donadoras, elementos del grupo V (fósforo, arsénico, antimonio) que tienen 5 electrones de valencia. Cuatro forman enlaces covalentes y el quinto queda libre como electrón. En tipo N, los electrones son los portadores mayoritarios y los huecos los minoritarios: $n \gg p$.

Tipo P (positivo): Se añaden impurezas aceptoras, elementos del grupo III (boro, aluminio, galio) que tienen 3 electrones de valencia. Esto crea un déficit de electrones, es decir, un hueco adicional. En tipo P, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones los minoritarios: $p \gg n$.

La concentración de dopaje determina la conductividad del material:

- Baja dopaje: $10^{14} - 10^{16} \text{ átomos/cm}^3$
- Media dopaje: $10^{16} - 10^{18} \text{ átomos/cm}^3$
- Alta dopaje: $> 10^{18} \text{ átomos/cm}^3$ (se indica con superíndice +: N^+ , P^+)

16.4 Dopaje y Portadores de Carga

El dopaje es el proceso de introducir controladamente impurezas en el semiconductor para modificar su conductividad. Los métodos principales son:

Difusión: Las impurezas se difunden en el cristal a altas temperaturas (800-1200°C). Se usa para crear regiones dopadas en la superficie.

Implantación iónica: Los iones de impurezas se aceleran e impactan en el cristal. Permite un control más preciso de la concentración y profundidad.

Epitaxia: Crecimiento de capas cristalinas con dopaje controlado sobre un sustrato.

Portadores de carga:

- Electrones: Portadores mayoritarios en tipo N, minoritarios en tipo P.
- Huecos: Portadores mayoritarios en tipo P, minoritarios en tipo N. Un hueco se

comporta como una carga positiva que se mueve cuando electrones vecinos lo ocupan sucesivamente.

16.5 La Unión PN

La unión PN es la estructura fundamental de casi todos los dispositivos semiconductores. Se forma cuando se ponen en contacto un semiconductor tipo P y uno tipo N.

Comportamiento físico:

1. Los portadores mayoritarios (electrones de N, huecos de P) se difunden hacia el lado opuesto.
2. En la región de la unión, los electrones y huecos se recombinan.
3. Esto deja una región desprovista de portadores llamada “zona de agotamiento” o “región de deplexión”.
4. Se forma un campo eléctrico interno que se opone a la difusión adicional (potencial de barrera).
5. Para el silicio, el potencial de barrera es de aproximadamente 0.7 V.

Polarización directa: Se aplica voltaje positivo al lado P y negativo al lado N. El campo externo reduce la barrera, permitiendo el flujo de corriente cuando el voltaje supera el umbral (0.7 V para silicio).

Polarización inversa: Se aplica voltaje positivo al lado N y negativo al lado P. El campo externo aumenta la barrera, impidiendo el flujo de corriente (solo una pequeña corriente de fuga).

Ruptura: Si el voltaje inverso es suficientemente alto, se produce la ruptura de la unión. Puede ser por avalancha (ionización por impacto) o por efecto Zener (tunelamiento), según el nivel de dopaje.

16.6 El Silicio como Material Base

El silicio es el semiconductor dominante por varias razones:

- Abundancia en la corteza terrestre (27%, segundo elemento más abundante)
- Procesos de fabricación maduros y económicos
- Banda prohibida (bandgap) de 1.12 eV, adecuada para operación hasta ~150°C
- Excelente óxido nativo (SiO₂) que permite aislamiento y fabricación de transistores MOS
- Compatibilidad con procesos de fabricación a gran escala

Otros semiconductores importantes:

- Arseniuro de galio (GaAs): Mayor movilidad de electrones, usado en alta frecuencia (RF, microondas) y optoelectrónica.
- Carburo de silicio (SiC): Mayor bandgap (3.3 eV), opera a altas temperaturas y voltajes. Creciente uso en electrónica de potencia (vehículos eléctricos, inversores).
- Nitruro de galio (GaN): Alta eficiencia en potencia y RF. Usado en cargadores rápidos, estaciones base 5G.
- Germanio (Ge): Primer semiconductor usado, ahora limitado a aplicaciones específicas (alta frecuencia).

16.7 Fabricación de Dispositivos Semiconductores

La fabricación de semiconductores es un proceso complejo que requiere salas limpias (class 10 o mejor) y equipos especializados:

1. **Crecimiento del cristal:** Se obtienen lingotes de silicio monocristalino mediante el proceso Czochralski.
2. **Corte en obleas (wafers):** El lingote se corta en discos delgados (300-1000 μm).
3. **Oxidación:** Se crea una capa de SiO_2 en la superficie.
4. **Fotolitografía:** Se transfieren patrones del diseño mediante máscaras y luz ultravioleta.
5. **Grabado (etching):** Se eliminan selectivamente capas de material.
6. **Dopaje:** Se introducen impurezas por difusión o implantación iónica.
7. **Deposición de metales:** Se crean las conexiones (aluminio, cobre).
8. **Encapsulado:** El chip se monta en un encapsulado protector.

16.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Los semiconductores son la base de todos los sistemas de control electrónico en mecatrónica industrial:

Sensores: Muchos sensores modernos utilizan semiconductores (sensores Hall, de temperatura, de presión MEMS).

Procesamiento: Microcontroladores, DSP, FPGA y PLC están hechos de semiconductores.

Actuación: La electrónica de potencia (MOSFET, IGBT) controla motores, solenoides y actuadores.

Comunicación: Transceptores, aisladores y drivers de bus industrial (PROFIBUS, EtherCAT).

Acondicionamiento de señales: Amplificadores operacionales, filtros activos, convertidores ADC/DAC.

Ejercicios del Capítulo 16

1. Explica la diferencia entre semiconductores intrínsecos y extrínsecos.
2. ¿Qué son los portadores mayoritarios y minoritarios en semiconductores tipo N y tipo P?
3. Describe el proceso de dopaje y su efecto en la conductividad del semiconductor.
4. ¿Qué es la unión PN y cómo se forma la zona de agotamiento?
5. Explica el comportamiento de una unión PN con polarización directa e inversa.
6. ¿Por qué el silicio es el semiconductor más utilizado en la industria electrónica?
7. Investiga las ventajas del SiC y GaN sobre el silicio en aplicaciones de potencia.
8. Describe brevemente el proceso de fabricación de un circuito integrado desde el lingote de silicio hasta el chip encapsulado.

\newpage

CAPÍTULO 17: DIODOS Y RECTIFICADORES

17.1 El Diodo Semiconductor

Un diodo es un dispositivo semiconductor de dos terminales que permite el flujo de corriente principalmente en una dirección. Es el dispositivo semiconductor más simple y fundamental, formado por una unión PN.

Símbolo y terminales:

- Ánodo (A): Terminal del lado P (positivo)
- Cátodo (K): Terminal del lado N (negativo)
- La flecha en el símbolo indica la dirección de la corriente convencional (de ánodo a cátodo)

Curva característica V-I:

- Polarización directa: Con voltaje positivo en el ánodo respecto al cátodo:
- $V < 0.7 \text{ V}$ (para silicio): Corriente despreciable
- $V \geq 0.7 \text{ V}$: La corriente aumenta exponencialmente
- $V \approx 0.7 \text{ V}$: Caída de voltaje típica en conducción (0.3 V para germanio, 0.7 V para silicio)
 - Polarización inversa: Con voltaje positivo en el cátodo:
 - Corriente de fuga muy pequeña (nA a μA)
 - Hasta alcanzar el voltaje de ruptura (V_{BR})
 - Por encima de V_{BR} : Corriente aumenta abruptamente (efecto Zener o avalancha)

17.2 Tipos de Diodos

Diodo rectificador: Diseñado para altas corrientes y voltajes inversos. Usado en fuentes de alimentación. Ejemplo: 1N4007 (1000 V, 1 A).

Diodo Zener: Diseñado para operar en la zona de ruptura inversa a un voltaje preciso. Usado como regulador de voltaje de referencia.

Diodo Schottky: Unión metal-semiconductor. Menor caída directa (0.2-0.4 V) y conmutación muy rápida. Usado en fuentes conmutadas de alta frecuencia.

LED (Light Emitting Diode): Emite luz cuando conduce. Polarización directa. Materiales: GaAsP (rojo), GaN (azul), InGaN (blanco). Caída directa: 1.8-3.5 V según color.

Fotodiodo: Genera corriente cuando recibe luz (polarización inversa). Usado en sensores de luz, receptores de fibra óptica.

Diodo láser: Emite luz coherente (láser). Usado en comunicaciones ópticas, lectores de CD/DVD, punteros láser.

Diodo varactor (varicap): Capacitancia variable con la polarización inversa. Usado en sintonizadores de radio y TV.

Diodo TVS (Transient Voltage Suppressor): Protege contra sobretensiones transitorias. Similar al Zener pero diseñado para alta potencia de pico.

17.3 Rectificación de Media Onda

La rectificación es el proceso de convertir corriente alterna (AC) en corriente continua pulsante (DC). Es la aplicación más común de los diodos.

Rectificador de media onda:

- Un solo diodo en serie con la carga
- Durante el semiciclo positivo: el diodo conduce (ánodo positivo)
- Durante el semiciclo negativo: el diodo no conduce (cátodo positivo)
- La salida es un tren de pulsos positivos (solo medio ciclo)

Parámetros:

- Voltaje promedio (DC) de salida: $V_{DC} = V_p / \pi \approx 0.318 V_p$
- Frecuencia de rizado: igual a la frecuencia de entrada
- Factor de rizado: 1.21 (121%)

Desventajas: Baja eficiencia (solo utiliza medio ciclo), alto rizado.

17.4 Rectificación de Onda Completa

Rectificador de onda completa con transformador de derivación central (center tap):

- Dos diodos y transformador con derivación central

- Cada diodo conduce en un semiciclo alterno
- La salida contiene ambos semiciclos rectificadas

Parámetros:

- $V_{DC} = 2V_p / \pi \approx 0.637 V_p$
- Frecuencia de rizado: $2f_{entrada}$
- Factor de rizado: 0.48 (48%)

Rectificador de puente (puente de Graetz):

- Cuatro diodos en configuración de puente
- No requiere transformador con derivación central
- Es la configuración más común en fuentes de alimentación
- Durante el semiciclo positivo: conducen D1 y D2
- Durante el semiciclo negativo: conducen D3 y D4
- La corriente en la carga siempre fluye en la misma dirección

Parámetros: Mismos que onda completa con center tap.

17.5 Filtrado de la Señal Rectificada

La salida de un rectificador es pulsante, no una DC constante. Para obtener una DC más estable, se añade un filtro capacitivo:

Filtro con capacitor:

- Un capacitor electrolítico en paralelo con la carga
- El capacitor se carga durante los picos de la señal rectificada
- Se descarga lentamente a través de la carga durante los valles
- El voltaje de salida se “suaviza” pero mantiene un rizado

Rizado (ripple): Es la variación residual del voltaje alrededor del valor DC. Se calcula:

$$V_{rizado} \approx I_{carga} / (2f \times C) \text{ (para rectificador de onda completa)}$$

Donde f es la frecuencia de la red (50/60 Hz), C la capacitancia del filtro e I_{carga} la corriente de carga.

Ejemplo: Fuente de 12 V que entrega 1 A, con rectificador de onda completa a 50 Hz y capacitor de 2200 µF:

$$V_{rizado} \approx 1 / (2 \times 50 \times 2200 \times 10^{-6}) = 1 / 0.22 = 4.55 \text{ V (pico a pico)}$$

Para reducir el rizado, se necesita mayor capacitancia o usar filtros más complejos (RC, LC).

17.6 Regulación de Voltaje

Después del filtrado, el voltaje DC todavía varía con la carga y la entrada. La regulación estabiliza el voltaje de salida:

Regulación con diodo Zener:

- Diodo Zener en polarización inversa (en paralelo con la carga)
- Mantiene un voltaje constante igual a V_Z en sus terminales
- Limitaciones: baja potencia, eficiencia limitada, voltaje fijo

Reguladores integrados de tres terminales:

- Serie 78xx (positivos): 7805 (+5V), 7812 (+12V), 7824 (+24V)
- Serie 79xx (negativos): 7905 (-5V), 7912 (-12V)
- Proporcionan regulación precisa, protección térmica y contra cortocircuitos
- Corriente típica: 1 A (con disipador adecuado)

Reguladores conmutados (SMPS):

- Alta eficiencia (>85%)
- Tamaño reducido
- Más complejos (requieren inductores, MOSFET, controladores PWM)
- Usados en fuentes de alimentación modernas, cargadores, equipos industriales

17.7 Aplicaciones de Diodos en Mecatrónica

Fuentes de alimentación: Rectificación de AC a DC para alimentar PLC, sensores, actuadores y circuitos de control.

Protección contra polarización inversa: Diodo en serie con la entrada de alimentación para evitar daños por conexión incorrecta de batería.

Diodo de rueda libre (flyback): Diodo en paralelo con bobinas de relés, contactores y solenoides para suprimir picos de voltaje al desconectarlos.

Protección de entradas: Diodos en configuraciones de protección (clamping) limitan voltajes en entradas de PLC y microcontroladores.

Detección de cruce por cero: Circuitos con diodos detectan el paso por cero de la AC para control de fase (dimming, control de potencia).

Puentes rectificadores modulares: En variadores de frecuencia y fuentes industriales.

Sensores: Fotodiodos en sensores de presencia, barreras de luz, codificadores.

17.8 Selección y Consideraciones Prácticas

Parámetros clave para seleccionar un diodo:

- Corriente directa máxima (I_F): Corriente continua que puede conducir sin dañarse.
- Voltaje inverso máximo (V_{RRM}): Voltaje inverso que soporta sin entrar en ruptura.
- Caída de voltaje directo (V_F): Típicamente 0.7 V para silicio, 0.3 V para Schottky.
- Tiempo de recuperación inversa (t_{rr}): Tiempo para bloquearse al conmutar de conducción a corte. Importante en alta frecuencia.

Consideraciones térmicas:

- La potencia disipada: $P = V_F \times I_F$
- Temperatura máxima de unión: típicamente 150-175°C
- Uso de disipadores cuando la potencia lo requiere
- La corriente nominal se reduce con la temperatura (derating)

Ejercicios del Capítulo 17

1. Dibuja la curva característica V-I de un diodo de silicio, indicando las regiones de polarización directa, inversa y ruptura.
2. Calcula el voltaje DC de salida de un rectificador de media onda con $V_p = 20$ V (despreciando la caída del diodo).
3. Diseña un rectificador de onda completa con puente de diodos para obtener 12 V DC de una entrada de 12 V AC RMS.
4. Calcula el rizado de una fuente con rectificador de onda completa a 60 Hz, capacitor de 1000 μ F y carga de 500 mA.
5. ¿Por qué se usa un diodo de rueda libre en paralelo con una bobina de relé?
6. Dimensiona la resistencia limitadora para un LED rojo ($V_F = 2$ V, $I_F = 20$ mA) alimentado a 12 V.
7. Explica la diferencia entre un diodo rectificador y un diodo Zener en términos de aplicación.
8. Investiga el funcionamiento de un regulador 7812 y sus aplicaciones típicas en la industria.

\newpage

CAPÍTULO 18: TRANSISTORES BIPOLARES

18.1 Introducción al Transistor Bipolar

El transistor bipolar de unión (BJT - Bipolar Junction Transistor) fue inventado en 1947 en los Laboratorios Bell por John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley. Este invento revolucionó la electrónica y sentó las bases de la era digital. El BJT es un dispositivo de tres terminales que puede amplificar señales eléctricas y funcionar como interruptor controlado.

El nombre “bipolar” se debe a que en su funcionamiento intervienen ambos tipos de portadores de carga: electrones y huecos. A diferencia de los transistores de efecto de campo (FET), que son unipolares.

18.2 Estructura y Tipos

El BJT está formado por tres regiones de semiconductor dopadas alternadamente: dos regiones del mismo tipo separadas por una región del tipo opuesto.

Tipos según estructura:

- NPN: Dos regiones tipo N (emisor y colector) con una región tipo P (base) entre ellas.
- PNP: Dos regiones tipo P (emisor y colector) con una región tipo N (base) entre ellas.

Terminales:

- Emisor (E): Región fuertemente dopada que inyecta portadores a la base.
- Base (B): Región delgada y ligeramente dopada que controla el flujo de portadores.
- Colector (C): Región que recoge los portadores provenientes del emisor.

Símbolos:

- NPN: Flecha del emisor hacia afuera (sale de la base)
- PNP: Flecha del emisor hacia adentro (entra a la base)

La flecha en el emisor indica la dirección de la corriente convencional cuando la unión base-emisor está polarizada directamente.

18.3 Principio de Funcionamiento

El BJT funciona mediante un mecanismo de control de corriente. Una pequeña corriente en la base controla una corriente mucho mayor entre colector y emisor.

Polarización (para NPN):

1. Unión base-emisor (BE): Polarizada directamente ($V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$ para silicio).
2. Unión base-colector (BC): Polarizada inversamente.

Flujo de portadores (NPN en modo activo):

1. Los electrones del emisor (tipo N, fuertemente dopado) son inyectados hacia la base.
2. La base es muy delgada y ligeramente dopada, por lo que la mayoría de los electrones la atraviesan sin recombinarse.
3. Los electrones llegan al colector (tipo N), donde son recogidos por el voltaje positivo del colector.
4. Solo una pequeña fracción de los electrones se recombina en la base, constituyendo la corriente de base (I_B).

Relaciones fundamentales:

$$I_E = I_C + I_B \text{ (Ley de Kirchhoff)}$$

$$I_C = \beta \times I_B \text{ (Ganancia de corriente)}$$

$$I_E = (\beta + 1) \times I_B \approx \beta \times I_B \text{ (para } \beta \text{ grande)}$$

Donde β (h_{FE}) es la ganancia de corriente en DC, típicamente entre 20 y 1000.

$\alpha = I_C / I_E = \beta / (\beta + 1)$ es la ganancia de corriente en base común.

18.4 Configuraciones del BJT

Emisor común (EC):

- Entrada: base, Salida: colector, Común: emisor
- Alta ganancia de voltaje y corriente
- Inversión de fase (salida desfasada 180°)
- Impedancia de entrada media, salida media
- Configuración más utilizada

Base común (BC):

- Entrada: emisor, Salida: colector, Común: base
- Alta ganancia de voltaje, ganancia de corriente ≈ 1
- No invierte fase
- Baja impedancia de entrada, alta de salida
- Usada en amplificadores de alta frecuencia

Colector común (CC) o seguidor de emisor:

- Entrada: base, Salida: emisor, Común: colector
- Ganancia de voltaje ≈ 1 , alta ganancia de corriente
- No invierte fase
- Alta impedancia de entrada, baja de salida
- Usado como adaptador de impedancias (buffer)

18.5 Puntos de Operación y Recta de Carga

El punto de operación (punto Q) de un BJT se define por la corriente de colector (I_{CQ}) y el voltaje colector-emisor (V_{CEQ}) en ausencia de señal.

Recta de carga:

Para un circuito con resistencia de colector R_C y fuente V_{CC} :

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \times R_C$$

La recta de carga conecta los puntos:

- Corte: $I_C = 0$, $V_{CE} = V_{CC}$
- Saturación: $V_{CE} \approx 0$, $I_C = V_{CC} / R_C$

Regiones de operación:

1. Corte: $V_{BE} < 0.7 \text{ V}$, $I_B = 0$, $I_C = 0$ (transistor apagado)
2. Activa: $V_{BE} \approx 0.7 \text{ V}$, $I_C = \beta \times I_B$, $V_{CE} > V_{CE}(\text{sat})$ (amplificación)
3. Saturación: $V_{BE} > 0.7 \text{ V}$, $I_C < \beta \times I_B$, $V_{CE} \approx 0.2 \text{ V}$ (transistor completamente encendido)

18.6 El BJT como Interruptor

En aplicaciones de mecatrónica industrial, el BJT se usa frecuentemente como interruptor (conmutación), operando entre corte y saturación:

Circuito interruptor con BJT NPN:

- Base controlada por señal digital (0-5 V, 0-24 V)

- Colector conectado a la carga (relé, LED, motor pequeño)
- Emisor a tierra (GND)

Cálculo de la resistencia de base:

$$R_B = (V_{\text{control}} - V_{BE}) / I_B$$

Donde I_B debe ser suficiente para saturar el transistor:

$$I_B > I_C(\text{carga}) / \beta_{\text{min}}$$

Ejemplo: Controlar un relé de 12 V que consume 100 mA con un transistor con $\beta_{\text{min}} = 100$, señal de control de 5 V:

$$I_B > 0.1 / 100 = 1 \text{ mA}$$

$$R_B < (5 - 0.7) / 0.001 = 4300 \Omega$$

Se elige $R_B = 3300 \Omega$ (valor comercial, da $I_B = 1.3 \text{ mA}$)

18.7 El BJT como Amplificador

En la región activa, el BJT amplifica señales pequeñas. Un amplificador en emisor común típico incluye:

- Resistencias de polarización (R_1, R_2) que establecen el punto Q
- Resistencia de colector (R_C) que convierte la corriente en voltaje
- Resistencia de emisor (R_E) que estabiliza térmicamente el circuito
- Capacitores de acoplo que bloquean DC y pasan AC
- Capacitor de desvío (bypass) del emisor para máxima ganancia

Ganancia de voltaje aproximada:

$$A_V \approx -R_C / r_e$$

Donde $r_e \approx 25 \text{ mV} / I_{CQ}$ (resistencia dinámica del emisor).

Para una señal pequeña, un amplificador bien diseñado puede tener ganancias de 100 a 500.

18.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Interfaz de salida de PLC: Los transistores BJT conmutan cargas DC (relés, solenoides, lámparas) desde las salidas de PLC. Las salidas de transistor (colector abierto) son comunes en PLC compactos.

Drivers de motores DC pequeños: Puentes H con transistores BJT para control bidireccional de motores DC de baja potencia.

Amplificación de sensores: Acondicionamiento de señales de sensores analógicos (termopares, RTD, celdas de carga) usando amplificadores con BJT.

Circuitos de alarma: Detectores de nivel, sensores de presencia con salida a transistor.

Fuentes de alimentación lineales: Transistores de paso (pass transistors) en reguladores serie de fuentes de alimentación.

Control de potencia: Circuitos de control de fase con TRIAC disparados por circuitos con BJT.

Osciladores: Circuitos de temporización y generación de señales (astables, monoestables).

Ejercicios del Capítulo 18

1. Explica la diferencia entre transistores NPN y PNP en términos de estructura y polarización.
2. Para un BJT con $\beta = 200$ e $I_B = 50 \mu\text{A}$, calcula I_C e I_E .
3. Diseña un circuito interruptor con BJT NPN para activar una lámpara de 12 V / 6 W desde una señal de 5 V.
4. ¿Qué son las tres regiones de operación de un BJT y cómo se diferencian?
5. Calcula la resistencia de base necesaria para saturar un BJT 2N2222 ($\beta_{\text{min}} = 100$) que controla una carga de 500 mA con señal de 3.3 V.
6. Explica el funcionamiento de un amplificador en emisor común.
7. ¿Por qué es importante la estabilización térmica en circuitos con BJT?
8. Investiga las diferencias entre los transistores BJT y MOSFET para aplicaciones de conmutación industrial.

\newpage

CAPÍTULO 19: TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO

19.1 Introducción a los FET

Los transistores de efecto de campo (FET - Field Effect Transistor) son dispositivos semiconductores de tres terminales que controlan el flujo de corriente mediante un campo eléctrico. A diferencia de los BJT, que son controlados por corriente, los FET son controlados por voltaje, lo que les confiere ventajas importantes: alta impedancia de entrada, bajo consumo de control y facilidad de integración.

Los FET son unipolares: solo un tipo de portador participa en la conducción (electrones en MOSFET de canal N, huecos en MOSFET de canal P). Esto los hace más rápidos que los BJT en conmutación.

19.2 JFET (Junction FET)

El JFET es el tipo más simple de FET. Consiste en una barra de semiconductor (canal) con un contacto en cada extremo (drenador y fuente) y una unión PN en un lado (puerta).

Terminales:

- Drenador (D): Por donde sale la corriente
- Fuente (S): Por donde entra la corriente
- Puerta (G): Controla el flujo de corriente

Tipos:

- JFET de canal N: Canal tipo N, puerta tipo P
- JFET de canal P: Canal tipo P, puerta tipo N

Principio de funcionamiento:

1. Con voltaje V_{DS} aplicado entre drenador y fuente, circula corriente I_D .
2. La puerta se polariza inversamente respecto a la fuente (V_{GS} negativo para canal N).
3. Al aumentar el voltaje inverso de puerta, la zona de agotamiento se expande

hacia el canal.

4. El canal se estrecha, aumentando la resistencia y reduciendo I_D .

5. Con suficiente voltaje inverso ($V_{GS(off)}$), el canal se cierra completamente.

Características:

- Alta impedancia de entrada ($10^8 - 10^{10} \Omega$)
- Operación con voltaje de puerta negativo (canal N)
- Baja transconductancia (ganancia) comparado con BJT
- Usado principalmente en amplificadores de instrumentación y circuitos de entrada

19.3 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET)

El MOSFET es el tipo de transistor más utilizado en la actualidad. Constituye la base de los circuitos integrados digitales y analógicos, así como de la electrónica de potencia.

Estructura:

- Sustrato de silicio (tipo P para canal N, tipo N para canal P)
- Regiones de fuente y drenador dopadas (tipo N para canal N)
- Capa de óxido de silicio (SiO_2) aislante sobre el canal
- Electrodo de puerta metálica o de polisilicio sobre el óxido

Terminales:

- Drenador (D), Fuente (S), Puerta (G), Sustrato (B, normalmente conectado a fuente)

Tipos de MOSFET:

Tipo de empobrecimiento (depletion): Conduce con $V_{GS} = 0$, se apaga con V_{GS} negativo (canal N). Menos comunes hoy en día.

Tipo de enriquecimiento (enhancement): No conduce con $V_{GS} = 0$, necesita voltaje positivo en puerta para crear el canal (canal N). Es el tipo más común.

Principio de funcionamiento (MOSFET de enriquecimiento canal N):

1. Con $V_{GS} = 0$: No hay canal, $I_D = 0$ (transistor apagado).
2. Al aplicar V_{GS} positivo: Se crea un campo eléctrico que atrae electrones a la superficie del sustrato P, formando un canal N inducido.
3. $V_{GS(threshold)}$: Voltaje mínimo para formar el canal (típicamente 1-4 V).
4. Con $V_{GS} > V_{th}$: El canal conduce, permitiendo el flujo I_D .
5. A mayor V_{GS} , más ancho el canal y mayor I_D .

19.4 Características del MOSFET

Regiones de operación:

1. Región de corte: $V_{GS} < V_{th}$, $I_D = 0$
2. Región lineal (triodo): $V_{GS} > V_{th}$ y $V_{DS} < V_{GS} - V_{th}$, I_D es aproximadamente proporcional a V_{DS}
3. Región de saturación (activa): $V_{GS} > V_{th}$ y $V_{DS} > V_{GS} - V_{th}$, I_D es aproximadamente constante (controlada por V_{GS})

Relación corriente-voltaje (región de saturación):

$$I_D = (k/2) \times (V_{GS} - V_{th})^2$$

Donde k es el parámetro de transconductancia del MOSFET.

Resistencia de encendido ($R_{DS(on)}$): Resistencia entre drenador y fuente cuando el MOSFET está completamente encendido. Típicamente desde unos $m\Omega$ hasta varios Ω .

19.5 MOSFET de Potencia

Los MOSFET de potencia están diseñados para manejar altas corrientes y voltajes. Son fundamentales en la electrónica de potencia industrial.

Estructura vertical (VDMOS): El drenador está en la parte inferior del chip y la fuente/puerta en la superior. Esto permite manejar mayores corrientes y voltajes.

Características clave para MOSFET de potencia:

- V_{DSS} : Voltaje máximo drenador-fuente (hasta 1500 V)
- I_D : Corriente máxima de drenador (hasta 500 A)
- $R_{DS(on)}$: Resistencia de encendido (desde 1 $m\Omega$)
- Q_g : Carga total de puerta (determina velocidad de conmutación)
- Tiempos de conmutación: t_{on} , t_{off} (típicamente ns)

Ventajas sobre BJT en potencia:

- Conmutación más rápida (menores pérdidas en alta frecuencia)
- Control por voltaje (menor potencia de control)
- No tiene efecto de segunda ruptura (más robusto)
- Facilidad de paralelización (coeficiente de temperatura positivo)

19.6 Puertas Lógicas CMOS

La tecnología CMOS (Complementary MOS) utiliza pares de MOSFET de canal N y canal P para implementar funciones lógicas con muy bajo consumo estático.

Inversor CMOS:

- MOSFET de canal P (arriba, conectado a V_{DD})
- MOSFET de canal N (abajo, conectado a GND)
- Entrada conectada a ambas puertas
- Cuando entrada es 0: PMOS conduce, NMOS corta → salida = 1 (V_{DD})
- Cuando entrada es 1: PMOS corta, NMOS conduce → salida = 0 (GND)

Ventajas de CMOS:

- Consumo estático casi nulo (solo consume durante conmutación)
- Alta inmunidad al ruido
- Amplio rango de voltaje de alimentación (2-18 V para lógica 4000, 3-5.5 V para HC)
- Alta densidad de integración

19.7 Aplicaciones de FET en Mecatrónica

Electrónica de potencia:

- Variadores de frecuencia: MOSFET e IGBT en inversores para control de motores AC.
- Fuentes conmutadas (SMPS): MOSFET como elemento de conmutación.
- Controladores de motores DC: Puentes H con MOSFET.
- Convertidores DC-DC: Buck, boost, buck-boost.

Protección de circuitos:

- MOSFET como interruptor de carga (load switch).
- Circuitos de protección contra polarización inversa con MOSFET de canal P.
- Limitadores de corriente de arranque (inrush current limiter).

Interfaz de sensores:

- Amplificadores de instrumentación con JFET de entrada (alta impedancia).
- Seguidores de voltaje para sensores de alta impedancia (piezoeléctricos).
- Multiplexores analógicos con MOSFET.

Sistemas digitales:

- Microcontroladores y DSP fabricados en tecnología CMOS.

- Memorias (SRAM, DRAM, Flash).
- FPGA y CPLD.

Automoción:

- Control de inyectores, bombas, ventiladores.
- Gestión de baterías en vehículos eléctricos.
- Electrónica de carrocería y confort.

19.8 Comparación BJT vs MOSFET

Propiedad	BJT	MOSFET
Control	Corriente (I_B)	Voltaje (V_{GS})
Impedancia de entrada	Baja ($k\Omega$)	Muy alta ($M\Omega - G\Omega$)
Ganancia	$\beta = 20-1000$	$g_m = 1-100 S$
Velocidad de conmutación	Media (μs)	Alta (ns)
Pérdidas en conducción	$V_{CE(sat)} \approx 0.2 V$	$I_D \times R_{DS(on)}$
Facilidad de paralelización	Difícil (necesita resistencias de emisor)	Fácil ($R_{DS(on)}$ aumenta con T)
Costo por amperio	Menor (baja potencia)	Menor (media/alta potencia)
Robustez	Susceptible a segunda ruptura	Más robusto

Ejercicios del Capítulo 19

1. Explica la diferencia fundamental entre un JFET y un MOSFET en términos de construcción.
2. ¿Qué ventajas tiene un MOSFET sobre un BJT para aplicaciones de conmutación de alta frecuencia?
3. Dibuja el circuito de un inversor CMOS y explica su funcionamiento.
4. ¿Qué significa $R_{DS(on)}$ y por qué es importante en MOSFET de potencia?
5. Calcula la potencia disipada en un MOSFET con $R_{DS(on)} = 0.1 \Omega$ conduciendo 10 A.

6. Explica cómo funciona un MOSFET de enriquecimiento de canal N y la formación del canal inducido.
7. ¿Por qué los MOSFET de potencia son más adecuados que los BJT para fuentes conmutadas?
8. Investiga el IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) como evolución del MOSFET de potencia para aplicaciones de alta tensión.

\newpage

CAPÍTULO 20: TIRISTORES Y TRIACS

20.1 Introducción a los Tiristores

Los tiristores son dispositivos semiconductores de potencia con estructura de cuatro capas PNPN. Funcionan como interruptores biestables: pueden estar en estado de conducción (ON) o de bloqueo (OFF), pero una vez activados, permanecen conduciendo incluso si la señal de disparo desaparece, siempre que la corriente de mantenimiento se mantenga.

El tiristor básico también se conoce como SCR (Silicon Controlled Rectifier). Es el dispositivo de potencia más antiguo y robusto, inventado en 1956 por General Electric.

20.2 El SCR (Rectificador Controlado de Silicio)

Estructura: Cuatro capas alternadas PNPN, con tres terminales:

- Ánodo (A): Terminal positivo
- Cátodo (K): Terminal negativo
- Puerta (G): Terminal de control

Funcionamiento:

1. Polarización directa (ánodo positivo): El SCR está en estado de bloqueo (no conduce), aunque esté polarizado directamente.
2. Disparo: Un pulso de corriente positivo en la puerta (I_{GT}) inicia la conducción.
3. Una vez disparado, el SCR permanece en conducción aunque se retire la señal de puerta (efecto de enclavamiento o latch).
4. El SCR deja de conducir solo cuando la corriente de ánodo cae por debajo de la corriente de mantenimiento (I_H), lo que ocurre naturalmente en cada cruce por cero en AC.

Parámetros principales:

- V_{RRM} : Voltaje inverso repetitivo máximo (hasta 8000 V)
- V_{DRM} : Voltaje directo repetitivo máximo
- $I_T(AV)$: Corriente promedio (hasta 5000 A)

- I_{GT}: Corriente de disparo de puerta (típicamente 1-100 mA)
- V_{GT}: Voltaje de disparo de puerta (típicamente 1-3 V)
- I_H: Corriente de mantenimiento (típicamente 10-100 mA)
- dv/dt: Tasa máxima de cambio de voltaje (V/μs)

20.3 Circuitos de Disparo para SCR

Disparo por resistencia:

- Resistencia variable en serie con la puerta
- Simple pero sensible a temperatura y variaciones

Disparo por diodo de disparo (DIAC):

- DIAC conduce cuando el voltaje en sus terminales supera V_{BO} (típicamente 30 V)
- Proporciona un pulso de disparo bien definido
- Usado comúnmente con TRIAC en controles de fase

Disparo por pulso (con transistor o optoacoplador):

- Señal de control aislada galvánicamente
- Permite control preciso del ángulo de disparo
- Usado en controladores industriales y variadores

Disparo por circuito integrado (UJT, PUT, microcontrolador):

- Temporizadores precisos para control de fase
- Sincronización con el cruce por cero de la AC

20.4 Control de Fase con SCR

El control de fase es la técnica más común para regular potencia en AC usando SCR o TRIAC. Consiste en retardar el disparo del tiristor dentro de cada ciclo de AC, controlando así la fracción de la onda que se entrega a la carga.

Ángulo de disparo (α): Ángulo (en grados eléctricos) en el que se dispara el tiristor en cada semiciclo:

- $\alpha = 0^\circ$: Conducción durante todo el semiciclo (potencia máxima)
- $\alpha = 90^\circ$: Conducción durante medio semiciclo (50% potencia)
- $\alpha = 180^\circ$: Sin conducción (potencia cero)

Potencia entregada:

$$P = P_{\text{máx}} \times (1 - \alpha/180^\circ + \text{sen}(2\alpha)/(2\pi))$$

Aplicaciones de control de fase:

- Regulación de iluminación incandescente (dimmers)
- Control de velocidad de motores universales
- Control de temperatura en calentadores
- Arranque suave de motores

20.5 EL TRIAC

El TRIAC (Triode for Alternating Current) es un dispositivo bidireccional que puede conducir corriente en ambos sentidos. Es equivalente a dos SCR conectados en antiparalelo con una puerta común.

Estructura y funcionamiento:

- Tres terminales: MT1, MT2 (terminales principales) y G (puerta)
- Puede dispararse con polaridad positiva o negativa en la puerta respecto a MT1
- Conduce en ambos semiciclos de la AC
- Se apaga cuando la corriente cae por debajo de I_H (cruce por cero)

Cuadrantes de disparo:

- Q1: MT2 positivo, G positivo (disparo más sensible)
- Q2: MT2 positivo, G negativo
- Q3: MT2 negativo, G negativo
- Q4: MT2 negativo, G positivo (menos sensible, evitar)

Aplicaciones:

- Control de iluminación (dimmers domésticos)
- Control de velocidad de herramientas eléctricas
- Control de temperatura (calentadores)
- Relés de estado sólido (SSR) para AC

Limitaciones:

- Menor capacidad de dv/dt que los SCR
- Corriente de disparo generalmente mayor
- No adecuado para cargas altamente inductivas sin protección RC (snubber)

20.6 Otros Tiristores

GTO (Gate Turn-Off thyristor): Puede apagarse mediante un pulso negativo en la puerta, eliminando la limitación de tener que esperar el cruce por cero. Usado en inversores de alta potencia.

MCT (MOS Controlled Thyristor): Combina MOSFET y tiristor. Se enciende y apaga mediante señal de puerta MOS. Alta velocidad y capacidad de corriente.

IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor): Evolución del GTO para altas potencias. Usado en variadores de media tensión, sistemas de tracción.

RCT (Reverse Conducting Thyristor): SCR con diodo antiparalelo integrado.

LASCR (Light Activated SCR): Disparado por luz. Usado en sistemas de alta tensión donde el aislamiento es crítico (válvulas HVDC).

20.7 Protección de Tiristores

Protección contra dv/dt :

- Altas velocidades de cambio de voltaje pueden disparar el tiristor espuriamente.
- Solución: circuito snubber RC en paralelo con el tiristor.
- Valores típicos: $R = 10-100 \Omega$, $C = 0.1-1 \mu F$.

Protección contra di/dt :

- Altas velocidades de cambio de corriente pueden dañar la unión en el encendido.
- Solución: inductancia serie para limitar di/dt .

Protección contra sobretensión:

- Varistores (MOV) en la entrada.
- Supresores TVS.
- Descargadores de gas (GDT).

Protección térmica:

- Disipadores dimensionados adecuadamente.
- Ventilación forzada si es necesario.
- Protección por temperatura (termostato, PTC).

20.8 Aplicaciones en Mecatrónica Industrial

Control de motores AC:

- Arrancadores suaves (soft starters) con SCR antiparalelo.
- Control de velocidad de motores universales.
- Inversores de frecuencia (en combinación con IGBT).

Control de temperatura:

- Hornos eléctricos industriales controlados por SCR.

- Control de fase o ciclo integral (zero-crossing).
- Estaciones de soldadura.

Relés de estado sólido (SSR):

- Reemplazan relés electromecánicos en AC.
- Ventajas: sin partes móviles, vida útil ilimitada, conmutación silenciosa.
- Desventajas: mayor caída de voltaje, necesidad de disipador.

Fuentes de alimentación:

- PFC (Power Factor Correction) con SCR.
- Pre-carga de capacitores (inrush current limiting).
- Conmutación de bancos de capacitores.

Soldadura:

- Control de corriente en soldadoras por resistencia.
- Soldadura por puntos con control preciso de tiempo y corriente.

Sistemas de tracción:

- Control de motores en trenes, tranvías, vehículos eléctricos (GTO, IGCT).

Ejercicios del Capítulo 20

1. Explica la diferencia fundamental entre un SCR y un TRIAC.
2. ¿Por qué un SCR permanece conduciendo después de retirar el pulso de disparo?
3. ¿Qué es el control de fase y cómo se regula la potencia con un SCR?
4. Calcula la potencia entregada a una carga de 1000 W con ángulo de disparo de 60° .
5. ¿Qué es un circuito snubber y por qué es necesario en circuitos con tiristores?
6. Explica las ventajas de un SSR (relé de estado sólido) sobre un relé electromecánico.
7. Diseña un circuito básico de control de fase con DIAC y TRIAC para una lámpara.
8. Investiga la aplicación de GTO o IGCT en sistemas de tracción ferroviaria.

\newpage

CAPÍTULO 21: FUENTES DE ALIMENTACIÓN

21.1 Clasificación de Fuentes de Alimentación

Las fuentes de alimentación son dispositivos que convierten la energía eléctrica de una forma a otra, proporcionando el voltaje y corriente adecuados para alimentar equipos electrónicos e industriales. Son fundamentales en cualquier sistema mecatrónico.

Clasificación según topología:

Fuentes lineales: Utilizan transformador, rectificador, filtro y regulador lineal. Ventajas: bajo ruido, simplicidad, buena regulación. Desventajas: baja eficiencia (30-60%), gran tamaño y peso.

Fuentes conmutadas (SMPS - Switched Mode Power Supply): Utilizan conmutación de alta frecuencia (20 kHz - 1 MHz) con transformadores pequeños. Ventajas: alta eficiencia (70-95%), tamaño compacto, bajo peso. Desventajas: mayor ruido electromagnético, complejidad.

Clasificación según aplicación:

- Fuentes de laboratorio: Variables, precisas, multifunción.
- Fuentes industriales: Fijas, robustas, para PLC y sensores (24 V DC).
- Fuentes de PC: Múltiples voltajes de salida (3.3V, 5V, 12V, -12V).
- Cargadores de baterías: Curva de carga específica (IU, IUI).

21.2 Fuentes Lineales

Etapas de una fuente lineal:

1. Transformador: Reduce el voltaje de AC a un nivel adecuado.
2. Rectificador: Convierte AC en DC pulsante (puente de diodos).
3. Filtro: Capacitor electrolítico que suaviza la DC (reduce rizado).
4. Regulador: Mantiene el voltaje de salida constante.

Regulador lineal serie:

- Transistor de paso (pass transistor) en serie con la carga.

- Circuito de control compara V_{salida} con $V_{\text{referencia}}$.
- Ajusta la conducción del transistor para mantener V_{salida} constante.
- La diferencia $V_{\text{entrada}} - V_{\text{salida}}$ se disipa como calor en el transistor.

Pérdidas en regulador lineal:

$$P_{\text{pérdida}} = (V_{\text{entrada}} - V_{\text{salida}}) \times I_{\text{salida}}$$

Ejemplo: Fuente de 12 V desde 24 V no regulado, entregando 2 A:

$$P_{\text{pérdida}} = (24 - 12) \times 2 = 24 \text{ W (eficiencia del 50%)}$$

Ventajas:

- Bajo rizado y ruido (ideal para circuitos analógicos sensibles)
- Respuesta transitoria rápida
- Diseño simple, bajo costo
- Sin interferencia electromagnética (EMI)

Desventajas:

- Baja eficiencia (especialmente con grandes diferencias $V_{\text{entrada}} - V_{\text{salida}}$)
- Necesita grandes disipadores de calor
- Voluminoso (transformador de 50/60 Hz pesado)
- Solo puede reducir voltaje (buck)

21.3 Fuentes Conmutadas (SMPS)

Topologías principales:

Buck (reductor): Reduce el voltaje DC de entrada a un DC menor de salida. MOSFET conmutador, diodo, inductor, capacitor de salida.

Boost (elevador): Aumenta el voltaje DC de entrada a un DC mayor de salida. MOSFET, inductor, diodo, capacitor.

Buck-Boost (reductor-elevador): Puede reducir o aumentar el voltaje. Invierte la polaridad.

Flyback: Usa un transformador acoplador. Proporciona aislamiento galvánico. Común en fuentes de baja potencia (<150 W).

Forward: Similar a flyback pero con mejor eficiencia. Para potencias medias (150-500 W).

Push-Pull, Half-Bridge, Full-Bridge: Para altas potencias (>500 W). Múltiples MOSFET en configuraciones de puente.

Control PWM:

- Un circuito de control (PWM IC) genera pulsos de frecuencia fija (típicamente 50-200 kHz).
- El ciclo de trabajo (duty cycle) determina el voltaje de salida.
- $D = t_{on} / T$, $V_{salida} = D \times V_{entrada}$ (para buck).

Regulación por retroalimentación:

- Optoacoplador aísla el lado de salida del de control.
- El circuito PWM ajusta el duty cycle para mantener V_{salida} constante.
- Compensación de lazo de control para estabilidad.

21.4 Fuentes Industriales para Mecatrónica

Las fuentes industriales estándar para automatización son las fuentes de 24 V DC, que alimentan PLC, sensores, actuadores y paneles de control.

Especificaciones típicas:

- Entrada: 85-264 V AC / 120-370 V DC (universal)
- Salida: 24 V DC ajustable (22-28 V)
- Potencia: 12 W a 960 W (0.5 A a 40 A)
- Eficiencia: >90%
- Protecciones: sobrecarga, sobretensión, cortocircuito, sobret temperatura
- Aislamiento: 3-4 kV entre primario y secundario

Características adicionales:

- Protección contra sobretensión (OVP): Desconexión si $V > 28-30$ V
- Señal DC OK: Salida de relé o transistor indicando funcionamiento normal
- Compartición de corriente: Para paralelizar fuentes
- Entrada para respaldo de batería
- Recubrimiento conformado: Protección contra ambientes agresivos
- MTBF: Típicamente >500,000 horas

21.5 Fuentes Ininterrumpidas (UPS)

Los sistemas UPS proporcionan energía de respaldo cuando falla la red eléctrica. Son críticos en procesos industriales que no pueden detenerse abruptamente.

Tipos de UPS:

- Offline (Standby): Normalmente alimenta desde la red. Conmuta a batería cuando falla la red. Tiempo de transferencia: 5-20 ms.

- Line Interactive: Similar al offline pero con regulación de voltaje (AVR) sin conmutar a batería.
- Online (Doble conversión): Siempre alimenta desde el inversor (convierte AC-DC-AC). Aislamiento completo de la red. Tiempo de transferencia cero.

Componentes de un UPS:

- Rectificador/cargador: Convierte AC en DC y carga la batería
- Inversor: Convierte DC en AC de salida
- Batería: Almacena energía (típicamente plomo-ácido selladas o Li-ion)
- By-pass estático: Conmutación instantánea a la red en caso de falla del inversor

Dimensionamiento:

$$P_{UPS} > P_{carga} / FP_{UPS}$$

$$\text{Autonomía} = \text{Capacidad}_{batería} (\text{Ah}) \times V_{batería} \times \text{Eficiencia} / P_{carga}$$

21.6 Reguladores de Voltaje Integrados

Serie 78xx (positivos fijos):

- 7805: +5 V, 7806: +6 V, 7808: +8 V, 7810: +10 V, 7812: +12 V, 7815: +15 V, 7818: +18 V, 7824: +24 V
- Corriente máxima: 1 A (con disipador)
- Protecciones: térmica, sobrecorriente, sobretensión
- Voltaje mínimo de entrada: $V_{salida} + 2.5 \text{ V}$ (dropout)

Serie 79xx (negativos fijos):

- 7905: -5 V, 7912: -12 V, 7924: -24 V
- Mismas características que 78xx pero voltaje negativo

Reguladores ajustables:

- LM317 (positivo ajustable): $V_{salida} = 1.25 \times (1 + R_2/R_1)$, 1.25-37 V, 1.5 A
- LM337 (negativo ajustable): Equivalente negativo al LM317
- LM338: 5 A ajustable

Reguladores de baja caída (LDO):

- Dropout típico: 0.1-0.5 V
- Mayor eficiencia que 78xx convencionales
- Usados en equipos portátiles y baterías

21.7 Consideraciones de Diseño

Disipación térmica:

- Calcular potencia disipada: $P_d = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out}$
- Seleccionar disipador con resistencia térmica adecuada
- Usar pasta térmica entre componente y disipador
- Considerar ventilación del gabinete

Capacitores de entrada y salida:

- Entrada: Capacitor electrolítico de valor adecuado (100-1000 μF por amperio)
- Salida: Capacitor de menor valor (10-100 μF) para filtrado
- Capacitores cerámicos (0.1 μF) cerca de las patillas para alta frecuencia

Protecciones:

- Fusible a la entrada
- Diodo de protección contra inversión de polaridad
- Varistor (MOV) contra sobretensiones transitorias
- TVS en la salida

Compatibilidad electromagnética (EMC/EMI):

- Filtro EMI a la entrada (Modo común y modo diferencial)
- Ferrita en cables de entrada/salida
- PCB con plano de tierra
- Blindaje del transformador

21.8 Aplicaciones en Sistemas Mecatrónicos

Alimentación de PLC: Fuentes industriales de 24 V DC con capacidad suficiente para CPU, módulos de E/S y sensores. Regla práctica: sumar consumos de todos los módulos más 20% de margen.

Alimentación de sensores: Sensores industriales (proximidad, presión, temperatura) típicamente funcionan a 24 V DC. Algunos sensores especializados requieren 5 V, 12 V, o fuentes de excitación específicas.

Alimentación de actuadores: Válvulas solenoide, contactores, motores pequeños pueden usar la misma fuente de 24 V. Motores grandes requieren fuentes separadas (variadores de frecuencia, servodrives).

Alimentación de sistemas embebidos: Microcontroladores (3.3 V, 5 V), Raspberry Pi (5 V), Arduino (5 V/3.3 V) requieren fuentes reguladas de baja potencia.

Alimentación de pantallas HMI: Pantallas táctiles industriales típicamente a 24 V DC.

Ejercicios del Capítulo 21

1. Compara las ventajas y desventajas de las fuentes lineales versus las fuentes conmutadas.
2. Calcula la potencia disipada en un regulador 7812 que entrega 500 mA con una entrada de 18 V DC.
3. Explica el principio de funcionamiento de una fuente conmutada tipo buck.
4. ¿Qué es un UPS online y por qué se usa en procesos industriales críticos?
5. Diseña una fuente lineal de 5 V / 1 A usando un 7805, especificando el transformador, puente rectificador, capacitor de filtro y disipador necesarios.
6. ¿Qué protecciones debe tener una fuente de alimentación industrial y cómo funcionan?
7. Investiga qué es el efecto de “dropout voltage” en un regulador lineal y cómo afecta el diseño.
8. Calcula la capacidad necesaria de una UPS para alimentar un PLC (200 W) y 2 computadoras (300 W cada una) durante 30 minutos.

\newpage

CAPÍTULO 22: AMPLIFICADORES OPERACIONALES

22.1 Introducción

El amplificador operacional (op-amp u operational amplifier) es un circuito integrado de alta ganancia que amplifica la diferencia entre dos señales de entrada. Es uno de los bloques fundamentales de la electrónica analógica y se utiliza en innumerables aplicaciones, desde acondicionamiento de señales de sensores hasta sistemas de control.

Símbolo y terminales:

- Entrada no inversora (+): V_{in+}
- Entrada inversora (-): V_{in-}
- Salida: V_{out}
- Alimentación positiva: V_{CC+} (típicamente +5 a +15 V)
- Alimentación negativa: V_{CC-} (típicamente -5 a -15 V o GND)

Características del amplificador operacional ideal:

- Ganancia de voltaje en lazo abierto infinita ($A_{OL} \rightarrow \infty$)
- Impedancia de entrada infinita ($Z_{in} \rightarrow \infty$)
- Impedancia de salida cero ($Z_{out} \rightarrow 0$)
- Ancho de banda infinito ($BW \rightarrow \infty$)
- Voltaje de offset de entrada cero
- Respuesta instantánea (sin retardos)

Características del op-amp real (LM741 típico):

- Ganancia en lazo abierto: 200,000 (106 dB)
- Impedancia de entrada: 2 M Ω
- Impedancia de salida: 75 Ω
- Ancho de banda: 1 MHz (ganancia unitaria)
- Voltaje de offset: 1-5 mV
- Slew rate: 0.5 V/ μ s

22.2 Configuraciones Básicas

Comparador (sin realimentación):

- Si $V_{in+} > V_{in-}$: $V_{out} = V_{CC+}$ (saturación positiva)
- Si $V_{in+} < V_{in-}$: $V_{out} = V_{CC-}$ (saturación negativa)
- Detecta cuál entrada es mayor

Amplificador inversor:

$$V_{out} = -(R_f / R_{in}) \times V_{in}$$

La entrada no inversora se conecta a tierra. La señal de entrada se aplica a través de R_{in} a la entrada inversora. R_f proporciona realimentación negativa.

Amplificador no inversor:

$$V_{out} = (1 + R_f / R_1) \times V_{in}$$

La señal de entrada se aplica a la entrada no inversora. La realimentación negativa va de salida a entrada inversora.

Seguidor de voltaje (buffer):

$$V_{out} = V_{in} \text{ (ganancia unitaria)}$$

Alta impedancia de entrada, baja de salida. Aísla etapas.

22.3 Aplicaciones Lineales

Sumador inversor:

$$V_{out} = -R_f \times (V_1/R_1 + V_2/R_2 + V_3/R_3)$$

$$\text{Si } R_1 = R_2 = R_3 = R_f: V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3)$$

Amplificador diferencial (restador):

$$V_{out} = R_f/R_{in} \times (V_2 - V_1) \text{ (con } R_1 = R_2 = R_{in}, R_3 = R_f)$$

Amplifica la diferencia de dos señales, rechazando el modo común.

Integrador:

$$V_{out} = -(1/RC) \times \int V_{in} dt$$

La salida es la integral (en el tiempo) de la señal de entrada, invertida.

Derivador:

$$V_{out} = -RC \times dV_{in}/dt$$

La salida es la derivada de la señal de entrada. Menos usado por su sensibilidad al ruido.

Amplificador de instrumentación:

Tres op-amps que proporcionan alta ganancia diferencial, muy alta impedancia de entrada y excelente rechazo al modo común (CMRR > 100 dB). Usado para señales débiles de sensores (termopares, galgas extensométricas).

22.4 Aplicaciones No Lineales

Comparador con histéresis (Schmitt trigger):

Histéresis: $V_{TH+} = V_{ref} \times R_2 / (R_1 + R_2) + V_{CC+} \times R_1 / (R_1 + R_2)$

Elimina oscilaciones en la conmutación por ruido. Umbrales diferentes para flanco ascendente y descendente.

Rectificador de precisión:

Rectifica señales menores a 0.7 V (donde el diodo normal no conduce). Usa un diodo en el lazo de realimentación del op-amp.

Detector de pico:

Captura y mantiene el valor máximo de una señal. Op-amp con diodo y capacitor de retención.

Multiplicador de capacitancia:

Simula un capacitor de gran valor usando un capacitor pequeño y un op-amp. Útil en circuitos integrados.

22.5 Filtros Activos

Los filtros activos combinan op-amps con componentes pasivos (R, C) para implementar funciones de filtrado sin inductores.

Filtro pasa-bajos:

- Deja pasar frecuencias bajas, atenúa altas
- Frecuencia de corte: $f_c = 1 / (2\pi RC)$
- Orden 1: -20 dB/década
- Orden 2: -40 dB/década (Sallen-Key)

Filtro pasa-altos:

- Deja pasar frecuencias altas, atenúa bajas
- $f_c = 1 / (2\pi RC)$

Filtro pasa-banda:

- Deja pasar un rango de frecuencias
- Ancho de banda = $f_{c_alta} - f_{c_baja}$

Filtro notch (rechaza-banda):

- Atenúa una frecuencia específica (ejemplo: 50/60 Hz para eliminar ruido de red)
- Twin-T notch filter: circuito RC en configuración T doble

Orden y tipo de filtro:

- Butterworth: Máxima planitud en la banda de paso
- Chebyshev: Transición más abrupta pero con rizado
- Bessel: Respuesta de fase lineal (mejor para señales pulse)

22.6 Parámetros y Limitaciones Reales

Slew Rate (SR): Máxima tasa de cambio del voltaje de salida. Limita la máxima frecuencia y amplitud de la señal sin distorsión. $f_{m\acute{a}x} = SR / (2\pi \times V_{pico})$

Voltaje de offset (V_{OS}): Voltaje DC en la salida cuando ambas entradas están al mismo potencial. Se puede ajustar externamente o compensar con un capacitor de acoplo.

CMRR (Common Mode Rejection Ratio): Capacidad de rechazar señales iguales en ambas entradas. Típicamente 60-120 dB.

PSRR (Power Supply Rejection Ratio): Capacidad de mantener la salida estable ante variaciones en la alimentación.

Impedancia de entrada y salida: Afecta la carga de la fuente y la capacidad de excitar la siguiente etapa.

Ancho de banda de ganancia unitaria (GBW): Producto ganancia \times ancho de banda es constante. Si la ganancia es 100, el ancho de banda es GBW/100.

Ruido: Voltaje de ruido interno (nV/ \sqrt{Hz}). Importante en aplicaciones de señales débiles.

22.7 Op-Amps Especializados

Instrumentación: INA128, AD620. CMRR > 100 dB, offset bajo, para sensores.

Precisión (chopper): LTC2057, MAX4238. Offset < 1 μV , deriva < 0.01 $\mu V/^{\circ}C$.

Alta velocidad: LMH6703, OPA847. GBW > 1 GHz, SR > 1000 V/ μ s.

Bajo ruido: NE5532, LM4562. Ruido < 5 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Micro-power: LM324, MCP6001. Consumo < 100 μ A por amplificador.

De potencia: OPA541, LM12. Corriente de salida > 1 A.

Comparadores: LM311, LM393. Optimizados para operación en saturación (sin realimentación).

22.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Acondicionamiento de sensores:

- Amplificación de termopares (ganancia x100 - x1000)
- Amplificación de celdas de carga (puente de Wheatstone)
- Filtrado de señales de sensores (eliminación de ruido)
- Linealización de sensores no lineales (termistores NTC/PTC)

Control PID analógico:

- Implementación de controladores proporcional-integral-derivativo con op-amps
- Compensación de lazos de control en tiempo continuo

Interfaz de señales:

- Conversión de señales: 0-10 V, 4-20 mA, 0-20 mA
- Adaptación de niveles de voltaje entre diferentes sistemas
- Aislamiento (con optoacopladores o amplificadores de aislamiento)

Circuitos de protección:

- Detectores de sobrecorriente
- Comparadores de nivel para alarmas
- Limitadores de corriente

Generación de señales:

- Osciladores senoidales (puente de Wien)
- Generadores de onda cuadrada (astables)
- Generadores de rampa (para PWM, barrido)

Fuentes de alimentación:

- Referencias de voltaje precisas
- Reguladores de voltaje programables
- Fuentes de corriente constante (para sensores)

Ejercicios del Capítulo 22

1. Calcula la ganancia de un amplificador inversor con $R_f = 100 \text{ k}\Omega$ y $R_{in} = 10 \text{ k}\Omega$.
2. Diseña un amplificador no inversor con ganancia de 11.
3. ¿Qué ventajas tiene un amplificador de instrumentación frente a un op-amp simple para señales de sensores?
4. Calcula la frecuencia de corte de un filtro pasa-bajos de primer orden con $R = 10 \text{ k}\Omega$ y $C = 100 \text{ nF}$.
5. Explica qué es el slew rate y cómo limita la frecuencia máxima de operación.
6. Diseña un circuito sumador inversor para $V_{out} = -(2V_1 + 3V_2 + V_3)$.
7. ¿Qué es un comparador con histéresis y por qué se usa?
8. Investiga el integrado LM324 y sus aplicaciones típicas en sistemas industriales.

\newpage

CAPÍTULO 23: RELÉS Y CONTACTORES

23.1 Introducción a los Relés

Un relé es un interruptor electromagnético que permite controlar un circuito de alta potencia mediante una señal de baja potencia. Es uno de los componentes más antiguos y utilizados en automatización industrial, proporcionando aislamiento galvánico entre el circuito de control y el circuito de potencia.

Componentes básicos:

- Bobina o electroimán: crea el campo magnético cuando circula corriente.
- Armadura: pieza móvil de material ferromagnético que se desplaza por la atracción magnética.
- Contactos: conductores que se abren o cierran según la posición de la armadura.
- Resorte: devuelve la armadura a su posición de reposo cuando la bobina se desenergiza.
- Carcasa: protección mecánica y aislamiento eléctrico.

Principio de funcionamiento:

1. Cuando se aplica voltaje a la bobina (generalmente DC: 5V, 12V, 24V), circula corriente.
2. La corriente genera un campo magnético que atrae la armadura.
3. La armadura mueve los contactos, cambiando su estado (abierto/cerrado).
4. Cuando se retira el voltaje, el resorte devuelve la armadura a su posición original.

23.2 Tipos de Contactos

Contacto Normalmente Abierto (NA o NO): Está abierto cuando el relé está desenergizado. Se cierra cuando se energiza la bobina. Símbolo: -o- o]-[.

Contacto Normalmente Cerrado (NC): Está cerrado cuando el relé está desenergizado. Se abre cuando se energiza la bobina. Símbolo: -/o- o -/o- .

Contacto de conmutación (SPDT): Tiene un contacto común (C), uno NA y uno NC. Cuando el relé cambia de estado, el común conmuta entre NA y NC.

Configuraciones:

- SPST (Single Pole Single Throw): Un polo, una posición (NA o NC)
- SPDT (Single Pole Double Throw): Un polo, dos posiciones (conmutación)
- DPST (Double Pole Single Throw): Dos polos independientes, NA o NC
- DPDT (Double Pole Double Throw): Dos polos con doble posición (2 conmutadores)
- 3PDT, 4PDT: Múltiples polos

Designación de contactos:

Los contactos se designan según su función en esquemas eléctricos. Por ejemplo, "K1" es un relé, "K1.1" es el contacto 1 de ese relé. En Europa, se usan números: 1-2 (NC), 3-4 (NA), 5-6-8 (conmutación) según las normas DIN.

23.3 Relés de Estado Sólido (SSR)

Los SSR (Solid State Relays) reemplazan los contactos mecánicos por semiconductores (TRIAC, SCR, MOSFET) y el electroimán por un optoacoplador.

Ventajas sobre relés electromecánicos:

- Vida útil ilimitada (sin desgaste mecánico)
- Conmutación silenciosa
- Velocidad de conmutación más rápida (μs vs ms)
- Sin arcos eléctricos (seguro para atmósferas explosivas)
- Resistente a vibraciones y golpes
- Control por voltaje DC o AC

Desventajas:

- Mayor caída de voltaje en conducción (1-2 V)
- Corriente de fuga en estado apagado
- Sensible a sobretensiones
- Disipación de calor en altas corrientes
- No adecuado para cargas inductivas sin protección

Tipos de SSR:

- SSR para AC: Usan TRIAC o SCR antiparalelo. Conmutación por cruce por cero (zero-cross) o por fase aleatoria.
- SSR para DC: Usan MOSFET. Conmutación rápida sin problemas de arco.

23.4 Contactores

Un contactor es un relé de potencia diseñado para conmutar cargas eléctricas de alta corriente y voltaje, principalmente motores, sistemas de iluminación industrial, bancos de capacitores y sistemas de calefacción.

Diferencias con relés:

- Mayor capacidad de corriente (hasta miles de amperios)
- Contactos principales para potencia
- Contactos auxiliares para señalización y enclavamiento
- Cámara de extinción de arco
- Diseñado para alta frecuencia de operación
- Construcción más robusta

Componentes de un contactor:

- Bobina: Voltajes típicos: 24V AC/DC, 110V AC, 220V AC, 380V AC
- Núcleo magnético: Generalmente en forma de E, de acero al silicio laminado
- Armadura móvil: Conectada al porta-contactos
- Contactos principales: 3 o 4 polos para circuitos de potencia
- Contactos auxiliares: NA y NC para circuitos de control y señalización
- Muelles de presión de contactos: Aseguran buena conductancia
- Resortes de retorno: Abren los contactos al desenergizarse
- Cámara de apagado de arco: Divide y enfría el arco eléctrico

Categorías de empleo (IEC 60947):

- AC-1: Cargas resistivas o ligeramente inductivas (calefacción)
- AC-3: Motores de jaula de ardilla: arranque, desconexión durante marcha
- AC-4: Motores de jaula de ardilla: arranque, inversión de marcha, frenado
- DC-1: Cargas resistivas en DC
- DC-3: Motores DC: arranque, desconexión durante marcha

23.5 Circuitos de Control con Relés

Circuito de enclavamiento (hold-in circuit):

- Un pulsador de arranque (NA) conecta la bobina
- Un contacto NA del relé mantiene la bobina alimentada después de soltar el pulsador
- Un pulsador de parada (NC) interrumpe el circuito

Circuito de enclavamiento mutuo (interlocking):

- Impide que dos contactores se activen simultáneamente

- Ejemplo: inversión de giro de motor (no pueden activarse K1 y K2 a la vez)
- Se usan contactos NC de cada contactor en el circuito del otro

Protección térmica combinada:

- Relé térmico de sobrecarga en serie con la bobina
- Contacto NC del relé térmico desenergiza el contactor en caso de sobrecarga

Circuitos temporizados:

- Relés temporizadores (timers) con retardo a la conexión (ON-delay) o a la desconexión (OFF-delay)
- Usados para arranque estrella-delta, arranque secuencial

23.6 Selección de Relés y Contactores

Parámetros para seleccionar un relé:

- Voltaje de la bobina: Debe coincidir con el voltaje de control disponible
- Corriente nominal de contactos: Capacidad de corriente continua
- Voltaje nominal de contactos: Voltaje máximo que pueden conmutar
- Tipo de carga: Resistiva, inductiva, motora (la corriente de arranque puede ser 6-8 veces la nominal)
- Vida útil mecánica: Número de operaciones sin carga (típicamente 10^7 - 10^8)
- Vida útil eléctrica: Número de operaciones con carga nominal (típicamente 10^5 - 10^6)

Parámetros para seleccionar un contactor:

- Corriente de empleo (I_e): Corriente nominal en la categoría de empleo específica
- Potencia del motor: Potencia máxima del motor que puede controlar
- Voltaje de la bobina: Según el sistema de control
- Número de polos: 3 para motores trifásicos, 4 para cargas especiales
- Poder de corte: Capacidad de interrumpir corrientes de cortocircuito
- Vida útil: Número de maniobras en la categoría de empleo

23.7 Protección de Bobinas Inductivas

Las bobinas de relés y contactores son cargas inductivas. Al desconectarlas, la energía almacenada en el campo magnético genera un pico de voltaje que puede dañar los componentes de control (transistores, PLC).

Diodo de rueda libre (flyback): Diodo en paralelo con la bobina (cátodo al positivo, ánodo al negativo). Absorbe el pico de voltaje. Solo para DC, retarda ligeramente la desenergización.

Varistor (MOV): Absorbe picos de voltaje, funciona en AC y DC. No retarda la desenergización.

Circuito RC (snubber): Capacitor en serie con resistencia en paralelo con la bobina. Funciona en AC, suprime interferencias de RF.

Diodo Zener + diodo: Combinación que limita el pico a un voltaje definido (más rápido que solo diodo).

23.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Control de motores: Arranque y parada directa, inversión de giro, arranque estrella-delta.

Automatización de procesos: Secuencias de operación, enclavamientos de seguridad, temporizaciones.

Señalización: Indicadores luminosos, alarmas, paneles sinópticos.

Aislamiento de señales: Separar circuitos de control (24V DC) de circuitos de potencia (400V AC).

Sistemas de seguridad: Paradas de emergencia, puertas de seguridad, cortinas de luz.

Control de iluminación: Encendido/apagado de grandes cargas de iluminación industrial.

Bancos de capacitores: Conmutación de capacitores para corrección de factor de potencia.

Ejercicios del Capítulo 23

1. Explica la diferencia entre un relé electromecánico y un SSR, indicando ventajas y desventajas de cada uno.
2. Dibuja y explica un circuito de enclavamiento con relé (arranque/parada con retención).
3. ¿Qué es un contactor y cómo se diferencia de un relé convencional?

4. Explica el funcionamiento del diodo de rueda libre y por qué es necesario en bobinas de relés.
5. ¿Qué categorías de empleo existen para contactores (AC-1, AC-3, AC-4) y qué cargas controlan?
6. Selecciona un contactor adecuado para un motor trifásico de 7.5 kW a 400 V (considera $I_n \approx 15$ A, corriente de arranque ≈ 90 A).
7. Diseña un circuito de enclavamiento mutuo para evitar que dos motores funcionen simultáneamente.
8. Investiga los relés temporizadores (timers) y sus modos de operación: ON-delay, OFF-delay, flicker.

\newpage

CAPÍTULO 24: MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

24.1 Principios Fundamentales

El motor de corriente continua (DC) es una máquina eléctrica que convierte energía eléctrica DC en energía mecánica de rotación. Funciona basándose en la fuerza de Lorentz: cuando un conductor que transporta corriente se encuentra dentro de un campo magnético, experimenta una fuerza perpendicular al campo y a la corriente.

Componentes principales:

- Estator: Parte fija que genera el campo magnético (imanes permanentes o devanados de campo)
- Rotor (inducido): Parte giratoria que contiene los conductores donde se induce el movimiento
- Colector (delgas): Segmentos de cobre en el rotor que conmutan la dirección de la corriente
- Escobillas: Contactos fijos de carbón que transmiten corriente al rotor
- Eje: Transmite el par mecánico a la carga

Principio de funcionamiento:

1. La corriente circula por las bobinas del rotor a través de las escobillas y el colector.
2. La interacción entre el campo magnético del estator y la corriente del rotor genera una fuerza tangencial.
3. El rotor gira. Cuando las bobinas pasan por la posición neutra (escobillas entre delgas), el colector invierte la corriente para mantener la dirección del par.

24.2 Tipos de Motores DC

Motor de imanes permanentes:

- Estator con imanes permanentes (ferrita, neodimio)
- Simple, compacto, económico

- Par proporcional a la corriente
- Velocidad máxima limitada por la fuerza centrífuga
- Usado en juguetes, herramientas portátiles, actuadores pequeños

Motor de excitación independiente:

- Campo y armadura alimentados por fuentes separadas
- Control independiente de velocidad (voltaje de armadura) y par (corriente de campo)
- Excelente control de velocidad
- Usado en servomotores, aplicaciones de precisión

Motor serie:

- Campo y armadura en serie
- Alto par de arranque (hasta 5 veces el nominal)
- Velocidad variable con la carga (riesgo de embalamiento en vacío)
- Usado en tracción (trenes, tranvías), grúas, elevadores

Motor shunt (derivación):

- Campo y armadura en paralelo
- Velocidad aproximadamente constante
- Par de arranque moderado
- Usado en máquinas herramienta, bombas, ventiladores

Motor compound (compuesto):

- Combinación de devanados serie y shunt
- Par de arranque alto con velocidad más estable que el serie
- Usado en aplicaciones que requieren ambas características

24.3 Ecuaciones Fundamentales

Fuerza contraelectromotriz (FCEM):

$$E = K \times \Phi \times \omega$$

Donde K es constante de la máquina, Φ es el flujo magnético y ω la velocidad angular.

Par electromagnético:

$$T = K \times \Phi \times I_a$$

Donde I_a es la corriente de armadura.

Relación velocidad-par (motor serie):

$$\omega = (V - I_a \times R_a) / (K \times \Phi)$$

Para motor serie: $\Phi \propto I_a$, por lo que $\omega \propto 1/I_a$ (velocidad inversamente proporcional a la corriente).

Potencia mecánica:

$$P_{mec} = T \times \omega = E \times I_a \times \eta$$

24.4 Control de Velocidad

Control por voltaje de armadura:

- Varía el voltaje aplicado a la armadura (V_a)
- La velocidad es aproximadamente proporcional a V_a
- Rango típico: 0 a velocidad nominal
- Par constante (si el campo es constante)

Control por corriente de campo:

- Varía la corriente de campo (debilitamiento de campo)
- La velocidad aumenta al debilitar el campo
- Rango típico: velocidad nominal a 2-3 veces la nominal
- Par inversamente proporcional a la velocidad

Control PWM (Pulse Width Modulation):

- Método más común en la actualidad
- Conmutación rápida (kHz) de la alimentación DC
- El ciclo de trabajo (duty cycle) determina el voltaje efectivo
- Alta eficiencia (>90%)
- Usa MOSFET de potencia

Puente H:

- Cuatro interruptores (transistores/MOSFET) que permiten control bidireccional
- Estados: Avance, retroceso, frenado, rueda libre
- Tipos: Puente H discreto, circuito integrado (L293D, L298), módulo (BTS7960)

24.5 Frenado de Motores DC

Frenado regenerativo:

- El motor actúa como generador
- La energía cinética se convierte en eléctrica y se devuelve a la fuente
- Mayor eficiencia energética
- Complejo de implementar

Frenado dinámico:

- La armadura se desconecta de la fuente y se cortocircuita a través de una resistencia
- La energía se disipa como calor en la resistencia
- Simple y efectivo

Frenado por contra-corriente (plugging):

- Se invierte la polaridad de la armadura mientras el motor gira
- Alto par de frenado pero alta disipación de energía
- Riesgo de inversión de giro si no se desconecta a tiempo

24.6 Motores DC sin Escobillas (BLDC)

Los motores BLDC (Brushless DC) eliminan las escobillas y el colector, reemplazándolos por un controlador electrónico.

Construcción:

- Rotor: Imanes permanentes
- Estator: Devanados (similar al motor AC)
- Sensores Hall: Detectan la posición del rotor
- Controlador electrónico: Conmuta las fases del estator secuencialmente

Ventajas sobre motores DC con escobillas:

- Mayor eficiencia (85-95%)
- Mayor vida útil (sin desgaste de escobillas)
- Mayor relación par/peso
- Menor mantenimiento
- Menor ruido electromagnético

Control de BLDC:

- Seis pasos (trapezoidal): Conmutación cada 60° eléctricos
- Control vectorial (FOC - Field Oriented Control): Control sinusoidal, más suave
- Requiere controlador dedicado (BLDC controller)

24.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Robótica: Actuación de articulaciones en brazos robóticos, robots móviles. Se usan servomotores DC con encoder.

Máquinas herramienta: Avance y posicionamiento en tornos, fresas CNC con servomotores DC.

Automoción: Motores de limpiaparabrisas, elevallunas, asientos ajustables, ventiladores.

Vehículos eléctricos: Motores DC sin escobillas en bicicletas eléctricas, scooters, carros de golf.

Automatización industrial: Cintas transportadoras, alimentadores, bobinadoras.

Instrumentación: Actuadores de precisión en válvulas, posicionadores.

Electrodomésticos: Aspiradoras, batidoras, secadores de pelo.

Equipos médicos: Bombas de infusión, camas hospitalarias, taladros quirúrgicos.

24.8 Mantenimiento y Diagnóstico

Problemas comunes y soluciones:

- Desgaste de escobillas: Reemplazar cuando alcancen el límite mínimo (típicamente 5 mm)
- Colector rayado o sucio: Limpiar con alcohol isopropílico, rectificar si es necesario
- Rodamientos desgastados: Reemplazar, verificar alineación
- Bobinado quemado: Verificar aislamiento, puede requerir rebobinado
- Imanes desmagnetizados: Reemplazar (motores de imanes permanentes)

Pruebas de diagnóstico:

- Medición de resistencia de armadura (valores muy bajos: cortocircuito; infinito: abierto)
- Medición de resistencia de campo
- Prueba de aislamiento (megger)
- Medición de corriente en vacío y a plena carga
- Verificación de velocidad con tacómetro

Ejercicios del Capítulo 24

1. Explica el principio de funcionamiento de un motor DC, incluyendo el papel del colector y las escobillas.
2. Compara los motores DC serie, shunt y compound en términos de características par-velocidad.

3. Calcula la FCEM de un motor DC con $K\Phi = 0.5 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ que gira a 1500 rpm.
4. ¿Qué es un puente H y cómo permite controlar la dirección de un motor DC?
5. Explica las ventajas de los motores BLDC sobre los motores DC con escobillas.
6. Diseña un circuito de control PWM para un motor DC usando un transistor MOSFET y un microcontrolador.
7. ¿Qué métodos de frenado existen para motores DC y en qué aplicaciones se usa cada uno?
8. Investiga el control de velocidad de un motor DC mediante un variador (driver) comercial.

\newpage

CAPÍTULO 25: MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

25.1 Fundamentos de Motores AC

Los motores de corriente alterna son las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria. Se estima que consumen aproximadamente el 70% de la energía eléctrica industrial. Su popularidad se debe a su construcción robusta, bajo mantenimiento, alta eficiencia y capacidad de operar directamente con la red AC.

Clasificación principal:

- Motores síncronos: El rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético giratorio del estator.
- Motores asíncronos (inducción): El rotor gira a una velocidad ligeramente menor que la del campo magnético.

25.2 Campo Magnético Giratorio

El campo magnético giratorio es el principio fundamental de los motores AC trifásicos. Fue descubierto por Nikola Tesla en 1888.

Generación del campo giratorio:

1. El estator tiene tres devanados desplazados 120° en el espacio.
2. Los devanados se conectan a un sistema trifásico (tensiones desfasadas 120° en el tiempo).
3. La combinación de los tres campos alternos produce un campo magnético que gira a velocidad constante.

Velocidad síncrona:

$$N_s = 120 \times f / P$$

Donde N_s es la velocidad síncrona en rpm, f la frecuencia en Hz y P el número de polos.

Ejemplos (a 50 Hz):

- 2 polos: $N_s = 3000$ rpm
- 4 polos: $N_s = 1500$ rpm
- 6 polos: $N_s = 1000$ rpm
- 8 polos: $N_s = 750$ rpm

25.3 Motor de Inducción Trifásico

Es el motor más utilizado en la industria. Su nombre proviene de que la corriente en el rotor es inducida por el campo magnético del estator, no conducida directamente.

Componentes:

- Estator: Carcasa con núcleo de chapas magnéticas y devanados trifásicos.
- Rotor: Puede ser de jaula de ardilla (el más común) o bobinado.
- Entrehierro: Espacio de aire entre estator y rotor (mínimo posible, típicamente 0.5-2 mm).
- Caja de bornes: Conexiones para alimentación y configuración estrella/delta.
- Ventilador: Refrigeración forzada montado en el eje.

Rotor de jaula de ardilla:

- Barras de aluminio o cobre en el rotor, cortocircuitadas por anillos en los extremos.
- Sin escobillas ni anillos rozantes (mínimo mantenimiento).
- Las corrientes inducidas en las barras interactúan con el campo giratorio.
- Produce un par que arrastra el rotor.

Deslizamiento (s):

$$s = (N_s - N_r) / N_s$$

$$\text{Velocidad del rotor: } N_r = N_s \times (1 - s)$$

El deslizamiento a plena carga es típicamente 2-6% (mayor en motores pequeños, menor en grandes).

25.4 Características del Motor de Inducción

Curva par-velocidad:

- Par de arranque: Típicamente 1.5-2.5 veces el par nominal.
- Par máximo (pull-out): Típicamente 2-3 veces el par nominal.

- Par nominal: Par continuo a velocidad nominal.
- La zona estable de operación es entre velocidad nominal y par máximo.

Corriente de arranque:

- 5-8 veces la corriente nominal.
- Causa caídas de voltaje en la instalación.
- Requiere métodos de arranque especiales para motores grandes.

Eficiencia:

- Motores IE1 (estándar): 80-87%
- Motores IE2 (alta eficiencia): 85-91%
- Motores IE3 (eficiencia premium): 88-94%
- Motores IE4 (super premium): 90-96%

Factor de potencia:

- Típicamente 0.75-0.90 a plena carga.
- Disminuye a carga parcial (puede llegar a 0.2-0.4 en vacío).

25.5 Métodos de Arranque

Arranque directo:

- Conexión directa a la red.
- Simple y económico.
- Alto par de arranque pero alta corriente (5-8 I_n).
- Solo para motores pequeños (< 5 HP o con instalación robusta).

Arranque estrella-delta:

- El motor arranca en estrella (voltaje reducido a $1/\sqrt{3}$) y después conmuta a delta.
- Corriente de arranque: 1.5-2.5 I_n (vs 5-8 en directo).
- Par de arranque: reducido a 1/3 del par nominal.
- Requiere motor con 6 bornes accesibles.

Arranque con autotransformador:

- Autotransformador con taps al 50%, 65%, 80%.
- Voltaje reducido durante el arranque.
- Arranque suave, par ajustable.

Arrancador suave (soft starter):

- SCR antiparalelo controlan el voltaje durante el arranque.
- Arranque y parada suaves (rampa ajustable).

- Protección integrada (térmica, sobrecarga, desbalance).
- Tamaño compacto.

Variador de frecuencia (VFD):

- Control completo de velocidad y par.
- Arranque suave con corriente limitada.
- Ahorro energético significativo en aplicaciones de caudal variable.

25.6 Inversión de Giro

Cambiar la dirección de giro de un motor trifásico es simple: se intercambian dos fases cualesquiera de la alimentación.

Circuito de inversión:

- Dos contactores (K1: giro horario, K2: giro antihorario).
- Enclavamiento eléctrico (contactos NC de K1 en circuito de K2 y viceversa).
- Enclavamiento mecánico (opcional, para mayor seguridad).
- Temporización: esperar que el motor se detenga antes de invertir.

25.7 Motores Monofásicos de Inducción

Se usan donde no hay disponibilidad de trifásica (< 3 HP).

Tipos según método de arranque:

- Motor de fase partida: Devanado auxiliar de arranque con interruptor centrífugo. Alto par de arranque. Uso: compresores, bombas.
- Motor con capacitor de arranque: Capacitor electrolítico en serie con devanado auxiliar. Mayor par de arranque. Uso: aires acondicionados, maquinaria.
- Motor con capacitor permanente: Capacitor de polipropileno en serie con devanado auxiliar siempre conectado. Bajo par de arranque. Uso: ventiladores, bombas centrífugas.
- Motor de espira de sombra: Anillo de cobre en una porción del polo. Mínimo par de arranque. Uso: ventiladores pequeños, extractores.

25.8 Mantenimiento de Motores AC

Mantenimiento preventivo:

- Medición periódica de resistencia de aislamiento (megger > 1 MΩ/kV)

- Limpieza de aletas de refrigeración
- Engrase de rodamientos según intervalo del fabricante
- Verificación de alineación (acoplamiento, poleas)
- Medición de vibraciones
- Termografía para detectar puntos calientes

Diagnóstico de fallas:

- El motor no arranca: Verificar alimentación, fusibles, relé térmico, contactor.
- El motor se sobrecalienta: Sobrecarga, ventilación obstruida, desbalance de voltaje, rodamientos dañados.
- Ruido anormal: Rodamientos, desbalance del rotor, problemas de acoplamiento.
- Vibraciones: Desbalance, desalineación, resonancia, problemas eléctricos (barras del rotor rotas).

Ejercicios del Capítulo 25

1. Calcula la velocidad síncrona de un motor trifásico de 4 polos a 50 Hz y a 60 Hz.
2. Explica el concepto de deslizamiento en un motor de inducción. ¿Cuál es el deslizamiento típico?
3. Un motor de 15 kW, 400 V, 50 Hz consume 28 A a plena carga. Calcula su eficiencia si el FP es 0.86.
4. Compara los métodos de arranque de motores (directo, estrella-delta, soft starter, variador).
5. ¿Cómo se invierte el giro de un motor trifásico? Dibuja el circuito con contactores.
6. Explica las diferencias entre los motores de inducción de jaula de ardilla y rotor bobinado.
7. ¿Qué son los motores IE3 e IE4 y por qué son importantes para la eficiencia energética?
8. Investiga los motores de espira de sombra y explica por qué son adecuados para ventiladores pequeños.

\newpage

CAPÍTULO 26: MOTORES PASO A PASO Y SERVOMOTORES

26.1 Motores Paso a Paso (Stepper Motors)

Los motores paso a paso son motores DC sin escobillas que convierten pulsos eléctricos en movimientos mecánicos discretos. Cada pulso hace girar el rotor un ángulo fijo (paso), lo que permite un control de posición preciso sin necesidad de retroalimentación (lazo abierto).

Características principales:

- Posicionamiento preciso: Resolución determinada por el tamaño del paso (típicamente 0.9° a 7.5°).
- Alto par a baja velocidad.
- Control en lazo abierto (sin encoder necesario para aplicaciones básicas).
- Mantenimiento de posición (par de retención) sin energía en los devanados.
- Fáciles de controlar con microcontroladores.

26.2 Tipos de Motores Paso a Paso

Imanes permanentes:

- Rotor con imanes permanentes
- Paso típico: 7.5° a 15° (48-24 pasos/revolución)
- Velocidad máxima: 100-300 rpm
- Aplicaciones simples: impresoras, lectores de tarjetas

Reluctancia variable:

- Rotor de material ferromagnético sin imanes
- Paso típico: 15° (24 pasos/revolución)
- Paso angular preciso
- Bajo par de retención (no mantiene posición sin corriente)

Híbridos:

- Combinación de imán permanente y reluctancia variable

- Paso típico: 0.9° a 1.8° (400-200 pasos/revolución)
- Mayor par y precisión
- El tipo más utilizado en aplicaciones de mecatrónica

26.3 Secuencias de Excitación

Onda completa (1 fase):

- Se excita una fase a la vez
- Bajo consumo, bajo par
- 4 pasos por ciclo eléctrico

Onda completa (2 fases):

- Se excitan dos fases simultáneamente
- Mayor par ($\sqrt{2}$ veces el de 1 fase)
- 4 pasos por ciclo eléctrico

Medio paso (half-step):

- Alterna 1 y 2 fases excitadas
- Duplica la resolución (400 pasos/vuelta para motor de 1.8°)
- Par menos uniforme

Microstepping:

- Corriente senoidal en las fases
- Hasta 256 micropasos por paso completo
- Movimiento extremadamente suave
- Requiere driver especializado

26.4 Drivers para Motores Paso a Paso

Los drivers son circuitos electrónicos que generan las secuencias de corriente necesarias para el motor.

Driver simple (L293D, ULN2003):

- Transistores de conmutación directa
- Limitado a bajas corrientes y voltajes
- Adecuado para motores pequeños

Driver con chopper (A4988, DRV8825, TMC2209):

- Regulación de corriente por PWM
- Microstepping integrado

- Protección térmica y contra sobrecorriente
- Ampliamente usados en impresión 3D y CNC

Características importantes del driver:

- Corriente máxima por fase
- Voltaje máximo de operación
- Resolución de microstepping
- Modo de silencio (StealthChop en TMC)
- Protecciones (cortocircuito, sobrettemperatura)

26.5 Limitaciones de los Motores Paso a Paso

Pérdida de pasos: Cuando el par requerido supera el par disponible, el motor pierde sincronismo (saltos). Soluciones: aumentar corriente, reducir velocidad, usar motor más grande.

Resonancia: Ciertas velocidades causan vibraciones mecánicas. Soluciones: medio paso, microstepping, amortiguadores.

Calentamiento: Los motores paso a paso pueden calentarse significativamente (típicamente 60-90°C). Es normal.

Baja eficiencia: Calientan incluso sin movimiento (par de retención). Soluciones: reducción automática de corriente en reposo.

Ruido audible: Especialmente a bajas velocidades con paso completo. Solución: microstepping, drivers silenciosos.

26.6 Servomotores

Los servomotores son motores DC o AC con sistemas de retroalimentación (encoder, resolver) que permiten control preciso de posición, velocidad y par en lazo cerrado.

Componentes de un sistema servo:

- Servomotor: Motor DC sin escobillas (BLDC) o AC síncrono de imanes permanentes (PMSM).
- Encoder: Sensor de posición (incremental o absoluto).
- Servodrive (amplificador): Controlador que interpreta las señales del encoder y ajusta la potencia al motor.
- Controlador maestro: PLC o controlador CNC que envía comandos al servodrive.

Modos de operación:

- Control de posición: El servodrives mantiene la posición comandada (más común).
- Control de velocidad: Mantiene la velocidad comandada independientemente de la carga.
- Control de par: Mantiene el par comandado (corriente proporcional al par).
- Control híbrido: Combinación de modos.

26.7 Servomotores vs Paso a Paso

Propiedad	Paso a Paso	Servomotor
Control	Lazo abierto	Lazo cerrado
Precisión	Sin acumulación de error	Con encoder
Par a alta velocidad	Bajo	Alto
Eficiencia	Baja	Alta
Ruido	Mayor	Menor
Costo	Bajo	Alto (5-10x)
Calentamiento	Alto (corriente constante)	Bajo (solo cuando trabaja)
Respuesta dinámica	Limitada	Excelente
Aplicación típica	Posicionamiento simple	Movimiento dinámico

26.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Impresión 3D: Motores paso a paso (NEMA 17, NEMA 23) para ejes X, Y, Z y extrusor. Drivers A4988, TMC2209. Precisión de 0.1 mm típica.

Máquinas CNC: Pasos a paso (DIY) o servomotores (industriales) para control de husillos y mesas. Controladores GRBL, Mach3, LinuxCNC.

Robótica: Servomotores en articulaciones de robots industriales (alta precisión, alta velocidad). Actuadores de robots colaborativos.

Automatización de empaquetado: Servomotores para control de sincronización en máquinas de etiquetado, llenado, sellado.

Pick and place: Servomotores de alta aceleración para componentes electrónicos. Posicionamiento rápido y preciso.

Textil: Motores paso a paso en máquinas de bordado, telares, cortadoras.

Instrumentación médica: Posicionamiento de precisión en equipos de análisis, bombas de jeringa.

Ejercicios del Capítulo 26

1. Explica el principio de funcionamiento de un motor paso a paso de imanes permanentes.
2. ¿Qué es el microstepping y cómo mejora el rendimiento de un motor paso a paso?
3. Calcula el número de pasos por revolución para un motor de 1.8° .
4. Compara los motores paso a paso con los servomotores, indicando ventajas y desventajas de cada uno.
5. ¿Qué factores causan la pérdida de pasos en un motor paso a paso y cómo se evita?
6. Explica el funcionamiento de un sistema servo con retroalimentación de posición.
7. ¿Qué es un driver con chopper de corriente y por qué es importante?
8. Investiga las aplicaciones de servomotores en robots industriales de 6 ejes.

\newpage

CAPÍTULO 27: ACTUADORES LINEALES

27.1 Introducción a los Actuadores Lineales

Los actuadores lineales convierten energía eléctrica en movimiento lineal (rectilíneo), a diferencia de los motores que producen movimiento rotatorio. Son fundamentales en la automatización industrial para tareas de empuje, tracción, posicionamiento y elevación.

Clasificación por principio de funcionamiento:

- Electromecánicos: Motor rotativo + mecanismo de conversión (husillo, correa)
- Electromagnéticos: Solenoides y actuadores lineales directos
- Piezoeléctricos: Materiales que se deforman con voltaje
- Electrotérmicos: Expansión térmica controlada

27.2 Solenoides Lineales

Un solenoide lineal es el actuador electromagnético más simple. Consiste en una bobina y un núcleo móvil (émbolo) de material ferromagnético.

Principio de funcionamiento:

1. Al energizar la bobina, se genera un campo magnético.
2. El émbolo ferromagnético es atraído hacia el centro de la bobina.
3. El movimiento lineal del émbolo puede utilizarse para accionar mecanismos.
4. Al desenergizar, un resorte retorna el émbolo a su posición inicial.

Tipos:

- Solenoide de empuje: El émbolo empuja al energizarse.
- Solenoide de tracción: El émbolo tira al energizarse.
- Solenoide de doble acción: Con resortes en ambos extremos o dos bobinas.

Parámetros:

- Carrera: distancia de desplazamiento (mm a cm)
- Fuerza: desde gramos-fuerza hasta kg-fuerza
- Ciclo de trabajo: relación tiempo activo/total (%), importante para evitar

sobrecalentamiento

- Tiempo de respuesta: típicamente 10-100 ms

27.3 Actuadores Electromecánicos con Husillo

Combinan un motor eléctrico (DC, paso a paso o AC) con un mecanismo de husillo (tornillo sin fin) para convertir rotación en movimiento lineal.

Husillo de bolas (ball screw):

- Rodamientos de bolas entre la tuerca y el husillo
- Baja fricción (eficiencia >90%)
- Alta precisión y repetibilidad
- Carga axial alta
- Costo moderado-alto
- Usado en máquinas CNC, robots, posicionadores

Husillo trapezoidal (Acme screw):

- Rosca trapezoidal, deslizamiento metal-metal
- Mayor fricción (eficiencia 20-50%)
- Autoblocante (no retrocede con la carga)
- Menor costo
- Usado en aplicaciones menos exigentes (mesas ajustables)

Actuador de correa dentada (belt drive):

- Correa dentada y poleas, motor en un extremo
- Alta velocidad, baja fuerza
- Posicionamiento rápido
- Usado en impresoras 3D, pick-and-place

Actuador de piñón-cremallera:

- Engranaje (piñón) y barra dentada (cremallera)
- Altas velocidades y largos recorridos
- Usado en pórticos, automatización de almacenes

27.4 Actuadores Lineales Eléctricos Comerciales

Los actuadores lineales eléctricos son dispositivos compactos que integran motor, mecanismo de transmisión y electrónica de control en una carcasa.

Características típicas:

- Voltaje: 12/24 V DC o 110/230 V AC
- Carrera: 50-1000 mm
- Fuerza: 100 N a 5000 N (10-500 kgf)
- Velocidad: 5-50 mm/s
- Protección: IP54-IP66
- Opciones: finales de carrera, potenciómetro de retroalimentación, freno

Aplicaciones:

- Posicionamiento de paneles solares
- Apertura de compuertas y escotillas
- Regulación de válvulas
- Equipamiento médico (camas, mesas de operaciones)
- Ergonomía industrial (mesas ajustables en altura)
- Agricultura (apertura de invernaderos)

27.5 Actuadores Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos se deforman cuando se les aplica un campo eléctrico. Este efecto permite actuación de ultra-precisión.

Características:

- Movimiento en nanómetros (nm)
- Fuerza alta (hasta kN)
- Respuesta extremadamente rápida (μ s)
- Voltaje alto (100-1000 V)
- Carrera muy limitada (μ m a mm)

Aplicaciones:

- Microscopía de fuerza atómica (AFM)
- Alineación de fibra óptica
- Válvulas de inyección de combustible
- Posicionamiento de lentes en litografía
- Sistemas de cancelación activa de vibraciones

Actuadores piezoeléctricos amplificados:

- Usan mecanismos de palanca para ampliar la carrera
- Carrera típica: 100-500 μ m
- Resolución sub-nanométrica
- Usados en óptica adaptativa, fabricación de semiconductores

27.6 Motores Lineales

Un motor lineal es un motor eléctrico cuyo estator está “desenrollado” para producir movimiento lineal directo, sin mecanismos de conversión intermedios.

Principio de funcionamiento:

- Esencialmente, un motor rotativo cortado radialmente y extendido en línea recta.
- La parte móvil (rotor) se desplaza linealmente sobre la parte fija (estator).
- El campo magnético viajero arrastra el rotor sin contacto físico.

Tipos:

- Motor lineal de inducción: Similar al motor de inducción rotativo. Usado en transporte (trenes de levitación magnética).
- Motor lineal síncrono de imanes permanentes (PMLSM): Imanes en el rotor, devanados en el estator. Alta eficiencia y precisión.
- Motor lineal DC sin escobillas: Similar al BLDC rotativo.

Ventajas:

- Sin desgaste por transmisión mecánica
- Alta velocidad y aceleración
- Precisión excepcional
- Movimiento suave y silencioso
- Mantenimiento mínimo

Aplicaciones:

- Máquinas herramienta de alta velocidad
- Sistemas de pick-and-place de alta velocidad
- Transporte vertical (ascensores sin cable)
- Montaje de componentes electrónicos
- Mesas de coordenadas

27.7 Criterios de Selección de Actuadores

Fuerza requerida:

$F = m \times a + F_{\text{rozamiento}} + F_{\text{gravedad}}$ (para movimiento vertical)

Velocidad y aceleración:

Velocidad = carrera / tiempo disponible. Aceleraciones típicas: 1-10 m/s².

Ciclo de trabajo:

Porcentaje del tiempo que el actuador está activo. Afecta la capacidad de disipación térmica.

Precisión y repetibilidad:

Precisión: desviación entre posición real y comandada. Repetibilidad: variación al regresar a una posición.

Entorno:

Temperatura, humedad, polvo, atmósferas explosivas, agentes químicos. Determinan el grado de protección (IP) y materiales.

Vida útil:

Número de ciclos antes de requerir mantenimiento o reemplazo.

27.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Prensas y plegadoras: Actuadores electromecánicos reemplazan sistemas hidráulicos en prensas de menor potencia.

Manipulación de materiales: Pinzas robóticas accionadas por actuadores lineales, mesas elevadoras.

Posicionamiento de piezas: Mesas XY con actuadores de husillo para posicionamiento en máquinas de ensamblaje.

Válvulas de control: Actuadores lineales para apertura precisa de válvulas en procesos químicos.

Robots de laboratorio: Pipeteo, dispensación y manipulación de muestras con actuadores de alta precisión.

Automatización de almacenes: Sistemas de extracción y almacenamiento con actuadores lineales.

Ejercicios del Capítulo 27

1. Explica el principio de funcionamiento de un solenoide lineal y sus aplicaciones industriales.
2. Compara los actuadores de husillo de bolas y husillo trapezoidal en términos de eficiencia, precisión y costo.
3. ¿Qué aplicaciones requieren actuadores piezoeléctricos y por qué?
4. Explica el principio de funcionamiento de un motor lineal.

5. Selecciona un actuador lineal para levantar una carga de 50 kg a 200 mm en 5 segundos.
6. ¿Qué factores determinan el ciclo de trabajo de un solenoide y por qué es importante?
7. Investiga las aplicaciones de motores lineales en máquinas herramienta de alta velocidad.
8. Diseña un sistema de posicionamiento XY usando actuadores de husillo de bolas con motores paso a paso.

\newpage

CAPÍTULO 28: VÁLVULAS SOLENOIDE

28.1 Principio de Funcionamiento

Una válvula solenoide es un dispositivo electromecánico que controla el flujo de fluidos (líquidos o gases) mediante un solenoide eléctrico. Es uno de los actuadores más comunes en automatización industrial, presente en sistemas neumáticos, hidráulicos y de control de procesos.

Componentes básicos:

- Bobina solenoide: Electroimán que genera el campo magnético al energizarse.
- Émbolo (armadura): Núcleo móvil ferromagnético que se desplaza por la acción del campo magnético.
- Resortes: Devuelven el émbolo a su posición de reposo al desenergizar.
- Vástago: Conecta el émbolo al elemento de sellado.
- Asiento de válvula: Superficie donde el sello hace contacto para cerrar el paso.
- Cuerpo de la válvula: Contiene los puertos de entrada y salida.
- Sello: Material elastomérico (NBR, FKM, EPDM) que asegura el cierre.

Principio:

1. Bobina desenergizada: El resorte mantiene el émbolo en su posición de reposo. La válvula está en su estado normal (NA o NC).
2. Bobina energizada: El campo magnético atrae el émbolo, venciendo la fuerza del resorte. El émbolo se desplaza, cambiando el estado de la válvula.
3. Bobina desenergizada: El resorte retorna el émbolo a su posición original.

28.2 Tipos de Válvulas Solenoide

Por número de vías:

- 2/2: 2 puertos, 2 posiciones (abierto/cerrado). La más simple.
- 3/2: 3 puertos, 2 posiciones. Una entrada, una salida, un escape. Usada en cilindros de simple efecto.
- 4/2: 4 puertos, 2 posiciones. Alimentación, dos salidas (avance/retroceso), escape. Para cilindros de doble efecto.

- 5/2: 5 puertos, 2 posiciones. Alimentación, dos salidas, dos escapes. La más común en neumática.
- 5/3: 5 puertos, 3 posiciones. Igual que 5/2 pero con posición central (cerrada, abierta a presión, abierta a escape).

Por función:

- NA (Normalmente Abierta): Abierta en reposo, se cierra al energizar.
- NC (Normalmente Cerrada): Cerrada en reposo, se abre al energizar.
- Universal: Puede funcionar como NA o NC según instalación.

Por acción:

- Acción directa: El solenoide actúa directamente sobre el asiento. Carrera corta, fuerza limitada. No requiere presión mínima.
- Pilotada (servo-asistida): El solenoide abre un orificio piloto que desbalancea la presión y permite la apertura del paso principal. Mayor caudal, requiere presión diferencial mínima.
- Pilotada con pistón: Combinación de solenoide piloto y pistón principal. Alto caudal, alta presión.

Por consumo:

- Consumo estándar: 4-8 W (DC), 6-10 VA (AC)
- Bajo consumo: 0.5-2 W (para PLC, baterías, atmósferas explosivas)
- Consumo reducido con latch: Pulso de activación, se mantiene con imán permanente (consumo cero en reposo)

28.3 Especificaciones Técnicas

Eléctricas:

- Voltaje de bobina: 12V DC, 24V DC, 24V AC, 110V AC, 230V AC
- Potencia: 2-20 W (DC), 4-20 VA (AC)
- Ciclo de trabajo: 100% ED (servicio continuo) para la mayoría
- Clase de aislamiento: B (130°C), F (155°C), H (180°C)

Neumáticas/hidráulicas:

- Presión de trabajo: 0-10 bar (neumática), hasta 350 bar (hidráulica)
- Caudal nominal (Cv o Kv): Capacidad de flujo a través de la válvula
- Fluidos compatibles: Aire, agua, aceite, gases, según materiales
- Temperatura del fluido: -10°C a 180°C (según sellos)

Mecánicas:

- Conexiones: G1/8, G1/4, G3/8, G1/2 (roscas BSP); NPT

- Cuerpo: Latón, acero inoxidable, aluminio, plástico (poliamida)
- Sellos: NBR (aceites), FKM/Viton (altas temperaturas, químicos), EPDM (agua, vapor)
- Protección: IP65 (polvo y chorros de agua)

28.4 Conexión Eléctrica de Válvulas Solenoide

Conexión directa:

- Bobina conectada directamente a la salida del PLC o relé.
- Adecuado para válvulas pequeñas con bajo consumo.
- Limitar corriente con fusible o protección electrónica.

Conexión con relé intermedio:

- Para válvulas con alto consumo o voltaje diferente al de control.
- El PLC activa un relé que conmuta la alimentación de la válvula.
- Aislamiento galvánico entre control y potencia.

Conexión con módulo de salidas:

- Módulos de salidas para válvulas (Válvulas terminales, manifolds).
- Integración directa con bus de campo (PROFIBUS, AS-i, IO-Link).
- Reducción de cableado.

Protección de la bobina:

- Diodo de rueda libre (DC): Protege el circuito de control.
- Varistor (AC): Suprime picos de voltaje.
- LED indicador: Visualización del estado de la bobina (añade protección).

28.5 Válvulas Proporcionales

Las válvulas proporcionales permiten un control continuo del caudal o presión, no solo ON/OFF. Utilizan solenoides especiales que pueden posicionar el émbolo en cualquier punto intermedio.

Tipos de solenoides proporcionales:

- Solenoide proporcional de fuerza: La fuerza es proporcional a la corriente.
- Solenoide proporcional con realimentación: Incluye sensor de posición (LVDT) para lazo cerrado.
- Solenoide con imán permanente (voice coil): Respuesta rápida, carrera limitada.

Control de válvula proporcional:

- Señal de control: 0-10 V o 4-20 mA
- Electrónica integrada (PWM con corrección de histéresis)
- Dither: Señal de alta frecuencia superpuesta para reducir fricción

Aplicaciones:

- Control de velocidad de cilindros neumáticos/hidráulicos
- Control de presión en procesos
- Regulación de caudal en sistemas de dosificación
- Frenado y embragues proporcionales

28.6 Manifolds y Sistemas Multipolo

En automatización compleja, múltiples válvulas se agrupan en manifolds (bases colectoras) para reducir espacio y cableado.

Manifold simple: Conexión individual de cada bobina a bornes.

Multipolo: Un solo conector multipolar para todas las bobinas del manifold. Reduce cableado.

Bus de campo: Comunicación serial (PROFIBUS, DeviceNet, EtherCAT) para el control individual de cada bobina. Mínimo cableado, diagnóstico avanzado.

AS-interface (AS-i): Bus económico de 2 hilos que transmite datos y potencia. Muy usado en sensores y actuadores de baja complejidad.

IO-Link: Protocolo punto a punto que proporciona datos de proceso, diagnóstico y parámetros. Creciente adopción en la industria 4.0.

28.7 Selección de Válvulas Solenoide

Criterios de selección:

1. Tipo de fluido: Compatibilidad química con los materiales de sellos y cuerpo.
2. Presión de trabajo: Máxima y mínima (especialmente en válvulas pilotadas).
3. Caudal requerido: Determinar Cv/Kv necesario.
4. Diámetro de conexión: Según tubería existente.
5. Voltaje y potencia: Compatible con el sistema de control.
6. Función: NA/NC, número de vías.
7. Entorno: Temperatura, humedad, atmósfera explosiva (ATEX).

8. Ciclo de trabajo: Frecuencia de conmutación requerida.
9. Certificaciones: UL, CE, ATEX, SIL (seguridad funcional).

Cálculo de caudal:

$$C_v = Q \times \sqrt{(SG / \Delta P)} \text{ (para líquidos)}$$

Donde Q es caudal en GPM, SG densidad relativa y ΔP caída de presión en PSI.

28.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Neumática industrial: Control de cilindros de simple y doble efecto en sistemas de automatización. Válvulas 5/2 y 5/3 son las más comunes.

Control de procesos: Apertura/cierre de líneas de fluidos en plantas químicas, petroquímicas, farmacéuticas.

Riego y agricultura: Control de sectores de riego, sistemas de fertilización.

Automoción: Sistemas de frenos ABS, control de transmisión, inyección de combustible.

Refrigeración y climatización: Control de refrigerante en sistemas HVAC, válvulas de expansión.

Equipos médicos: Control de oxígeno, anestesia, ventilación mecánica.

Dosificación: Control preciso de cantidades de líquidos en envasado, alimentación.

Ejercicios del Capítulo 28

1. Explica el principio de funcionamiento de una válvula solenoide de acción directa.
2. ¿Cuál es la diferencia entre una válvula 3/2, 5/2 y 5/3? ¿Qué aplicación tiene cada una?
3. Calcula la potencia disipada por una bobina de 24 V DC con resistencia de 48 Ω .
4. ¿Qué ventajas tiene un sistema de bus de campo frente al cableado tradicional de válvulas?
5. Explica el funcionamiento de una válvula proporcional y sus ventajas frente a una ON/OFF.

6. Selecciona una válvula solenoide para una aplicación neumática a 6 bar con caudal de 500 L/min.
7. ¿Qué protección necesita una bobina de válvula solenoide controlada por una salida de PLC?
8. Investiga las normas de seguridad ATEX para válvulas solenoide en atmósferas potencialmente explosivas.

\newpage

CAPÍTULO 29: EL MULTÍMETRO DIGITAL

29.1 Introducción a los Instrumentos de Medición

Los instrumentos de medición eléctrica son herramientas fundamentales para el diagnóstico, instalación y mantenimiento de sistemas eléctricos y electrónicos. Sin mediciones precisas, es imposible verificar el funcionamiento correcto de los circuitos, detectar fallas o garantizar la seguridad.

El multímetro digital (DMM - Digital Multimeter) es el instrumento más versátil y común en electricidad y electrónica. Integra en un solo dispositivo las funciones de voltímetro, amperímetro, ohmímetro y, en modelos más avanzados, capacímetro, frecuencímetro, termómetro y más.

29.2 Funciones Básicas del Multímetro

Medición de voltaje DC (V — o V DC):

- Mide diferencias de potencial en corriente continua.
- Rango típico: 200 mV a 1000 V.
- Conexión: en paralelo con el componente o fuente.
- Polaridad: si se invierte, la lectura muestra signo negativo.

Medición de voltaje AC (V ~ o V AC):

- Mide voltajes de corriente alterna.
- El valor mostrado es RMS (Root Mean Square) para ondas senoidales.
- Los multímetros True RMS miden correctamente ondas no senoidales.

Medición de corriente DC (A — o A DC):

- Mide corriente continua.
- Conexión: en serie con el circuito (abrir el circuito e insertar el multímetro).
- Rangos típicos: μ A, mA, A (hasta 10 A o 20 A en modelos estándar).
- **IMPORTANTE:** No conectar nunca en paralelo para medir corriente (causa cortocircuito).

Medición de corriente AC (A ~):

- Mide corriente alterna en serie con el circuito.
- Seguridad: usar pinzas amperimétricas para altas corrientes.

Medición de resistencia (Ω):

- Mide resistencia entre dos puntos.
- Conexión: en paralelo con el componente (circuito sin alimentación).
- No medir resistencias en circuitos energizados.
- Rangos típicos: 200 Ω a 200 M Ω .

Prueba de continuidad (símbolo de diodo o onda):

- Emite un pitido si la resistencia es menor a un umbral (típicamente < 30-50 Ω).
- Útil para verificar cables, pistas de PCB, conexiones.
- Ideal para localizar cortocircuitos o circuitos abiertos.

Prueba de diodos:

- Aplica una corriente constante (típicamente 1 mA) y mide la caída de voltaje.
- Polarización directa: muestra V_F (0.6-0.7 V para silicio, 0.2-0.4 V para Schottky).
- Polarización inversa: muestra OL (over limit, circuito abierto).

29.3 Funciones Avanzadas

Medición de capacitancia (F):

- Mide capacitancia de capacitores (típicamente nF a mF).
- Descargar el capacitor antes de medir.
- Algunos modelos miden ESR (Equivalent Series Resistance).

Medición de frecuencia (Hz):

- Mide la frecuencia de una señal periódica.
- Rango típico: hasta 10 MHz.

Medición de temperatura ($^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$):

- Usa termopar tipo K incluido o externo.
- Rango: -50°C a 1000°C .

Medición de ciclo de trabajo (%):

- Porcentaje del tiempo que una señal está en alto (ON).
- Útil para verificar señales PWM.

Medición True RMS:

- Mide correctamente voltaje AC con formas de onda no senoidales (cuadrada, triangular, pulsos).

- Diferencia entre True RMS y Average Sensing: hasta 40% de error en señales no senoidales.

Auto-ranging vs Manual:

- Auto-ranging selecciona automáticamente el rango adecuado.
- Manual: permite fijar el rango para mediciones estables y mayor resolución.

29.4 Cómo Usar el Multímetro Correctamente

Medición de voltaje:

1. Seleccionar función V (DC o AC).
2. Conectar puntas: COM (negro) y VΩHz (rojo).
3. Conectar puntas en paralelo con el componente/fuente.
4. Leer el valor en la pantalla.

Medición de corriente:

1. Seleccionar función A (DC o AC).
2. Conectar punta roja en A (para corrientes hasta 10 A) o mA/μA (para corrientes pequeñas).
3. Abrir el circuito y conectar el multímetro en SERIE.
4. Encender el circuito y leer el valor.
5. NO conectar nunca en paralelo (causa cortocircuito y daño al multímetro).

Medición de resistencia:

1. Circuito sin alimentación.
2. Seleccionar función Ω.
3. Conectar puntas en paralelo con la resistencia.
4. Leer el valor. Si aparece OL, el rango es muy bajo o el circuito está abierto.

Reglas de seguridad:

- Siempre empezar con el rango más alto y luego reducir.
- No medir resistencia en circuitos energizados.
- No exceder los límites máximos del instrumento.
- Usar puntas con aislamiento adecuado (CAT III, CAT IV).
- Cambiar batería cuando aparezca el indicador de batería baja.

29.5 Categorías de Seguridad (CAT)

Las categorías de seguridad definen la protección del multímetro contra sobretensiones transitorias:

CAT I: Equipos electrónicos protegidos (circuitos de baja energía). Protección contra transitorios bajos.

CAT II: Electrodomésticos, herramientas portátiles, tomas de corriente. Protección contra transitorios moderados.

CAT III: Instalaciones fijas (tableros de distribución, motores, alimentación de edificios). Protección contra transitorios altos.

CAT IV: Origen de la instalación (medidores de compañía eléctrica, acometidas principales). Protección contra transitorios muy altos (rayos).

Un multímetro CAT III 600V puede medir en instalaciones industriales con seguridad hasta 600 V. Un CAT IV 600V ofrece mayor protección.

29.6 Mantenimiento del Multímetro

Cuidados básicos:

- Guardar en funda protectora.
- Limpiar con paño suave (no usar disolventes).
- No exponer a temperaturas extremas.
- Retirar puntas al guardar.
- Revisar puntas periódicamente (aislamiento, puntas rotas).

Verificación de precisión:

- Comparar con un patrón de referencia anualmente.
- Verificar voltaje de una batería nueva (1.5 V debe mostrar entre 1.55-1.65 V).
- Verificar resistencia con resistencias de precisión.

Cambio de batería y fusible:

- Usar batería alcalina de 9 V (mayor duración, menos fugas).
- Reemplazar fusible dañado solo con el tipo y valor especificado.
- Usar fusibles de alta capacidad de ruptura (HRC) para seguridad.

29.7 Aplicaciones Prácticas

Diagnóstico de fallas:

- Verificar presencia de voltaje en la alimentación.
- Medir continuidad de cables y conexiones.
- Verificar fusibles (continuidad).

- Medir resistencia de bobinas de contactores y relés.
- Verificar diodos y transistores.

Instalaciones eléctricas:

- Verificar voltaje en tomas de corriente.
- Medir caída de tensión en conductores.
- Verificar polaridad y conexión a tierra.
- Medir consumo de equipos.

Electrónica:

- Verificar voltajes de alimentación en circuitos.
- Medir voltajes en pines de circuitos integrados.
- Verificar componentes sospechosos (resistencias, capacitores).

Ejercicios del Capítulo 29

1. Explica la diferencia entre medición de voltaje (paralelo) y corriente (serie).
2. ¿Qué precauciones de seguridad deben tomarse al medir corriente con un multímetro?
3. ¿Qué es la medición True RMS y cuándo es necesaria?
4. Interpreta las categorías de seguridad CAT I, II, III y IV. ¿Cuál es adecuada para mediciones en tableros industriales?
5. Practica: Mide el voltaje de una batería de 9 V, la corriente que consume un LED con su resistencia limitadora, y la resistencia de una resistencia de 1 k Ω .
6. ¿Cómo se verifica un diodo con el multímetro en la función de prueba de diodos?
7. ¿Qué muestra el multímetro si se mide continuidad en un cable en buen estado?
¿Y en uno roto?
8. ¿Cuándo se debe usar la función de auto-ranging versus el rango manual?

\newpage

CAPÍTULO 30: EL OSCILOSCOPIO

30.1 Introducción al Osciloscopio

El osciloscopio es un instrumento de medición electrónico que visualiza señales eléctricas variables en el tiempo. A diferencia del multímetro, que muestra valores numéricos, el osciloscopio muestra la forma de onda de la señal, permitiendo analizar su amplitud, frecuencia, fase, forma y distorsión.

Es una herramienta indispensable para el diagnóstico de circuitos electrónicos, sistemas de control, comunicaciones y electrónica de potencia.

30.2 Controles Básicos

Control de escala vertical (Volts/Div):

- Ajusta la amplitud mostrada: cuántos voltios por división en la pantalla.
- Rango típico: 1 mV/div a 20 V/div.
- Sonda 1X: el valor en pantalla es directo.
- Sonda 10X: el valor en pantalla debe multiplicarse por 10.

Control de escala horizontal (Time/Div):

- Ajusta la base de tiempo: cuántos segundos por división horizontal.
- Rango típico: 1 ns/div a 10 s/div.

Control de disparo (Trigger):

- Estabiliza la imagen sincronizando el barrido con la señal.
- Tipos: flanco ascendente, descendente, ancho de pulso, video.
- Fuente: canal 1, canal 2, externa, línea.

Canales:

- 2 canales típicos, 4 canales en modelos avanzados.
- Cada canal tiene su propio control vertical.
- Modos: CH1, CH2, DUAL (ambos), ADD (suma algebraica).

Acoplo de entrada:

- DC: Muestra todos los componentes de la señal (DC + AC).

- AC: Filtra el componente DC (solo muestra variaciones AC).
- GND: Muestra la línea de masa (referencia 0 V).

30.3 Tipos de Osciloscopios

Osciloscopio analógico:

- Utiliza un tubo de rayos catódicos (CRT) para visualizar la señal.
- Representación en tiempo real.
- Limitado: sin almacenamiento, mediciones manuales.
- Prácticamente obsoleto para uso profesional.

Osciloscopio digital (DSO - Digital Storage Oscilloscope):

- Convierte la señal analógica a digital (ADC) y la almacena en memoria.
- Permite análisis, almacenamiento y procesamiento de señales.
- Funciones: medición automática, FFT, cursores, análisis matemático.
- El estándar actual en laboratorios e industria.

Osciloscopio de señal mixta (MSO):

- Combina canales analógicos (2-4) con canales digitales (8-16).
- Visualiza simultáneamente señales analógicas y digitales.
- Ideal para depuración de sistemas embebidos.

Osciloscopio USB (PC-based):

- Convierte la señal y la envía por USB a una computadora.
- Software de análisis en PC.
- Portátil y económico.

30.4 Especificaciones Clave

Ancho de banda:

- Frecuencia máxima que el osciloscopio puede medir con precisión (atenuación < 3 dB).
- Regla práctica: el ancho de banda debe ser 5 veces la frecuencia máxima de la señal.
- Típico: 50 MHz a 1 GHz. Para aplicaciones básicas: 20-100 MHz.

Tasa de muestreo (Sampling Rate):

- Número de muestras por segundo que el ADC convierte.
- Teorema de Nyquist: tasa de muestreo debe ser > 2 veces la frecuencia máxima.

- Típico: 100 MS/s a 10 GS/s (MS/s = megamuestras/segundo, GS/s = gigamuestras/segundo).

Resolución vertical:

- Número de bits del ADC.
- 8 bits típico (256 niveles, resolución de 0.4%).
- Osciloscopios de alta resolución: 10-14 bits.

Memoria:

- Profundidad de memoria en puntos (samples).
- Determina cuánto tiempo puede capturar con alta resolución.
- Típico: 1 MPts a 100 MPts.

Canales:

- 2 o 4 canales analógicos (más comunes).
- Canales digitales adicionales en MSO.

30.5 Sondas de Osciloscopio

Sonda pasiva 1X/10X:

- La más común. Incluye atenuación 10X (divisor de voltaje).
- 10X: Mayor ancho de banda, mayor voltaje máximo, menor carga en el circuito.
- Compensación: ajuste del capacitor variable para igualar la respuesta en frecuencia.

Sonda activa:

- Contiene amplificador en la punta.
- Alta impedancia de entrada, bajo voltaje máximo.
- Para señales de alta frecuencia y baja amplitud.

Sonda de corriente:

- Mide corriente mediante efecto Hall o transformador.
- No requiere abrir el circuito.
- Tipos: AC-only (transformador), AC/DC (Hall).

Sonda diferencial:

- Mide la diferencia entre dos puntos, ninguno conectado a tierra.
- Para medir en circuitos no referenciados a tierra.
- Esencial en electrónica de potencia (motores, variadores).

30.6 Mediciones Comunes

Medición de voltaje pico a pico (Vpp):

- Diferencia entre el punto máximo y mínimo de la señal.
- Se mide con cursores verticales.

Medición de frecuencia y periodo:

- Periodo = distancia horizontal entre dos puntos equivalentes de la onda.
- Frecuencia = 1/Periodo.

Medición de fase:

- Desfase entre dos señales (canal 1 y canal 2).
- Se mide en grados: $\Delta\varphi = (\Delta t / T) \times 360^\circ$.

Medición de tiempo de subida/bajada:

- Tiempo que tarda la señal en pasar del 10% al 90% de su amplitud.
- Importante para señales digitales y conmutación.

Análisis FFT (Fast Fourier Transform):

- Muestra el espectro de frecuencias de la señal.
- Identifica armónicos, ruido y distorsión.

Medición de ciclo de trabajo (duty cycle):

- Porcentaje del periodo que la señal está en nivel alto.
- Para señales PWM.

30.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Análisis de señales PWM: Verificar frecuencia, ciclo de trabajo, tiempos de subida/bajada de señales de control de motores.

Diagnóstico de variadores de frecuencia: Medir voltaje y corriente de salida, verificar conmutación de IGBT, detectar transitorios.

Verificación de comunicaciones: Analizar señales RS-232, RS-485, CAN bus, PROFIBUS. Medir niveles de voltaje y tiempos.

Análisis de fuentes conmutadas: Medir ripple de salida, verificar conmutación del MOSFET, analizar formas de onda en transformador.

Caracterización de sensores: Verificar señal de salida de sensores (encoder, Hall, ultrasonido) en diferentes condiciones.

Depuración de sistemas embebidos: Analizar señales de microcontroladores (SPI, I2C, UART), verificar temporización.

Medición de transitorios: Capturar picos de voltaje en bobinas de relés, arranque de motores, conexión de capacitores.

Ejercicios del Capítulo 30

1. Explica la diferencia entre un osciloscopio analógico y uno digital.
2. ¿Qué ancho de banda de osciloscopio se necesita para medir una señal de 20 MHz?
3. ¿Qué es la tasa de muestreo y por qué debe cumplir el teorema de Nyquist?
4. Explica las diferencias entre los modos de acoplo DC, AC y GND en un osciloscopio.
5. ¿Cuándo se debe usar una sonda 10X en lugar de 1X?
6. Conecta un osciloscopio a una señal senoidal de 1 kHz y 5 Vpp. Ajusta los controles para visualizar 2 ciclos completos en la pantalla.
7. Mide el desfase entre el voltaje y la corriente de un motor monofásico pequeño usando el osciloscopio.
8. Investiga cómo se utiliza un osciloscopio para diagnosticar problemas en un variador de frecuencia.

\newpage

CAPÍTULO 31: MEDICIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS

31.1 Medición de Voltaje

La medición de voltaje es la operación más básica y común en electricidad. Se realiza conectando el voltímetro en paralelo con el componente o fuente a medir.

Técnica de medición de voltaje DC:

1. Seleccionar función V DC. Si el valor es desconocido, empezar con el rango más alto.
2. Conectar punta negra (COM) al punto de menor potencial (negativo o tierra).
3. Conectar punta roja (V) al punto de mayor potencial.
4. Leer el valor. Si es negativo, la polaridad está invertida.

Técnica de medición de voltaje AC:

1. Seleccionar función V AC (True RMS recomendado).
2. Conectar puntas sin preocuparse por polaridad (la AC no tiene polaridad fija).
3. La lectura es el valor RMS de la señal.

Medición de voltaje en sistemas trifásicos:

- Voltaje de fase (fase-neutro): entre una fase y el neutro.
- Voltaje de línea (fase-fase): entre dos fases.
- Relación: $V_L = \sqrt{3} \times V_F$ (para sistema balanceado).

Medición de caída de tensión:

- Medir voltaje en el origen y en el extremo de un conductor.
- La diferencia es la caída de tensión ($I \times R$).
- No debe exceder el 3-5% del voltaje nominal (según normativa).

31.2 Medición de Corriente

Medición directa con multímetro:

1. Seleccionar función A. Usar el conector adecuado (A o mA/ μ A).
2. Apagar el circuito.

3. Abrir el circuito en el punto donde se quiere medir.
4. Conectar el multímetro en serie (observando polaridad en DC).
5. Encender el circuito y leer.

Medición con pinza amperimétrica:

- Mide la corriente sin contacto, por el campo magnético generado.
- Simplemente rodear el conductor con la pinza.
- Tipos: AC (transformador), AC/DC (efecto Hall).
- Ventajas: no abre el circuito, mide altas corrientes, seguridad.

Medición de corriente de fuga:

- Pinza amperimétrica de alta sensibilidad (mA).
- Rodear ambos conductores (fase y neutro) juntos: si la corriente no es cero, hay fuga a tierra.

Medición de corriente de arranque (inrush):

- Función Inrush en pinzas especializadas.
- Captura el pico de corriente al conectar cargas inductivas (motores, transformadores).

31.3 Medición de Resistencia, Capacitancia e Inductancia

Resistencia:

- Circuito sin alimentación.
- Seleccionar función Ω .
- Conectar puntas en los extremos del componente.
- Para resistencias en circuito, considerar el efecto de otros componentes.

Capacitancia:

- Descargar el capacitor antes de medir (con resistencia de 1-10 k Ω).
- Seleccionar función F en el multímetro (si tiene).
- Conectar puntas (respetando polaridad en electrolíticos).
- Esperar estabilización (los capacitores grandes tardan en medirse).

Inductancia:

- Menos común en multímetros básicos.
- Usar LC meter o multímetro especializado.
- Medir a frecuencia específica (típicamente 1 kHz o 100 Hz).

31.4 Medición de Potencia y Energía

Vatímetro analógico/digital:

- Mide potencia activa ($P = V \times I \times FP$).
- Conexión: voltaje en paralelo, corriente en serie.
- Uso en laboratorio y aplicaciones específicas.

Analizador de redes (Power Quality Analyzer):

- Mide potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia, armónicos.
- Registro de datos durante días o semanas.
- Esencial para auditorías energéticas y análisis de calidad de potencia.
- Conexión: pinzas de voltaje y corriente en las tres fases.

Medición de energía (kWh):

- Contadores de energía (medidores eléctricos).
- Tipos: electromecánicos (disco de inducción), electrónicos (ADC + procesamiento), inteligentes (comunicación remota).
- Los contadores miden energía activa (kWh) y algunos también reactiva (kVARh).

31.5 Medición de Aislamiento (Megger)

El megóhmetro (megger) mide resistencias de aislamiento muy altas ($M\Omega$ a $G\Omega$) aplicando un voltaje DC elevado (250 V, 500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V).

Procedimiento de medición de aislamiento:

1. Verificar que el equipo esté desconectado y sin energía.
2. Descargar capacitancia parásita.
3. Conectar el megger entre los conductores y tierra.
4. Aplicar el voltaje de prueba durante 60 segundos.
5. Leer el valor de resistencia de aislamiento.
6. Descargar el equipo después de la prueba.

Interpretación de resultados:

- $> 1 M\Omega/kV$: Aceptable para equipos de baja tensión.
- $> 10 M\Omega$: Buen aislamiento en motores y transformadores.
- $< 1 M\Omega$: Aislamiento deficiente, requiere investigación.
- Relación de absorción dieléctrica (DAR): R_{60s} / R_{30s} . $DAR > 1.3$ es bueno.

Tipos de megóhmetros:

- Manual: Generador de manivela, sin batería (para campo).

- Electrónico: Batería recargable, digital, funciones avanzadas.
- Automático: Pruebas programadas (DAR, PI, paso a paso).

31.6 Medición de Puesta a Tierra

Telurómetro (medidor de resistencia de tierra):

- Mide la resistencia del sistema de puesta a tierra (R_{tierra}).
- Método de caída de potencial (3 electrodos): inyecta corriente entre electrodo auxiliar y tierra, mide voltaje con electrodo de prueba.
- Método selectivo: pinza amperimétrica solo en el conductor de tierra (sin desconectar).

Valores recomendados:

- Instalaciones industriales generales: $R_{\text{tierra}} < 10 \Omega$
- Subestaciones: $R_{\text{tierra}} < 1 \Omega$
- Equipos sensibles (informática, telecomunicaciones): $R_{\text{tierra}} < 5 \Omega$
- Pararrayos: $R_{\text{tierra}} < 10 \Omega$

31.7 Medición de Temperatura

Termopar (termocupla):

- Unión de dos metales diferentes genera voltaje proporcional a la temperatura.
- Tipos: K (níquel-cromo/níquel-aluminio, -200°C a 1250°C), J, T, N, R, S.
- Compensación de junta fría en el instrumento.

RTD (Resistance Temperature Detector):

- Resistencia que varía con la temperatura. Pt100: 100Ω a 0°C .
- Alta precisión y estabilidad.
- Medición a 3 o 4 hilos para eliminar resistencia de cables.

Termistor:

- NTC: resistencia disminuye al aumentar temperatura.
- PTC: resistencia aumenta al aumentar temperatura.
- Alta sensibilidad, rango limitado (-50°C a 300°C).

Pirómetro infrarrojo:

- Mide temperatura sin contacto por radiación infrarroja.
- Rango: -50°C a 3000°C según modelo.
- Emisividad ajustable para diferentes materiales.

31.8 Registro de Datos y Monitorización

Data logger:

- Registra mediciones durante un período programado.
- Almacena miles de lecturas con sello de tiempo.
- Parámetros: voltaje, corriente, potencia, temperatura.

Monitorización en tiempo real:

- Sistemas SCADA y BMS (Building Management System).
- Sensores conectados a PLC que envían datos a servidores.
- Visualización remota, alarmas, tendencias.

Software de análisis:

- Procesamiento de datos registrados.
- Generación de informes de calidad de energía.
- Identificación de patrones de consumo.

Ejercicios del Capítulo 31

1. Explica la diferencia entre medir voltaje en paralelo y corriente en serie.
2. ¿Qué ventajas tiene la pinza amperimétrica sobre el multímetro para medir corriente?
3. ¿Cómo se mide la resistencia de aislamiento de un motor con un megger?
4. Un motor tiene resistencia de aislamiento de $2\text{ M}\Omega$ a 1000 V . ¿Es aceptable según la regla $1\text{ M}\Omega/\text{kV}$?
5. Explica el método de caída de potencial para medir resistencia de puesta a tierra.
6. ¿Cuándo se debe usar un analizador de redes eléctricas?
7. Compara las ventajas y desventajas de termopares vs. RTD para medición de temperatura industrial.
8. ¿Cómo se mide la corriente de fuga a tierra con una pinza amperimétrica?

\newpage

CAPÍTULO 32: SEGURIDAD ELÉCTRICA INDUSTRIAL

32.1 Efectos de la Corriente en el Cuerpo Humano

La seguridad eléctrica es primordial en el entorno industrial. El conocimiento de los efectos de la electricidad en el cuerpo humano es esencial para prevenir accidentes y actuar correctamente en emergencias.

Factores que determinan la severidad de una descarga:

- Intensidad de corriente: Es el factor más crítico.
- Trayectoria: Mano-mano, mano-pie, cabeza-pie (las más peligrosas).
- Duración: Mayor tiempo = mayor daño.
- Frecuencia: La DC y 50/60 Hz son especialmente peligrosas (causan fibrilación).
- Resistencia del cuerpo: Varía según humedad, contacto, callosidades.

Efectos según la corriente (a 50/60 Hz, trayectoria mano-pie):

- < 1 mA: Percepción umbral. No peligroso, apenas se siente un cosquilleo.
- 1-5 mA: Sensación molesta. Puede causar movimientos involuntarios.
- 5-15 mA: Contracción muscular, no se puede soltar el conductor (let-go threshold). Dificultad para respirar.
- 15-50 mA: Contracciones musculares severas, dificultad respiratoria, posible pérdida de conciencia.
- 50-100 mA: Fibrilación ventricular (corazón late descoordinado). Muerte probable sin desfibrilación.
- 100-200 mA: Fibrilación ventricular segura, paro respiratorio.
- > 200 mA: Paro cardíaco, quemaduras severas. En algunos casos, la corriente alta puede evitar la fibrilación (el corazón se detiene en lugar de fibrilar).

Umbral de no soltar (let-go):

- Hombres: aproximadamente 16 mA (mano), 6-9 mA (mano-muñeca)
- Mujeres: aproximadamente 10.5 mA (mano)
- Es la corriente máxima que una persona puede soltar voluntariamente.

32.2 Causas de Accidentes Eléctricos

Contacto directo:

- Contacto con partes activas (conductores desnudos, bornes, barras).
- Ocurre durante trabajos de mantenimiento, instalación o por error del operario.
- Trabajar sin verificar ausencia de tensión (falta de procedimiento de bloqueo).

Contacto indirecto:

- Contacto con masas que accidentalmente están bajo tensión (carcasa metálica de un equipo con falla de aislamiento).
- Ocurre por falla de aislamiento, sin sistema de puesta a tierra o con tierra defectuosa.

Arco eléctrico (arc flash):

- Descarga eléctrica a través del aire entre conductores o a tierra.
- Temperatura del arco: hasta 20,000°C (varias veces la superficie del sol).
- Causa: cortocircuito, error de maniobra, herramienta metálica cerca de partes energizadas.
- Efectos: quemaduras graves, onda de presión, luz cegadora, metal vaporizado.
- El arco puede ocurrir sin contacto físico (por aproximación excesiva a alta tensión).

Sobrecarga:

- Exceso de corriente por encima de la capacidad nominal de un conductor o equipo.
- Causa calentamiento excesivo, deterioro del aislamiento, posible incendio.

Cortocircuito:

- Conexión de baja impedancia entre conductores de diferente potencial.
- Corriente extremadamente alta (10-100 kA), arco eléctrico, daños catastróficos.

32.3 Sistema de Puesta a Tierra

La puesta a tierra es la conexión intencional de partes conductoras accesibles (masas) al terreno mediante electrodos (jabalinas, mallas).

Funciones:

- Limitar el voltaje de las masas respecto a tierra en caso de falla de aislamiento.
- Proporcionar un camino de baja impedancia para la corriente de falla.
- Facilitar la operación de los dispositivos de protección (interruptores

diferenciales, fusibles).

- Disipar energía de rayos y sobretensiones.

Tipos de tierra:

- Tierra de protección (PE): Protege a las personas (conectada a masas metálicas).
- Tierra de servicio (N): Neutro del transformador (referencia del sistema).
- Tierra de instrumentación: Referencia limpia para equipos electrónicos sensibles.

Componentes:

- Electrodo (jabalina): Varilla de cobre o acero cobrizado de 2-3 m, enterrada verticalmente.
- Conductor de tierra: Cable desnudo o aislado conectando el electrodo al tablero.
- Barra de tierra (bornera de tierra): Punto central de conexión en el tablero.
- Conductores de protección: Desde la barra a cada equipo y toma de corriente.

Esquemas de conexión a tierra (IEC 60364):

- TN: Neutro conectado a tierra en el transformador. Masas conectadas al neutro (TN-S: conductores separados; TN-C: neutro y protección combinados; TN-C-S: combinación).
- TT: Neutro conectado a tierra en el transformador. Masas conectadas a electrodo independiente (común en instalaciones domiciliarias).
- IT: Sin conexión directa a tierra (usado en quirófanos, industrias de procesos continuos).

32.4 Protección Diferencial

El interruptor diferencial (RCD - Residual Current Device) detecta diferencias entre la corriente que va y vuelve por un circuito. Si la diferencia supera el umbral, desconecta el circuito.

Principio de funcionamiento:

- Un transformador toroidal abraza los conductores de fase y neutro.
- En condiciones normales: $I_{\text{fase}} = I_{\text{neutro}}$, no hay flujo magnético.
- En caso de fuga a tierra: $I_{\text{fase}} \neq I_{\text{neutro}}$, se induce corriente en el toroidal.
- Si la corriente de fuga supera el umbral ($I_{\Delta n}$), el disparador abre los contactos.

Tipos según sensibilidad:

- Alta sensibilidad: 10-30 mA (protección de personas, tomas de uso general).
- Media sensibilidad: 100-300 mA (protección contra incendios, circuitos generales).
- Baja sensibilidad: 500-1000 mA (protección de equipos, selectividad).

Tipos según forma de onda:

- Tipo AC: Detecta fugas de corriente alterna senoidal.
- Tipo A: Detecta AC senoidal y AC pulsante (rectificada de media onda).
- Tipo B: Detecta AC, DC pulsante y DC pura (para variadores de frecuencia, UPS).
- Tipo F: Para circuitos con frecuencias mixtas (electrodomésticos modernos).

Selectividad:

- Diferencial general (300 mA) aguas arriba.
- Diferenciales secundarios (30 mA) aguas abajo.
- En caso de fuga, solo dispara el diferencial más cercano a la falla.

32.5 Bloqueo y Etiquetado (LOTO)

El procedimiento LOTO (Lockout-Tagout) es un sistema de seguridad que garantiza que las fuentes de energía estén aisladas antes de realizar trabajos de mantenimiento.

Pasos del procedimiento LOTO:

1. Notificar a todos los afectados.
2. Apagar el equipo siguiendo el procedimiento normal.
3. Aislar todas las fuentes de energía (eléctrica, neumática, hidráulica, mecánica).
4. Aplicar candado y etiqueta en cada punto de aislamiento.
5. Verificar la ausencia de energía (probar que el equipo no arranca, medir voltaje).
6. Realizar el trabajo de mantenimiento.
7. Retirar herramientas y personal.
8. Retirar candados y etiquetas por la persona que los colocó.
9. Notificar que el equipo está listo para operar.

Equipo LOTO:

- Candados de seguridad (generalmente rojos, con una sola llave por trabajador).
- Etiquetas resistentes con advertencia y datos del trabajador.
- Block de candados (hasp) para múltiples trabajadores.
- Dispositivos de bloqueo específicos (para disyuntores, válvulas, enchufes).

32.6 Equipos de Protección Personal (EPP)

Protección básica para trabajos eléctricos:

- Casco dieléctrico: Sin perforaciones metálicas, resistente a impactos.
- Gafas de seguridad: Protección contra arco eléctrico, partículas, luz cegadora.

- Guantes dieléctricos: Clasificados por voltaje máximo (Clase 00: 500V, Clase 0: 1000V, Clase 1: 7500V, etc.). Revisar fecha de prueba dieléctrica.
- Ropa de trabajo antiarco (arc flash suit): Norma ASTM F1506, calibrada según nivel de energía incidente (cal/cm²).
- Calzado de seguridad dieléctrico: Suela aislante, resistente a perforaciones.
- Protectores faciales: Pantalla facial transparente con protección UV contra arco.

Equipo avanzado para alta tensión:

- Pértiga de salvamento y detección de tensión.
- Banqueta o alfombra aislante.
- Señalización y barandillas de seguridad.
- Detectores de tensión (contacto y sin contacto).

32.7 Normativa Internacional

IEC 60364: Instalaciones eléctricas de baja tensión (base de la mayoría de normativas nacionales).

IEC 60947: Aparata de baja tensión (interruptores, contactores, seccionadores).

NFPA 70E: Seguridad eléctrica en lugares de trabajo (Estados Unidos). Define niveles de energía incidente y EPP requerido.

OSHA 29 CFR 1910.269: Norma de seguridad para generación, transmisión y distribución eléctrica.

UNE/IEC 62305: Protección contra rayos.

ATEX 2014/34/UE: Equipos para atmósferas explosivas (gas, polvo).

32.8 Primeros Auxilios en Accidentes Eléctricos

Protocolo de actuación (PAS): Proteger, Avisar, Socorrer.

1. Proteger: Cortar la corriente antes de tocar a la víctima (desconectar interruptor, retirar el cable con un objeto no conductor). Si no es posible, separar a la víctima con material aislante (madera seca, goma).
2. Avisar: Llamar a emergencias (112 en Europa, 911 en América). Indicar: qué pasó, cuántas víctimas, estado, ubicación exacta.

3. Socorrer:

- La víctima no responde ni respira: Iniciar RCP (30 compresiones, 2 ventilaciones).
- Continuar RCP hasta que llegue ayuda o la víctima se recupere.
- Si hay desfibrilador (DEA): Encender, seguir instrucciones de voz.
- Tratar quemaduras eléctricas: Enfriar con agua, cubrir con gasa estéril, no aplicar cremas.
- NO enterrar a la víctima en la tierra (mito peligroso e inútil).

Ejercicios del Capítulo 32

1. Explica los efectos de 10 mA, 50 mA y 200 mA en el cuerpo humano a 50 Hz.
2. ¿Cuál es la diferencia entre contacto directo e indirecto?
3. Describe los tres esquemas de conexión a tierra (TN, TT, IT) y sus aplicaciones.
4. ¿Qué es un interruptor diferencial y cuál es su función de protección?
5. Explica el procedimiento LOTO paso a paso.
6. ¿Qué EPP se requiere para trabajar en un tablero eléctrico de 480 V?
7. ¿Qué hacer si un compañero recibe una descarga eléctrica y no responde?
8. Investiga la normativa NFPA 70E y su aplicación en la industria.

\newpage

CAPÍTULO 33: NORMATIVAS ELÉCTRICAS

33.1 Importancia de las Normativas

Las normativas eléctricas son conjuntos de reglas y estándares que garantizan la seguridad, calidad y compatibilidad de las instalaciones y equipos eléctricos. Su cumplimiento no solo es obligatorio legalmente, sino que también protege vidas, equipos y la continuidad de los procesos productivos.

En el contexto de la mecatrónica industrial, el conocimiento y aplicación de normativas es esencial para diseñar, instalar y mantener sistemas que cumplan con los requisitos legales y de seguridad.

33.2 Normas Internacionales

IEC (International Electrotechnical Commission):

Es la organización internacional de normalización más importante para tecnologías eléctricas y electrónicas. Sus normas son adoptadas por la mayoría de los países.

Normas IEC relevantes:

- IEC 60364: Instalaciones eléctricas de baja tensión (la más importante para instalaciones).
- IEC 60947: Aparata de baja tensión (interruptores, contactores, seccionadores).
- IEC 61131: Autómatas programables (PLC).
- IEC 61158: Bus de campo (PROFIBUS, Foundation Fieldbus).
- IEC 61800: Sistemas de accionamiento de potencia ajustable (variadores de frecuencia).
- IEC 62061: Seguridad funcional de máquinas (relacionada con ISO 13849).
- IEC 61508: Seguridad funcional de sistemas eléctricos/electrónicos/programables (base para SIL).
- IEC 60204: Seguridad de máquinas - Equipo eléctrico.
- IEC 60529: Grados de protección IP.

- IEC 60034: Máquinas eléctricas rotativas.
- IEC 60076: Transformadores de potencia.

33.3 Normas ISO Relacionadas

ISO (International Organization for Standardization):

- ISO 13849: Partes de sistemas de control relacionadas con la seguridad. Define PL (Performance Level) a, b, c, d, e.
- ISO 12100: Seguridad de máquinas - Principios generales para diseño y evaluación de riesgos.
- ISO 4414: Sistemas neumáticos - Reglas generales.
- ISO 4413: Sistemas hidráulicos - Reglas generales.
- ISO 9001: Sistema de gestión de calidad.
- ISO 14001: Sistema de gestión ambiental.
- ISO 50001: Sistema de gestión energética.

33.4 Normas Nacionales

España:

- REBT: Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (Real Decreto 842/2002). Es la norma fundamental para instalaciones de baja tensión.
- RAT: Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en líneas eléctricas de alta tensión.
- Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC): Desarrollan aspectos específicos del REBT.

Unión Europea:

- Directiva de Baja Tensión (2014/35/UE): Requisitos de seguridad para equipos eléctricos.
- Directiva de Máquinas (2006/42/CE): Requisitos de seguridad para maquinaria.
- Directiva EMC (2014/30/UE): Compatibilidad electromagnética.
- Directiva ATEX (2014/34/UE): Equipos para atmósferas explosivas.
- Marcado CE: El fabricante declara que el producto cumple con todas las directivas aplicables.

Estados Unidos:

- NEC (National Electrical Code - NFPA 70): Equivalente al REBT. Especifica requisitos de instalación.
- NESC (National Electrical Safety Code - IEEE C2): Seguridad en instalaciones de

servicios públicos.

- UL (Underwriters Laboratories): Normas de seguridad para productos.
- NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery.

América Latina:

- Argentina: Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas (AEA 90364).
- Brasil: NBR 5410 (Instalaciones eléctricas de baja tensión).
- México: NOM-001-SEDE (Instalaciones Eléctricas).
- Chile: NCH Elec. 4/2003.

33.5 Grados de Protección IP

El sistema IP (Ingress Protection) clasifica el grado de protección de envoltentes contra entrada de sólidos y líquidos.

Primer dígito (protección contra sólidos):

- 0: Sin protección
- 1: Cuerpos sólidos > 50 mm
- 2: Cuerpos sólidos > 12.5 mm (dedos)
- 3: Cuerpos sólidos > 2.5 mm (herramientas)
- 4: Cuerpos sólidos > 1 mm (alambres)
- 5: Protección contra polvo (limitada entrada, sin daños)
- 6: Totalmente protegido contra el polvo

Segundo dígito (protección contra líquidos):

- 0: Sin protección
- 1: Goteo vertical
- 2: Goteo inclinado (15°)
- 3: Agua pulverizada
- 4: Salpicaduras de agua
- 5: Chorros de agua
- 6: Chorros potentes de agua
- 7: Inmersión temporal (hasta 1 m, 30 min)
- 8: Inmersión continua (> 1 m, condiciones especificadas)
- 9: Agua a alta temperatura / alta presión

Ejemplos:

- IP20: Uso interior, protección contra dedos, sin protección contra agua.
- IP54: Protección contra polvo y salpicaduras. Común en equipos industriales.

- IP65: Polvo total y chorros de agua. Exteriores.
- IP67: Inmersión temporal. Equipos en exteriores expuestos a inundación.

33.6 Clasificación de Áreas (ATEX/IECEx)

Las áreas con riesgo de explosión requieren equipos certificados que no puedan iniciar una explosión.

Clasificación de zonas (IEC 60079):

- Zona 0 (Gas): Presencia permanente de atmósfera explosiva (> 1000 h/año).
- Zona 1 (Gas): Presencia ocasional (10-1000 h/año).
- Zona 2 (Gas): Presencia poco probable (< 10 h/año).
- Zona 20 (Polvo): Presencia permanente de nube de polvo combustible.
- Zona 21 (Polvo): Presencia ocasional.
- Zona 22 (Polvo): Presencia poco probable.

Categorías de equipos:

- Categoría 1 (Muy alta protección): Zonas 0, 20.
- Categoría 2 (Alta protección): Zonas 1, 21.
- Categoría 3 (Protección normal): Zonas 2, 22.

Modos de protección:

- Ex d (a prueba de explosión): Envoltente resistente que contiene la explosión interna.
- Ex e (seguridad aumentada): Medidas adicionales para evitar arcos y chispas.
- Ex i (intrínsecamente seguro): Energía limitada a niveles que no pueden causar ignición.
- Ex n (no incendiario): No produce ignición en condiciones normales.
- Ex p (presurización): Presurización de envoltente para evitar entrada de gas.
- Ex m (encapsulado): Componentes encapsulados en resina.

Marcado típico: II 2 G Ex d IIC T6 (Equipo para gas, zona 1, a prueba de explosión, grupo IIC, T6 = 85°C).

33.7 Normas de Seguridad Funcional (SIL/PL)

La seguridad funcional asegura que los sistemas de control respondan correctamente a condiciones peligrosas.

SIL (Safety Integrity Level) - IEC 61508/62061:

- SIL 1: Riesgo reducido, 1 fallo peligroso/10 años (probabilidad de fallo 0.1-0.01).
- SIL 2: Riesgo moderado, 1 fallo/100 años (probabilidad 0.01-0.001).
- SIL 3: Riesgo alto, 1 fallo/1000 años (probabilidad 0.001-0.0001).
- SIL 4: Riesgo muy alto (raro en industria, típico en nuclear, ferrocarriles).

PL (Performance Level) - ISO 13849:

- PL a: Bajo (probabilidad de fallo peligroso por hora 10^{-4} a 10^{-5}).
- PL b: Moderado (10^{-5} a 3×10^{-6}).
- PL c: Medio (3×10^{-6} a 10^{-6}).
- PL d: Alto (10^{-6} a 10^{-7}).
- PL e: Muy alto (10^{-7} a 10^{-8}).

Categorías de arquitectura (ISO 13849):

- Básica (B): Un canal, sin detección de fallos.
- Categoría 1: Un canal, componentes probados.
- Categoría 2: Un canal con prueba periódica.
- Categoría 3: Dos canales, monitoreo mutuo.
- Categoría 4: Dos canales, tolerancia a un solo fallo, detección de múltiples fallos.

33.8 Compatibilidad Electromagnética (EMC)

La EMC asegura que los equipos no generen interferencias que afecten a otros equipos, ni sean afectados por interferencias externas.

Emisiones:

- Límites de emisiones conducidas (150 kHz - 30 MHz).
- Límites de emisiones radiadas (30 MHz - 1 GHz).
- Medición en laboratorio acreditado.

Inmunidad:

- Descargas electrostáticas (ESD - IEC 61000-4-2).
- Campos electromagnéticos radiados (IEC 61000-4-3).
- Transitorios rápidos (burst - IEC 61000-4-4).
- Sobretensiones (surge - IEC 61000-4-5).
- Armónicos de corriente (IEC 61000-3-2).

Marcado CE de EMC:

El fabricante debe demostrar que el equipo cumple con las normas EMC aplicables. Para equipos industriales, se aplican límites menos restrictivos que para equipos domésticos.

Ejercicios del Capítulo 33

1. Explica la diferencia entre IEC, ISO y normativas nacionales.
2. ¿Qué es el grado de protección IP y cómo se interpreta IP65?
3. Clasifica las zonas ATEX para gases (Zona 0, 1, 2) y su diferencia.
4. ¿Qué es la seguridad funcional y qué niveles SIL existen?
5. Un contactor tiene marcado CE. ¿Qué significa y qué requisitos debe cumplir?
6. Investiga la Directiva de Máquinas 2006/42/CE y su aplicación en sistemas mecatrónicos.
7. ¿Qué modos de protección ATEX existen (Ex d, Ex e, Ex i) y dónde se aplica cada uno?
8. Explica la importancia de la EMC en sistemas industriales con variadores de frecuencia.

\newpage

CAPÍTULO 34: SENSORES DE TEMPERATURA

34.1 Importancia de la Medición de Temperatura

La temperatura es una de las variables físicas más medidas en la industria. Su control es esencial en procesos químicos, tratamiento térmico, sistemas HVAC, monitoreo de equipos, seguridad contra incendios y control de calidad de productos.

En mecatrónica, los sensores de temperatura se integran con PLC y sistemas SCADA para monitorear y controlar procesos, proteger equipos contra sobrecalentamiento y garantizar condiciones óptimas de operación.

34.2 Termopares (Termocuplas)

Los termopares son los sensores de temperatura más utilizados en la industria por su amplio rango, robustez y bajo costo.

Principio de funcionamiento (Efecto Seebeck):

Cuando dos metales diferentes se unen en un extremo (unión caliente) y el otro extremo está a diferente temperatura (unión fría), se genera una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura.

Tipos de termopares:

- Tipo K (NiCr-NiAl): -200°C a 1250°C. El más común. Económico, buena linealidad.
- Tipo J (Fe-CuNi): -40°C a 750°C. Alto voltaje termoeléctrico. Sensible a corrosión.
- Tipo T (Cu-CuNi): -200°C a 350°C. Alta precisión a bajas temperaturas.
- Tipo N (NiCrSi-NiSi): -200°C a 1300°C. Mejor estabilidad que K, resiste oxidación.
- Tipo R (Pt13%Rh-Pt): 0°C a 1600°C. Alta temperatura, caro.
- Tipo S (Pt10%Rh-Pt): 0°C a 1600°C. Estándar de calibración.
- Tipo B (Pt30%Rh-Pt6%Rh): 200°C a 1800°C. Máxima temperatura.

Cables de extensión y compensación:

- Cables de extensión: Mismo material que el termopar. Menor error.

- Cables de compensación: Aleación similar pero más económica. Rango limitado.
- Conectar con la polaridad correcta (+/-).

Unión fría (Cold Junction Compensation - CJC):

La FEM medida depende de la temperatura de ambas uniones. Para conocer solo la temperatura de la unión de medición, se debe medir la temperatura de la unión de referencia (unión fría) y compensar electrónicamente.

34.3 RTD (Resistance Temperature Detector)

Los RTD utilizan el cambio de resistencia de un metal con la temperatura. Son más precisos y estables que los termopares, pero tienen menor rango de temperatura y mayor costo.

Pt100: El RTD más común. Resistencia de 100 Ω a 0°C.

- Rango: -200°C a 600°C (hasta 850°C para algunos).
- Precisión: $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (Clase AA) a $\pm 0.6^\circ\text{C}$ (Clase B).
- Linealidad: $R(T) = R_0(1 + \alpha T)$, donde $\alpha \approx 0.00385 \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$.
- Pt1000: Resistencia de 1000 Ω a 0°C. Mayor señal, menor efecto de cables.

Conexión a 2, 3 y 4 hilos:

- 2 hilos: Simple pero incluye resistencia de cables en la medición. Menor precisión.
- 3 hilos: Compensa la resistencia de los cables usando el tercer hilo como referencia. El más común en industria.
- 4 hilos: Dos hilos para corriente de excitación, dos para medición de voltaje. Máxima precisión. Usado en laboratorios y calibración.

Materiales:

- Platino (Pt): El más común. Alta estabilidad, amplio rango.
- Níquel (Ni): Menor rango, menor costo. Más no lineal.
- Cobre (Cu): Alta linealidad, bajo rango de temperatura.

34.4 Termistores NTC y PTC

Los termistores son semiconductores cuya resistencia varía significativamente con la temperatura.

NTC (Negative Temperature Coefficient):

- La resistencia DISMINUYE al aumentar la temperatura.
- Alta sensibilidad (mayor que RTD y termopares).

- Rango típico: -50°C a 300°C.
- Muy no lineal (necesita linealización o tabla de lookup).
- Usos: medición de temperatura en electrónica, electrodomésticos, automoción.

PTC (Positive Temperature Coefficient):

- La resistencia AUMENTA al aumentar la temperatura.
- Cambio abrupto cerca de una temperatura umbral (Curie).
- Usos: protección contra sobrecorriente (como fusible rearmable), protección de motores (bimetálico PTC).

Curva de un NTC (ecuación de Steinhart-Hart):

$$1/T = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3$$

34.5 Sensores de Temperatura Integrados

LM35 (Analog Devices):

- Salida lineal: 10 mV/°C.
- Rango: -55°C a 150°C.
- Precisión: ±0.5°C a 25°C.
- Fácil de usar, no requiere calibración.
- Alimentación: 4-30 V.

DS18B20 (Maxim):

- Comunicación digital (OneWire).
- Resolución configurable: 9-12 bits (0.5°C a 0.0625°C).
- Rango: -55°C a 125°C.
- Cada sensor tiene ID único (múltiples sensores en un bus).
- Alimentación: 3-5.5 V.

DHT11/DHT22:

- Temperatura y humedad en un solo módulo.
- Comunicación digital propietaria.
- DHT22: rango -40°C a 80°C, precisión ±0.5°C.
- Usado en proyectos de automatización y climatización.

Sensores infrarrojos de temperatura:

- MLX90614: Sensor IR sin contacto. -70°C a 380°C.
- AMG8833: Matriz de 8×8 píxeles térmicos. Cámara térmica de bajo costo.

34.6 Pirómetros Ópticos

Los pirómetros miden temperatura sin contacto, basándose en la radiación infrarroja emitida por los cuerpos calientes.

Principio:

Todo cuerpo emite radiación electromagnética según su temperatura (Ley de Planck). La intensidad en ciertas longitudes de onda se correlaciona con la temperatura.

Tipos:

- Pirómetro de radiación total: Mide toda la radiación infrarroja. Menos preciso.
- Pirómetro de banda estrecha: Filtro para longitud de onda específica. Más preciso.
- Pirómetro de relación (dos colores): Relación entre dos longitudes de onda. No afectado por emisividad variable.

Emisividad:

- La emisividad (ϵ) indica cuán eficientemente un material emite radiación.
- Cuerpo negro: $\epsilon = 1$. Materiales reales: $\epsilon < 1$.
- Superficies pulidas: ϵ baja (0.1-0.3). Superficies mates: ϵ alta (0.8-0.95).
- El pirómetro debe configurarse con la emisividad correcta.

Aplicaciones industriales:

- Hornos de fundición: hasta 2000°C.
- Procesos de laminación y forja.
- Control de calidad en vidrio y cerámica.
- Monitoreo de rodamientos y equipos eléctricos.

34.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Protección de motores: Termistores PTC embebidos en devanados de motores detectan sobrecalentamiento. Conectados a relés de protección que desenergizan el motor.

Control de procesos: PLC lee temperatura de RTD o termopar a través de módulos de entrada analógica. Control PID para mantener temperatura en hornos, calderas, reactores.

Climatización industrial: Sensores de temperatura controlan HVAC en salas de servidores, salas limpias, almacenes.

Monitoreo de rodamientos: Sensores RTD en chumaceras y rodamientos detectan calentamiento anormal antes de una falla catastrófica.

Soldadura: Control preciso de temperatura en estaciones de soldadura, hornos de reflow.

Seguridad: Detectores de calor en sistemas de alarma contra incendios.

Ejercicios del Capítulo 34

1. Explica el principio Seebeck de los termopares.
2. Compara termopares, RTD y termistores en términos de rango, precisión y costo.
3. ¿Qué es la compensación de unión fría en termopares y por qué es necesaria?
4. Calcula la resistencia de un Pt100 a 100°C ($\alpha = 0.00385$).
5. Explica la diferencia entre conexión a 2, 3 y 4 hilos en RTD.
6. ¿Qué es la emisividad y cómo afecta la medición con pirómetros?
7. Selecciona el sensor de temperatura adecuado para: a) Horno de 1200°C, b) Sala de servidores, c) Protección de motor.
8. Diseña un circuito de medición de temperatura con Pt100 y un amplificador de instrumentación.

\newpage

CAPÍTULO 35: SENSORES DE PRESIÓN

35.1 Conceptos Fundamentales de Presión

La presión es la fuerza por unidad de área que ejerce un fluido (líquido o gas) sobre las superficies que lo contienen. Su medición es esencial en numerosos procesos industriales: neumática, hidráulica, control de calderas, procesos químicos, entre otros.

Unidades de presión:

- Pascal (Pa): Unidad SI. $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$.
- Bar: $1 \text{ bar} = 100,000 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$. Muy usado en Europa.
- PSI (libras por pulgada cuadrada): $1 \text{ psi} \approx 6.895 \text{ kPa}$. Usado en países anglosajones.
- atm (atmósfera): $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa} = 1.01325 \text{ bar}$.
- kgf/cm^2 : $1 \text{ kgf/cm}^2 = 98,066.5 \text{ Pa} \approx 0.981 \text{ bar}$.
- mmH₂O, mmHg: Unidades manométricas.

Tipos de presión:

- Presión absoluta: Referencia al vacío total (0 Pa). $P_{\text{abs}} = P_{\text{manométrica}} + P_{\text{atmosférica}}$.
- Presión manométrica (relativa): Referencia a la presión atmosférica local. La más común en industria. Indicada como barg, psig.
- Presión diferencial: Diferencia entre dos puntos. Usada para medir caudal, nivel, obstrucción en filtros.
- Vacío: Presión por debajo de la atmosférica. Medido en mmHg, mbar, % de vacío.

35.2 Sensores de Presión Mecánicos

Tubo de Bourdon:

- Tubo curvo de sección ovalada que se endereza al aumentar la presión.
- Mecanismo de engranajes y aguja indicadora.
- Rango: 0.6 a 7000 bar.

- Ventajas: simple, robusto, sin alimentación.
- Desventajas: sin salida eléctrica, histéresis.

Manómetro de diafragma:

- Diafragma flexible que se deforma con la presión.
- Adecuado para presiones bajas y fluidos corrosivos.
- Puede incluir transmisor electrónico.

Manómetro de fuelle (bellows):

- Fuelle metálico que se expande/contrae con la presión.
- Alta sensibilidad para bajas presiones.
- Usado en aplicaciones de vacío y baja presión.

35.3 Sensores de Presión Electrónicos

Piezo-resistivo (semiconductor):

- Puente de Wheatstone difundido en un chip de silicio.
- La deformación del diafragma por la presión cambia las resistencias.
- Muy sensible, tamaño pequeño, bajo costo.
- Compensación de temperatura integrada.
- Rangos: 10 mbar a 1000 bar.
- Precisión: 0.1-1% del rango.

Capacitivo:

- Diafragma metálico y electrodo fijo forman un capacitor.
- La deformación del diafragma cambia la capacitancia.
- Bajo consumo, buena estabilidad.
- Usado en aplicaciones de baja presión y vacío.

Efecto Hall:

- Imán en el diafragma y sensor Hall en la carcasa.
- El movimiento del diafragma cambia el campo magnético detectado por el Hall.
- Robusto, larga vida.

Extensométrico (strain gauge):

- Galgas extensométricas en el diafragma miden la deformación.
- Puente de Wheatstone.
- Exacto, estable, amplio rango.
- Usado en aplicaciones de alta precisión.

Resonante:

- Elemento resonante (silicio o cuarzo) cuya frecuencia cambia con la presión.
- Salida digital (frecuencia), alta precisión.
- Usado como patrón de calibración.

35.4 Transmisores de Presión

Los transmisores convierten la señal del sensor a una señal estándar industrial, típicamente 4-20 mA o bus de campo.

Señal 4-20 mA:

- 4 mA: Presión mínima del rango (0%).
- 20 mA: Presión máxima del rango (100%).
- 4 mA permite detectar rotura de cable (0 mA = falla).
- Alimentación por lazo (2 hilos) o separada (3-4 hilos).

Configuración del rango:

- Rango (range): Presión mínima y máxima que mide el transmisor.
- Span: Diferencia entre máximo y mínimo.
- Zero: Ajuste de offset.
- Elevación/supresión de cero: Desplazar el cero del rango.

Parámetros de selección:

- Rango de presión.
- Fluido compatible (material de la celda, sellos).
- Temperatura del proceso.
- Precisión (típicamente 0.1-1% del span).
- Salida (4-20 mA, 0-10 V, HART, PROFIBUS, IO-Link).
- Conexión al proceso (G1/4, G1/2, NPT, brida).
- Protección (IP65, IP67, ATEX).

35.5 Protocolo HART

HART (Highway Addressable Remote Transducer) es un protocolo de comunicación que superpone una señal digital sobre el lazo analógico 4-20 mA.

Características:

- Compatible con 4-20 mA (modo analógico).
- Comunicación digital FSK (1200 bps).

- Hasta 15 dispositivos por bucle (multidrop).
- Variables de proceso, configuración, diagnóstico.

Aplicaciones:

- Configuración remota de transmisores.
- Lectura de múltiples variables (presión, temperatura del sensor).
- Diagnóstico y mantenimiento predictivo.
- Integración con sistemas de gestión de activos (AMS, PDM).

35.6 Sensores de Presión Diferencial

Los sensores de presión diferencial miden la diferencia entre dos puntos de presión. Son la base de muchos sistemas de medición industrial.

Aplicaciones:

- Medición de caudal: Placa orificio, tubo Pitot. La caída de presión es proporcional al cuadrado del caudal.
- Medición de nivel: En tanques abiertos y cerrados. La presión diferencial indica la altura de líquido.
- Monitoreo de filtros: La presión diferencial a través del filtro indica su obstrucción.
- Control de columnas de destilación: Diferencia de presión entre etapas.

Configuraciones:

- Transmisor de presión diferencial puro (DP): mide solo la diferencia.
- Transmisor de presión absoluta + diferencial: mide dos presiones y la diferencia.

35.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Sistemas neumáticos: Monitoreo de presión de aire comprimido (típicamente 6-8 bar). Sensores de presión en líneas de alimentación de cilindros y actuadores. Alarmas por baja presión.

Sistemas hidráulicos: Control de presión en bombas, válvulas y cilindros hidráulicos. Sensores de presión de alta presión (hasta 350 bar). Protección contra sobrepresión.

Control de procesos: Medición de presión en reactores, calderas, tuberías de vapor. Control PID de presión con válvulas de control. Seguridad (PSV - Pressure Safety Valves).

Robótica: Sensores de presión en pinzas robóticas (fuerza de agarre). Control de presión en sistemas de sujeción neumática.

Automoción: Monitoreo de presión de aceite, combustible, neumáticos (TPMS). Sensores MAP (Manifold Absolute Pressure) en motores.

HVAC: Control de presión en sistemas de refrigeración y climatización. Detección de obstrucción en filtros.

Ejercicios del Capítulo 35

1. Explica la diferencia entre presión absoluta, manométrica y diferencial.
2. Convierte 5 bar a Pa, PSI y atmósferas.
3. Explica el principio de funcionamiento de un sensor de presión piezo-resistivo.
4. ¿Qué es la señal 4-20 mA y por qué se usa 4 mA como mínimo en lugar de 0 mA?
5. Un transmisor de presión tiene rango 0-10 bar y salida 4-20 mA. ¿Qué corriente corresponde a 3.5 bar?
6. Explica las ventajas del protocolo HART sobre la señal analógica 4-20 mA.
7. ¿Cómo se usa la presión diferencial para medir caudal?
8. Selecciona un transmisor de presión para una aplicación neumática a 8 bar con salida 4-20 mA y conexión G1/4.

\newpage

CAPÍTULO 36: SENSORES DE PROXIMIDAD

36.1 Importancia de los Sensores de Proximidad

Los sensores de proximidad detectan la presencia de objetos sin contacto físico. Son fundamentales en la automatización industrial para detectar piezas en cintas transportadoras, finales de carrera en actuadores, presencia/ausencia en máquinas de ensamblaje, y sistemas de seguridad.

Se clasifican según el principio de detección: inductivos (metales), capacitivos (cualquier material), ópticos (fotocélulas), ultrasónicos, magnéticos (efecto Hall).

36.2 Sensores Inductivos

Detectan objetos metálicos mediante un campo electromagnético de alta frecuencia.

Principio de funcionamiento:

1. Un oscilador genera un campo magnético alterno de alta frecuencia (100 kHz - 1 MHz) en la cara del sensor.
2. Cuando un objeto metálico entra en el campo, se inducen corrientes de Foucault en el objeto.
3. Las corrientes de Foucault absorben energía del oscilador, amortiguando la oscilación.
4. Un circuito detector (evaluador) detecta la reducción de amplitud y cambia la salida.

Factores de corrección:

- Acero (Fe): Factor 1.0 (distancia de detección nominal).
- Acero inoxidable: Factor 0.6-0.9.
- Aluminio: Factor 0.3-0.5.
- Cobre: Factor 0.2-0.4.
- Latón: Factor 0.3-0.5.
- Los metales no ferrosos tienen menor distancia de detección.

Tipos de salida:

- NPN (sinking): La salida conmuta a negativo (GND). Común en sensores japoneses y asiáticos.
- PNP (sourcing): La salida conmuta a positivo (24 V). Común en sensores europeos y americanos.
- DC 2 hilos: Dos cables, funciona como interruptor NA o NC. Polarizado.
- AC 2 hilos: Para circuitos de AC. No polarizado.
- NAMUR: Dos hilos, cambio de resistencia (para zonas ATEX Ex i).

Distancia de detección:

- Distancia nominal (S_n): Distancia a la que detecta un objeto estándar (acero, cuadrado, espesor 1 mm).
- Distancia efectiva (S_r): $0.9 \times S_n$ (con tolerancia de fabricación).
- Distancia utilizable (S_u): $0.81 \times S_n$ (considerando temperatura y tensión).
- Distancia de operación (S_a): $0-0.81 \times S_n$ (rango de operación segura).

Tipos constructivos:

- Tubulares M8, M12, M18, M30: Roscados, los más comunes. Distancias: 1-20 mm.
- Cubo (cuadrado): Distancias mayores (hasta 60 mm). Montaje en superficies planas.
- Tipo anillo (ring): Detectan objetos que pasan por el centro. Usados en alimentadores de piezas.
- Tipo ranura (slot): Objeto pasa por la ranura. Usados en detectores de movimiento (engranajes).

36.3 Sensores Capacitivos

Detectan cualquier material (metálico o no metálico) que tenga una constante dieléctrica diferente al aire.

Principio de funcionamiento:

1. Un oscilador de alta frecuencia (10-100 kHz) carga y descarga un capacitor formado por la cara del sensor y el objeto.
2. Cuando un objeto se aproxima, la capacitancia entre la cara del sensor y tierra cambia.
3. La amplitud de oscilación cambia, activando el detector.
4. El sensor se ajusta (potenciómetro de sensibilidad) para detectar diferentes materiales.

Materiales detectables:

- Metales (buena detección, alta constante dieléctrica).
- Plásticos, vidrio, cerámica, madera, papel, cartón.
- Líquidos (agua, aceite, etc.) a través de paredes no metálicas.
- Polvos y granulados.

Aplicaciones típicas:

- Detección de nivel de líquidos en tanques (a través de paredes).
- Detección de vidrio y plástico en envases.
- Conteo de piezas de cualquier material.
- Detección de productos en envases de cartón o plástico.

Limitaciones:

- Distancia de detección limitada (típicamente 1-25 mm).
- Sensible a la humedad y condensación.
- La distancia depende de la constante dieléctrica del material.
- Afectado por masas metálicas cercanas.

36.4 Sensores Ópticos (Fotocélulas)

Los sensores ópticos utilizan luz (visible o infrarroja) para detectar objetos. Son los más versátiles, con distancias de detección desde mm hasta decenas de metros.

Tipos:

Barrera de luz (through-beam):

- Emisor y receptor separados. El objeto interrumpe el haz de luz.
- Mayor distancia (hasta 50 m).
- Inmune a superficies reflectantes del objeto.
- Requiere cableado en ambos lados.

Reflex (retro-reflectivo):

- Emisor y receptor en el mismo cuerpo. Un reflector devuelve el haz.
- Distancia hasta 10 m.
- Cableado en un solo lado.
- Detecta objetos opacos que interrumpen el haz.
- Polarizado (filtro de polarización) para evitar falsas detecciones con superficies reflectantes.

Difuso (proximidad):

- Emisor y receptor en el mismo cuerpo. La luz se refleja en el objeto.
- Distancia típica: 10-1000 mm.

- Detecta cualquier objeto.
- La distancia depende del color y superficie del objeto.
- Versión con supresión de fondo (background suppression): detecta a una distancia fija independientemente del color.

Fibra óptica:

- Emisor y receptor separados del cuerpo del sensor por fibra óptica.
- Para espacios reducidos, altas temperaturas, entornos agresivos.
- Distancias hasta 10 m con fibra de vidrio.

Luz visible vs infrarroja:

- Rojo visible (660 nm): Fácil de alinear. Usado en la mayoría de aplicaciones.
- Infrarrojo (880 nm): Mayor potencia. Menos visible.
- Láser (650 nm, clase 1 o 2): Haz muy estrecho. Alta precisión, larga distancia.

Consideraciones de selección:

- Distancia de detección requerida.
- Tamaño, color y transparencia del objeto.
- Entorno (polvo, humedad, luz ambiental).
- Espacio de montaje.
- Velocidad de respuesta.

36.5 Sensores Ultrasónicos

Utilizan ondas sonoras de alta frecuencia (80-400 kHz) para detectar objetos mediante el tiempo de vuelo del eco.

Principio:

1. El emisor genera un pulso ultrasónico.
2. La onda se refleja en el objeto.
3. El receptor detecta el eco.
4. El tiempo entre emisión y recepción es proporcional a la distancia.

Características:

- Distancia: 30 mm a 10 m.
- Detecta cualquier material que refleje el sonido (sólidos, líquidos, polvos).
- No afectado por color, transparencia o luz ambiental.
- Afectado por: temperatura (compensación), presión, humedad, superficies absorbentes de sonido (espuma, tela).
- Zona ciega: distancia mínima donde no puede medir (generalmente 10-200 mm).
- Tipos: con salida digital (ON/OFF) o analógica (0-10 V, 4-20 mA).

36.6 Sensores Magnéticos (Efecto Hall y Reed)

Sensor de efecto Hall:

- Detecta la presencia de un campo magnético.
- Salida digital (con/sin campo) o analógica (intensidad del campo).
- Detecta imanes permanentes en actuadores neumáticos (posición de émbolo en cilindros).
- Inmune a polvo y suciedad.
- Alta velocidad de conmutación.

Sensor Reed (contacto magnético):

- Contacto de láminas metálicas que se cierra en presencia de campo magnético.
- No requiere alimentación (contacto seco).
- Bajo costo, simple.
- Vida útil limitada (desgaste mecánico del contacto).
- Baja velocidad de conmutación.

Aplicaciones:

- Detección de posición de pistón en cilindros neumáticos (sensores de montaje en ranura).
- Interruptores de puerta y seguridad.
- Finales de carrera magnéticos.
- Detectores de velocidad (ruedas dentadas con imán).

36.7 Aplicaciones en Mecatrónica

Detección de posición: Finales de carrera en cilindros neumáticos (sensores magnéticos). Presencia de piezas en estaciones de trabajo (inductivos, ópticos).

Conteo de piezas: Sensores ópticos de barrera o reflex en cintas transportadoras. Sensores inductivos para piezas metálicas.

Control de nivel: Sensores capacitivos para nivel de líquidos en tanques. Sensores ultrasónicos para nivel continuo.

Seguridad: Cortinas de luz (múltiples haces ópticos) para proteger zonas peligrosas. Sensores inductivos en puertas de seguridad.

Identificación: Sensores de color para clasificar productos. Sensores de contraste para marcas de registro en envases.

Medición de distancia: Sensores ultrasónicos y láser para posicionamiento y medición de dimensiones.

Ejercicios del Capítulo 36

1. Explica el principio de funcionamiento de un sensor inductivo.
2. ¿Por qué un sensor inductivo tiene diferente distancia de detección para acero y aluminio?
3. Compara los tres tipos de sensores ópticos: barrera, reflex y difuso.
4. ¿Qué sensor elegirías para detectar botellas de vidrio transparente en una cinta transportadora?
5. Explica las diferencias entre salida NPN y PNP en sensores industriales.
6. ¿Qué es un sensor capacitivo y qué materiales puede detectar?
7. ¿Cómo funciona un sensor ultrasónico para medición de distancia?
8. Selecciona sensores para: a) Detectar pistón en cilindro neumático, b) Contar latas de aluminio en cinta, c) Medir nivel de un silo de cereal.

\newpage

CAPÍTULO 37: SENSORES DE POSICIÓN

37.1 Importancia de la Medición de Posición

La medición precisa de posición es fundamental en sistemas mecatrónicos para control de movimiento, posicionamiento de piezas, robótica y máquinas herramienta. Los sensores de posición permiten conocer la ubicación exacta de un componente en sistemas de control de lazo cerrado.

37.2 Potenciómetros

Los potenciómetros son los sensores de posición más simples y económicos. Convierten la posición angular o lineal en una resistencia variable.

Potenciómetro lineal:

- Una resistencia fija con un cursor que se desplaza linealmente.
- Carrera típica: 10-300 mm.
- Resolución: infinita (teóricamente), limitada por ruido.

Potenciómetro rotativo:

- Resistencia circular con cursor giratorio.
- Ángulo típico: 270° a 360° (multivuelta).
- Rango: 1-10 vueltas.

Características:

- Voltaje de salida: $V_{out} = V_{ref} \times (\text{posición} / \text{carrera_total})$
- Precisión: $\pm 0.1-1\%$
- Linealidad: $\pm 0.1-0.5\%$
- Vida útil: 1-10 millones de ciclos (desgaste mecánico).
- Ventajas: bajo costo, fácil interfaz (divisor de voltaje).
- Desventajas: desgaste por contacto, ruido en el cursor, velocidad limitada.

Aplicaciones:

- Posicionamiento en mesas y husillos de bajo costo.

- Retroalimentación en actuadores lineales.
- Control de ángulo en válvulas y compuertas.

37.3 Encoders Incrementales

Los encoders incrementales convierten el movimiento rotatorio en pulsos digitales. Son el sensor de posición más utilizado en servomotores, motores paso a paso, y sistemas de control de movimiento.

Principio de funcionamiento:

Disco codificado con marcas (ranuras o franjas) que gira entre un emisor de luz y un fotodetector. Los pulsos generados indican el movimiento.

Señales de salida:

- Canal A: Pulsos de posición (cambia con el movimiento).
- Canal B: Pulsos desplazados 90° respecto a A (indica dirección).
- Canal Z (Index o Zero): Pulso único por revolución (referencia de posición absoluta).

Resolución (PPR - Pulses Per Revolution):

- Típica: 100 a 5000 PPR (encoders industriales estándar).
- Alta resolución: hasta 10,000 PPR (o más).
- Con decodificación: x1, x2, x4 (cuadruplica la resolución detectando flancos).

Tipos:

- Óptico (más común): Alta resolución, sensible a polvo y suciedad.
- Magnético: Pistas magnéticas en lugar de ópticas. Más robusto, puede tener menor resolución.
- Capacitivo: Mediciones de capacitancia. Robusto, tamaño pequeño.

Consideraciones:

- Frecuencia máxima: La frecuencia máxima de los pulsos limita la velocidad máxima del encoder.
- Cable: Usar cable apantallado para largas distancias. Evitar junto a cables de potencia.
- Conexión: Push-pull, colector abierto NPN/PNP, línea diferencial (RS-422) para largas distancias.

37.4 Encoders Absolutos

Los encoders absolutos proporcionan el valor de posición absoluta (único para cada punto del recorrido), no solo los incrementos de movimiento.

Codificación:

- Disco con múltiples pistas (cada pista es un bit).
- Código Gray: Cambia solo un bit entre posiciones adyacentes (evita errores de lectura).
- Código binario directo o BCD.

Resolución (bits):

- 10 bits: 1024 posiciones por revolución.
- 12 bits: 4096 posiciones.
- 13 bits: 8192 posiciones (común en servomotores).
- 17 bits: 131,072 posiciones (alta precisión).
- Multivuelta: Cuenta el número de revoluciones (hasta 4096 o 65536 vueltas).

Interfaces de comunicación:

- Paralelo (para resoluciones bajas): 10-17 bits en paralelo. Muchos cables.
- SSI (Synchronous Serial Interface): Serie síncrono. Cableado simple, larga distancia.
- BiSS (Bidirectional Synchronous Serial): Protocolo abierto, alta velocidad.
- PROFIBUS, EtherCAT, CANopen: Encoders de bus de campo.

Ventajas sobre incremental:

- No requiere búsqueda de referencia al encender.
- Mantiene la posición incluso sin alimentación (valor absoluto almacenado).
- Inmune a pérdida de pulsos por interferencias.

37.5 Resolvers

Los resolvers son transformadores rotatorios que indican la posición angular absoluta del rotor. Son extremadamente robustos, tolerantes a altas temperaturas, vibraciones y contaminación.

Principio:

- Devanado primario (rotor) excitado con AC (5-10 kHz).
- Dos devanados secundarios (estator) desplazados 90°.
- La amplitud de las señales en los secundarios codifica la posición: $V_1 =$

$k \times V_{exc} \times \sin(\theta)$, $V_2 = k \times V_{exc} \times \cos(\theta)$.

- De la relación sen/cos se obtiene el ángulo θ .

Características:

- Precisión: ± 5 a ± 30 minutos de arco.
- Resolución: Determinada por el convertidor R/D (resolver-to-digital), típicamente 12-16 bits.
- Sin partes electrónicas en el rotor (solo devanados).
- Temperatura: -55°C a $+155^\circ\text{C}$ (o más).
- Alta tolerancia a vibraciones y golpes.

Aplicaciones:

- Servomotores en entornos hostiles (militar, aeroespacial).
- Motores en vehículos eléctricos.
- Aplicaciones con altas temperaturas y vibraciones.

37.6 LVDT (Transformador Diferencial de Desplazamiento Lineal)

El LVDT mide desplazamiento lineal con alta precisión. Consiste en un transformador con núcleo móvil.

Principio:

- Devanado primario en el centro, dos secundarios a los lados (conectados en oposición).
- El núcleo ferromagnético se desplaza linealmente dentro del transformador.
- En posición central: voltajes iguales en ambos secundarios, salida diferencial = 0.
- Fuera del centro: el voltaje de un secundario aumenta y el otro disminuye.
- La salida diferencial es proporcional al desplazamiento.

Características:

- Carrera: ± 0.5 mm a ± 500 mm.
- Precisión: 0.1-0.5% del rango.
- Resolución: Infinita (teóricamente), limitada por el convertidor.
- Sin contacto físico (larga vida útil).
- Robusto, inmune a polvo y humedad.

Aplicaciones:

- Medición de posición en máquinas herramienta.
- Control de válvulas proporcionales.

- Posicionamiento en sistemas hidráulicos.
- Control de calidad (medición de espesores, deformaciones).

37.7 Consideraciones de Instalación

Cableado:

- Usar cable apantallado para señales de encoder y resolver.
- No tender junto a cables de potencia (motores, variadores).
- Mantener la longitud dentro de los límites especificados.
- Terminaciones correctas (conectores IP67, prensaestopas).

Montaje:

- Alineación precisa del eje del encoder con el eje del motor/eje.
- Acoplamiento flexible para absorber desalineaciones.
- Fijación del cuerpo del encoder (anti-rotación).

Protección:

- Grado IP según entorno (IP54, IP65, IP67).
- Protección contra sobrevelocidad en aplicaciones de alta velocidad.
- Aislamiento galvánico de las señales (especialmente en presencia de motores).

37.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Servomotores: Encoder absoluto (multivuelta) integrado en el servomotor para control de posición en lazo cerrado. Resolución típica: 17-23 bits.

Robots: Encoders en cada articulación para conocer la posición exacta del robot. Encoders absolutos en robots de 6 ejes.

CNC: Encoders lineales (reglas ópticas) en mesas de máquinas herramienta para posicionamiento de alta precisión.

Impresión 3D: Finales de carrera (micro-switches) para homing. Encoders en motores paso a paso (opcional).

Elevadores: Encoder en el motor del ascensor para control de parada precisa en cada piso.

Posicionamiento de paneles solares: Encoders absolutos para orientación de paneles fotovoltaicos.

Ejercicios del Capítulo 37

1. Compara encoders incrementales y absolutos, indicando ventajas y desventajas.
2. Un encoder incremental de 1000 PPR está acoplado a un motor. ¿Cuántos pulsos por revolución del motor si hay una reducción 5:1?
3. ¿Qué es el código Gray y por qué se usa en encoders absolutos?
4. Explica el funcionamiento de un resolver y sus ventajas sobre los encoders ópticos.
5. ¿Qué es un LVDT y cómo mide el desplazamiento lineal?
6. Calcula la resolución angular de un encoder absoluto de 12 bits.
7. ¿Cómo se determina la dirección de giro con un encoder incremental (señales A y B)?
8. Diseña un sistema de medición de posición para una mesa XY usando encoders lineales de 5 μm de resolución.

\newpage

CAPÍTULO 38: SENSORES DE VELOCIDAD

38.1 Importancia de la Medición de Velocidad

La medición de velocidad es esencial en el control de motores, sistemas de transporte, procesos de fabricación y seguridad de maquinaria. Permite controlar la velocidad de motores, detectar condiciones de sobrevelocidad, sincronizar procesos y medir caudal.

38.2 Tacómetros Generadores (DC Tachogenerators)

Los tacómetros generadores son pequeños generadores DC acoplados al eje del motor. Generan un voltaje DC proporcional a la velocidad de rotación.

Principio:

- Devanado de imán permanente (estator) y armadura giratoria (rotor) con escobillas.
- El voltaje generado (FCEM) es proporcional a la velocidad: $V_{out} = K \times \omega$.

Características:

- Salida analógica lineal (típicamente 5-20 V/1000 rpm).
- Buena precisión en un amplio rango de velocidades.
- Bidireccional (polaridad indica dirección).
- Tamaño compacto.
- Mantenimiento (escobillas se desgastan).

Aplicaciones:

- Retroalimentación de velocidad en variadores DC tradicionales.
- Control de velocidad en servosistemas antiguos.

38.3 Encoders como Sensores de Velocidad

Los encoders incrementales miden velocidad con alta precisión. La velocidad se calcula a partir de la frecuencia de pulsos.

Métodos de cálculo de velocidad con encoder:

Método de frecuencia (alta velocidad):

- Cuenta pulsos en un período fijo de tiempo (T).
- $\text{Velocidad} = \text{Pulsos_contados} / (\text{PPR} \times T)$.
- Preciso a altas velocidades.
- Menos preciso a bajas velocidades (pocos pulsos).

Método de período (baja velocidad):

- Mide el tiempo entre pulsos consecutivos.
- $\text{Velocidad} = 1 / (T_{\text{pulso}} \times \text{PPR})$.
- Preciso a bajas velocidades.
- Menos preciso a altas velocidades (tiempo muy pequeño).

Método combinado (M/T):

- Combina ambos métodos para óptima precisión en todo el rango.
- Usado en servodrives modernos.

Resolución de velocidad:

- Depende de PPR del encoder y del método de cálculo.
- Mayor PPR = mejor resolución de velocidad.
- Para aplicaciones de control, PPR típico: 1000-5000.

38.4 Sensores de Velocidad Sin Contacto

Sensor de efecto Hall con rueda dentada:

- Imán y sensor Hall enfrentados a una rueda dentada ferromagnética.
- El paso de los dientes modula el campo magnético, generando pulsos.
- Frecuencia de pulsos proporcional a la velocidad: $f = N \times \text{rpm} / 60$.
- Donde N es el número de dientes de la rueda.
- Usado en automoción (velocidad de cigüeñal, velocidad de rueda ABS).

Sensor inductivo de proximidad con rueda dentada:

- Similar al Hall pero con sensor inductivo.
- Detecta los dientes de la rueda metálica.
- Mayor tolerancia a la contaminación.
- Menor resolución que Hall.

Sensor óptico reflectivo:

- Sensor óptico con marcas reflectantes en el eje o disco.
- Marca reflectante genera un pulso por revolución.
- Simple, económico.

38.5 Sensores de Velocidad Lineal

Encoder lineal (regla óptica):

- Similar al encoder rotativo pero lineal.
- Pista de vidrio o acero con marcas incrementales y de referencia.
- Resolución típica: 1-50 μm .
- Precisión: $\pm 1-10 \mu\text{m/m}$.

Sensor magneto-estrictivo:

- Impulso de corriente en un conductor genera un pulso torsional en un material magnetoestrictivo.
- Tiempo de vuelo del pulso indica la posición.
- Velocidad calculada como derivada de la posición.

Láser Doppler:

- Mide velocidad de movimiento o flujo mediante desplazamiento Doppler de la luz láser reflejada.
- Sin contacto, alta precisión.
- Usado en medición de caudal (LDA - Laser Doppler Anemometry).

38.6 Acelerómetros y Giroscopios

Los acelerómetros miden aceleración lineal. Los giroscopios miden velocidad angular. Combinados (IMU - Inertial Measurement Unit) proporcionan información completa de movimiento.

Acelerómetros MEMS:

- Masa sísmica suspendida por micro-muelles.
- La aceleración desplaza la masa, cambiando la capacitancia o resistencia.
- Rango: $\pm 1 \text{ g}$ a $\pm 200 \text{ g}$.
- Sensibilidad: típicamente 100-1000 mV/g.
- Ejes: 1, 2 o 3 ejes (X, Y, Z).

Giroscopios MEMS:

- Miden velocidad angular usando el efecto Coriolis.
- Rango: $\pm 100^\circ/\text{s}$ a $\pm 2000^\circ/\text{s}$.
- Sensibilidad: típicamente 0.5-10 mV/ $^\circ/\text{s}$.
- Deriva (bias) que requiere calibración.

IMU (Inertial Measurement Unit):

- Combina acelerómetros (3 ejes) y giroscopios (3 ejes).

- A veces incluye magnetómetro (9 DOF).
- Algoritmos de fusión (Kalman, Mahony) para estimar orientación y posición.

Aplicaciones:

- Estabilización de plataformas y vehículos.
- Navegación inercial (robots móviles, drones).
- Detección de vibraciones en maquinaria.
- Control de movimiento en robótica.

38.7 Sensores de Velocidad por Efecto Doppler

Utilizan el efecto Doppler de ondas (sonido o luz) para medir velocidad.

Radar Doppler:

- Onda electromagnética reflejada en el objeto en movimiento.
- El cambio de frecuencia (Doppler) es proporcional a la velocidad relativa.
- Usado en control de velocidad en procesos (cintas transportadoras), automoción.

Láser Doppler (LDA):

- Mide velocidad de fluidos y superficies.
- Alta precisión, sin contacto.
- Usado en investigación y laboratorios.

Ultrasónico Doppler:

- Mide velocidad de fluidos (caudal) mediante reflexión en partículas.
- Usado en medición de caudal en tuberías.

38.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Control de motores: Medición de velocidad para lazo cerrado en servomotores y variadores de frecuencia. El encoder del motor proporciona la realimentación.

Cintas transportadoras: Medición de velocidad lineal para sincronización (con encoder en tambor motriz). Control de velocidad variable según producción.

Vehículos guiados (AGV): Lectura de velocidad de ruedas para odometría. Combinación con IMU para navegación.

Máquinas herramienta: Control de velocidad de husillo (rpm) y avance (mm/min). Encoder de alta resolución.

Seguridad: Monitoreo de sobrevelocidad en motores, ventiladores, turbinas. Sistemas de parada de emergencia.

Robótica: Control de velocidad de articulaciones. Encoders en cada articulación proporcionan velocidad y posición.

Detección de vibraciones: Acelerómetros monitorizan vibraciones de rodamientos, motores y estructuras para mantenimiento predictivo (análisis FFT de la señal).

Ejercicios del Capítulo 38

1. Explica la diferencia entre los métodos de frecuencia y período para medir velocidad con encoder.
2. Un encoder de 2000 PPR produce 50,000 pulsos/s. ¿Cuál es la velocidad en rpm?
3. ¿Qué es un tacómetro generador y cómo produce una señal proporcional a la velocidad?
4. Describe el funcionamiento de un sensor de efecto Hall con rueda dentada para medición de velocidad.
5. ¿Qué son los acelerómetros MEMS y cómo miden aceleración?
6. Un giroscopio mide $150^\circ/\text{s}$. ¿Cuánto tiempo tarda en girar 45° ?
7. ¿Cómo se usa el efecto Doppler para medir velocidad?
8. Diseña un sistema de medición de velocidad para una cinta transportadora usando un encoder incremental y un microcontrolador.

\newpage

CAPÍTULO 39: SENSORES DE FUERZA Y PAR

39.1 Conceptos de Fuerza y Par

La fuerza es la magnitud física que cambia el estado de movimiento de un cuerpo. El par (torque) es la fuerza aplicada a una distancia de un eje de rotación. Su medición es crucial en procesos de ensamblaje, robótica, ensayos de materiales y control de calidad.

Unidades:

- Fuerza: Newton (N), kgf (1 kgf \approx 9.81 N), libra-fuerza (lbf).
- Par: Newton-metro (N·m), kgf·cm, libra-pie (lb·ft).

Tipos de fuerzas a medir:

- Compresión: Empuje.
- Tracción: Tensión, estiramiento.
- Corte: Cizallamiento.
- Flexión: Combinación de tracción y compresión.
- Torsión: Par de giro.

39.2 Galgas Extensométricas (Strain Gauges)

La galga extensométrica es el elemento sensor más utilizado para medir fuerza y deformación. Se basa en el cambio de resistencia eléctrica de un conductor cuando se deforma mecánicamente.

Principio:

- Un conductor metálico delgado (constantán, nicromo) adherido a un soporte flexible.
- Al deformarse, el conductor se alarga (mayor resistencia) o acorta (menor resistencia).
- El cambio relativo de resistencia es proporcional a la deformación: $\Delta R/R = GF \times \epsilon$.
- GF (Gauge Factor): Factor de la galga (típicamente 2 para metálicas, 100-200

para semiconductoras).

- ϵ (strain): Deformación unitaria (mm/mm), típicamente micro-strain ($\mu\epsilon = 10^{-6}$).

Configuración en puente de Wheatstone:

- Las galgas se conectan en puente de Wheatstone para máxima sensibilidad y compensación de temperatura:
- Cuarto de puente: 1 galga activa + 3 resistencias fijas.
- Medio puente: 2 galgas activas (una en compresión, una en tracción).
- Puente completo: 4 galgas activas (máxima sensibilidad, compensación de temperatura).

Tipos de galgas:

- Metálicas (foil): Más comunes. Flexible, fácil montaje. Factor de galga ≈ 2 .
- Semiconductoras: Mayor sensibilidad (GF 100-200). Más frágiles, mayor dependencia térmica.

39.3 Celdas de Carga (Load Cells)

Las celdas de carga son transductores que convierten fuerza en señal eléctrica. Contienen galgas extensométricas montadas en un cuerpo elástico calibrado.

Tipos según la dirección de la fuerza:

Celda de compresión:

- Mide fuerzas de compresión (empuje).
- Forma de disco, columna o anillo.
- Capacidad: 10 N a 10 MN (1000 toneladas).

Celda de tracción:

- Mide fuerzas de tensión.
- Forma de S, barra roscada.
- Capacidad: 10 N a 1000 kN.

Celda de viga (bending beam):

- Viga en voladizo con galgas en la base.
- Capacidad: 1 N a 5000 N.
- Común en balanzas de laboratorio y plataformas.

Celda de cortante (shear beam):

- Galgas montadas a 45° en un punto del cuerpo.
- Capacidad: 500 N a 500 kN.
- Robusta, tolerante a cargas laterales.

Celda tipo S (S-beam):

- Carga aplicada en los extremos del cuerpo en forma de S.
- Mide tracción y compresión.
- Capacidad: 50 N a 50 kN.

Especificaciones eléctricas:

- Sensibilidad: típicamente 2-3 mV/V de excitación.
- Alimentación: 5-15 V DC (excitación).
- Salida a plena carga: 10-30 mV (con excitación de 10 V).
- Puente completo de 350 Ω o 1000 Ω .

39.4 Sensores de Par (Torque Sensors)

Los sensores de par miden el torque aplicado a un eje rotatorio.

Tipos:

Sensor de par con galgas:

- Galgas montadas a 45° en el eje (ángulo de máximo esfuerzo cortante).
- Transmisión de señal por anillos rozantes (desgaste) o telemetría (sin contacto).
- Alimentación por batería o inducción.
- Precisión: 0.1-0.5%.

Sensor de par de reacción:

- Mide el torque de reacción en el soporte del motor o carga.
- No requiere transmisión rotativa.
- El motor o carga se monta sobre el sensor.
- Capacidad limitada a la construcción del soporte.

Sensor de par de superficie (SAW):

- Ondas acústicas superficiales en un sustrato piezoeléctrico.
- Sin contacto, robusto, alta velocidad de respuesta.
- Usado en herramienta eléctrica y automoción.

Aplicaciones:

- Control de apriete en atornilladores y llaves dinamométricas.
- Medición de potencia en motores: $P = T \times \omega$ (potencia = par \times velocidad angular).
- Control de procesos de ensamblaje (detección de roscado incorrecto).
- Pruebas de durabilidad y fatiga.

39.5 Sensores de Fuerza Piezoeléctricos

Utilizan el efecto piezoeléctrico: algunos cristales (cuarzo, cerámicas PZT) generan una carga eléctrica cuando se deforman mecánicamente.

Características:

- Alta sensibilidad: detectan fuerzas muy pequeñas.
- Amplio rango dinámico: desde mN hasta kN.
- Alta frecuencia de respuesta: hasta MHz.
- Solo miden fuerzas dinámicas (no estáticas).
- Alta impedancia de salida (necesita acondicionador de señal).
- Deriva de la señal a bajas frecuencias.

Aplicaciones:

- Medición de fuerzas de impacto.
- Dinamómetros de corte para maquinado.
- Análisis de vibraciones.
- Pruebas de fatiga dinámica.

39.6 Sensores de Presión de Película (Force Sensing Resistors - FSR)

Los FSR son resistencias cuyo valor cambia con la fuerza aplicada. Están hechos de polímero conductor.

Características:

- Bajo costo, perfil delgado.
- Rango: 0.1 N a 100 N (aproximadamente 10 g a 10 kg).
- Precisión: $\pm 5-25\%$ (no son de alta precisión).
- Resolución: continua (infinito).
- Vida útil: >1 millón de actuaciones.

Aplicaciones:

- Sensores táctiles (robótica colaborativa).
- Paneles de control táctiles.
- Detección de presencia en asientos y superficies.
- Sensores de mordida en pinzas robóticas.

39.7 Acondicionamiento de Señal

La señal de las celdas de carga y galgas es de muy bajo nivel (mV) y requiere amplificación y filtrado.

Amplificador de instrumentación:

- Alta ganancia (100-1000), alto CMRR (>100 dB).
- Bajo ruido, bajo offset.
- Integrados típicos: INA125, AD620.

Excitación:

- Voltaje de excitación: 5-15 V DC regulado.
- La salida del puente: $V_{out} = V_{exc} \times (\text{sensibilidad} \times \text{fuerza/rango_completo})$.

Filtrado:

- Filtro pasa-bajos para eliminar ruido de alta frecuencia.
- Frecuencia de corte típica: 10-100 Hz (según aplicación).

Digitalización:

- ADC de 16-24 bits para alta resolución.
- Convertidores sigma-delta (ADS1256, HX711).
- Salida digital (RS-232, USB, I2C).

39.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Robótica: Sensores de fuerza en pinzas robóticas para control de agarre (fuerza de sujeción). Robots colaborativos con detección de colisiones (sensores de par en articulaciones).

Líneas de ensamblaje: Control de fuerza en procesos de inserción (presión necesaria para ensamblar componentes). Monitoreo de atornillado (par + ángulo). Detección de piezas defectuosas por fuerza anormal.

Control de calidad: Ensayos de tracción y compresión en materiales. Pruebas de fatiga. Pesaje dinámico de productos en producción.

Máquinas herramienta: Medición de fuerzas de corte en torneado y fresado (dinamómetro de plataforma). Optimización de parámetros de corte.

Automoción: Medición de par en el volante (dirección asistida). Sensores de fuerza en asientos (detección de ocupantes). Pedales sensorizados.

Ejercicios del Capítulo 39

1. Explica el principio de funcionamiento de una galga extensométrica.
2. ¿Qué es el puente de Wheatstone y cómo se configura una celda de carga con 4 galgas?
3. Un amplificador de celda de carga tiene salida de 0-10 V para 0-500 kg. ¿Qué voltaje corresponde a 175 kg?
4. Compara celdas de carga de compresión y de tracción en términos de aplicación.
5. ¿Qué es un sensor de par y cómo se diferencia de un sensor de fuerza lineal?
6. Explica el efecto piezoeléctrico y sus aplicaciones en medición de fuerza.
7. Calcula la potencia de un motor que entrega 50 N·m a 3000 rpm. $P = T \times \omega$ (ω en rad/s).
8. Diseña un sistema de control de fuerza para una pinza robótica usando una celda de carga y un microcontrolador.

\newpage

CAPÍTULO 40: CONTROL ON-OFF

40.1 Introducción a los Sistemas de Control

Un sistema de control es un conjunto de componentes que gestionan el comportamiento de otros dispositivos o sistemas para lograr un resultado deseado. En mecatrónica industrial, los sistemas de control regulan variables como temperatura, presión, velocidad, posición y caudal.

Elementos de un sistema de control:

- Variable controlada: La magnitud que se desea controlar (temperatura, velocidad).
- Setpoint (consigna): Valor deseado de la variable controlada.
- Sensor: Mide el valor actual de la variable controlada.
- Controlador: Compara el valor medido con el setpoint y genera una señal de control.
- Actuador: Ejecuta la acción de control (calentador, motor, válvula).
- Proceso (planta): El sistema que se está controlando.

Tipos de control:

- Lazo abierto: El controlador actúa sin realimentación (ejemplo: lavadora con temporizador).
- Lazo cerrado (realimentación): El controlador usa la medición del sensor para ajustar su acción (ejemplo: termostato).

40.2 Control ON-OFF (Bang-Bang)

El control ON-OFF es la forma más simple de control de lazo cerrado. El actuador solo tiene dos estados: completamente encendido (ON) o completamente apagado (OFF).

Principio:

- Si la variable controlada (PV) está por debajo del setpoint (SP): Actuador ON.
- Si la variable controlada (PV) está por encima del setpoint (SP): Actuador OFF.

Ejemplo: Termostato de ambiente:

- Setpoint: 22°C.
- Si temperatura < 22°C: Calefacción ON.
- Si temperatura > 22°C: Calefacción OFF.

Oscilación alrededor del setpoint:

El control ON-OFF puro causa oscilaciones continuas alrededor del setpoint, ya que el sistema tiene inercia (tiempo de respuesta). La temperatura no se estabiliza exactamente en el setpoint, sino que oscila alrededor de él.

Histéresis:

Para reducir la frecuencia de conmutación y proteger los contactos del relé/contactador, se añade histéresis (diferencial):

- Encendido: $PV < SP - \text{histéresis}$.
- Apagado: $PV > SP + \text{histéresis}$.
- Sin cambio: $SP - \text{histéresis} < PV < SP + \text{histéresis}$.

Ejemplo con histéresis (SP = 22°C, histéresis = 1°C):

- Si temperatura < 21°C: Calefacción ON.
- Si temperatura > 23°C: Calefacción OFF.
- Entre 21°C y 23°C: Mantiene el estado anterior.

40.3 Implementación con Relés y Contactores

El control ON-OFF industrial se implementa típicamente con:

- Termostato/presostato/higrostató: Interruptor calibrado que abre o cierra un contacto según la variable.
- Contacto del sensor: Activa la bobina de un contactor.
- Contactor: Conmuta la potencia al actuador (calentador, motor).

Ejemplo: Control de nivel en tanque:

- Sensor de nivel (boya con interruptor).
- Bomba conectada a contactor.
- Nivel bajo: enciende bomba.
- Nivel alto: apaga bomba.
- Histéresis determinada por la separación física de los sensores de nivel alto y bajo.

40.4 Control ON-OFF en PLC

El control ON-OFF se implementa fácilmente en PLC con lógica de escalera:

```
Sensor_Nivel_Bajo  Bomba_On
----] [------( )----

Bomba_On  Sensor_Nivel_Alto
----] [-----]/[----- (continúa bobina)

Bomba_On
---( )--- Salida a contactor
```

40.5 Control Secuencial de Temporizadores

En procesos industriales, los temporizadores (timers) controlan la secuencia de operaciones ON-OFF:

Tipos de temporizadores en PLC:

- TON (Timer ON-delay): La salida se activa después de un retardo desde la activación de la entrada.
- TOF (Timer OFF-delay): La salida se desactiva después de un retardo desde la desactivación de la entrada.
- TP (Timer Pulse): Genera un pulso de duración fija.
- Contadores: Cuentan eventos y activan salida al alcanzar el valor prefijado.

Ejemplo: Secuencia de llenado y mezclado:

1. Sensor nivel bajo activa válvula de llenado.
2. Sensor nivel alto desactiva válvula y activa motor mezclador.
3. Temporizador TON 60 segundos.
4. Al cumplirse los 60 segundos, desactiva motor y activa válvula de descarga.
5. Sensor nivel bajo desactiva válvula de descarga.

40.6 Control ON-OFF en Equipos Industriales

Control de temperatura en hornos:

- Termopar o RTD conectado a controlador de temperatura.
- Controlador con salida de relé (ON-OFF) a contactor que alimenta resistencias calefactoras.

- La temperatura oscila alrededor del setpoint. La amplitud de oscilación depende de la inercia térmica del horno.

Control de presión en compresores:

- Presostato con dos puntos de consigna (presión mínima y máxima).
- Presión baja (P_{min}): Arranca compresor.
- Presión alta (P_{max}): Para compresor.

Control de nivel en depósitos:

- Interruptores de nivel (boyas, conductivos, capacitivos).
- Bomba ON para llenar, OFF cuando está lleno.

40.7 Ventajas y Limitaciones

Ventajas:

- Simple y económico.
- Fácil de implementar y diagnosticar.
- Robusto y confiable.
- No requiere ajuste de parámetros.
- Adecuado para procesos con inercia grande y tolerancia a oscilaciones.

Limitaciones:

- Oscilación continua alrededor del setpoint (precisión limitada).
- Desgaste de contactos por conmutación frecuente.
- No adecuado para procesos que requieren control preciso y estable.
- Estrés térmico y mecánico en actuadores por conmutación brusca.

40.8 Aplicaciones Típicas

- Termostatos de calefacción y refrigeración.
- Control de nivel en tanques de agua y productos.
- Control de presión en compresores de aire.
- Sistemas de alarma (temperatura máxima, presión mínima).
- Control de iluminación (fotocélula).
- Protección de equipos (térmicos, sobrecorriente).

Ejercicios del Capítulo 40

1. Explica la diferencia entre control de lazo abierto y lazo cerrado con ejemplos.
2. ¿Qué es la histéresis en control ON-OFF y por qué se usa?
3. Diseña un circuito de control ON-OFF para un horno con termostato y contactor.
4. ¿Qué ventajas tiene el control ON-OFF con histéresis sobre el control ON-OFF puro?
5. Escribe un programa en ladder de PLC para control ON-OFF de nivel de tanque.
6. ¿Qué limitaciones tiene el control ON-OFF para procesos que requieren alta precisión?
7. Compara el control ON-OFF de temperatura vs el control PID en términos de precisión y estabilidad.
8. Aplica control ON-OFF a un sistema de climatización de una sala industrial.

\newpage

CAPÍTULO 41: CONTROL PID

41.1 Fundamentos del Control PID

El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es el algoritmo de control más utilizado en la industria. Combina tres modos de control para lograr una respuesta precisa, estable y rápida. Se estima que más del 90% de los lazos de control industrial utilizan PID.

Ecuación del controlador PID:

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times de(t)/dt$$

Donde:

- $u(t)$: Señal de salida del controlador.
- $e(t)$: Error = Setpoint - Variable de proceso.
- K_p : Ganancia proporcional.
- K_i : Ganancia integral.
- K_d : Ganancia derivativa.

Forma paralela (estándar):

$$u(t) = K_p \times [e(t) + (1/T_i) \times \int e(t)dt + T_d \times de(t)/dt]$$

Donde T_i es el tiempo integral y T_d el tiempo derivativo.

41.2 Acción Proporcional (P)

La acción proporcional produce una salida proporcional al error actual.

Características:

$$u(t) = K_p \times e(t) + \text{bias (offset)}$$

- K_p alto: respuesta rápida pero posible sobreoscilación e inestabilidad.
- K_p bajo: respuesta lenta pero estable.
- El error en estado estacionario (desviación permanente) existe si la carga cambia y no hay acción integral.

Banda proporcional (PB):

$PB = 100\% / K_p$ (en porcentaje del rango del proceso). Una PB del 50% significa que el controlador satura cuando el error es del 50% del rango.

Efecto del offset (bias):

El control P puro no puede eliminar el error en estado estacionario bajo carga variable. Siempre habrá un error residual (offset) que depende de la ganancia y la carga.

41.3 Acción Integral (I)

La acción integral produce una salida proporcional a la integral del error a lo largo del tiempo. Elimina el error en estado estacionario.

Características:

- Acumula el error en el tiempo y ajusta la salida hasta que el error es cero.
- El término integral permite alcanzar exactamente el setpoint (sin offset).
- T_i (tiempo integral): Tiempo que tarda la acción integral en igualar la acción proporcional ante un error constante.
- Cuanto menor T_i , más fuerte la acción integral (más rápido elimina el error).
- T_i muy pequeño: sobreoscilación, posible inestabilidad.
- T_i demasiado grande: eliminación lenta del error.

Windup (saturación) integral:

Cuando el actuador se satura (válvula completamente abierta o cerrada), el error continúa acumulándose en el integrador. Al desaturarse, el integrador debe “descargar” el exceso, causando una gran sobreoscilación (overshoot).

Anti-windup:

- Parar la integración cuando la salida está saturada.
- Limitación del valor del integrador.
- Realimentación condicional de la integración.

41.4 Acción Derivativa (D)

La acción derivativa produce una salida proporcional a la tasa de cambio del error. Anticipa el error futuro y añade estabilidad.

Características:

- Responde a la velocidad del error, no a su magnitud.

- Mejora la estabilidad (permite usar mayor K_p).
- Reduce la sobreoscilación.
- No afecta al error en estado estacionario.

Problemas de la acción derivativa:

- Amplifica el ruido de alta frecuencia (el ruido tiene alta derivada).
- No debe usarse en señales ruidosas sin filtrado previo.
- Puede causar “golpes” (kicks) en respuesta a cambios bruscos del setpoint.

Soluciones:

- Filtro pasa-bajos en la señal de proceso antes de la derivación.
- Derivada limitada (rate limit).
- D aplicado solo a la variable de proceso, no al setpoint (derivative-on-measurement).

41.5 Ajuste de Controladores PID (Tuning)

El ajuste de PID consiste en determinar los valores óptimos de K_p , K_i y K_d para un proceso específico.

Método de Ziegler-Nichols (lazo abierto):

1. Aplicar un escalón a la entrada.
2. Registrar la respuesta del proceso (curva de reacción).
3. Determinar: L (tiempo muerto) y τ (constante de tiempo).
4. Calcular parámetros: P: $K_p = \tau/L$; PI: $K_p = 0.9\tau/L$, $T_i = L/0.3$; PID: $K_p = 1.2\tau/L$, $T_i = 2L$, $T_d = 0.5L$.

Método de Ziegler-Nichols (lazo cerrado):

1. Aumentar K_p (con $K_i = 0$, $K_d = 0$) hasta que el sistema oscile de forma sostenida.
2. Registrar: K_u (ganancia última) y T_u (período de oscilación).
3. Calcular: P: $K_p = 0.5K_u$; PI: $K_p = 0.45K_u$, $T_i = T_u/1.2$; PID: $K_p = 0.6K_u$, $T_i = T_u/2$, $T_d = T_u/8$.

Método de Lambda (λ -tuning):

- Ajuste más conservador, prioriza robustez.
- Acepta una respuesta más lenta a cambio de estabilidad.
- $\lambda = \tau$ (constante de tiempo deseada del lazo cerrado).

Auto-tuning (autocalibración):

Muchos controladores comerciales (PLC, controladores de temperatura) incluyen

auto-tuning:

- El controlador realiza una perturbación controlada.
- Analiza la respuesta del proceso.
- Calcula automáticamente los parámetros PID óptimos.

41.6 Implementación del PID

PID analógico: Antes se implementaba con amplificadores operacionales, resistencias y capacitores. Ahora es poco común.

PID digital (software):

Se implementa en PLC, microcontroladores o controladores dedicados:

$$u(k) = u(k-1) + K_p \times [e(k) - e(k-1)] + K_i \times e(k) \times T_s + K_d \times [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]/T_s$$

Donde T_s es el período de muestreo.

Consideraciones prácticas:

- Período de muestreo adecuado (regla: 10-20 veces más rápido que el tiempo de respuesta del proceso).
- Filtro en la variable de proceso.
- Limitación de la salida (saturación).
- Anti-windup.
- Cambio sin golpes (bumpless transfer) al conmutar entre manual/automático.
- Inicialización segura.

41.7 Variantes del PID

PI (Proporcional-Integral):

- El más común en la industria.
- Elimina el error en estado estacionario.
- Simple de ajustar (solo dos parámetros).
- Usado en control de presión, nivel, caudal.

PD (Proporcional-Derivativo):

- Útil cuando la acción integral no es necesaria (procesos sin offset natural).
- Anticipa el error, mejora estabilidad.
- Usado en control de posición, servos.

P (Proporcional puro):

- Simple, pero tiene offset permanente.
- Usado en procesos donde el offset es aceptable o la carga es constante.

PID con dos grados de libertad:

- Parámetros diferentes para seguimiento del setpoint y rechazo de perturbaciones.
- Pone pesos diferentes al setpoint en cada acción.
- Mejor rendimiento en ambos aspectos.

Cascada:

- Dos lazos PID anidados: el lazo maestro genera el setpoint del lazo esclavo.
- Ejemplo: Control de temperatura (maestro) y caudal de gas (esclavo).
- Mejora la respuesta a perturbaciones.

Feedforward (prealimentación):

- Mide la perturbación y actúa antes de que afecte al proceso.
- Se suma a la salida del PID.
- Mejora el rechazo de perturbaciones conocidas.

41.8 Aplicaciones en Mecatrónica

Control de temperatura: Hornos, calderas, reactores, extrusoras. El PID controla la potencia del calentador. Auto-tuning típico.

Control de velocidad: Motores DC y AC con variadores de frecuencia. PID ajusta la frecuencia de salida o el voltaje.

Control de posición: Servomotores con encoder. PID ajusta la corriente del motor para alcanzar la posición deseada.

Control de presión: Compresores, válvulas de control. PI es típicamente suficiente.

Control de caudal: Válvulas de control proporcionales. PI con filtrado.

Control de nivel: Tanques, depósitos. PI con anti-windup (evitar desbordamiento si la bomba está al máximo).

Ejercicios del Capítulo 41

1. Explica las tres acciones (P, I, D) y su efecto en la respuesta del sistema.

2. ¿Qué es el error en estado estacionario y cómo lo elimina la acción integral?
3. ¿Por qué la acción derivativa puede ser problemática con señales ruidosas?
4. Explica el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto para ajuste de PID.
5. ¿Qué es el windup integral y cómo se evita?
6. Compara el control P, PI y PID para control de temperatura de un horno.
7. ¿Qué es el control en cascada y cuándo se usa?
8. Implementa un controlador PID en un PLC (o microcontrolador) para control de temperatura con un RTD y un calentador.

\newpage

CAPÍTULO 42: LÓGICA DE RELÉS Y CABLEADO

42.1 Introducción a la Lógica Cableada

Antes de la aparición de los PLC, la automatización industrial se realizaba mediante lógica cableada con relés, contactores, temporizadores y otros dispositivos electromecánicos. Aunque los PLC han reemplazado a la lógica cableada en la mayoría de aplicaciones, el conocimiento de estos circuitos sigue siendo esencial para:

- Comprender los fundamentos de la lógica de control.
- Mantener y modernizar instalaciones existentes.
- Implementar funciones de seguridad independientes del PLC.
- Diseñar circuitos de potencia (arrancadores de motores).

42.2 Elementos de la Lógica Cableada

Elementos de entrada (sensores):

- Pulsadores (NA, NC): Botones de arranque y parada.
- Selectores: Interruptores rotativos para selección de modo.
- Finales de carrera: Detectan posición mecánica.
- Presostatos, termostatos, flujostatos: Contactos controlados por variables físicas.
- Focélulas: Detectores ópticos con salida de contacto.

Elementos de control:

- Bobinas de relés y contactores: Actuadores electromagnéticos.
- Temporizadores (timers): Retardo a la conexión/desconexión.
- Contadores (electromecánicos o electrónicos).
- Relés térmicos de protección (protección contra sobrecarga).

Elementos de salida (actuadores):

- Motores (a través de contactores).
- Válvulas solenoide.

- Lámparas señalizadoras.
- Alarmas (sirenas, bocinas).

42.3 Circuitos Fundamentales

Circuito de arranque/parada (Marcha-Paro):

```

Parada (NC)  Arranque (NA)  Bobina Contacto Aux
----] [-----] [----- ( )----
           |      |
           +----] [--- Retención

```

Funcionamiento:

1. Presionar Arranque: Bobina se energiza.
2. Contacto auxiliar de retención se cierra, mantiene la bobina.
3. Soltar Arranque: La bobina sigue energizada por el contacto auxiliar.
4. Presionar Parada: Se interrumpe el circuito, bobina desenergizada.
5. Contacto auxiliar se abre, listo para próximo ciclo.

Circuito de enclavamiento mutuo (Interlocking):

- Impide que dos contactores se activen simultáneamente.
- Usado en inversión de giro de motores, selección de fuente.

```

Arranque1  Contactor2(NC)  Bobina1
----] [-----]/[----- ( )----

Arranque2  Contactor1(NC)  Bobina2
----] [-----]/[----- ( )----

```

Circuito de parada de emergencia:

- Pulsador NC en serie con la alimentación de toda la máquina.
- Un único paro de emergencia puede detener todo el sistema.
- Debe ser de tipo "seta" (hongo), color rojo, retenido (girar para desbloquear).

42.4 Circuito de Arranque Estrella-Delta

El arranque estrella-delta reduce la corriente de arranque de motores trifásicos.

Temporización:

1. Arranque: Contactores de línea (KM1) y estrella (KM3) se activan. Motor arranca

en estrella.

2. Temporización (típicamente 5-15 segundos): Timer TON se activa.
3. Transición: KM3 se desactiva. Pausa breve (unos ms) para evitar cortocircuito.
4. Marcha: Contactor delta (KM2) se activa. Motor funciona en delta.

Circuito de potencia:

```
L1 ---- [KM1] ---- U1 ---- [KM2] ---- U2
L2 ---- [KM1] ---- V1 ---- [KM2] ---- V2
L3 ---- [KM1] ---- W1 ---- [KM2] ---- W2

U2 ---- [KM3] ---- V2
V2 ---- [KM3] ---- W2
W2 ---- [KM3] ---- U2
```

42.5 Circuito de Inversión de Giro

Para invertir el giro de un motor trifásico, se intercambian dos fases:

Circuito:

- Contactor KM1 (giro horario): conecta L1, L2, L3 a U1, V1, W1.
- Contactor KM2 (giro antihorario): conecta L1, L2, L3 a W1, V1, U1 (fases intercambiadas).
- Enclavamiento mutuo: Contacto NC de KM1 en serie con bobina KM2 y viceversa.
- Paro de emergencia en serie con ambos.

42.6 Señalización y Alarmas

Circuitos de señalización:

- Luz verde: Máquina en funcionamiento (en paralelo con bobina del contactor).
- Luz roja: Máquina parada o fallo (contacto NC del contactor + indicación de fallo).
- Luz amarilla: Modo manual, mantenimiento, alarma preventiva.

Circuitos de alarma:

- Sirena o bocina activada por sensor de fallo (térmico, presión, nivel).
- Temporizador para duración de la alarma.
- Pulsador de silencio (silencio alarma pero mantiene indicación visual).
- Reset de alarma después de corregir la falla.

42.7 Normas para Esquemas Eléctricos

Identificación de componentes (IEC):

- -Q: Contactor, interruptor.
- -K: Relé (K1, K2, etc.).
- -F: Protección (fusible F1, térmico F2).
- -S: Sensor/interruptor (S1 pulsador, S2 final de carrera).
- -M: Motor.
- -Y: Válvula solenoide.
- -H: Señalización (H1 lámpara, H2 sirena).

Numeración de bornes:

Los contactos se numeran según su posición:

- Contactos de potencia: números 1-2, 3-4, 5-6.
- Bobina: A1-A2.
- Contactos auxiliares: 13-14 (NA), 21-22 (NC), 31-32 (NC), 43-44 (NA).

Cableado:

- Conductores de fase: Negro, marrón, gris.
- Neutro: Azul claro.
- Tierra: Verde-amarillo.
- Circuitos de control: Pueden usar colores distintivos (rojo para AC, azul para DC).

42.8 Mantenimiento y Diagnóstico

Procedimientos de diagnóstico:

1. Verificar alimentación (voltaje en bornes de la bobina).
2. Verificar continuidad de contactos de seguridad (paro de emergencia, térmicos, enclavamientos).
3. Verificar estado de fusibles y disyuntores.
4. Medir voltaje en la bobina del contactor.
5. Verificar estado de contactos de potencia (desgaste, soldadura).
6. Verificar temporizadores (ajuste, funcionamiento).

Problemas comunes:

- Bobina quemada: Verificar voltaje correcto y ausencia de picos.
- Contactos soldados: Sobrecorriente, arco excesivo, contactor sobredimensionado.
- Fallo de retención: Contacto auxiliar sucio o desgastado.
- Temporizador no calibrado: Ajuste incorrecto o suciedad en los contactos.

Ejercicios del Capítulo 42

1. Dibuja y explica el circuito de marcha-paro con retención.
2. ¿Qué es el enclavamiento mutuo y por qué es necesario en circuitos de inversión de giro?
3. Diseña el circuito de potencia y control para un arranque estrella-delta temporizado.
4. Interpreta la simbología normalizada: -K1, -F2, -S3, -Y1.
5. Diseña un circuito de alarma con señalización visual y acústica.
6. ¿Qué colores de cables se usan para fase, neutro y tierra según normativa?
7. Dibuja el circuito de inversión de giro de un motor trifásico con enclavamiento.
8. Diagnostica: Un motor no arranca al presionar el botón de arranque. ¿Qué verificas primero?

\newpage

CAPÍTULO 43: ARRANCADORES DE MOTORES

43.1 Generalidades

Los arrancadores de motores son dispositivos que controlan la conexión y protección de motores eléctricos. Su función principal es arrancar y detener el motor de forma segura, protegiéndolo contra sobrecargas, cortocircuitos y pérdida de fase.

Un arrancador típico incluye:

- Contactor: Conmuta la alimentación al motor.
- Relé térmico de sobrecarga: Protege contra corrientes excesivas prolongadas.
- Fusibles o disyuntor magnetotérmico: Protegen contra cortocircuitos.
- Circuito de control: Pulsadores, selectores, temporizadores.

43.2 Arranque Directo

El arranque directo conecta el motor directamente a la alimentación a pleno voltaje. Es el método más simple y económico.

Características:

- Corriente de arranque: $5-8 \times I_{\text{nominal}}$.
- Par de arranque: $1.5-2.5 \times \text{Par}_{\text{nominal}}$.
- Alto esfuerzo mecánico (golpe de corriente).
- Adecuado para motores pequeños (< 5 HP en redes débiles, < 10 HP en redes fuertes).

Componentes:

- Interruptor seccionador (desconexión visible).
- Fusibles (protección cortocircuito).
- Contactor (conmutación).
- Relé térmico (protección sobrecarga).

Esquema de potencia:

```

L1 L2 L3
| | |
[Fusibles]
| | |
[Contactor]
| | |
[Térmico]
| | |
M M M

```

Protección del motor:

El relé térmico debe ajustarse a la corriente nominal del motor (I_n). Para motores de servicio normal, se ajusta a I_n . Para motores con arranque difícil, hasta $1.05 \times I_n$.

43.3 Arranque Estrella-Delta

El arranque estrella-delta reduce el voltaje aplicado al motor durante el arranque, limitando la corriente.

Principio:

- Arranque en estrella: Voltaje en cada devanado = $V_{\text{linea}}/\sqrt{3}$. Corriente reducida a 1/3 de la de arranque directo.
- Después de un tiempo (ajustable), conmuta a delta: Voltaje pleno en cada devanado.

Características:

- Corriente de arranque: $1.5-2.5 \times I_n$ (contra 5-8 en directo).
- Par de arranque: $0.3-0.5 \times \text{Par}_n$ (también reducido).
- Tres contactores: Línea (KM1), Estrella (KM3), Delta (KM2).
- Temporizador (relé de tiempo) para la conmutación.
- Pausa de 30-100 ms en la conmutación para evitar cortocircuito.

Requisitos:

- Motor con 6 bornes accesibles (U1, V1, W1, U2, V2, W2).
- Tensión nominal del motor debe coincidir con la tensión de delta.

Aplicaciones:

- Motores de 5-50 HP con arranque sin carga o con carga reducida.
- Bombas centrífugas, ventiladores, compresores con descarga.

43.4 Arrancador Suave (Soft Starter)

El arrancador suave utiliza SCR (tiristores) para controlar el voltaje durante el arranque y la parada. Proporciona una rampa de voltaje suave.

Características:

- Rampa de arranque ajustable: 0.5-30 segundos.
- Rampa de parada ajustable (suave): Evita golpes de ariete en bombas.
- Corriente de arranque limitada (típicamente $2-4 \times I_n$).
- Par de arranque ajustable.
- Protección integrada: sobrecarga, desbalance de fase, sobretensión.
- By-pass (contactor de derivación): Cortocircuita los SCR después del arranque para evitar disipación de calor.

Configuración:

- Voltaje de arranque inicial: 30-80% del voltaje nominal.
- Tiempo de rampa: Tiempo para alcanzar el voltaje pleno.
- Limitación de corriente: Corriente máxima durante el arranque.
- Tiempo de parada suave: Solo para aplicaciones que lo requieren.

Aplicaciones:

- Bombas (elimina golpe de ariete).
- Cintas transportadoras (arranque suave).
- Ventiladores y extractores.
- Compresores.

43.5 Variador de Frecuencia (VFD)

El variador de frecuencia controla la velocidad del motor variando la frecuencia y el voltaje de alimentación. Es el método de arranque y control más avanzado.

Principio:

1. Rectificación: AC se convierte en DC (puente de diodos).
2. Bus DC: Capacitores filtran y almacenan la DC.
3. Inversión: IGBT conmutan a alta frecuencia (PWM) generando AC de frecuencia y voltaje variables.

Características:

- Control de velocidad: 0-100% de la velocidad nominal (y hasta 200% con debilitamiento de campo).
- Control de par: Par constante en todo el rango de velocidad.

- Arranque suave: Rampa de aceleración/desaceleración ajustable.
- Frenado regenerativo: Recupera energía (opcional con resistencia de frenado).
- Ahorro energético: En aplicaciones de caudal variable (bombas, ventiladores), la potencia varía con el cubo de la velocidad.

Curva de par constante:

En un variador típico, el par es constante hasta la frecuencia nominal (50 Hz) y disminuye por encima (debilitamiento de campo).

Modos de control:

- V/f (Voltios/Hercio): Control escalar. Simple, adecuado para cargas de par constante (bombas, ventiladores múltiples).
- Control vectorial de lazo abierto: Control de par y velocidad sin encoder.
- Control vectorial de lazo cerrado: Máxima precisión con encoder.

Aplicaciones:

- Bombas y ventiladores (ahorro energético hasta 50%).
- Cintas transportadoras (control de velocidad de proceso).
- Máquinas herramienta (control de velocidad de husillo).
- Elevadores y grúas (control fino de velocidad y par).

43.6 Relés Térmicos de Protección

El relé térmico protege el motor contra sobrecargas prolongadas. Se basa en la deformación de una lámina bimetálica por el calor generado por la corriente.

Principio:

- Lámina bimetálica (dos metales con diferente coeficiente de expansión).
- La corriente del motor calienta la lámina.
- Al deformarse, acciona un contacto NC que desenergiza el contactor.
- Tiempo de disparo inversamente proporcional a la sobrecarga.

Clases de disparo:

- Clase 10: Dispara en < 10 segundos a $7.2 \times I_n$ (motores de jaula de ardilla).
- Clase 20: Dispara en < 20 segundos (arranque pesado).
- Clase 30: Dispara en < 30 segundos (arranque muy pesado).

Compensación de temperatura:

El relé debe compensar la temperatura ambiente para evitar disparos falsos a altas temperaturas o falta de protección a bajas temperaturas.

Ajuste de corriente:

El dial de ajuste se fija a la corriente nominal del motor (valor de placa). Para motores con arranque pesado, se ajusta hasta $1.05 \times I_n$.

43.7 Protección Electrónica de Motores

Los relés de protección electrónicos (relés de motor) ofrecen funciones más avanzadas que el térmico bimetálico.

Funciones típicas:

- Protección térmica (modelo térmico del motor).
- Protección contra desbalance de fases (> 15%).
- Protección contra pérdida de fase.
- Protección contra rotor bloqueado.
- Protección contra sobrecarga.
- Protección contra subcarga (bomba funcionando en seco).
- Protección contra sobrecorriente y cortocircuito.
- Registro de eventos y diagnóstico.

Comunicación:

Los relés modernos tienen comunicación por bus de campo (PROFIBUS, Modbus, DeviceNet) para integración con sistemas SCADA.

43.8 Mantenimiento de Arrancadores

Mantenimiento preventivo:

- Inspeccionar contactos del contactor (desgaste, soldadura).
- Limpiar contactos auxiliares.
- Verificar ajuste del relé térmico.
- Limpiar polvo y suciedad del gabinete.
- Verificar apriete de conexiones (bornes, barras).
- Verificar funcionamiento del temporizador.
- Probar el disparo del térmico (simular sobrecarga).

Mantenimiento predictivo:

- Termografía: Detectar puntos calientes en contactos y conexiones.
- Análisis de vibraciones: Detectar problemas mecánicos en el motor.
- Medición de aislamiento: Megger periódico.

Ejercicios del Capítulo 43

1. Compara los cuatro métodos de arranque: directo, estrella-delta, soft starter y variador de frecuencia.
2. ¿Qué corriente de arranque esperas en cada método para un motor de 20 A nominales?
3. Explica el principio de funcionamiento de un relé térmico bimetálico.
4. ¿Qué aplicaciones se benefician de la parada suave (soft stop)?
5. ¿Cómo ahorra energía un variador de frecuencia en una bomba centrífuga?
6. Diseña el circuito de potencia y control de un arranque estrella-delta temporizado.
7. Selecciona un arrancador adecuado para un motor de 15 kW a 400 V.
8. ¿Qué protecciones adicionales ofrece un relé de motor electrónico frente al térmico bimetálico?

\newpage

CAPÍTULO 44: PLC - INTRODUCCIÓN Y ARQUITECTURA

44.1 ¿Qué es un PLC?

Un PLC (Programmable Logic Controller o Autómata Programmable) es un computador industrial utilizado para la automatización de procesos industriales. Controla máquinas y procesos mediante la ejecución de un programa de usuario que lee entradas (sensores) y activa salidas (actuadores).

Historia:

El primer PLC fue desarrollado en 1968 por Modicon (Bedford Associates) para General Motors, que buscaba reemplazar los complejos paneles de relés cableados. El PLC permitía reprogramar la lógica de control sin modificar el cableado, reduciendo costos y tiempo de parada.

Norma IEC 61131:

Estándar internacional que define:

- Parte 1: Información general.
- Parte 2: Requisitos de hardware (eléctricos, mecánicos, ambientales).
- Parte 3: Lenguajes de programación (LD, FBD, ST, IL, SFC).
- Parte 4: Guías de usuario.
- Parte 5: Comunicaciones.
- Parte 8: Directrices para la aplicación de lenguajes de programación.

44.2 Arquitectura Interna de un PLC

Componentes principales:

CPU (Unidad Central de Procesamiento):

- Microprocesador (procesador principal).
- Chipset y memoria.
- Reloj de tiempo real.
- Sistema operativo en tiempo real (RTOS).

Memoria:

- ROM/Flash: Almacena el sistema operativo y firmware.
- RAM: Almacena el programa de usuario y datos.
- EEPROM/Retentiva: Mantiene variables críticas sin alimentación (batería o supercapacitor).
- Memoria de respaldo para el programa de usuario (tarjeta SD, Memory Stick).

Módulos de entrada/salida (E/S o I/O):

- Entradas digitales: 24 V DC, 110 V AC, 230 V AC.
- Salidas digitales: Relé, transistor (NPN/PNP), TRIAC.
- Entradas analógicas: 0-10 V, 4-20 mA, RTD, termopar.
- Salidas analógicas: 0-10 V, 4-20 mA.
- Módulos especiales: Contadores rápidos, posicionamiento, peso, temperatura.

Fuente de alimentación:

- Convierte la tensión de entrada (24 V DC, 110/230 V AC) a las tensiones internas (5 V, 3.3 V, 24 V para E/S).
- Aislada galvánicamente de los circuitos de entrada/salida.

Bus de comunicación:

- Conexión entre CPU y módulos de E/S (bus de fondo, backplane).
- Protocolos: PROFIBUS, PROFINET, EtherCAT, Modbus TCP, CANopen.

44.3 Ciclo de Escaneo (Scan Cycle)

El PLC ejecuta su programa en un ciclo continuo:

1. **Lectura de entradas (I):** Lee el estado de todos los módulos de entrada y almacena en la imagen de proceso de entrada (PII).
2. **Ejecución del programa:** Ejecuta el programa de usuario línea por línea, usando los valores actualizados de las entradas y las variables internas. Actualiza la imagen de proceso de salida (PIQ).
3. **Escritura de salidas (Q):** Transfiere los valores de la imagen de proceso de salida a los módulos de salida físicos.
4. **Comunicación y autodiagnóstico:** Gestiona comunicaciones, actualiza contadores, verifica el estado del sistema.

Tiempo de ciclo (Scan Time):

- Típicamente 1-100 ms, dependiendo del tamaño del programa y la velocidad del PLC.

- Los PLC modernos tienen tiempos de ciclo de 0.1-10 ms para programas medianos.
- Para aplicaciones rápidas (codificadores, control de movimiento), se usan CPUs rápidas o interrupciones.

Imagen de proceso:

El PLC no lee/escribe las E/S físicas en cada instrucción, sino que trabaja con una copia en memoria:

- Ventaja: Comportamiento determinista (el estado de las entradas no cambia durante el ciclo).
- Desventaja: Pequeño retardo entre el cambio físico y la percepción (un ciclo de scan).

44.4 Tipos de PLC

PLC Compacto (todo en uno):

- CPU, fuente, E/S integradas en una sola unidad.
- Número fijo de E/S (típicamente 10-40).
- Ejemplos: Siemens LOGO!, Allen-Bradley MicroLogix, Schneider Zelio.
- Aplicación: Pequeñas máquinas, sistemas simples, control de iluminación.

PLC Modular (rack):

- CPU, fuente, módulos de E/S separados en un rack o bus.
- Configuración flexible (expansión según necesidad).
- Ejemplos: Siemens S7-1200/S7-1500, Allen-Bradley CompactLogix/ControlLogix, Schneider M340/M580.
- Aplicación: Industria general, control de procesos, automatización de máquinas.

PAC (Controlador de Automatización Programable):

- Evolución del PLC con capacidades de PC (mayor memoria, procesamiento de datos).
- Soporta múltiples disciplinas: control de procesos, movimiento, visión, robótica.
- Ejemplos: Siemens S7-1500, Allen-Bradley CompactLogix, Beckhoff CX, B&R.
- Aplicación: Máquinas complejas, líneas de producción integradas.

PLC de seguridad (Safety PLC):

- Certificado SIL 2/3 (IEC 61508).
- Arquitectura redundante (2 o 3 CPUs que se comparan).
- Ejecuta funciones de seguridad: parada de emergencia, cortinas de luz, puertas de seguridad.

- Comunicación segura (PROFIsafe, CIP Safety).
- Ejemplos: Siemens S7-1200F/1500F, Allen-Bradley GuardLogix.

PLC de seguridad certificado:

Siemens S7-1200F/1500F, Allen-Bradley GuardLogix.

PLC compacto modular pequeño:

Siemens S7-1200, Allen-Bradley Micro850.

44.5 Criterios de Selección de un PLC

Requisitos de E/S:

- Número de entradas/salidas digitales.
- Número de entradas/salidas analógicas y su tipo (0-10 V, 4-20 mA, RTD).
- Velocidad requerida (contadores rápidos, interrupciones).

Requisitos de proceso:

- Tamaño del programa (memoria de usuario).
- Velocidad de ejecución (tiempo de ciclo requerido).
- Funciones especiales (PID, control de movimiento, comunicaciones).

Requisitos de comunicación:

- Protocolos necesarios (PROFIBUS, PROFINET, Modbus, EtherCAT).
- Integración con SCADA, HMI, otros PLC.
- Comunicación con variadores de frecuencia, servodrive.

Requisitos ambientales:

- Temperatura, humedad, vibraciones.
- Grado IP del gabinete.
- Alimentación disponible (24 V DC, 110 V AC, 230 V AC).

Costo:

- PLC compacto: \$100-500.
- PLC modular pequeño: \$500-2000.
- PLC modular mediano: \$2000-5000.
- PLC modular grande: \$5000-20000+.

44.6 Conexión de E/S Digitales

Entradas digitales (24 V DC):

- Sensor PNP (sourcing): Suministra corriente positiva. Se conecta a la entrada del

PLC.

- Sensor NPN (sinking): Conmuta a negativo. Requiere configuración específica del módulo.
- Conexión típica: Sensor → Entrada PLC → Común del módulo (0 V o 24 V según tipo).

Salidas digitales:

- Relé: Contacto seco (NA/NC). Aísla el circuito de control del de potencia. Corriente típica: 2-5 A.
- Transistor (NPN/PNP): Conmutación rápida (kHz). Corriente típica: 0.5-2 A. Protegido contra cortocircuito.
- TRIAC: Para salidas AC. Conmutación hasta 1 A. Adecuado para contactores y válvulas.

44.7 Conexión de E/S Analógicas

Entradas analógicas:

- 0-10 V: Sensor de 3 hilos (+V, Out, GND) o 2 hilos (señal +, señal -).
- 4-20 mA: Sensor de 2 hilos (lazo de corriente), 3 hilos o 4 hilos.
- Conexión diferencial o single-ended según el módulo.
- Cable apantallado para evitar interferencias.

Salidas analógicas:

- 0-10 V: Control de variadores, válvulas proporcionales.
- 4-20 mA: Control de posicionadores, I/P converters.

Resolución:

- Típica: 12-16 bits.
- 12 bits: 4096 cuentas (0.024% del rango para 0-10 V: 2.44 mV).
- 16 bits: 65536 cuentas (0.015%: 0.15 mV).

44.8 Instalación y Mantenimiento

Consideraciones de instalación:

- Temperatura ambiente: 0-60°C (típica).
- Humedad: 5-95% sin condensación.
- Distancias mínimas entre módulos para ventilación.
- Cableado separado para señales analógicas y digitales.
- Cableado separado para señales de baja tensión y potencia.

Mantenimiento:

- Respaldo del programa: Regular, después de cada modificación.
- Limpieza de filtros de ventilación.
- Verificación de conexiones (bornes apretados).
- Monitoreo de horas de operación y temperatura interna.
- Reemplazo de batería (si tiene) según calendario del fabricante.

Ejercicios del Capítulo 44

1. Explica el ciclo de escaneo de un PLC y su importancia para el comportamiento determinista.
2. Compara PLC compacto y modular, indicando ventajas de cada uno.
3. ¿Qué es la imagen de proceso de entrada y salida (PII/PIQ)?
4. ¿Qué criterios usarías para seleccionar un PLC para controlar una máquina con 20 entradas digitales, 10 salidas a relé, 3 entradas analógicas y comunicación PROFINET?
5. Explica la diferencia entre entradas PNP y NPN en un PLC.
6. ¿Qué es la resolución de un canal analógico y cómo afecta la precisión?
7. ¿Qué precauciones de instalación deben tomarse para evitar interferencias electromagnéticas en un PLC?
8. Investiga las diferencias entre Siemens S7-1200 y S7-1500 en términos de capacidades y aplicaciones.

\newpage

CAPÍTULO 45: PROGRAMACIÓN DE PLC EN ESCALERA

45.1 Lenguajes de Programación IEC 61131-3

La norma IEC 61131-3 define cinco lenguajes de programación para PLC:

Lenguajes gráficos:

- LD (Ladder Diagram / Diagrama de Escalera): Basado en esquemas de relés. El más utilizado.
- FBD (Function Block Diagram): Bloques funcionales interconectados. Popular en procesos.
- SFC (Sequential Function Chart): Diagrama de estados para procesos secuenciales.

Lenguajes textuales:

- ST (Structured Text): Similar a Pascal/C. Para algoritmos complejos y cálculos.
- IL (Instruction List): Similar a ensamblador. En desuso.

45.2 Elementos del Diagrama de Escalera (Ladder)

El diagrama de escalera representa la lógica de control como circuitos eléctricos entre dos barras verticales (alimentación y neutro).

Contactos (Entradas):

- Normalmente Abierto (NA): `--] [--` Se cierra si la variable es TRUE (1).
- Normalmente Cerrado (NC): `--]/[--` Se cierra si la variable es FALSE (0).
- Flanco ascendente: `--]P[--` Se cierra por un ciclo al cambiar de 0 a 1.
- Flanco descendente: `--]N[--` Se cierra por un ciclo al cambiar de 1 a 0.

Bobinas (Salidas):

- Bobina directa: `--()--` Activa si el circuito a la izquierda es TRUE.
- Bobina negada: `--(/)--` Activa si el circuito a la izquierda es FALSE.
- Bobina SET: `--(S)--` Activa y permanece activa hasta RESET.
- Bobina RESET: `--(R)--` Desactiva una bobina SET.

Operadores:

- Serie: Y lógico (AND).
- Paralelo: O lógico (OR).
- Contacto en serie: Todos deben estar cerrados para activar.
- Contacto en paralelo: Cualquiera cerrado activa.

45.3 Funciones y Bloques Funcionales

Temporizadores:

- TON (Timer ON-delay): Q = TRUE después de PT tiempo desde que IN = TRUE.
- TOF (Timer OFF-delay): Q = FALSE después de PT tiempo desde que IN = FALSE.
- TP (Timer Pulse): Q = TRUE durante PT tiempo desde flanco ascendente de IN.
- Parámetros: IN (entrada), PT (tiempo preset), Q (salida), ET (tiempo transcurrido).

Contadores:

- CTU (Counter Up): Cuenta flancos ascendentes en CU. Q = TRUE cuando CV \geq PV.
- CTD (Counter Down): Cuenta flancos descendentes en CD.
- CTUD (Counter Up/Down): Cuenta en ambas direcciones.
- Parámetros: CU/CD (entradas), R (reset), PV (valor preset), CV (valor actual), Q (salida).

Comparadores:

- CMP (Compare): Compara dos valores. Salida TRUE si condición se cumple.
- EQ (Equal): TRUE si $IN1 = IN2$.
- NE (Not Equal): TRUE si $IN1 \neq IN2$.
- GT (Greater Than): TRUE si $IN1 > IN2$.
- LT (Less Than): TRUE si $IN1 < IN2$.
- GE (Greater or Equal): TRUE si $IN1 \geq IN2$.
- LE (Less or Equal): TRUE si $IN1 \leq IN2$.

Operaciones matemáticas:

- ADD, SUB, MUL, DIV: Aritméticas básicas.
- SQRT, ABS, LN, LOG: Funciones matemáticas.
- MOVE, SEL, MUX: Transferencia y selección de datos.

45.4 Estructura del Programa

Organización del programa (POUs):

- PROGRAM (PRG): Programa principal o subprograma.
- FUNCTION (FUN): Función sin memoria (misma salida para mismas entradas).
- FUNCTION_BLOCK (FB): Bloque funcional con memoria (instancia).

Secciones de datos:

- VAR: Variables locales.
- VAR_INPUT: Parámetros de entrada.
- VAR_OUTPUT: Parámetros de salida.
- VAR_IN_OUT: Parámetros de entrada/salida.
- GLOBAL: Variables globales (accesibles desde todos los POUs).

Tipos de datos:

- BOOL: Verdadero/Falso (TRUE/FALSE).
- BYTE, WORD, DWORD, LWORD: Datos binarios (8, 16, 32, 64 bits).
- SINT, INT, DINT, LINT: Enteros con signo (8, 16, 32, 64 bits).
- USINT, UINT, UDINT, ULINT: Enteros sin signo.
- REAL, LREAL: Números en coma flotante (32, 64 bits).
- TIME: Duración (horas:minutos:segundos:milisegundos).
- DATE, DATE_AND_TIME, TIME_OF_DAY: Fecha y hora.
- STRING: Cadena de caracteres.
- ARRAY: Arreglo de un tipo de datos.
- STRUCT: Estructura con múltiples campos.

45.5 Programa de Ejemplo: Marcha-Paro

```
PROGRAM MarchaParo
VAR
    Start_PB : BOOL; (* Pulsador arranque (NA) *)
    Stop_PB  : BOOL; (* Pulsador parada (NC) *)
    Motor_K  : BOOL; (* Bobina contactor motor *)
    MotorRunning : BOOL; (* Indicador motor en marcha *)
END_VAR

(* Rung 1: Marcha-Paro con retención *)
Start_PB Motor_K
----] [-----+----- ( ) ----
      |
Motor_K  |
----] [-----+
```

```
(* Rung 2: Indicador de marcha *)
Motor_K
----] [----( Motor_Running )----
```

45.6 Programa de Ejemplo: Semáforo Industrial

Un semáforo de 3 luces con temporizadores (verde 10s, amarillo 3s, rojo 10s):

```
PROGRAM Semaforo
VAR
  Start : BOOL;
  Timer_Verde : TON;
  Timer_Amarillo : TON;
  Timer_Rojo : TON;
  Verde : BOOL;
  Amarillo : BOOL;
  Rojo : BOOL;
  Estado : INT; (* 0=verde, 1=amarillo, 2=rojo *)
END_VAR

(* Rung 1: Estado Verde *)
Start Estado = 0 Start Timer_Verde(IN := TRUE, PT := T#10s)
--] [---] [-----[Timer_Verde]---
```

```
(* Rung 2: Transición a Amarillo *)
Timer_Verde.Q
----] [----[ Estado := 1 ]----
```

```
(* Rung 3: Estado Amarillo *)
Estado = 1 Timer_Amarillo(IN := TRUE, PT := T#3s)
----] [-----[Timer_Amarillo]----
```

```
(* Rung 4: Transición a Rojo *)
Timer_Amarillo.Q
----] [----[ Estado := 2 ]----
```

```
(* Rung 5: Estado Rojo *)
Estado = 2 Timer_Rojo(IN := TRUE, PT := T#10s)
----] [-----[Timer_Rojo]----
```

```
(* Rung 6: Transición a Verde *)
Timer_Rojo.Q
----] [----[ Estado := 0 ]----
```

```
(* Rung 7: Salidas *)
Estado = 0: ( Verde )
Estado = 1: ( Amarillo )
Estado = 2: ( Rojo )
```

45.7 Structured Text (ST)

ST es un lenguaje textual de alto nivel, similar a Pascal, para implementar algoritmos complejos:

```
IF Temperature > 120.0 THEN
    Alarm := TRUE;
    Heater := FALSE;
ELSIF Temperature < 100.0 THEN
    Heater := TRUE;
    Alarm := FALSE;
END_IF;

FOR i := 1 TO 10 DO
    Sum := Sum + Values[i];
END_FOR;

CASE State OF
    0: // Idle
        IF Start THEN State := 1; END_IF;
    1: // Running
        IF Stop THEN State := 0; END_IF;
    2: // Error
        IF Reset THEN State := 0; END_IF;
END_CASE;
```

45.8 Depuración y Buenas Prácticas

Técnicas de depuración:

- Forzar variables: Forzar entradas/salidas para probar la lógica.
- Watch (vigilancia): Monitorear valores de variables en tiempo real.
- Breakpoints: Pausar la ejecución en una línea específica (ST).
- Diagrama de estados: Visualizar la secuencia actual.
- Data logging: Registrar variables durante la operación.

Buenas prácticas de programación:

- Comentar el código (autor, fecha, función de cada rung).
- Usar nombres significativos (Motor_Arranque, Temperatura_Horno).
- Estructurar el programa en secciones y funciones.
- Evitar bobinas duplicadas (misma bobina en múltiples rungs).
- Usar temporizadores y contadores de forma consistente.
- Mantener la lógica simple y legible.
- Documentar las variables en tabla de símbolos.
- Realizar backup del programa después de cada modificación.

Ejercicios del Capítulo 45

1. Escribe un programa en ladder para un arranque estrella-delta temporizado.
2. Convierte el programa de semáforo del ejemplo a ST (Structured Text).
3. ¿Qué diferencia hay entre FUNCTION y FUNCTION_BLOCK?
4. Escribe un programa en ladder para un contador de piezas con reset.
5. ¿Qué tipos de datos existen en IEC 61131-3 y cómo se usan?
6. Implementa un control PID en ST para control de temperatura.
7. ¿Qué técnicas de depuración usarías para encontrar un error intermitente en un programa de PLC?
8. Diseña la secuencia de una máquina de llenado usando SFC.

\newpage

CAPÍTULO 46: HMI - INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA

46.1 Introducción a HMI

La HMI (Human-Machine Interface) es el sistema que permite la interacción entre el operador humano y la máquina o proceso industrial. Proporciona visualización del estado del proceso, control de parámetros, alarmas y diagnóstico.

Evolución:

- Paneles de control cableados: Botones, lámparas, instrumentos analógicos.
- Paneles de operador de texto: Display LCD, teclado numérico.
- Paneles gráficos: Pantallas táctiles, gráficos de barras, tendencias.
- SCADA móvil: Acceso remoto desde tablets y smartphones.

46.2 Componentes de un Sistema HMI

Hardware:

- Pantalla: LCD TFT color (4.3" a 21"), táctil resistiva o capacitiva.
- Procesador: ARM, x86.
- Memoria: Flash para almacenamiento (sistema y proyecto), RAM para ejecución.
- Puertos de comunicación: RS-232, RS-485, Ethernet, USB.
- Puertos de expansión: Tarjetas SD, memorias USB.
- Alimentación: 24 V DC típicamente.

Software de desarrollo:

- Siemens: WinCC (Comfort, Advanced, Unified).
- Allen-Bradley: FactoryTalk View (ME, SE).
- Schneider: Vijeo Designer, EcoStruxure Operator Terminal.
- Weintek: EasyBuilder Pro.
- Beijer: iX Developer.
- CODESYS: HMI (multi-fabricante).

46.3 Funciones de una HMI

Visualización:

- Pantallas sinópticas: Representación gráfica del proceso.
- Indicadores digitales y analógicos (barras, medidores).
- Gráficos de tendencia (tiempo real e histórico).
- Tablas de datos (recetas, lotes, producción).

Control:

- Botones virtuales (arranque, parada, reset).
- Selectores de modo (automático, manual, mantenimiento).
- Entrada de datos (setpoint, parámetros, recetas).
- Sliders y potenciómetros virtuales.

Alarmas:

- Visualización de alarmas activas y históricas.
- Jerarquía de alarmas (crítica, warning, informativa).
- Confirmación (acknowledge) de alarmas.
- Causa y solución de la alarma.

Datos:

- Registro de datos de producción.
- Recetas: Conjuntos de parámetros para diferentes productos.
- Informes de producción (turno, día, lote).
- Trazabilidad.

Seguridad:

- Niveles de acceso (operador, supervisor, ingeniero, administrador).
- Autenticación por usuario y contraseña.
- Registro de eventos (log de auditoría).

46.4 Comunicación HMI-PLC

Protocolos de comunicación:

- Siemens: MPI, PROFIBUS, PROFINET.
- Allen-Bradley: DH+, ControlNet, EtherNet/IP.
- Modbus RTU (RS-485): Universal, simple.
- Modbus TCP (Ethernet): Universal, rápido.
- OPC UA: Comunicación multiplataforma, seguridad integrada.

Variables (tags):

- Definición de tags en el HMI que se vinculan a direcciones de memoria del PLC.
- Tipos: BOOL, INT, REAL, STRING.
- Tags pueden ser de lectura, escritura o lectura/escritura.

Sincronización:

- El HMI lee periódicamente los tags del PLC (polling).
- Algunos protocolos soportan publicación por eventos (cambio de valor).
- El tiempo de actualización depende de la velocidad de comunicación y cantidad de tags.

46.5 Diseño de Pantallas HMI

Principios de diseño:

- Simplicidad: No sobrecargar la pantalla con información innecesaria.
- Consistencia: Misma disposición de elementos en todas las pantallas.
- Jerarquía visual: Información más importante más grande/visible.
- Código de colores: Verde (OK, funcionando), Rojo (alarma, parada), Amarillo (advertencia).
- Navegación intuitiva: Botones de navegación consistentes.

Estructura de navegación:

- Pantalla principal: Vista general del proceso.
- Pantallas de proceso: Zoom en áreas específicas.
- Pantalla de alarmas: Alarmas activas e históricas.
- Pantalla de tendencias: Gráficos de variables.
- Pantalla de configuración: Parámetros, recetas, usuarios.

Estándares de diseño:

- ISA-101: Norma para diseño de HMI en procesos.
- Directrices de ingeniería de factores humanos (HF).
- Guías de fabricantes (Siemens, Rockwell).

46.6 Alarmas y Eventos

Configuración de alarmas:

- Variable a monitorear.
- Límite/alarma: Alto, bajo, alto-alto, bajo-bajo.

- Prioridad: 1 (crítica) a 10 (informativa).
- Tipo: Alarma de proceso, alarma de sistema, alarma de diagnóstico.

Gráfica de alarma:

- Hora de activación.
- Hora de confirmación (acknowledge).
- Hora de retorno a normal.
- Usuario que confirmó.
- Duración total de la alarma.

Eventos:

- Eventos de sistema: PLC conectado/desconectado, HMI iniciado/apagado.
- Eventos de usuario: Inicio de sesión, cambio de parámetros.
- Eventos de producción: Inicio/fin de lote, cambio de producto.

46.7 Recetas y Data Logging

Recetas:

- Conjuntos de parámetros predefinidos.
- Ejemplo: Receta de producto A (Temp=200°C, Presión=5 bar, Tiempo=30s).
- Gestión: Crear, modificar, cargar, eliminar recetas.
- Almacenamiento: Memoria interna de HMI, USB, servidor.

Data Logging (registro de datos):

- Registro periódico de variables en memoria no volátil.
- Período de muestreo: 1 segundo a 1 hora.
- Almacenamiento: Archivos CSV, SQLite, servidor SQL.
- Uso: Análisis de producción, mantenimiento predictivo, control de calidad.

46.8 Tendencias y Proyectos

Tendencias (trends):

- Tendencias en tiempo real: Muestran el valor actual y reciente.
- Tendencias históricas: Muestran datos almacenados (selección de fecha/hora).
- Ejes Y múltiples: Diferentes escalas para diferentes variables.

Desarrollo de proyectos:

1. Definir requisitos: Variables a visualizar, funciones de control, alarmas.
2. Diseñar estructura de navegación: Mapa de pantallas.
3. Crear pantallas: Sinóptico, paneles de control, alarmas, tendencias.

4. Configurar tags: Vincular variables HMI-PLC.
5. Programar scripts (opcional): Lógica avanzada en el HMI.
6. Probar y depurar: Simulación, conexión real.
7. Desplegar: Transferir proyecto al HMI.

Ejercicios del Capítulo 46

1. Explica las funciones principales de una HMI en un sistema de automatización.
2. ¿Qué protocolos de comunicación se usan entre HMI y PLC? ¿Cuándo usarías cada uno?
3. Diseña la estructura de pantallas para la HMI de un horno industrial con temperatura, presión y alarmas.
4. ¿Qué son los niveles de acceso de seguridad en HMI y por qué son importantes?
5. Configura un sistema de alarmas para un tanque con nivel alto y bajo.
6. ¿Cómo se implementan recetas en una HMI y para qué sirven?
7. Explica la diferencia entre tendencias en tiempo real e históricas.
8. Diseña una pantalla HMI para el control de una cinta transportadora con arranque, parada y conteo de piezas.

\newpage

CAPÍTULO 47: REDES INDUSTRIALES

47.1 Introducción a las Redes Industriales

Las redes industriales (bus de campo) permiten la comunicación digital entre dispositivos de automatización: PLC, HMI, variadores, sensores, actuadores y sistemas SCADA. Reemplazan el cableado punto a punto tradicional con un bus de comunicación compartido, reduciendo costos de cableado, simplificando el diagnóstico y permitiendo funciones avanzadas.

Ventajas sobre cableado paralelo:

- Menos cableado (un solo cable para múltiples dispositivos).
- Diagnóstico remoto de dispositivos.
- Configuración y parametrización remota.
- Datos de proceso y diagnóstico en la misma red.
- Flexibilidad para añadir/eliminar dispositivos.
- Reducción de bornes, conectores y armarios.

47.2 Niveles de Red (Pirámide CIM / ISA-95)

Nivel 0 (Proceso): Sensores y actuadores.

- DeviceNet, AS-Interface, IO-Link.
- Conexión de sensores binarios y actuadores simples.

Nivel 1 (Control): PLC, variadores, HMI.

- PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP, Modbus TCP.
- Intercambio de datos de proceso entre controladores y dispositivos.

Nivel 2 (Supervisión): SCADA, servidores.

- Ethernet industrial, OPC UA.
- Recogida de datos de múltiples PLC.

Nivel 3 (Gestión): MES, ERP.

- Ethernet corporativa, bases de datos SQL.
- Integración con sistemas de gestión empresarial.

47.3 Niveles Físicos y Protocolos

RS-232:

- Punto a punto (1 transmisor, 1 receptor).
- Distancia máxima: 15 m.
- Velocidad: hasta 115.2 kbps.
- Simple, usado en programación de PLC.

RS-485:

- Multidrop (hasta 32 dispositivos en bus).
- Distancia máxima: 1200 m (con repetidores).
- Velocidad: hasta 10 Mbps.
- Diferencial (alta inmunidad al ruido).
- Usado como capa física para Modbus RTU, PROFIBUS.

Ethernet industrial:

- Basado en Ethernet estándar (IEEE 802.3).
- 100BASE-TX (100 Mbps), 1000BASE-T (1 Gbps).
- Distancia: 100 m por segmento.
- Protocolos: PROFINET, EtherNet/IP, EtherCAT, Modbus TCP, POWERLINK.

47.4 Principales Protocolos de Bus de Campo

PROFIBUS (PROcess Field BUS):

- Estándar IEC 61158, IEC 61784.
- Capa física: RS-485 (PROFIBUS DP) o MBP (PROFIBUS PA).
- Velocidad: 9.6 kbps a 12 Mbps.
- Maestro-esclavo (DP) o múltiples maestros (FDL).
- Perfiles: DP (dispositivos de campo), PA (procesos), FMS (comunicación entre PLC).
- Muy utilizado en Europa, amplia base instalada.

PROFINET (PROcess Field NET):

- Ethernet industrial de Siemens (IEC 61158, IEC 61784).
- RT (Real-Time): Ciclo de 1-10 ms.
- IRT (Isochronous Real-Time): Ciclo de 31.25 μ s para control de movimiento.
- NCMA (Non-Critical Multiple Access): Conmutación Ethernet estándar.
- Integración con PROFIBUS mediante proxies.
- El estándar actual para nuevas instalaciones.

EtherNet/IP:

- Desarrollado por Rockwell (Allen-Bradley).
- Basado en TCP/IP y UDP.
- CIP (Common Industrial Protocol) como capa de aplicación.
- Velocidad: 100 Mbps, 1 Gbps.
- Amplio en América del Norte.

EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology):

- Desarrollado por Beckhoff.
- Procesamiento de trama "on the fly" (mínimo retardo).
- Ciclo típico: 100 μ s para 1000 E/S digitales.
- Alta precisión (sincronización de ejes < 1 μ s).
- Código abierto, multi-fabricante.
- Líder en control de movimiento y máquinas de alto rendimiento.

Modbus:

- Desarrollado por Modicon (Schneider).
- Protocolo abierto más simple y extendido.
- Modbus RTU (RS-232/485): Binario, 9600-115200 bps.
- Modbus TCP (Ethernet): Sobre TCP/IP, puerto 502.
- Funciones: Leer bobinas (01), leer registros (03), escribir bobina (05), escribir registro (06).
- Universal, soportado por casi todos los fabricantes.

AS-Interface (AS-i):

- Bus de 2 hilos que transporta datos y potencia (30 V DC, 8 A).
- Conecta sensores y actuadores binarios.
- Hasta 62 esclavos por maestro.
- Ciclo: 5 ms para 62 esclavos.
- Simple y rápido para nivel de sensor/actuador.

IO-Link:

- Protocolo punto a punto (no es bus, sino comunicación serie).
- Conecta sensores/actuadores al módulo de E/S o maestro IO-Link.
- Datos de proceso (cíclicos), datos de servicio (acíclicos), eventos.
- Parametrización automática al reemplazar un dispositivo (plug-and-play).
- Creciente adopción en Industria 4.0.

CANopen:

- Basado en CAN (Controller Area Network).
- Alta fiabilidad, usado en automoción y maquinaria móvil.

- Velocidad: hasta 1 Mbps.
- Perfiles para drives (CiA 402), sensores, I/O.

47.5 Topologías de Red

Estrella: Todos los dispositivos conectados a un switch central. Común en Ethernet.

Bus (línea): Todos los dispositivos en un cable compartido con terminación. PROFIBUS, RS-485.

Anillo: Dispositivos conectados en anillo. Redundancia (si un cable falla, la comunicación continúa). EtherCAT anillo, PROFINET MRP.

Árbol: Combinación de estrella y bus. Jerárquica.

Malla: Múltiples conexiones redundantes. Redes inalámbricas.

47.6 Cableado y Terminación

PROFIBUS RS-485:

- Cable apantallado, 2 hilos trenzados (A, B) + tierra.
- Conector D-sub 9 pins (macho/hembra).
- Resistencia de terminación en ambos extremos (220 Ω).
- Sin derivaciones (stubs) largas (< 0.3 m).
- Distancia máxima: 1900 m a 93.75 kbps, 200 m a 12 Mbps.

Ethernet industrial:

- Cable CAT5e o CAT6 (mínimo).
- Conector RJ45 blindado (shielded) con codificación mecánica.
- Switch gestionado (managed switch) para diagnóstico y segmentación.
- Alimentación PoE (Power over Ethernet) para dispositivos.

Terminación de red (bus RS-485):

La resistencia de terminación (120 Ω para RS-485, 220 Ω para PROFIBUS) en los extremos del bus evita reflexiones de señal:

- Extremo 1: Resistencia entre A(+) y B(-).
- Extremo 2: Resistencia entre A(+) y B(-).
- Sin terminación o con terminación incorrecta: errores de comunicación.

47.7 Diagnóstico de Redes

Herramientas:

- Multímetro: Verificar continuidad y voltaje de bus.
- Reflectómetro (TDR): Localizar roturas o cortocircuitos en cables.
- Analizador de protocolo (Ethernet, PROFIBUS): Capturar y analizar tramas.
- Web server del switch gestionado: Estadísticas de puertos, errores.
- Software de diagnóstico del fabricante: Siemens PRONETA, Rockwell RSLinx.

Problemas comunes:

- Terminación incorrecta: Errores de comunicación intermitentes.
- Longitud excesiva del bus: Errores en nodos distantes.
- Derivaciones largas (stubs): Reflexiones, pérdida de datos.
- Cable dañado: Rotura, cortocircuito, humedad.
- Puesta a tierra incorrecta: Lazos de tierra, interferencias.
- Dirección duplicada (IP, PROFIBUS address): Dispositivo no accesible.

47.8 Seguridad en Redes Industriales

La convergencia de redes IT/OT (Information Technology / Operational Technology) requiere medidas de seguridad:

Riesgos:

- Acceso remoto no autorizado.
- Ataques de denegación de servicio (DoS).
- Infección por malware (Stuxnet, ransomware).
- Manipulación de parámetros y programas.
- Espionaje industrial.

Medidas de seguridad:

- Segmentación de red (firewalls industriales, DMZ).
- VPN para acceso remoto seguro.
- Autenticación de usuarios y dispositivos.
- Cifrado de comunicaciones (OPC UA, PROFINET con seguridad).
- Actualización de firmware.
- Monitoreo de tráfico de red (IDS/IPS industrial).
- Políticas de seguridad (IEC 62443).

Ejercicios del Capítulo 47

1. Explica los niveles de la pirámide de automatización (ISA-95) y los protocolos típicos de cada nivel.
2. Compara PROFIBUS y PROFINET en términos de velocidad, topología y aplicaciones.
3. ¿Qué es Modbus RTU y qué capa física utiliza?
4. ¿Qué ventajas tiene EtherCAT para control de movimiento sobre PROFINET RT?
5. ¿Cómo se realiza la terminación de un bus RS-485 y por qué es necesaria?
6. Explica la diferencia entre IO-Link y AS-Interface en términos de funcionamiento y aplicación.
7. ¿Qué herramientas usarías para diagnosticar una red PROFIBUS con errores intermitentes?
8. Investiga la norma IEC 62443 sobre seguridad en sistemas de automatización industrial.

\newpage

CAPÍTULO 48: SCADA

48.1 Introducción a SCADA

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) es un sistema de software que permite supervisar y controlar procesos industriales a distancia. Proporciona una visión centralizada de una planta o conjunto de instalaciones dispersas geográficamente (oleoductos, redes eléctricas, plantas de tratamiento de agua).

Funciones principales:

- Adquisición de datos: Recoge datos de PLC, RTU y otros dispositivos de campo.
- Supervisión: Visualiza el estado del proceso en tiempo real (sinópticos, gráficos, alarmas).
- Control: Permite al operador enviar comandos (setpoint, arranque/parada).
- Alarmas: Notifica condiciones anormales con prioridad y gestión.
- Tendencias: Muestra evolución de variables en el tiempo.
- Históricos: Almacena datos a largo plazo para análisis.
- Informes: Genera reportes de producción, calidad, eficiencia.

48.2 Componentes de un Sistema SCADA

Servidores SCADA:

- Servidor de comunicaciones: Gestiona la comunicación con los dispositivos de campo.
- Servidor de datos (historian): Almacena datos históricos en base de datos.
- Servidor de alarmas: Centraliza alarmas de toda la planta.
- Servidor de aplicaciones: Ejecuta lógica de supervisión y scripts.
- Servidor redundante (standby): Toma el control si el servidor principal falla.

Estaciones de operador (cliente):

- PCs con software cliente SCADA.
- Múltiples estaciones para diferentes áreas de la planta.
- Operadores con diferentes niveles de acceso.

RTU (Remote Terminal Unit):

- Dispositivo de campo para adquisición de datos en ubicaciones remotas.
- Comunicación por radio, satélite, módem, GSM/GPRS.
- Bajo consumo, operación con batería/panel solar.
- Usado en oil&gas, agua, energía eléctrica.

PLC:

- Adquiere datos de sensores y controla actuadores localmente.
- Comunica datos al SCADA vía bus de campo o red.

Interfaces de comunicación:

- OPC DA, OPC UA, OPC HDA.
- Protocolos nativos (Modbus, PROFIBUS, PROFINET, DNP3, IEC 60870).
- Gateways (convertidores de protocolo).

48.3 Protocolo OPC

OPC (OLE for Process Control) es el estándar de comunicación entre SCADA y dispositivos de campo.

OPC Classic (DA, HDA, AE):

- Basado en COM/DCOM de Microsoft Windows.
- OPC DA (Data Access): Datos en tiempo real.
- OPC HDA (Historical Data Access): Datos históricos.
- OPC AE (Alarms & Events): Alarmas y eventos.
- Limitaciones: Dependiente de Windows DCOM (problemas de seguridad y configuración).

OPC UA (Unified Architecture):

- Sucesor multiplataforma (Windows, Linux, embebido).
- Independiente de plataforma y lenguaje.
- Seguridad integrada (autenticación, cifrado, firmado).
- Modelo de información (objetos, métodos, tipos).
- PubSub (publicación/suscripción) para comunicación eficiente.
- Estándar IEC 62541.

Arquitectura OPC UA:

- Cliente: SCADA, HMI, MES.
- Servidor: PLC, RTU, gateway.
- Discovery: Encuentra servidores en la red.
- Direcciones: Nodos organizados en jerarquía.

48.4 Funcionalidades Avanzadas

Redundancia:

- Servidores redundantes (principal/respaldo).
- Conmutación automática por fallo (failover).
- Canales de comunicación redundantes.
- Sin pérdida de datos durante la conmutación.

Control a distancia:

- Setpoint remoto desde SCADA.
- Control de lazo cerrado desde SCADA (no recomendado por latencia).
- Activación/desactivación de equipos remotos.

Análisis de datos (analytics):

- Cálculo de KPIs (Overall Equipment Effectiveness, disponibilidad, rendimiento).
- Análisis de tendencias y patrones.
- Mantenimiento predictivo basado en datos históricos.

Reporting (informes):

- Informes automáticos por turno, día, semana, mes.
- Formatos: PDF, Excel, HTML, correo electrónico.
- Indicadores: producción, calidad, consumo energético, paradas.

Integración con MES (Manufacturing Execution System):

- Recepción de órdenes de producción desde MES.
- Envío de datos de producción y consumo a MES.
- Trazabilidad de productos (lotes, materiales).

48.5 Software SCADA Comercial

Siemens WinCC:

- WinCC V7 (SCADA clásico).
- WinCC Unified (nueva plataforma, web-based).
- Integración nativa con Siemens (S7-1200/1500, PROFINET).

Rockwell FactoryTalk View:

- Site Edition (SE): SCADA multi-servidor, multi-cliente.
- Machine Edition (ME): HMI/SCADA para máquinas.
- Integración nativa con ControlLogix/CompactLogix.

Schneider EcoStruxure:

- Antes Vijeo Citect, ClearSCADA.
- Arquitectura moderna, web-based.

Aveva (Wonderware):

- System Platform (SCADA histórico).
- InTouch (HMI/SCADA).

Ignition (Inductive Automation):

- Basado en Java, multiplataforma.
- Modelo de licenciamiento por servidor (ilimitado clientes).
- Creciente popularidad (flexible, modular, web-based).

Código abierto:

- OpenSCADA, ScadaBR, Proview.
- Eclipse NeoSCADA (EclipseSCADA).

48.6 Seguridad en SCADA

Tradicionalmente, los sistemas SCADA estaban aislados (air-gapped). La convergencia IT/OT los expone a ciberataques.

Buenas prácticas de seguridad:

- Segmentación de red (firewalls, DMZ).
- Autenticación fuerte (2FA, certificados).
- Políticas de contraseñas robustas.
- Actualización de software y parches de seguridad.
- Monitoreo de actividad inusual.
- Copias de seguridad regulares (configuración, base de datos histórica).
- Plan de respuesta a incidentes.

Normas de seguridad:

- IEC 62443: Seguridad en sistemas de automatización industrial.
- NIST SP 800-82: Guía de seguridad para SCADA.
- ISA 99 / IEC 62443 (misma norma).

48.7 Implementación de un Proyecto SCADA

Fases:

1. Ingeniería:

- Definir objetivos: ¿Qué supervisar? ¿Qué controlar?
 - Identificar puntos de datos (tags): entradas, salidas, variables internas.
 - Definir arquitectura del sistema.
2. Diseño:
- Diseñar pantallas (sinópticos, alarmas, tendencias).
 - Definir base de datos histórica.
 - Planificar redundancia y seguridad.
3. Desarrollo:
- Configurar servidores de comunicaciones.
 - Crear pantallas y navegación.
 - Implementar lógica de alarmas y eventos.
 - Configurar históricos e informes.
4. Pruebas:
- Prueba de comunicación con PLC.
 - Prueba de funcionalidad (simulación de alarmas, condiciones anormales).
 - Prueba de rendimiento (carga del sistema, número de tags, clientes concurrentes).
 - Prueba de redundancia (fallo de servidor principal).
5. Puesta en marcha:
- Conexión al sistema real.
 - Capacitación de operadores.
 - Transición de operación manual a SCADA.
6. Operación y mantenimiento:
- Monitoreo del sistema.
 - Respaldo periódico de configuración.
 - Actualizaciones y mejoras.

Ejercicios del Capítulo 48

1. Explica la diferencia entre SCADA y HMI en términos de alcance y funcionalidad.
2. ¿Qué es OPC UA y qué ventajas tiene sobre OPC Classic?
3. Describe la arquitectura típica de un sistema SCADA con servidores redundantes.
4. ¿Qué funcionalidades de seguridad debe tener un sistema SCADA moderno?
5. Compara los servidores de comunicaciones, de datos (historian) y de alarmas en SCADA.

6. ¿Qué es un RTU y en qué aplicaciones se usa típicamente?
7. Diseña la arquitectura SCADA para una planta de tratamiento de agua con 5 estaciones remotas.
8. Investiga el software Ignition SCADA y sus ventajas frente a sistemas SCADA tradicionales.

\newpage

CAPÍTULO 49: FUNDAMENTOS DE NEUMÁTICA

49.1 Introducción a la Neumática

La neumática utiliza aire comprimido para transmitir energía y realizar trabajo mecánico. Es ampliamente utilizada en automatización industrial por su seguridad, limpieza y bajo costo. Los sistemas neumáticos son esenciales en la mecatrónica para actuación de pinzas, cilindros, herramientas y posicionamiento.

Ventajas: Aire abundante y gratuito, componentes de bajo costo, sistema limpio (sin fugas contaminantes), seguro en atmósferas explosivas, actuadores suaves y adaptables, sobrecarga segura (el actuador simplemente se detiene).

Desventajas: Menor eficiencia energética que la hidráulica y electricidad (el aire comprimido tiene pérdidas), fuerzas limitadas (comparado con hidráulica), ruido en escapes, necesidad de mantenimiento de filtros y lubricadores, compresibilidad del aire (menor precisión en posicionamiento).

Unidades neumáticas: Presión en bar (1 bar = 100 kPa), caudal en L/min o Nm³/h, fuerza en N.

49.2 Generación y Tratamiento de Aire Comprimido

Compresores: Compresor de pistón (presiones hasta 15 bar, pequeño caudal), compresor de tornillo (caudal continuo, media/gran potencia, eficiente), compresor centrífugo (gran caudal, baja presión). La presión de trabajo típica es 6-8 bar.

Tratamiento del aire (Unidad de Mantenimiento - FRL): Filtro: Elimina partículas sólidas (> 5 µm) y agua condensada. Regulador de presión: Reduce y estabiliza la presión al valor requerido (típicamente 6 bar). Lubricador: Añade niebla de aceite para lubricar componentes neumáticos. Manómetro: Indica la presión de salida.

Secadores: Refrigerativos (enfían el aire para condensar humedad, punto de rocío 3°C), de adsorción (aire seco para aplicaciones críticas, punto de rocío -40°C). Purga automática de condensados.

49.3 Actuadores Neumáticos

Cilindros neumáticos: Simple efecto: Fuerza en un sentido, retroceso por resorte. Carrera limitada. Doble efecto: Fuerza en ambos sentidos. Carrera hasta 2000 mm. Normalizado ISO 6432 (diámetros 8-25 mm), ISO 15552 (32-320 mm).

Parámetros: Diámetro del pistón (32, 40, 50, 63, 80, 100 mm), carrera (mm), presión de trabajo, fuerza teórica $F = P \times A$ (con $A = \pi \times D^2/4$). Fuerza real: $F_{\text{real}} = F_{\text{teórica}} \times 0.85-0.95$ (por rozamiento).

Cilindros especiales: Sin vástago (carreras largas, espacio reducido), de impacto (alta velocidad/energía), de fuelle (para aplicaciones sanitarias), rotativos (movimiento giratorio limitado), de bloqueo (con freno neumático).

Actuadores de giro: Pinza giratoria (rotación limitada, típicamente 0-180°), motor neumático (rotación continua, alto par a baja velocidad).

49.4 Válvulas Neumáticas

Válvulas direccionales: Controlan la dirección del flujo de aire. Designación: Número de vías / Número de posiciones. 3/2 (3 vías, 2 posiciones), 5/2, 5/3. Accionamiento: Solenoide (eléctrico), manual (pulsador, selector), mecánico (rodillo, final de carrera), neumático (pilotaje).

Válvulas de control de caudal: Reguladoras de caudal (unidireccionales con antirretorno), estranguladoras. Controlan la velocidad del actuador.

Válvulas de bloqueo: Antirretorno (permite flujo en un sentido), selectora (función OR), de simultaneidad (función AND), de escape rápido (aumenta velocidad de retroceso).

Válvulas de presión: Limitadora (seguridad), reguladora (reduce y estabiliza presión), secuencial (abre al alcanzar presión umbral).

49.5 Circuitos Neumáticos Básicos

Mando de cilindro de simple efecto: Válvula 3/2 NC (NA). Al accionar, el aire entra y el vástago sale. Al desaccionar, el resorte retorna el vástago y el aire escapa.

Mando de cilindro de doble efecto: Válvula 5/2. Posición 1: aire entra por cámara trasera, sale por delantera (avance). Posición 2: aire entra por cámara delantera, sale por trasera (retroceso).

Control de velocidad: Reguladores de caudal unidireccionales en cada entrada del cilindro. Estrangulación a la entrada (controla avance), estrangulación a la salida (controla retroceso). Más común: estrangulación a la salida (más estable).

Secuencia automática: Cilindro A avanza → sensor final de carrera → Cilindro B avanza → sensor → A retrocede → sensor → B retrocede. Secuencia A+, B+, A-, B-. Se implementa con válvulas 5/2 biestables y pilotajes neumáticos o eléctricos.

49.6 Electroneumática

La electroneumática combina componentes neumáticos con control eléctrico/electrónico. Las válvulas son accionadas por solenoides (electroválvulas) que reciben señales de PLC, relés o sensores.

Componentes: Electroválvulas (solenoides 24 V DC, con LED indicador y protección), sensores de posición en cilindros (magnéticos, de efecto Hall o Reed), PLC con módulos de salidas a relé o transistor.

Ventajas sobre neumática pura: Flexibilidad (cambiar lógica por programa), integración con sistemas de control superiores, diagnóstico remoto, menor cableado neumático.

49.7 Mantenimiento de Sistemas Neumáticos

Problemas comunes: Fugas de aire (pérdidas económicas y de presión), agua y contaminación en el aire (desgaste prematuro de componentes), lubricación insuficiente o excesiva, desgaste de sellos (fugas internas, pérdida de fuerza).

Mantenimiento preventivo: Drenar condensados del filtro diariamente, verificar nivel de aceite en lubricador, limpiar/reemplazar elemento filtrante periódicamente, verificar fugas con detector ultrasónico, verificar presión de trabajo, lubricar cilindros según especificaciones.

Diagnóstico de fallas: El cilindro no se mueve: verificar presión, válvula, señal eléctrica. Movimiento lento: verificar reguladores de caudal, fugas, rozamiento. Fuga externa: reemplazar sellos. Ruido excesivo: lubricación, desgaste, golpeteo.

Ejercicios del Capítulo 49

1. Calcula la fuerza teórica de un cilindro de 50 mm de diámetro a 6 bar. ¿Y la fuerza real (estimando 90% de eficiencia)?
2. Explica la diferencia entre una válvula 3/2 y una 5/2.
3. ¿Qué componentes tiene una unidad de mantenimiento FRL y qué función cumple cada uno?
4. Diseña un circuito neumático para un cilindro de doble efecto con control de velocidad en ambos sentidos.
5. ¿Qué ventajas tiene la electroneumática sobre la neumática pura?
6. Explica cómo se genera, trata y distribuye el aire comprimido en una planta industrial.
7. ¿Cuáles son los problemas más comunes en sistemas neumáticos y cómo se solucionan?
8. Diseña la secuencia A+, B+, A-, B- con electroneumática (PLC + electroválvulas).

\newpage

CAPÍTULO 50: ELECTRONEUMÁTICA

50.1 Integración Eléctrica-Neumática

La electroneumática integra componentes neumáticos con sistemas de control eléctrico (PLC, relés, sensores). Es el estándar en automatización industrial por su flexibilidad y facilidad de integración.

Arquitectura típica:

- Sensores eléctricos (finales de carrera, magnéticos) detectan posición.
- PLC procesa la lógica de control.
- Electroválvulas (solenoides 24V DC) convierten la señal eléctrica en movimiento neumático.
- Cilindros neumáticos realizan el trabajo mecánico.

50.2 Electroválvulas (Válvulas Solenoide)

Las electroválvulas son válvulas direccionales accionadas por un solenoide eléctrico. Son los componentes clave de la electroneumática.

Tipos de accionamiento: Monoestable: Un solenoide + resorte de retorno. Vuelve a posición de reposo al desenergizar. Biestable: Dos solenoides. Mantiene la posición sin necesidad de energía. (Ventaja: menor consumo, seguridad ante fallo de energía).

Características eléctricas: Voltaje: 24 V DC (más común), 110/230 V AC. Potencia: 2-8 W. Protección: IP65. LED indicador de estado. Supresor de picos (diodo o varistor).

Conexión con PLC: Las salidas del PLC (relé o transistor) activan la bobina de la electroválvula. Protección con diodo de rueda libre para bobinas DC.

50.3 Sensores en Electroneumática

Sensores de posición de cilindro: Detectan la posición del pistón dentro del cilindro. Utilizan imán permanente en el pistón y sensor externo (Reed o Hall) montado en el perfil del cilindro. Ofrecen señal NPN o PNP. Se montan en ranura C (perfil) o abrazadera.

Finales de carrera: Contacto mecánico accionado por el vástago o pieza móvil. Simple y robusto. Vida limitada (desgaste mecánico).

Sensores de presión: Detectan presencia/ausencia de presión en la línea. Señal digital para PLC. Ajuste de umbral (presión mínima).

Sensores de caudal: Caudalímetros para monitorear consumo de aire comprimido.

50.4 Diseño de Circuitos Electroneumáticos

Mando directo con relé: Pulsador de arranque + relé intermedio → electroválvula. Simple para cilindros individuales.

Mando desde PLC: Entradas del PLC: pulsadores, sensores de posición. Lógica programada en ladder. Salidas del PLC: electroválvulas, indicadores.

Ejemplo: Cilindro de doble efecto con finales de carrera:

- Entradas: S1 (inicio ciclo), S2 (final de carrera retrocedido), S3 (final de carrera avanzado).
- Salidas: Y1 (válvula avance), Y2 (válvula retroceso).
- Lógica: S1 y S2 → Y1 ON (avance). S3 → Y1 OFF, Y2 ON (retroceso).

50.5 Secuencias y Diagramas

Diagrama espacio-fase (Grafcet / SFC): Representa la secuencia de movimiento de cada actuador. Fases: pasos (etapas) y transiciones. Transición solo cuando se cumple la condición (sensor, temporizador).

Diagrama de movimiento: Coordenadas: tiempo en X, posición del actuador en Y. Muestra movimientos simultáneos.

Secuencias típicas: A+, B+, A-, B- (secuencia en cascada). A+, A-, B+, B- (secuencia en paralelo). A+ y B+, A- y B- (movimiento simultáneo).

50.6 Seguridad en Electroneumática

Parada de emergencia: Corte de alimentación eléctrica de electroválvulas (vuelven a posición de reposo por resorte). Válvula de descarga de presión (descarga acumuladores). Válvula de bloqueo (mantiene presión en actuadores en posición segura).

Protección contra sobrepresión: Válvula limitadora de presión en la alimentación.

Arranque seguro tras restauración de energía: Los actuadores no deben moverse inesperadamente al restaurar aire o electricidad. Sistema de enclavamiento y reset manual.

Ejercicios del Capítulo 50

1. Compara válvulas monoestables y biestables en aplicaciones de electroneumática.
2. Diseña un circuito electroneumático (PLC + sensores + electroválvulas) para un cilindro que avanza y retrocede automáticamente.
3. ¿Qué sensores se usan para detectar la posición de un pistón neumático?
4. Explica el diagrama espacio-fase (Grafcet) para la secuencia A+, B+, B-, A-.
5. ¿Qué consideraciones de seguridad deben implementarse en un sistema electroneumático?
6. Implementa en ladder de PLC el control de un cilindro de doble efecto con avance por pulsador y retroceso automático al final de carrera.

\newpage

CAPÍTULO 51: FUNDAMENTOS DE HIDRÁULICA

51.1 Introducción a la Hidráulica

La hidráulica utiliza un fluido (aceite mineral) a presión para transmitir energía y generar fuerza o movimiento. Es la tecnología preferida cuando se requieren altas fuerzas (toneladas), movimiento preciso a baja velocidad y alta densidad de potencia.

Ventajas: Fuerzas extremadamente altas (miles de kN), alta densidad de potencia (componentes compactos), movimiento suave y preciso a baja velocidad, autolubricación (el aceite lubrica los componentes), capaz de mantener fuerza constante sin movimiento, operación en condiciones extremas.

Desventajas: Mayor costo que neumática, riesgo de fugas de aceite (contaminación), menor eficiencia energética (pérdidas por fricción y calor), mantenimiento más complejo, sensible a contaminación del fluido, requiere filtración y refrigeración.

Principio fundamental (Pascal): La presión aplicada a un fluido confinado se transmite uniformemente en todas direcciones. $F_1/A_1 = F_2/A_2$, donde F es fuerza y A es área. Una fuerza pequeña en un área pequeña genera una fuerza grande en un área grande (principio de la prensa hidráulica).

Unidades: Presión en bar (1 bar = 10^5 Pa), caudal en L/min, fuerza en kN.

51.2 Componentes de Sistemas Hidráulicos

Bombas hidráulicas: Convierten energía mecánica (motor eléctrico) en energía hidráulica (caudal a presión). Bombas de engranajes (simples, económicas, presión media 200 bar), bombas de paletas (más silenciosas, 150-200 bar), bombas de pistones axiales (alta presión 350-450 bar, caudal variable). Caudal Q (L/min) = desplazamiento (cm^3/rev) \times rpm / 1000.

Válvulas de control direccional: Similar a neumática pero para alta presión. Electroválvulas proporcionales y servo-válvulas para control fino.

Válvulas de presión: Limitadora (seguridad, máxima presión del sistema), reguladora de presión (reduce presión a un circuito secundario), secuencial (abre paso al alcanzar presión umbral), de frenado.

Válvulas de caudal: Reguladoras de caudal (fijas o variables), compensadas en presión (mantienen caudal constante independientemente de la carga).

Actuadores hidráulicos: Cilindros hidráulicos (simples y doble efecto, hasta cientos de toneladas de fuerza). Motores hidráulicos (engranajes, paletas, pistones, alto par a baja velocidad).

Acumuladores: Almacenan energía hidráulica (nitrógeno comprimido separado por membrana o pistón). Funciones: compensar picos de demanda, mantener presión con bomba parada, amortiguar golpes de ariete, fuente de presión de emergencia.

51.3 Fluidos Hidráulicos

Aceites minerales: Los más comunes. Aditivos antioxidantes, antidesgaste (AW, zinc), antiespumantes. Viscosidad ISO VG 32, 46, 68 (la más usada en industria).

Fluidos resistentes al fuego: Esteres fosfatados (altas temperaturas, riesgo de incendio), emulsiones agua-aceite (minería), agua-glicol.

Propiedades clave: Viscosidad adecuada al rango de temperatura, lubricidad, resistencia a oxidación, compatibilidad con sellos, capacidad de disipación de calor.

Contaminación del fluido: La principal causa de falla en sistemas hidráulicos. Partículas sólidas ($> 10 \mu\text{m}$), agua, aire, productos de oxidación. Filtración: Filtro de aspiración (protege bomba), filtro de presión (protege válvulas), filtro de retorno (protege tanque). Clase de limpieza ISO 4406 (ejemplo: 18/16/13 para sistemas industriales).

51.4 Circuitos Hidráulicos Básicos

Circuito de bomba de caudal fijo con válvula limitadora: Bomba entrega caudal continuo. Válvula limitadora mantiene presión máxima. El exceso de caudal se descarga por la limitadora (genera calor). Baja eficiencia.

Circuito de bomba de caudal variable: Bomba ajusta el caudal a la demanda. Alta eficiencia. Más costosa.

Circuito regenerativo: El aceite de la cámara de avance se redirige a la cámara de retroceso. Aumenta velocidad de avance. Usado en prensas.

51.5 Mantenimiento de Sistemas Hidráulicos

Problemas comunes: Fugas externas (sellos, conexiones), sobrecalentamiento, ruido excesivo en bomba (cavitación, aire), actuación lenta o errática, contaminación del fluido.

Mantenimiento preventivo: Verificar nivel y estado del aceite (color, olor, turbidez), análisis periódico de aceite (viscosidad, acidez, contenido de agua, conteo de partículas), reemplazo de filtros según presión diferencial, verificar presión de precarga de acumuladores, inspeccionar mangueras y conexiones, verificar temperatura de operación (típicamente 40-55°C).

Diagnóstico: Medición de presión en puntos clave del circuito, medición de caudal (caudalímetro portátil), prueba de cilindros (fugas internas en sellos de pistón), análisis de vibraciones en bomba.

Ejercicios del Capítulo 51

1. Explica el principio de Pascal y su aplicación en sistemas hidráulicos.
2. Calcula la fuerza de un cilindro hidráulico de 100 mm de diámetro a 200 bar.
3. Compara bombas de engranajes, paletas y pistones axiales.
4. ¿Qué funciones cumple un acumulador hidráulico en un sistema industrial?
5. ¿Qué análisis se realizan al aceite hidráulico para mantenimiento predictivo?
6. Explica la diferencia entre un sistema de caudal fijo y caudal variable.
7. ¿Qué causas tiene el sobrecalentamiento en sistemas hidráulicos y cómo se soluciona?
8. ¿Qué clase de limpieza ISO 4406 es recomendable para sistemas hidráulicos industriales?

\newpage

CAPÍTULO 52: ELECTROHIDRÁULICA

La electrohidráulica integra componentes hidráulicos con control eléctrico/electrónico para lograr control preciso de posición, fuerza y velocidad. Se utiliza en maquinaria pesada, prensas, máquinas herramienta, y robots industriales de gran capacidad. Las válvulas proporcionales reciben señal analógica (0-10 V, 4-20 mA) o por bus de campo (PROFIBUS, EtherCAT) para posicionar el carrete en cualquier punto intermedio, permitiendo control continuo de caudal y dirección. Las servoválvulas ofrecen mayor precisión y respuesta dinámica, con resolución de posicionamiento del carrete en micras y frecuencia de respuesta superior a 100 Hz, usando realimentación interna (LVDT). Los amplificadores de válvula (controladores electrónicos) proporcionan la excitación al solenoide, la realimentación del LVDT, la corrección de histéresis (dither) y la rampa de control. Para posicionamiento preciso de cilindros, se usan transductores de posición magneto-estrictivos (Temposonics) que miden la posición del pistón con resolución micrométrica, y el control en lazo cerrado se implementa en un controlador de movimiento (CNC, PLC con módulo de control de eje) que ejecuta PID con feedforward. Las aplicaciones típicas incluyen prensas hidráulicas con control de fuerza y posición, máquinas de inyección de plástico, siderurgia (laminación, trenes de desbaste), grúas y maquinaria de construcción con control joystick, túneles y tuneladoras, y aerogeneradores con control de paso de pala.

CAPÍTULO 53: CIRCUITOS DE ILUMINACIÓN

Las instalaciones de iluminación son la aplicación más visible de la electricidad en edificios industriales. Una buena iluminación mejora la seguridad, productividad y calidad del trabajo. Los parámetros fundamentales son el flujo luminoso (lúmenes, lm), iluminancia ($\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$), eficacia luminosa (lm/W) y temperatura de color (Kelvin, K). Las tecnologías de iluminación incluyen LED con eficacia $>150 \text{ lm}/\text{W}$, vida útil $>50,000 \text{ h}$, controlable y de encendido instantáneo; fluorescentes compactas y lineales (ahora en declive frente a LED); y halogenuros metálicos para alta potencia. Los circuitos de lámparas LED requieren un driver LED que regule la corriente constante (típicamente 350-1050 mA). El control puede ser simple (interruptor), con sensor de presencia, con fotocélula (crepuscular), o por bus DALI (Digital Addressable Lighting Interface) para control individual de luminarias. En instalaciones trifásicas, las luminarias se distribuyen entre las fases para equilibrar la carga. La protección incluye disyuntor magnetotérmico (10-16 A) y diferencial (30 mA) para protección de personas. Las aplicaciones industriales principales son iluminación general de naves (LED de alta bahía 100-200W), iluminación localizada en puestos de trabajo, iluminación de emergencia con batería integrada (norma UNE-EN 1838, autonomía mínima 1 hora), alumbrado exterior (proyectores LED, IP65), e iluminación de zonas ATEX con luminarias certificadas Ex.

CAPÍTULO 54: CIRCUITOS DE FUERZA MOTRIZ

Los circuitos de fuerza alimentan motores eléctricos y otros equipos de potencia. Se dimensionan según la potencia del motor, distancia, método de instalación y protecciones. La corriente nominal de un motor trifásico se calcula como $I_n = P / (\sqrt{3} \times V \times FP \times \eta)$. Para 400 V, $FP=0.85$, $\eta=0.9$: $I_n(A) \approx P(kW) \times 1.9$. La sección del conductor se determina según la corriente nominal (capacidad de corriente según tabla), caída de tensión máxima admisible (3-5%), y protección contra cortocircuito. Ejemplos de secciones: 1.5 mm² (16 A), 2.5 mm² (20 A), 4 mm² (25 A), 6 mm² (32 A), 10 mm² (40 A), 16 mm² (63 A), 25 mm² (80 A), 35 mm² (100 A). La protección del circuito incluye disyuntor magnetotérmico (curva C o D para motores) calibrado a $1.2-1.5 \times I_n$, relé térmico desobrecarga (clase 10, ajuste $1.0-1.05 \times I_n$), contactor dimensionado para categoría AC-3, y guardamotor combinado (disyuntor + térmico integrado) que facilita el montaje.

CAPÍTULO 55: SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

La puesta a tierra protege a las personas contra contactos indirectos, proporciona camino de baja impedancia para corrientes de falla, estabiliza el potencial de referencia de equipos electrónicos y disipa energía de rayos. Una puesta a tierra consta de electrodos o jabalinas (varilla Cu 14-20 mm diámetro, 2-3 m longitud, enterrada verticalmente), conductores de tierra (Cu desnudo 35-50 mm² para bajante principal), y conexiones (soldadura cupro-aluminotérmica o conectores certificados, no simples abrazaderas). La resistencia de tierra ideal es menor a 10 Ω para industrias generales, menor a 5 Ω para equipos sensibles/informáticos, menor a 1 Ω para subestaciones. Se mide con telurómetro mediante método de caída de potencial (3 electrodos: H, S, E). Los sistemas de tierra incluyen TN-S con neutro y protección separados (recomendado para industrias), TN-C con neutro y protección combinados (existente, en desuso), y TT con tierra independiente de la del transformador. Las mallas de tierra son redes de conductores enterrados que cubren toda el área de la instalación, con paso de malla que limita el gradiente de potencial superficial (tensión de paso y contacto).

CAPÍTULO 56: PROTECCIONES ELÉCTRICAS

Los dispositivos de protección desconectan el circuito ante condiciones anormales: cortocircuito (corriente extremadamente alta, daño inmediato), sobrecarga (corriente excesiva prolongada, calentamiento), sobretensión (transitorios o falla de neutro), fuga a tierra (riesgo de electrocución), y subtensión/falta de fase (daño a motores). Los fusibles son la protección más simple: de cuchilla (NH, alta capacidad de ruptura, 100 kA), cilíndricos (D, D0, vidrio para equipos), o ultrarápidos (aR, semiconductores). Se seleccionan por corriente nominal, capacidad de ruptura (I_{cc} máxima) y curva tiempo-corriente. El disyuntor magnetotérmico combina protección térmica (bimetal, sobrecarga) y magnética (solenoides, cortocircuito), con curvas B (cargas resistivas, $3-5 \times I_n$), C (cargas inductivas, $5-10 \times I_n$), D (motores, transformadores, $10-20 \times I_n$). El interruptor diferencial (RCD) detecta fugas a tierra por balance de corrientes, con sensibilidades de 30 mA (personas), 100-300 mA (incendios), 500-1000 mA (selectividad). Las protecciones contra sobretensión (SPD) incluyen Tipo 1 (onda de 10/350 μ s, rayos, descargadores de gas), Tipo 2 (8/20 μ s, conmutación, varistores MOV), y Tipo 3 (equipos sensibles, filtros). La selectividad asegura que solo dispare el dispositivo más cercano a la falla (selectividad amperimétrica, cronométrica o energética). Los criterios de coordinación entre protecciones son esenciales para evitar paradas innecesarias de la instalación.

CAPÍTULO 57: TABLEROS ELÉCTRICOS

Los tableros eléctricos concentran y distribuyen la energía eléctrica, alojando protecciones, control y monitoreo. Incluyen tablero general de distribución (TGD, acometida principal), tableros de distribución secundaria (alimentan áreas/zona), tableros de control de motores (CCM, contactores, arrancadores, variadores), y tableros de control (PLC, relés, fuentes, bornes). La estructura del tablero incluye gabinete metálico IP54-IP66, puerta con cerradura, placa de montaje (chapa zinc), canaletas para cableado, borneras, barras de distribución (Cu electrolítico), y sistema de ventilación (filtros, ventilador, termostato). El diseño debe considerar espacio para expansión futura (20-30% libre), separación de circuitos (potencia/control, AC/DC, analógico/digital), disipación térmica y accesibilidad. El grado de protección (IP) depende del entorno: IP65 para ambientes polvorientos/húmedos, IP54 para interiores típicos, IP66 para exteriores. El cableado debe seguir normas de colores, secciones y radio de curvatura mínimos, usar terminales adecuados (punteras, horquillas, ovoides), y prensaestopas con IP adecuada. Los esquemas eléctricos (unifilar, multifilar, de control, de bornes) son documentación esencial para montaje y mantenimiento. El marcado CE, las placas de características y los diagramas en la puerta son requisitos normativos.

\newpage

CAPÍTULO 58: SISTEMAS NUMÉRICOS

Los sistemas numéricos son la base de la electrónica digital y los computadores. En mecatrónica, se usan para programación de PLC, microcontroladores, codificación de sensores y comunicaciones. El sistema decimal (base 10) usa dígitos 0-9. El sistema binario (base 2) usa solo 0 y 1, y es el lenguaje de los sistemas digitales. Cada dígito binario es un bit. El sistema hexadecimal (base 16) usa 0-9 y A-F, y se usa para direcciones de memoria y registros. Un byte son 8 bits (0-255 decimal, 00-FF hex). La conversión entre sistemas es esencial: binario a decimal (cada bit por su peso 2^n), decimal a binario (divisiones sucesivas entre 2), hex a binario (cada dígito hex = 4 bits). Los códigos binarios incluyen BCD (Binary Coded Decimal, cada dígito decimal se codifica en 4 bits, usado en displays y sensores), código Gray (solo cambia 1 bit entre números consecutivos, usado en encoders absolutos para evitar errores), y complemento a 2 (representación de números negativos en binario, $N_{bit} = 2^n - N_{positivo}$, permite suma/resta con misma circuitería). Las operaciones lógicas (AND, OR, XOR, NOT) operan sobre bits y son la base de la lógica digital. Los desplazamientos (shift left/right) multiplican o dividen por 2. En PLC, los datos se almacenan en memory word, double word, y se accede por direcciones. Las direcciones IP (IPv4) son 32 bits (4 bytes) en notación decimal punteada (192.168.1.1). Las máscaras de red definen qué parte es red y qué parte es host.

CAPÍTULO 59: COMPUERTAS LÓGICAS

Las compuertas lógicas son circuitos digitales básicos que realizan operaciones booleanas. Son los bloques constructivos de todos los sistemas digitales (microprocesadores, memorias, FPGA). Las compuertas básicas son: AND (Y, salida 1 solo si todas las entradas son 1), OR (O, salida 1 si al menos una entrada es 1), NOT (NO, invierte la entrada), NAND (AND negada, salida 0 solo si todas son 1, universal), NOR (OR negada, salida 1 solo si todas son 0, universal), XOR (O exclusiva, salida 1 si las entradas son diferentes), XNOR (igualdad, salida 1 si las entradas son iguales). Las compuertas NAND y NOR son universales (cualquier función lógica puede implementarse solo con ellas). El álgebra de Boole simplifica expresiones lógicas: leyes conmutativa $A+B = B+A$, asociativa $(A+B)+C = A+(B+C)$, distributiva $A \times (B+C) = A \times B + A \times C$, identidad $A+0 = A$, $A \times 1 = A$, complemento $A+A' = 1$, $A \times A' = 0$, De Morgan $(A+B)' = A' \times B'$, $(A \times B)' = A' + B'$. Los mapas de Karnaugh simplifican expresiones de hasta 5 variables visualmente. Los circuitos combinacionales incluyen sumadores (half-adder, full-adder), multiplexores (selector de una entrada entre varias), demultiplexores, codificadores (prioridad), y comparadores. Los circuitos secuenciales tienen memoria: flip-flops SR, JK, D, T (almacenan 1 bit), registros (grupo de FF), contadores (síncronos, asíncronos, cascada), y divisores de frecuencia. La tecnología de implementación actual usa circuitos integrados TTL (Transistor-Transistor Logic, 5V) y CMOS (Complementary MOS, 2-18V, bajo consumo). Las familias lógicas 74HC/HCT son las más comunes para lógica discreta. Las FPGA (Field Programmable Gate Array) permiten implementar millones de compuertas programables.

CAPÍTULO 60: MICROCONTROLADORES

Un microcontrolador (MCU) es un computador completo en un chip, que incluye procesador (CPU), memoria (Flash, RAM, EEPROM), y periféricos (ADC, temporizadores, UART, SPI, I2C, PWM). Se usa para control embebido en productos y equipos industriales. Los fabricantes principales son Microchip (PIC, AVR), STMicroelectronics (STM32, ARM Cortex-M), Texas Instruments (MSP430, Tiva), NXP (LPC, Kinetis) y Espressif (ESP32, con WiFi/BT). La memoria Flash almacena el programa (KB a MB), la RAM almacena datos volátiles, y la EEPROM almacena datos no volátiles (calibración, configuración). Los periféricos clave son: GPIO (entradas/salidas digitales, hasta 100+ pines), ADC (conversión analógico-digital, 8-16 bits, multiplexado), temporizadores (PWM, captura de pulsos, contadores), USART/UART (comunicación serie asíncrona RS-232/485), SPI (bus serie síncrono, alta velocidad, para sensores, displays), I2C (bus serie de 2 hilos, múltiples dispositivos), CAN (Controller Area Network, para automoción e industria), USB (dispositivo/host), DMA (Direct Memory Access, transferencia sin CPU), y Watchdog Timer (reinicia el sistema si se cuelga). Los entornos de desarrollo incluyen Arduino IDE (simple, educativo), STM32CubeIDE (ARM Cortex), MPLAB X (PIC), PlatformIO (multiplataforma), y Keil/IAR (profesional). La programación se realiza en C/C++, con librerías HAL (Hardware Abstraction Layer) o registros directos. Las interrupciones permiten respuesta inmediata a eventos externos (botón, sensor, timer). Los modos de bajo consumo (sleep, deep sleep, standby) son esenciales para aplicaciones con batería.

CAPÍTULO 61: ARDUINO PARA MECATRÓNICA

Arduino es una plataforma de desarrollo open-source basada en microcontroladores AVR (ATmega328P en Uno/Nano) y ARM (Due, Zero). Es ideal para prototipado rápido en mecatrónica y educación en control embebido. Arduino Uno tiene ATmega328P, 14 GPIO, 6 ADC 10-bit, 6 PWM, SPI, I2C, 32KB Flash, 2KB RAM. El lenguaje de programación (Wiring) es C++ simplificado con funciones `setup()` y `loop()`. Las librerías principales incluyen Servo (control de servomotores), Stepper (motores paso a paso), LiquidCrystal (displays LCD), Wire (I2C), SPI, SD (tarjetas SD). Shields (módulos de expansión) añaden funcionalidades: Ethernet, WiFi, motor driver, relés, GSM. En mecatrónica, Arduino se usa para prototipos de control de motores DC con puente H (L298N, L293D), control de servomotores (SG90, MG996R) con señal PWM de 50 Hz, control de motores paso a paso (28BYJ-48, NEMA 17) con drivers (ULN2003, A4988), lectura de sensores analógicos (potenciómetro, LDR, LM35, ultrasonido HC-SR04), interfaz con encoders rotativos, comunicación serie con PC para monitoreo, comunicación I2C con sensores (MPU6050, BME280), y control PID implementado en software. Para aplicaciones industriales, Arduino no es adecuado directamente (baja inmunidad al ruido, sin certificaciones industriales), pero es excelente para pruebas, prototipos y aprendizaje antes de migrar a sistemas industriales (PLC, microcontroladores industriales).

CAPÍTULO 62: INTERFACES DE POTENCIA

Las interfaces de potencia permiten que los sistemas de control de baja potencia (PLC, microcontrolador) manejen cargas de alta potencia (motores, calentadores, solenoides). Actúan como traductores entre señales de control y potencia. Los tipos principales son: relés electromecánicos (bobina 24V DC con contacto NA/NC, aislamiento galvánico, corriente 5-20A, vida limitada por desgaste), SSR (estado sólido con optoacoplador y TRIAC/MOSFET, vida ilimitada, conmutación silenciosa, sin arco), transistores BJT (para cargas DC, económicos, limitados en corriente), MOSFET de potencia (para cargas DC altas, $R_{DS(on)}$ bajo, conmutación rápida, protección integrada), módulos IGBT (para altas tensiones AC/DC, inversores, variadores), drivers de motores (puente H integrado L298N, BTS7960, TB6612), y optoacopladores (aislamiento galvánico entre control y potencia, para señales de hasta 100 kHz). La selección depende de la carga (DC/AC, voltaje, corriente, inductiva/resistiva), velocidad de conmutación requerida, aislamiento necesario y vida útil esperada. La protección contra picos inductivos (diodo de rueda libre para DC, snubber RC para AC) es esencial para evitar daños a los componentes de conmutación. La disipación térmica debe calcularse para la corriente nominal: $P = I^2 \times R_{DS(on)}$ para MOSFET, $P = V_{CE(sat)} \times I$ para BJT, y seleccionar disipador adecuado. La protección contra sobrecarga y cortocircuito puede integrarse en el driver (desaturación, limitación de corriente) o externa (fusible, disyuntor).

\newpage

CAPÍTULO 63: CINTAS TRANSPORTADORAS

Las cintas transportadoras son sistemas de transporte continuo de materiales, esenciales en la automatización industrial. Su control integra sensores, actuadores y PLC para gestionar el flujo de productos. Los componentes principales son la banda (caucho, PVC, módulos plásticos, malla metálica), el tambor motriz (conectado al motorreductor), los tambores de retorno y desvío, la estructura de soporte con rodillos y los sistemas de tensado y centrado. La selección del motorreductor considera velocidad lineal (m/s) y capacidad de carga (toneladas/hora). Potencia $P = F \times v / \eta$, donde F es la fuerza de tracción, v la velocidad y η la eficiencia. El control básico usa un contactor para arranque/parada, con sensores de presencia (inductivos, ópticos) para detectar productos. El control de velocidad se logra con variador de frecuencia. Los sensores incluyen finales de carrera (emergencia, tensado), detectores de presencia (piezas, cajas, pallets), encoders (velocidad de la banda), sensores de peso (básculas dinámicas), y detectores de atasco. El control por PLC gestiona arranque con preaviso acústico, secuencia de arranque ordenada (varias cintas), detección de atasco con parada automática, control de acumulación de productos, y rechazo de productos no conformes. La seguridad incluye paradas de emergencia a lo largo de la cinta, protectores en puntos de atrapamiento, enclavamiento de guardas, frenos de emergencia, y cable de parada (pull-cord) en cintas largas.

CAPÍTULO 64: BRAZOS ROBÓTICOS

Los brazos robóticos son manipuladores programables con múltiples articulaciones (grados de libertad, DOF). En la industria, los robots de 6 ejes (6 DOF) son los más comunes para tareas de manipulación, soldadura, pintura y ensamblaje. Las articulaciones de un robot de 6 ejes son: J1 (base, rotación), J2 (hombro), J3 (codo), J4 (muñeca, rotación), J5 (muñeca, inclinación), J6 (muñeca, rotación final). Los actuadores son servomotores AC con freno y encoder absoluto multivuelta, y reducción por armónicos (strain wave) o cicloidales para alta precisión y baja holgura. La cinemática directa calcula la posición del efector final a partir de los ángulos de las articulaciones (matrices de transformación Denavit-Hartenberg). La cinemática inversa calcula los ángulos para alcanzar una posición deseada (más compleja, múltiples soluciones). Los controladores de robot ejecutan trayectorias calculando interpolación de movimiento (PTP punto a punto, LIN lineal, CIRC circular), control de velocidad y aceleración, y sincronización con dispositivos externos (cintas, sensores). La programación se realiza mediante teach pendant (programación por puntos), lenguajes específicos (KRL para KUKA, RAPID para ABB), simulación offline (RoboDK, RobotStudio), o interfaces con PLC (PROFINET, EtherCAT). Las aplicaciones incluyen soldadura por arco y punto, manipulación pick-and-place (hasta 120 ciclos/minuto), pintura y recubrimiento, ensamblaje de precisión, paletizado, y mecanizado con robot. La seguridad en células robotizadas incluye vallas perimetrales, cortinas de luz, escáneres láser de seguridad, enclavamiento de puertas, control de velocidad reducida cuando hay personal cerca, y distancias de seguridad calculadas según ISO 13855.

CAPÍTULO 65: MÁQUINAS CNC

CNC (Control Numérico Computarizado) controla máquinas herramienta mediante programas de código G. Se usa en tornos, fresadoras, centros de mecanizado, cortadoras láser/plasma/waterjet y electroerosión. Los componentes son el controlador CNC (hardware + software), servomotores en cada eje (X, Y, Z + rotacionales), husillos de bolas con servomotores, husillo principal de alta velocidad (hasta 40,000 rpm), cambiador automático de herramientas (hasta 120 herramientas) y sistema de refrigeración. Los ejes típicos en fresadora son X (longitudinal), Y (transversal), Z (vertical), más ejes rotacionales A, B, C. El código G define movimientos: G00 (posicionamiento rápido), G01 (interpolación lineal), G02/G03 (interpolación circular), G17/G18/G19 (planos XY, XZ, YZ), G40/G41/G42 (compensación de herramienta). El código M controla funciones auxiliares: M03/M04 (husillo ON, sentido), M05 (husillo OFF), M06 (cambio de herramienta), M08/M09 (refrigerante ON/OFF). La programación moderna usa CAM (Computer Aided Manufacturing) como Fusion 360, Mastercam, NX CAM, que generan el código G a partir del modelo CAD 3D. Los parámetros de corte clave son velocidad de corte V_c (m/min), avance f (mm/rev o mm/min), profundidad de corte a_p (mm), y la relación $\text{rpm} = V_c \times 1000 / (\pi \times D)$. Los servomotores con encoder proporcionan precisión de posicionamiento de 0.001-0.005 mm típicamente, con repetición de 0.002-0.010 mm.

CAPÍTULO 66: SISTEMAS DE EMPAQUETADO

Los sistemas de empaquetado automatizan el envasado de productos, integrando múltiples estaciones controladas por PLC en secuencia sincronizada. Las estaciones típicas son alimentador de productos (tolva, cinta vibratoria, robot pick-and-place), formador de envases (llenado, sellado, etiquetado), pesaje dinámico para verificar peso, detector de metales o rayos X (control de calidad), y paletizado robotizado. Los tipos de máquinas incluyen flow pack (envoltura horizontal continua, hasta 300 ppm), termosellado (blister, skin pack), llenado de líquidos (volumétrico, nivel constante, másico), envasado al vacío o atmósfera modificada, y etiquetado (auto-adhesivo, sleeve, hot-melt). El control de sincronización usa servomotores multi-eje con control maestro/esclavo (electronic gearing, camming) para coordinar velocidad de fase entre estaciones. La detección de productos usa fotocélulas, sensores de proximidad, visión artificial, y encoders para tracking de posición. El rechazo de productos defectuosos se hace con expulsores neumáticos. El PLC ejecuta la lógica de secuencia, control de temperatura de sellado, control de tensión de film, y comunicación con HMI (recetas, producción, alarmas). Los protocolos de comunicación usan EtherCAT, PROFINET o CANopen para sincronización de servos.

CAPÍTULO 67: LÍNEAS DE ENSAMBLAJE

Las líneas de ensamblaje son sistemas de producción donde el producto se traslada secuencialmente entre estaciones de trabajo, cada una realizando una operación específica. La integración de sistemas mecatrónicos (PLC, robots, sensores, visión) permite la automatización flexible. La línea típica incluye cinta transportadora de pallets con sistema de parada/localización, estaciones de ensamblaje robotizadas, estaciones de inserción (tornillos, remaches, pegamento), estaciones de prueba y verificación (visión artificial, sensores, pruebas funcionales), y estaciones de marcado (láser, inkjet). El control del flujo se hace con sistema de identificación (RFID, código de barras, Data Matrix en cada pallet), que permite trazabilidad y control de producto específico. La sincronización evita colisiones gestionando el avance de pallets entre estaciones. El sistema de control centralizado usa PLC maestro que coordina estaciones vía bus de campo (PROFINET, EtherNet/IP). Cada estación puede tener su propio PLC esclavo o ser autónoma. El MES (Manufacturing Execution System) gestiona órdenes de producción, recetas, trazabilidad y calidad. La visión artificial (cámaras + software como Cognex, Keyence, Halcon) verifica presencia, posición, orientación y calidad de componentes. La robótica colaborativa (cobots) trabaja junto a operadores sin vallas (con sensores de fuerza y limitación de velocidad). El mantenimiento predictivo monitoriza vibraciones, temperatura y consumo de corriente de motores y actuadores.

CAPÍTULO 68: PROYECTO 1 - FUENTE DE ALIMENTACIÓN VARIABLE

Proyecto práctico para construir una fuente de alimentación de laboratorio de 0-30 V, 0-3 A con regulación y limitación de corriente. Componentes: transformador toroidal 24V+24V 150VA, puente rectificador 35A, capacitores de filtro 4700 μ F/50V, transistor de paso 2N3055, LM723 o LM317HV como regulador, potenciómetros para ajuste de voltaje y corriente, disipador con ventilador, panel frontal (voltímetro y amperímetro digital, bornes), fusible y protección. Diagrama de bloques: transformador \rightarrow rectificador \rightarrow filtro \rightarrow regulador \rightarrow salida. Cálculos: voltaje DC sin carga = $24 \times \sqrt{2} \approx 34$ V. Potencia del transformador = $30\text{V} \times 3\text{A} = 90\text{W}$ (margen 150VA). Rizado = $I/(2fC) = 3/(2 \times 50 \times 0.0047) = 6.4\text{Vpp}$. Disipación máxima = $(34-5) \times 3 = 87\text{W}$ (disipador grande con ventilador).

CAPÍTULO 69: PROYECTO 2 - CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTOR DC

Control PWM de motor DC con Arduino y MOSFET de potencia. Componentes: Arduino Nano, MOSFET IRFZ44N, diodo de rueda libre 1N4007, motor DC 12V/2A, potenciómetro 10k, encoder incremental (opcional), fuente 12V. Esquema: potenciómetro → entrada analógica Arduino → pin PWM → driver MOSFET → motor. Código Arduino: leer potenciómetro, mapear a 0-255, escribir analogWrite. Control en lazo cerrado con encoder: leer pulsos, calcular velocidad, PID para mantener velocidad deseada. Diagrama de circuito con protección. Consideraciones: frecuencia PWM adecuada (20 kHz para evitar ruido), protección MOSFET (gate resistor 100Ω, diodo flyback), disipación térmica.

CAPÍTULO 70: PROYECTO 3 - SISTEMA DE ALARMA CON SENSORES

Sistema de alarma con PLC LOGO! o Arduino con sensores múltiples. Componentes: sensor magnético de puerta, sensor PIR de movimiento, sensor de humo (MQ-2), sirenas, teclado numérico para código de desactivación, display LCD. Lógica: ausente/armado/desarmado. Entradas: sensores, teclado. Salidas: sirena, luz estroboscópica, notificación GSM (opcional). Programa ladder para LOGO! con temporizadores y contadores de intentos fallidos. Diagrama de conexiones y flujo de programa.

CAPÍTULO 71: PROYECTO 4 - BRAZO ROBÓTICO SIMPLE

Brazo robótico didáctico de 4 DOF con servomotores y Arduino. Componentes: servomotores MG996R (4 unidades), estructura impresa 3D o acrílico, Arduino Mega (o PCA9685 para más servos), potenciómetros para control, fuente 5V/10A. Articulaciones: base (giro 180°), hombro, codo, pinza. Control manual con potenciómetros (mapear lectura analógica a ángulo servo). Control programado (secuencia de posiciones almacenadas). Interpolación de movimiento (trayectoria lineal entre puntos). Interfaz PC (serial o Bluetooth en app Android). Cálculo de cinemática inversa simple (2D).


CAPÍTULO 72: PROYECTO 5 - CINTA TRANSPORTADORA AUTOMATIZADA

Cinta transportadora a escala con control PLC. Componentes: cinta de PVC con motorreductor DC 12V, variador de velocidad (PWM), sensores inductivos (3 unidades) para detectar piezas, PLC (LOGO! o S7-1200), electroválvula 5/2 con cilindro neumático para rechazo, HMI básica (KTP400 o display texto). Secuencia: motor ON, sensor 1 detecta pieza → temporizador → sensor 2 → actuación cilindro para clasificar pieza. Control de velocidad con potenciómetro en entrada analógica. Contador de piezas. Pantalla HMI: start/stop, velocidad, contador, alarmas.


\newpage

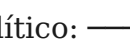
APÉNDICE A: TABLA DE SÍMBOLOS ELÉCTRICOS

Resistencia fija: 

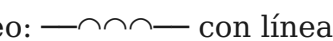
Resistencia variable:  con flecha

Potenciómetro:  con flecha al cursor


Condensador fijo: 


Condensador electrolítico:  con + en lado positivo

Bobina/inductor: 

Bobina con núcleo:  con línea

Transformador:  (dos bobinas con núcleo)

Diodo:  (ánodo→cátodo)

LED:  con flechas

Diodo Zener:  con ángulo

Transistor NPN: líneas con flecha saliendo de base

Transistor PNP: líneas con flecha entrando a base

MOSFET canal N: línea vertical, fuente, drenador, flecha puerta


SCR: diodo con puerta


TRIAC: dos diodos antiparalelo con puerta

Op-Amp: triángulo con entradas + - y salida

Puerta AND: 

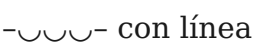
Puerta OR: 

Puerta NOT:  con círculo

Puerta NAND:  con círculo


Flip-Flop D: caja con D, CLK, Q, /Q

Relé bobina: 

Contacto bobina:  con línea

Contacto NA: 

Contacto NC: 

Fusible: 

Interruptor: 

Pulsador NA: 

Pulsador NC: 

Motor M: círculo con M

Generador G: círculo con G

Tierra: —■—

Tierra (señal): —■■—

Masa (chasis): —■— con línea inclinada

Fuente DC: —|— (largo +, corto -)

Fuente AC: —∪∪—

Lámpara: —⊗—

Altavoz: —◇—

Micrófono: —●—

APÉNDICE B: GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Aislante: Material que no conduce la electricidad (plástico, caucho).
- Amperio: Unidad de corriente eléctrica (SI). Flujo de 1 C/s.
- Amperímetro: Instrumento que mide corriente eléctrica.
- Armadura: Parte giratoria de un motor DC o parte móvil de un relé.
- Arrancador: Dispositivo que arranca y protege un motor.
- Autómata: PLC, controlador lógico programable.
- Bobina: Conductor enrollado que crea campo magnético.
- Bus de campo: Red de comunicación industrial (PROFIBUS, Modbus).
- Capacitor: Componente que almacena energía en campo eléctrico.
- Carga: Dispositivo que consume energía eléctrica (motor, lámpara).
- Caudal: Volumen de fluido por unidad de tiempo.
- Célula de carga: Sensor que mide fuerza/peso.
- Circuito: Trayectoria cerrada para corriente eléctrica.
- Contacto: Parte conductora que abre/cierra un circuito.
- Contactador: Relé de potencia para conmutar cargas.
- Contacto NA: Normalmente abierto (se cierra al activar).
- Contacto NC: Normalmente cerrado (se abre al activar).
- Corriente: Flujo de electrones. Se mide en amperios.
- Cortocircuito: Conexión de baja impedancia entre fases o fase-tierra.
- Deslizamiento: Diferencia de velocidad entre campo giratorio y rotor.
- Diferencial: Interruptor que detecta fugas a tierra.
- Diodo: Semiconductor que conduce en un solo sentido.
- Disyuntor: Interruptor automático con protección térmica y magnética.
- Eficiencia: Relación entre potencia útil y potencia consumida.
- Electroválvula: Válvula accionada por solenoide eléctrico.
- Encoder: Sensor que convierte movimiento en pulsos digitales.
- Factor de potencia: $\cos(\varphi)$, relación P/S en AC.

- Fusible: Elemento de protección que se funde por sobrecorriente.
- Galga extensométrica: Sensor de deformación para fuerza/peso.
- Histéresis: Diferencia entre umbrales de activación/desactivación.
- HMI: Interfaz hombre-máquina, pantalla de operación.
- Impedancia: Oposición total al flujo de AC ($Z = R + jX$).
- Inductor: Bobina que almacena energía en campo magnético.
- Interruptor: Dispositivo que abre/cierra un circuito manualmente.
- LED: Diodo emisor de luz.
- MOSFET: Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor.
- Ohmio: Unidad de resistencia eléctrica.
- PLC: Controlador lógico programable.
- PWM: Modulación por ancho de pulso.
- Relé: Interruptor electromagnético controlado por señal eléctrica.
- Resistencia: Oposición al flujo de corriente. Componente que disipa calor.
- RMS: Valor eficaz (Root Mean Square) de una señal AC.
- RTD: Detector de temperatura resistivo (Pt100).
- SCADA: Sistema de supervisión, control y adquisición de datos.
- Sensor: Dispositivo que detecta una variable física.
- Servomotor: Motor con encoder para control de lazo cerrado.
- SSR: Relé de estado sólido.
- Termistor: Resistencia sensible a temperatura (NTC, PTC).
- Termopar: Sensor de temperatura basado en efecto Seebeck.
- Tiristor: SCR, dispositivo semiconductor de 4 capas.
- Transformador: Máquina estática que transfiere energía entre circuitos.
- Variador (VFD): Controlador de velocidad de motores AC.
- Voltio: Unidad de diferencia de potencial o tensión.

APÉNDICE C: TABLAS DE DATOS TÉCNICOS

Código de colores de resistencias: Negro 0, Marrón 1, Rojo 2, Naranja 3, Amarillo 4, Verde 5, Azul 6, Violeta 7, Gris 8, Blanco 9. Multiplicadores: x1 Marrón, x10 Rojo, x100 Naranja, x1k Amarillo, x10k Verde, x100k Azul, x1M Violeta. Tolerancias: Marrón $\pm 1\%$, Rojo $\pm 2\%$, Oro $\pm 5\%$, Plata $\pm 10\%$.

Resistencias comerciales: E12: 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82 (+ décadas). E24: (E12 +) 11, 13, 16, 20, 24, 30, 36, 43, 51, 62, 75, 91.

Capacitancia: $1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^9 \text{ nF} = 10^{12} \text{ pF}$. Capacitores comunes: 10p, 47p, 100p, 1n, 10n, 47n, 100n, 470n, 1μ , 10μ , 47μ , 100μ , 470μ , 1000μ , 4700μ .

Corriente admisible en cables de cobre (mm^2 / A): 1.5/15, 2.5/20, 4/25, 6/32, 10/40, 16/63, 25/80, 35/100, 50/125, 70/160.

Curvas de disyuntores: B $3-5 \times I_n$ (cargas resistivas), C $5-10 \times I_n$ (cargas inductivas), D $10-20 \times I_n$ (motores grandes, transformadores).

Grados IP: IP20 (interior seco), IP54 (interior polvo+salpicadura), IP65 (exterior polvo+agua), IP67 (inmersión temporal).

Presión: $1 \text{ bar} = 0.987 \text{ atm} = 14.5 \text{ psi} = 100 \text{ kPa}$. Velocidad síncrona (rpm) = $120 \times f/p$. 50Hz: 2p=3000, 4p=1500, 6p=1000, 8p=750. 60Hz: 4p=1800, 6p=1200.

APÉNDICE D: RECURSOS Y REFERENCIAS

Libros: “Electrotecnia” de Paul Zbar, “Máquinas Eléctricas” de Chapman, “Control de Motores Eléctricos” de Petruzella, “Automation Systems” de Berger (Siemens), “Robótica” de Craig. Software: Siemens TIA Portal, Rockwell Studio 5000, Automation Studio (simulación), FluidSIM (neumática), LTspice (simulación), AutoCAD Electrical, EPLAN Electric P8. Cursos online: Coursera (Embedded Systems), Udemy (PLC, Arduino), OpenCourseWare MIT (Electrical Engineering). Fabricantes: Siemens (PLC, HMI, VFD), Rockwell (Allen-Bradley), Schneider Electric, ABB (motores, VFD), SMC, Festo (neumática), Bosch Rexroth (hidráulica), IFM, Sick, Banner (sensores). Normas: IEC 61131 (PLC), IEC 60204 (seguridad máquinas), IEC 60364 (instalaciones AT), ISO 13849 (funcional), NFPA 79, NEC.