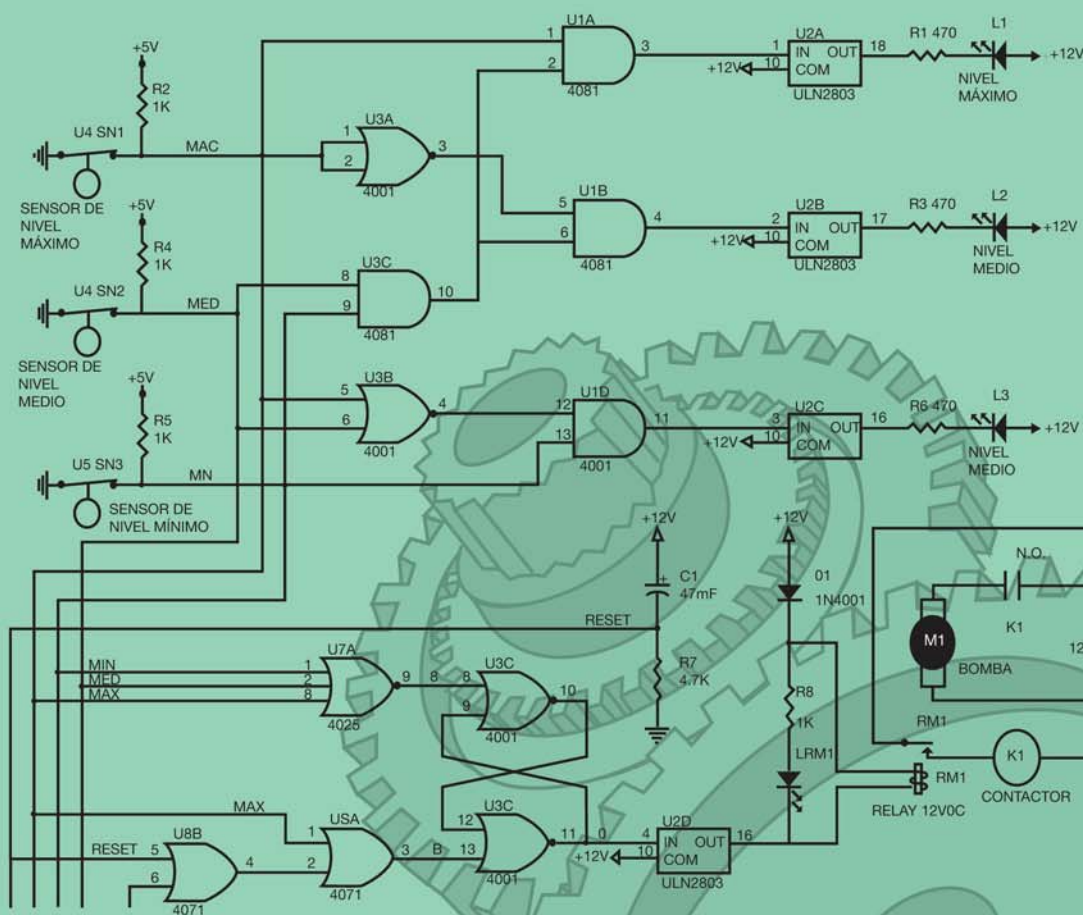




Electrónica Digital Aplicada para Ingeniería Mecánica

Samuel Carman Avendaño, Iryna Ponomaryova
María de Lourdes Beltrán Lara

Notabilis
Scientia

ELECTRÓNICA DIGITAL APLICADA
PARA INGENIERÍA MECÁNICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACÁN

Electrónica Digital Aplicada
para Ingeniería Mecánica

SAMUEL CARMAN AVENDAÑO
IRYNA PONOMARYOVA
MARÍA DE LOURDES BELTRÁN LARA
(PROFESORES-INVESTIGADORES)

MÉXICO 2013

Diseño y producción editorial: *Ediciones Eón*

Primera edición: noviembre 2013

ISBN: 978-607-8289-52-3

© Ediciones y Gráficos Eón, S. A. de C. V.
Av. México-Coyoacán núm. 421
Col. Xoco, Deleg. Benito Juárez
México, D. F., C.P. 03330
Tel.: 5604-1204 / 5688-9112
administracion@edicioneon.com.mx
edicion@edicioneon.com.mx

Impreso y hecho en México
Printed and made in Mexico

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen todas las facilidades prestadas a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional, a la carrera de Ingeniería Mecánica, así como los prototipos ensamblados, las pruebas, experimentos y mediciones realizadas en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica.

En especial se reconoce el trabajo, la disposición y apoyo incondicional del profesor Ingeniero Alejandro López Torrecillas, por la revisión, aclaraciones y sugerencias para mejorar la obra.

El soporte técnico, el apoyo en la elaboración de diagramas, textos y figuras, así como los comentarios aportados por los alumnos que ya han llevado el curso, son el valor agregado a esta obra. Por ello se reconoce el apoyo incondicional e invaluable de los alumnos investigadores de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Esime Culhuacán: José Manuel Juárez López, Maylú Romero Sánchez y Gustavo Castillo Hernández.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	11
UNIDAD 1	
INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA DE CONTROL.....	13
1.1 Elementos de control electrónico	13
1.2 Control básico en equipo eléctrico.....	15
1.3 Detectores en aplicaciones industriales de control	18
1.4 Circuitos de control.....	45
UNIDAD 2	
COMPUERTAS LÓGICAS	49
Introducción	49
2.1 Compuerta AND	50
2.2 Compuerta OR.....	52
2.3 Compuerta NOT	54
2.4 Combinaciones y aplicaciones	56
2.5 Simulación con compuertas lógicas	65
UNIDAD 3	
CIRCUITOS INTEGRADOS.....	71
3.1 Selección de circuitos integrados en aplicaciones de potencia y control.....	71
3.2 Operación con equipos de control por medio de tiristores y TRIACS.....	113
3.3 Aplicación en variadores de velocidad	119

UNIDAD 4	
CONTROL ELECTRÓNICO DE MOTORES A PASOS.	127
Introducción	127
4.1 Procedimientos para controlar un motor a pasos	129
4.2 Aplicaciones	139
UNIDAD 5	
CONTROLADORES INDUSTRIALES POR PLC's.	147
5.1 Introducción a los PLC's.	147
5.2 Tipos de programación de PLC's	151
5.3 Programación básica de PLC's	156
5.4 Aplicaciones	164
UNIDAD 6	
MICROCONTROLADORES.	171
Introducción	171
6.1 Principios de funcionamiento.	176
6.2 Fundamentos de programación	178
6.3 Aplicaciones	183
BIBLIOGRAFÍA	187

INTRODUCCIÓN

LAS NECESIDADES ACTUALES DE LA INDUSTRIA moderna en constante y rápido desarrollo en las últimas décadas demandan una formación sólida de profesionales de Ingeniería Mecánica capaces de ejercer en la industria un papel con alta eficiencia en las áreas que les competen.

Una de estas áreas es la ingeniería eléctrica, en combinación con la electrónica, donde el Ingeniero Mecánico deberá incursionar directamente en el uso de elementos semiconductores aplicables a la industria.

Un especial reconocimiento al Instituto Politécnico Nacional y, particularmente, a la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán por facilitar el desarrollo en sus instalaciones de este material escrito vinculado a proyectos de investigación. En el caso particular de este libro se encuentra registrado como producto derivado del proyecto “Electrónica digital aplicada al control de una máquina de polímeros”, con número de registro ante la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) 20120227.

La ESIME como institución precursora de enseñanza superior está comprometida a cumplir con los objetivos de formar ingenieros que sean profesionalmente competitivos en un desarrollo industrial, tecnológico, globalizado y de vanguardia.

Lo anterior sienta las bases para la inclusión de esta asignatura en el 5º semestre dentro del plan de estudios vigente.

De manera antecedente, requiere los conocimientos del curso de Circuitos Eléctricos, Máquinas Eléctricas, Electrónica Básica, Electricidad y Magnetismo. En forma consecuente, apoya a las asignaturas de Instalaciones Eléctricas, Control y Protección de Motores Eléctricos, Refrigeración, Acondicionamiento de Aire, Plantas de Bombeo, Turbinas y Plantas Hidroeléctricas, y a otras asignaturas de Ingeniería Aplicada. El diseño de este programa ha sido dispuesto en orden lógico con seis unidades, mismas que guardan entre sí un carácter secuencial. Inicia con la introducción general

a la electrónica de control, sigue con las compuertas lógicas y luego con el control de motores con componentes SCR, TRIAC Y PLC's.

La presente asignatura ofrece al alumno de esta carrera aquellos conocimientos de circuitos al control de motores de CD, CA, motores a pasos y el uso de PLC's en procesos industriales, colocándole así en la posibilidad de capacitarse de manera teórico-práctica para la solución de problemas que en el área combinada de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica se le presenten en el desempeño de su profesión, lo que justifica su inclusión dentro del plan de estudios vigente.

En su estructura este curso advierte gran flexibilidad, ya que será susceptible de enriquecimiento a partir de nuevos hallazgos de investigación en el campo, lo que le dará su actualidad.

Su implementación requiere de una participación activa donde tanto el profesor como el alumno compartan la responsabilidad en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

UNIDAD 1

INTRODUCCIÓN A LA ELECTRÓNICA DE CONTROL

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD

El alumno comprenderá y explicará los principios básicos de la electrónica de control y sus aplicaciones en la industria.

1.1 Elementos de control electrónico

Compuertas lógicas

SON UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO que es la expresión física de un operador algorítmico. Consiste en una red de dispositivos que cumplen las condiciones de interrupción para las que fueron diseñados. Están compuestos por una serie de terminales que representan las variables lógicas de entrada y salida de una o varias terminales.

Los contactos pueden ser normalmente abiertos o cerrados, lo que determina la función de la compuerta. Estos dispositivos funcionan mediante comandos binarios.

Dispositivo PIC

Las siglas PIC significan Controlador con Interface Periférica; producido por microchip, es un dispositivo electrónico capaz de controlar uno o más procesos.

Actualmente los PIC integran muchas funciones de control en un chip. Esto es lo que hoy conocemos con el nombre de microcontrolador. Este

dispositivo reduce el número de instrucciones y, físicamente, el espacio; además, trabaja a gran velocidad.

El PLC

Conocido como Controlador Lógico Programable, está a cargo de los enlaces y procesamiento de señales y está constituido por tres partes: la entrada de señales, la unidad central y la salida de señales. La unidad central está compuesta de un procesador y una memoria de programas.

El puente H

Es un circuito electrónico formado por cuatro interruptores que permite a un elemento de circuito el cambio en la dirección de la corriente, como a un motor eléctrico girar en ambos sentidos, su aplicación es ampliamente usada en robótica.

El término *puente* se debe a que desde el punto de vista físico existe contacto en todas las terminales de la malla, y desde el punto de vista eléctrico, no. "H" proviene de la típica representación gráfica del circuito, construido con cuatro interruptores, normalmente dispositivos semiconductores, y la carga o elemento eléctrico a controlar (véase Figura 1).

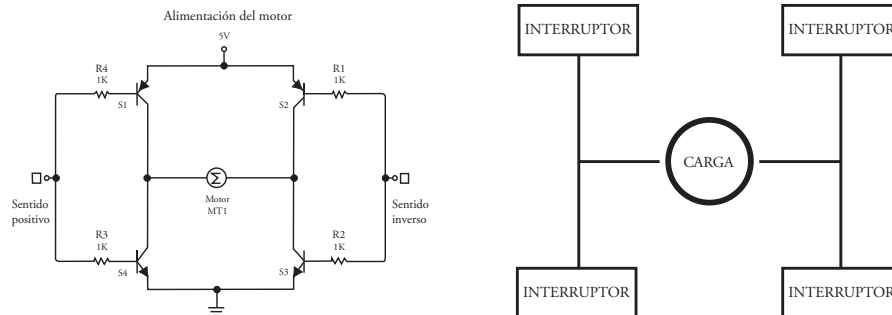


Figura 1. Puente H con transistores.

Si los interruptores S_1 y S_3 están cerrados mientras que S_2 y S_4 están abiertos, se aplica una tensión positiva en el motor, generándose una corriente en sentido convencional de S_1 a S_3 haciendo girar el motor en un sentido. Si en caso contrario se abrieran los interruptores S_1 y S_3 , manteniendo cerrados S_2 y S_4 , el voltaje se invierte permitiendo el giro en sentido inverso.

1.2 Control básico en equipo eléctrico

De acuerdo con la definición de la real academia de la lengua española control se define como mandos que regulan un sistema y tablero o panel donde se encuentran y mando se define como el procedimiento que actúa sobre un mecanismo o parte de él para iniciar, suspender o regular su funcionamiento podremos decir que el control básico en equipos eléctricos se logra por medio de dispositivos principalmente, electromecánicos y electrónicos (como se ve en la Tabla 1).

Tabla 1
Dispositivos electromecánicos y dispositivos electrónicos

<i>Dispositivos electromecánicos</i>	<i>Dispositivos electrónicos</i>
• Interruptores (switch) • Relevadores • Contactores • Actuadores	• Resistencias • Diodos • Elementos de estado sólido (transistores, IGBT, FET, powermosfet, relevadores de estado sólido, tiristores)

Dispositivos electromecánicos

Se basan fundamentalmente en permitir o interrumpir el paso de la corriente; su comportamiento de conmutación es llamado “todo o nada” debido a que no hay estados intermedios o alguna forma de regular la cantidad de energía que se suministra al sistema. Comúnmente se denota a estos dos

estados estables como I y O. Además están compuestos por un mecanismo y uno o más elementos de circuito eléctrico.

Interruptor (switch): dispositivo de acción manual que se emplea para el control de equipos. Está compuesto por una palanca y unos platinos o puntos de contacto (véase Figura 2).

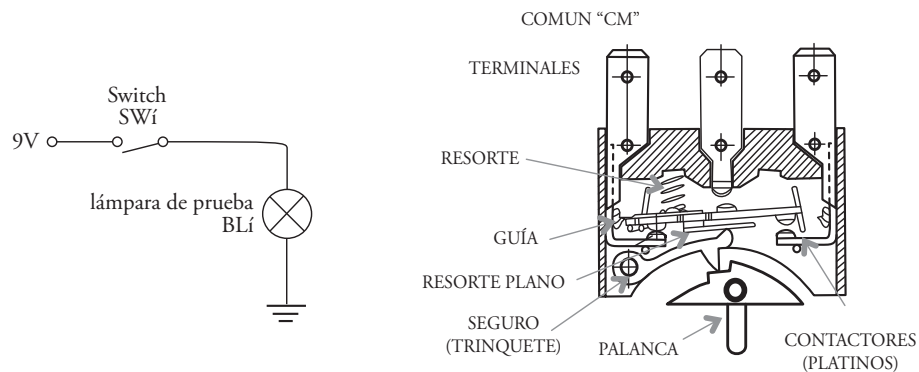


Figura 2. Interruptor.

Relevador: dispositivo ampliamente utilizado en los sistemas de control, se basa en el cierre o apertura de contactos por medio de la fuerza electromagnética generada por un electroimán. Al aplicar una corriente a la bobina el núcleo se magnetiza y atrae a la parte móvil del platino o interruptor, haciendo contacto; trabajan con valores discretos de potencia (Figura 3).

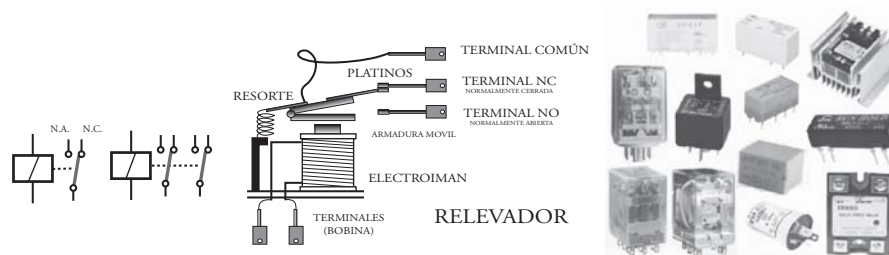


Figura 3. Relevador.

Tipos de relevadores

- Electromecánicos
- Estado sólido
- Corriente alterna
- Lámina

Contactor: al igual que los relevadores, funcionan con el principio del electroimán, que acciona o mueve la parte móvil del interruptor que porta los elementos de contacto así conocidos, los cuales le dan la posibilidad de manejar grandes potencias y de ser intercambiados (Figura 4).

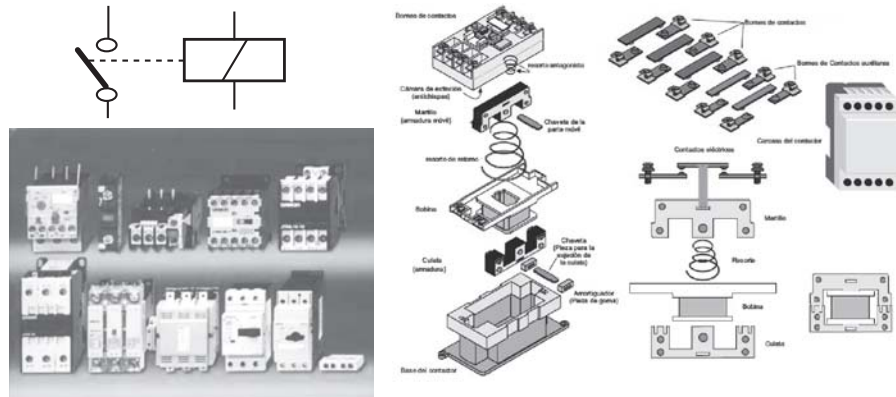


Figura 4. Contactor.

Tipos de contactores

- Electromagnéticos
- Electromecánicos
- Neumáticos
- Hidráulicos
- Estáticos (de estado sólido)

Actuador: se denomina actuador a aquel elemento que puede provocar un efecto de cambio sobre algo o sobre algún proceso automatizado. Los actuadores electromagnéticos son los más utilizados en el área de mecatrónica.

1.3 Detectores en aplicaciones industriales de control

Existe un sinnúmero de detectores en aplicaciones industriales de control, esto es debido al gran número de sensores que pueden ser utilizados en una línea de producción. Las variantes que existen en detectores se limitan al conocimiento de los sensores, por lo que se hace especial énfasis en el conocimiento general de los sensores más utilizados en la industria.

Detector: es un dispositivo capaz de detectar, descubrir, poner de manifiesto o reaccionar a cierto cuerpo o fenómeno físico oculto o que a simple vista no se percibe.

En el control de procesos se le puede llamar detector a un sensor que distingue entre dos posibles valores o estados del sistema en el que se trabaja, por lo cual también recibe el nombre de sensor binario o sensor todo o nada. Un detector puede estar formado por uno o más sensores que permitan percibir el fenómeno físico a detectar.

Sensor: es un dispositivo que capta magnitudes físicas, eléctricas y/o mecánicas; convierte magnitudes físicas como pueden ser las variaciones de luz, magnetismo, sonido, temperatura, calor, presión, movimiento, etc., a valores medibles de dicha magnitud. La información captada por el sensor generalmente tiene que ser acondicionada para que pueda ser tratada y procesada. En este trabajo nos enfocaremos en los procesos con controles eléctricos y electrónicos.

Un fenómeno físico para ser medido es captado por un sensor; regularmente se manejan los de salida con energía eléctrica, los cuales, como consecuencia de sus lecturas, muestran en su salida una diferencia de potencial directamente proporcional a la magnitud del fenómeno en cuestión; generalmente, aunque hay discrepancia por la utilización de términos, tienen transductores.

Transductor: es un dispositivo que nos permite transformar una forma de energía (magnitud física) en otra que de alguna manera podamos hacer proporcional, preferentemente, eléctrica.

La señal eléctrica, en la mayoría de los casos, tiene que ser modificada por un sistema de acondicionamiento y adecuación de la señal, cuya salida es un voltaje que será convertido por un instrumento analógico o un dispositivo ADC (Convertidor Análogo/Digital).

Tabla 2
Sensores y métodos de detección ordinarios para las magnitudes más frecuentes

Sensores	Magnitudes								
	Posición distancia desplazamiento	Velocidad	Aceleración vibración	Temperatura	Presión	Caudal Flujo	Nivel	Energía	Humedad
Resistivos	Potenciómetros Galgas Magnetorresistencias		Galgas + masa-resorte	RTD Termistores	Potenciómetros + tubo Bourdon	Anemómetros de hilo caliente Galgas + voladizo Termistores	Potenciómetro + flotador Termistores LDR	Galgas	Humistor
Capacitivos	Condensador diferencial				Condensador variable + diafragma		Condensador variable	Galgas capacitivas	Dielectríco variable
Inductivos y electromagnéticos	LVDI Corrientes Foucault, Resolver Inductosyn Efecto Hall	Ley Faraday LVT Efecto Hall Corrientes Foucault	LVDI + masa-resorte		LVDI + diafragma Reluctancia variable + diafragma	LVDI + rotámetro Ley Faraday	LVDI + flotador Corrientes Foucault	Magneto elástico LVDI + célula carga	
Generadores			Piezoelectricos + masa-resorte	Termopares Piroelectricos	Piezoelectricos			Piezoelectricos	
Digitales	Codificadores incrementales y absolutos	Codificadores incrementales		Osciladores de cuarzo	Codificador + tubo Bourdon	Vórtices			SAW
Uniones p-n	Fotoelectricos			Diodo Transistor Convertidores T/A			Fotoelectricos		
Ultrasonidos	Reflexión	Efecto Doppler				Efecto Doppler Tiempo tránsito Vórtices	Reflexión Absorción		

En la hoja de especificaciones técnicas del sensor aparecen factores a considerar y que pueden llegar a afectar su funcionamiento. Se suelen indicar condiciones ambientales como vibraciones, humedad o escalas de temperatura en las que se garantiza el correcto funcionamiento del dispositivo. Ramón Pallas (2007) los clasifica como se muestra en la Tabla 2.

Los principales sensores utilizados en la industria, desde el punto de vista eléctrico, son los siguientes:

- Resistivos
- Sensores capacitivos
- Sensores inductivos
- Electrostáticos
- Sensores magnéticos
(basados en el efecto Hall)
- Sensores ópticos (luz)
- Sensores de ultrasonido
- Sensores de fuerza
- Piezoeléctricos

Las recomendaciones para seleccionar el sensor adecuado dependen del material del objeto que se va a detectar. Si el objeto es metálico, se requiere un sensor inductivo. Si el objeto es de plástico, papel o líquido, granulado o en polvo, se requiere un sensor capacitivo. Si el objeto puede llevar un imán, es apropiado un sensor magnético, y así para cada caso especial.

Sensor de contacto

Sensores resistivos: tienen la particularidad de cambiar su propiedad resistiva o “resistividad” (ρ) de manera proporcional al estímulo de algún tipo de energía. Los más usados son: los de presión, ópticos, térmicos y de desplazamiento, lineal o angular; algunos tipos aumentan o disminuyen, se denominan de coeficiente positivo y negativo respectivamente.

Sensores resistivos de presión o de efecto piezoresistivo: se basan en la variación de la resistencia de un conductor o semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo o estrés mecánico (tracción o compresión) que los deforma. Dicho cambio es debido a la variación de la distancia interatómica (en el caso de

los metales) y a la variación de la concentración de portadores (en el caso de los semiconductores). Son conocidos como galgas extensiométricas.

Galga extensiométrica o extensómetro: es un sensor para medir la deformación, presión, carga, torque, posición, entre otras cosas, que está basado en el efecto piezorresistivo y los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son alambres muy pequeños de aleaciones metálicas; por ejemplo, nicromo (níquel 60%-cobre 40%), chromel (níquel-cromo), aleaciones (hierro-cromo-aluminio), elementos semiconductores como el silicio y el germanio o gravado en laminillas metálicas delgadas. Los hay de diferentes tipos y aplicaciones, como se muestra a continuación (Figura 5).

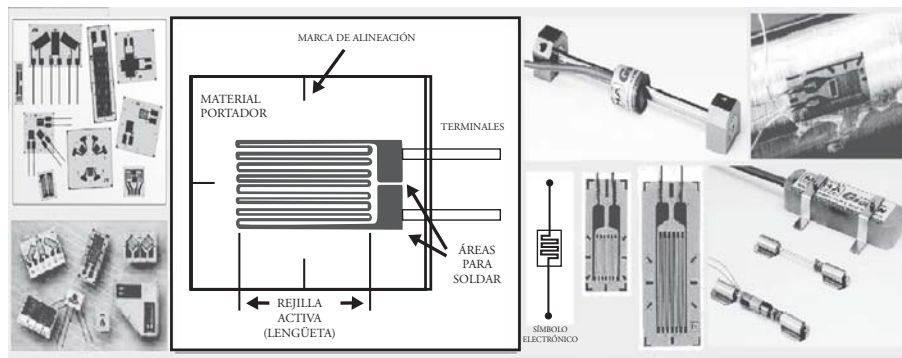


Figura 5. Extensómetro.

Sensores resistivos ópticos: estos dispositivos cambian su resistividad cuando incide sobre ellos (en su ventana) energía luminosa, disminuyéndola. También son conocidos como fotorresistores.

Fotorresistor: es un componente electrónico cuya “resistividad” (ρ) varía al incidir sobre la radiación óptica (radiación electromagnética con longitud de onda entre 1 nm y 10 nm). Puede también ser llamado fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuyas siglas (LDR) se originan de su nombre en inglés, Light-Dependent Resistor. Un fotorresistor está hecho de un semiconductor de alta resistencia como el sulfuro de cadmio, CdS (Figura 6).

Su cuerpo está formado por una pista de material semiconductor, una célula o celda de película metálica como electrodo y dos terminales. Como se muestra en la siguiente imagen.

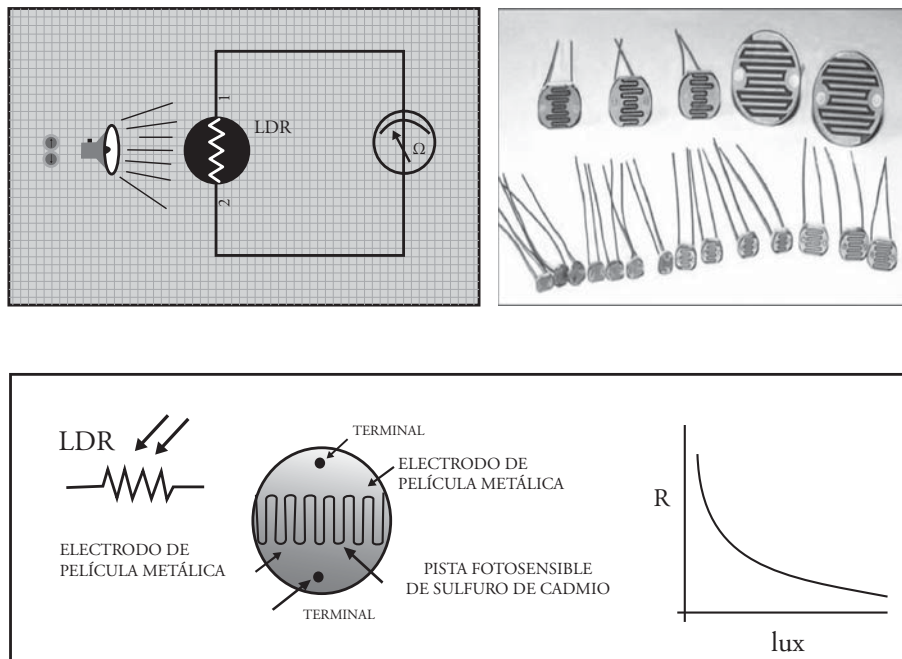
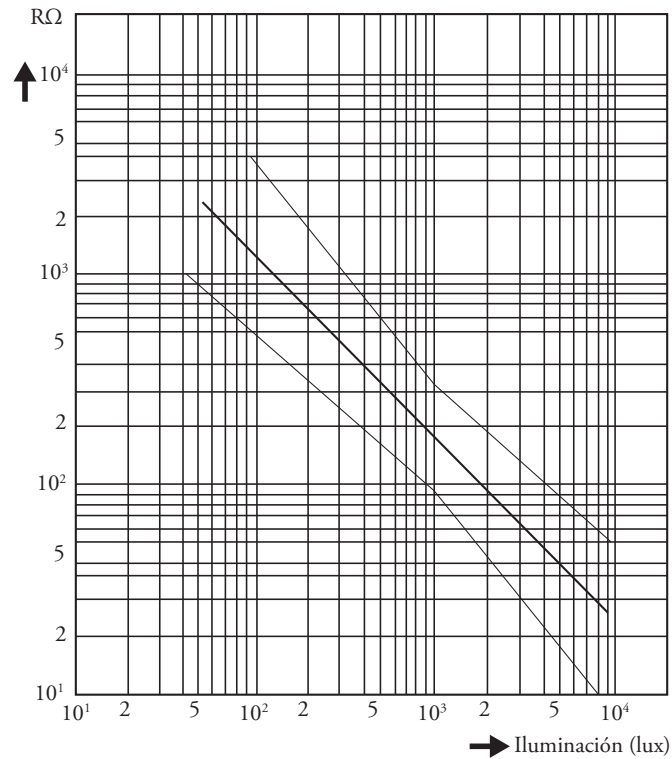


Figura 6. Fotorresistor.

Su funcionamiento se basa en el efecto fotoeléctrico. Si la luz que incide en el dispositivo es de alta frecuencia, los fotones son absorbidos por las elasticidades del semiconductor, dando a los electrones la suficiente energía “carga” para que salten a la banda de conducción. La carga libre que resulta disminuye la resistencia. Los valores típicos varían entre $1\text{ M}\Omega$ o más en la oscuridad, y $100\ \Omega$ con luz brillante. Son altamente sensibles a la temperatura y su tiempo de respuesta a iluminar es diferente al de extinción de luz (Gráfica 1).

Gráfica 1
Resistencia-iluminación



Sensores resistivos térmicos: estos dispositivos cambian su propiedad de resistencia eléctrica de manera proporcional, cuando aumenta o disminuye la temperatura del lugar en donde se encuentran instalados. Son conocidos los RTD (Resistance Temperature Detector) y los termistores.

El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor. Un RTD (Resistance Temperature Detector) es un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Algunos ejemplos de estos sensores los tenemos en la Figura 7, en donde se indica una variación lineal con coeficiente de temperatura positivo. Dado que el material más usado en esta aplicación es el platino, también son conocidos como PRT (Platinum Resistance Thermometer).

Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación y mayor resistencia.

La variación de la resistencia puede ser expresada de manera polinómica, como sigue a continuación. Por lo general, la variación es bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Donde:

- R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia T_0 .
- ΔT es la desviación de temperatura respecto a T_0 ($\Delta T = T - T_0$).
- α es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0°C ; interesa que sea de gran valor y constante con la temperatura.



Figura 7. Fotorresistor.

Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores como el cobre, el níquel o el platino. Las propiedades de algunos de éstos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3
Materiales para construcción de sensores RDT

<i>Parámetro</i>	<i>Platino (Pt)</i>	<i>Cobre (Cu)</i>	<i>Níquel (Ni)</i>	<i>Molibdeno (Mo)</i>
Resistividad ($\mu\Omega\text{cm}$)	10.6	1.673	6.844	5.7
$\alpha(\Omega/\Omega/\text{K})$	0.00385	0.0043	0.00681	0.003786
$R_0 (\Omega)$	25, 50, 100, 200	10	50, 100, 120	100, 200, 500
Margen ($^\circ\text{C}$)	-200 a +850	-200 a +260	-80 a +230	-200 a +200

De todos ellos es el *platino* el que ofrece mejores prestaciones, como:

- Alta resistividad para un mismo valor óhmico (la masa del sensor será menor, por lo que la respuesta será más rápida).
- Margen de temperatura mayor.
- Alta linealidad.
- Sin embargo, su sensibilidad (α) es menor.

Un *termistor* es un sensor resistivo de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura.

Existen dos tipos de termistor:

- NTC (*Negative Temperature Coefficient*), coeficiente de temperatura negativo.
- PTC (*Positive Temperature Coefficient*), coeficiente de temperatura positivo.

Cuando la temperatura aumenta, los tipo PTC aumentan su resistencia y los NTC la disminuyen debido una variación en la concentración de portadores.

Para los *termistores NTC*, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor, de ahí que el coeficiente sea negativo (Figura 8).

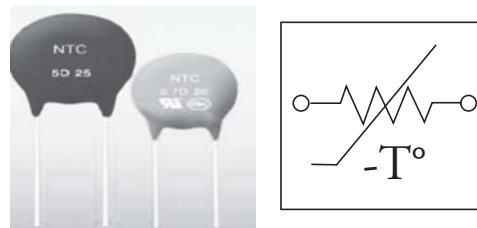


Figura 8. Termistores NTC.

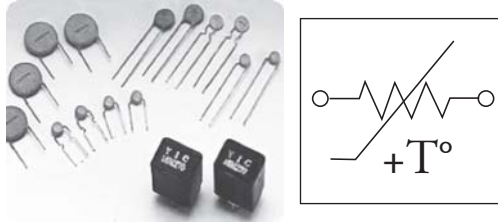


Figura 9. Termistores PTC.

Para los *termistores PTC*, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquirirá propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado. Usualmente, los termistores se fabrican a partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel o el óxido de cobalto (Figura 9).

Sin embargo, a diferencia de los sensores RTD, la variación de la resistencia con la temperatura es no lineal. Para un termistor NTC, la característica es hiperbólica.

Para pequeños incrementos de temperatura, se darán grandes incrementos de resistencia. Por ejemplo, el siguiente modelo caracteriza la relación entre la temperatura y la resistencia mediante dos parámetros:

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}; \text{ con } A = R_0 \cdot e^{\frac{-B}{T_0}}$$

Donde:

- R_T es la resistencia del termistor NTC a la temperatura T ($^{\circ}K$).
- R_0 es la resistencia del termistor NTC a la temperatura de referencia T_0 ($^{\circ}K$).
- B es la temperatura característica del material, entre 2000 $^{\circ}K$ y 5000 $^{\circ}K$.

Por analogía a los sensores RTD, podría definirse un coeficiente de temperatura equivalente a α , que para el modelo de dos parámetros quedaría:

$$\alpha = \frac{1}{R_T} \cdot \frac{dR_T}{dT} = -\frac{B}{T^2}$$

Puede observarse cómo el valor de este coeficiente varía con la temperatura.

Por ejemplo, para un termistor NTC con $B = 4000 \text{ }^\circ\text{K}$ y $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, se tendrá un coeficiente equivalente a $\alpha = -0.045 \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$, que será diez veces superior a la sensibilidad de un sensor Pt100 con $\alpha = 0.00385 \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$.

El error de este modelo en el margen de 0 a 50 $^\circ\text{C}$ es del orden de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. Existen modelos más sofisticados con más parámetros que dan un error de aproximación aún menor.

Hay diferentes tipos, pero de acuerdo con su aplicación se pueden clasificar en tres grupos:

- Aplicaciones en las que la corriente que circula por ellos no es capaz de producirles aumentos apreciables de temperatura y, por tanto, la resistencia del termistor depende únicamente de la temperatura del medio ambiente en el que se encuentra.
- Aplicaciones en las que su resistencia depende de las corrientes que lo atraviesan.
- Aplicaciones en las que se aprovecha la inercia térmica, es decir, el tiempo que tarda el termistor en calentarse o enfriarse cuando se le somete a variaciones de tensión.

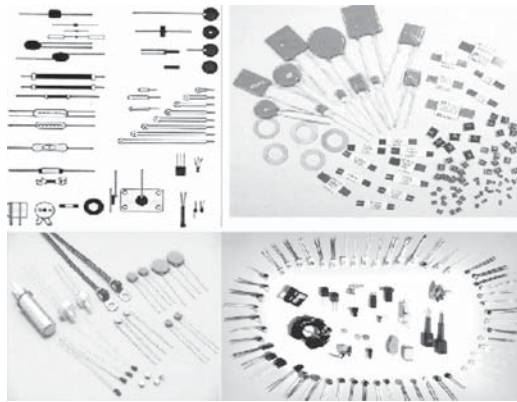


Figura 10. Dispositivos de termistores.

Estos dispositivos cambian su resistividad cuando sobre ellos se desplaza un contacto móvil llamado cursor, derivador o deslizador, lineal o angularmente, generando una especie de divisor de potencial entre una o más de sus terminales fijas. Los más usados son los potenciómetros, además se encuentran en diversos dispositivos acoplados, como se ve en la Figura 10.

Potenciómetros

Llamados así porque tienen la propiedad de variar el potencial eléctrico de un circuito en función del desplazamiento, que es directamente proporcional a la resistividad del material utilizado en el dispositivo; de esta manera, se puede controlar indirectamente la intensidad de corriente que fluye por un circuito si se conecta en paralelo, o la diferencia de potencial al conectarlo en serie.

Los potenciómetros se utilizan en circuitos de poca corriente. Para corrientes mayores, se utilizan los reóstatos, que pueden disipar más potencia (Figura 11).

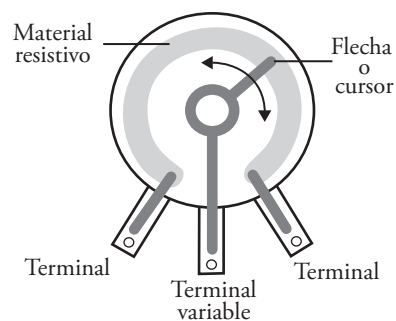
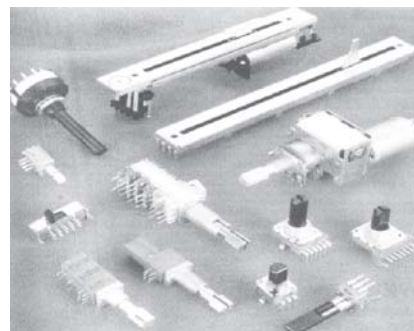


Figura 11. Potenciómetros.



Existen dos tipos de potenciómetros:

- *Potenciómetro impreso*, realizado con una pista de carbón o de *cermet* sobre un soporte duro, como papel baquelizado, fibra, alúmina, etc. La pista tiene sendos contactos en sus extremos y un cursor conectado a un patín que se desliza por la pista resistiva.
En los potenciómetros impresos la ley de resistencia se consigue variando la anchura de la pista resistiva, mientras que en los bobinados se ajusta la curva a tramos, con hilos de distinto grosor.
- *Potenciómetros bobinados*, consistentes en un arrollamiento toroidal de un hilo resistivo (por ejemplo, constantán) con un cursor que mueve un patín sobre el mismo.

Según su aplicación se distinguen varios tipos:

- *Potenciómetros de mando*. Son adecuados para su uso como elemento de control en los aparatos electrónicos. El usuario acciona sobre ellos para variar los parámetros normales de funcionamiento. Por ejemplo, el volumen de una radio.
- *Potenciómetros de ajuste*. Controlan parámetros preajustados, normalmente en fábrica, que el usuario generalmente no necesita retocar, por lo que no suelen ser accesibles desde el exterior. Existen tanto encapsulados en plástico como sin cápsula, y se distinguen potenciómetros de ajuste vertical, cuyo eje de giro es vertical, y potenciómetros de ajuste horizontal, con el eje de giro paralelo al circuito impreso.

Según la ley de variación de la resistencia $R = \rho(\theta)$:

- *Potenciómetros lineales*. La resistencia es proporcional al ángulo de giro. Generalmente denominados con una letra B.
- *Logarítmicos*. La resistencia depende logarítmicamente del ángulo de giro. Generalmente denominados con una letra A.
- *Sinusoidales*. La resistencia es proporcional al seno del ángulo de giro. Dos potenciómetros sinusoidales solidarios y girados 90° proporcionan el

seno y el coseno del ángulo de giro. Pueden tener topes de fin de carrera o no.

- *Antilogarítmicos*. Generalmente denominados con una letra F.

Para un ajuste fino de la resistencia existen *potenciómetros multivuelta*, en los que el cursor va unido a un tornillo desmultiplicador, de modo que para completar el recorrido necesita varias vueltas del órgano de mando.

Tipos de potenciómetros de mando:

- *Potenciómetros rotatorios*. Se controlan girando su eje. Son los más habituales pues son de larga duración y ocupan poco espacio.
- *Potenciómetros deslizantes*. La pista resistiva es recta, de modo que el recorrido del cursor también lo es. Estuvieron de moda hace unos años y se usan, sobre todo, en ecualizadores gráficos, pues la posición de sus cursores representa la respuesta del ecualizador. Son más frágiles que los rotatorios y ocupan más espacio. Además, suelen ser más sensibles al polvo.
- *Potenciómetros múltiples*. Son varios potenciómetros con sus ejes coaxiales, de modo que ocupan muy poco espacio. Se utilizaban en instrumentación, autorradios, etcétera.

Potenciómetros digitales

Se llama potenciómetro digital a un circuito integrado cuyo funcionamiento simula el de un potenciómetro analógico. Se compone de un divisor resistivo de $n+1$ resistencias, con sus “ n ” puntos intermedios conectados a un multiplexor analógico que selecciona la salida.

Se manejan a través de una interfaz serie (SPI, I²C, Microwire o similar). Suelen tener una tolerancia en torno al 20% y a esto hay que añadirle la resistencia debida a los interruptores internos, conocida como R_{wiper} . Los valores más comunes son de 10K y 100K aunque varía en función del fabricante con 32, 64, 128, 512 y 1024 posiciones en escala logarítmica o

lineal. Los principales fabricantes son Maxim, Intersil y Analog Devices. Estos dispositivos poseen las mismas limitaciones que los convertidores DAC como la corriente máxima que pueden drenar, que está en el orden de los ma, la INL y la DNL, aunque generalmente son monotónicos.

Se utilizan los potenciómetros comúnmente para la determinación de desplazamientos lineales o angulares. Los potenciómetros son fáciles de usar pero tienen que estar fijos a los componentes (Figura 12).

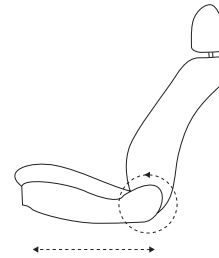


Figura 12. Ejemplo de aplicación del potenciómetro.

Sensores sin contacto

La reactancia de un componente nos da oportunidad de medir sin contacto físico la variable a sensor con un efecto de carga mínimo, con poca linealidad intrínseca y limitación de la frecuencia de trabajo, para desplazamientos lineales y angulares, útil en procesos de materiales ferrosos y húmedos. En este trabajo abordaremos algunos sensores de reactancia variable como los capacitivos, inductivos y electromagnéticos.

Sensores capacitivos

Son utilizados principalmente como sensores de desplazamiento, presión, nivel, fuerza, humedad y proximidad (flujo electrostático), aunque para distancias superiores a unos milímetros, la sensibilidad disminuye notablemente. Los sensores capacitivos pueden detectar materiales conductores y no conductores, en forma líquida o sólida. En este caso, la cercanía de un objeto va a provocar variación de la reactancia y, por ende, de la capacitancia; los hay de capacitancia variable y capacitancia diferencial (Figura 13).

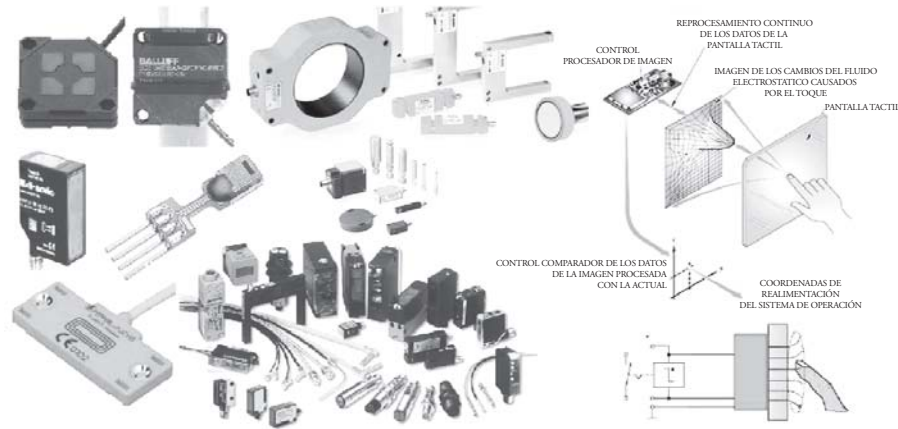


Figura 13. Sensores capacitivos.

Sensores capacitivos de capacitancia variable. Si un capacitor está formado por dos placas conductoras separadas por un dieléctrico cualquiera, la relación de carga Q y la diferencia de potencial V es su capacidad, y ésta depende de la geometría de los materiales (dieléctrico y conductor), matemáticamente.

$$C = \frac{Q}{V} \quad ; \quad C = C(\epsilon, G) \therefore C \epsilon_0 \epsilon_{\infty} \frac{A}{d} (n - 1)$$

- $\epsilon_0 = 8.85 \text{ pf/m}$ constante dieléctrica del vacío.
- $G =$ a la geometría y tipo de material a temperaturas específicas.

Por tanto, cualquier fenómeno que produzca una variación de G producirá, en consecuencia, cambios en su capacidad; este aumento o decremento puede ser medido. Estos sensores pueden ser utilizados para contar así como detectar distintos tipos de materiales y desplazamiento, además de una adecuada distancia, de proximidad (Figura 14).

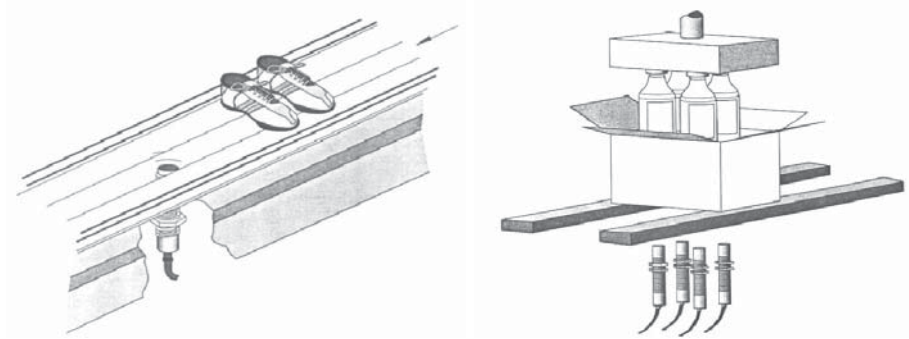


Figura 14. Sensores capacitivos.

Sensores capacitivos de capacitancia diferencial. Un sensor de capacitor diferencial está formado por dos capacitores variables, colocados de tal manera que ambos tengan el mismo cambio pero en sentidos opuestos para que se cumpla que el potencial de C1 se reste o divida al potencial de C2 como se observa en el diagrama 1.

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d+x} \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{d-x}$$

$$V_1 - V_2 = V \left(\frac{d+x}{2d} - \frac{d-x}{2d} \right) = V \frac{x}{d}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\frac{\epsilon A}{d+x}}{\frac{\epsilon A}{d-x}} = \frac{d-x}{d+x}$$

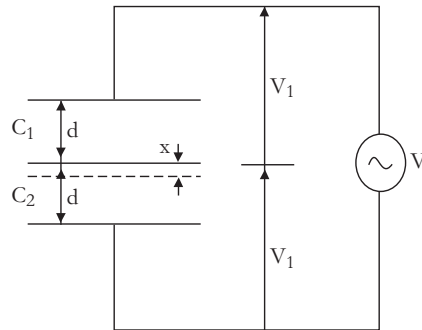


Diagrama 1. Sensor Capacitivo de capacitancia diferencial..

Sensores inductivos

La reluctancia magnética de un material o circuito magnético es la limitación que éste posee al paso de un flujo magnético cuando es influenciado por un campo magnético. Se define como la relación entre la fuerza magnetomotriz

(f.m.m.) (amperio vuelta) y el flujo magnético. Si: $\text{weber} = \frac{l}{\mu A}$, la reluctancia

$\mathbb{R}$ de un circuito magnético uniforme se puede calcular como:

$\mathbb{R}$

Donde:

- $\mathbb{R}$ = Reluctancia, medida en amperio (amperio vuelta) por weber ($\frac{A \cdot v}{\text{Weber}}$). Inverso del Henrio (H^{-1}) multiplicado por el número de espiras.
- L = Longitud del circuito, medida en metros.
- M = Permeabilidad magnética del material, medida en H/m (henrio/metro).
- A = Área de la sección transversal del núcleo magnético, en metros cuadrados.

Cuanto mayor sea la reluctancia de un material, más energía se requerirá para establecer un flujo magnético a través del mismo.

La inductancia de un circuito indica la magnitud del flujo magnético concatenado a una corriente eléctrica y se expresa como:

$$L = N \frac{\partial \phi}{\partial i} \Rightarrow \phi = \frac{M}{\mathbb{R}}$$

Dado que $M = Ni$, entonces:

$$L = \frac{N^2}{\mathbb{R}}$$

Para una bobina de sección transversal A y longitud l ; $\mathbb{R}$ está dada por:

$$\mathbb{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{A} + \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{A_0} \approx \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{A}$$

Donde:

- μ_r = permeabilidad relativa.
- l_0 = recorrido de las líneas en el aire.
- A_0 = área de la sección transversal del camino recorrido.

Y como el circuito magnético incluye tramos en el aire y en el material ferromagnético colocado en serie da:

$$R = \sum \frac{1}{\mu_0} \frac{l_0}{A_0} + \sum \frac{1}{\mu} \frac{l}{A}$$

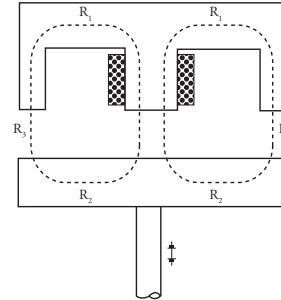


Figura 15. Sensores inductivos.

Los sensores inductivos (Figura 15), también conocidos como de reluctancia variable, contienen bobinas insertadas en núcleos de diferentes materiales como la ferrita, plástico y chapa de acero al silicio, con el fin de el campo electromagnético radiado en la dirección útil. Básicamente están formados por una bobina como sensor de campo, un oscilador, un demodulador y un circuito de disparo (*Flip-flop*) con la información de salida, contruidos en una o más partes (emisor detector) (Figura 16).

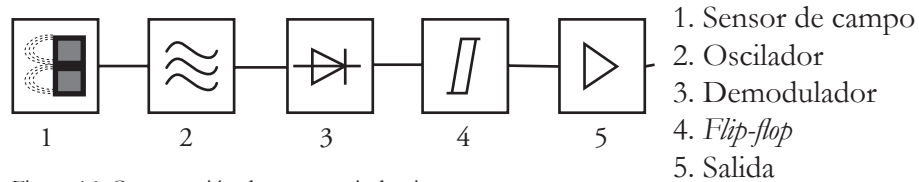


Figura 16. Construcción de sensores inductivos.

El oscilador genera una señal eléctrica cuya corriente dará origen a un campo electromagnético, comúnmente de alta frecuencia, el cual será emitido por la bobina. Al penetrar un objeto metálico en este campo electromagnético, se producen corrientes parásitas que absorben energía, tanto del campo electromagnético como del oscilador. Esta absorción de energía (atenuación) aumenta al acercarse un objeto metálico. La distancia sensitiva del sensor depende del tamaño de la bobina (Figura 17).

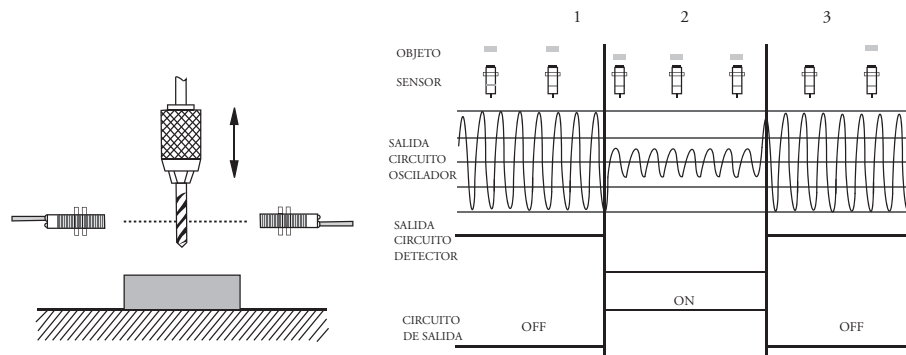


Figura 17. Oscilador-distancia sensitiva.

Sensores de corrientes de Foucault. Si una corriente (i) circula a través de un hilo conductor genera un campo magnético que está conectando a ella (figura 18).

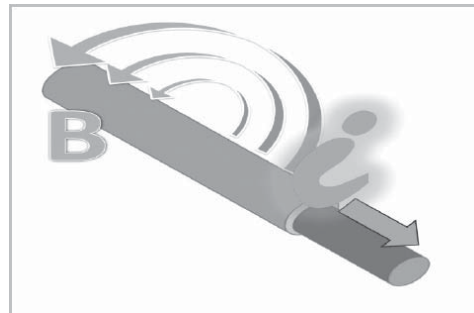


Figura 18. Campo magnético de Foucault.

Los sensores inductivos contienen un devanado interno. Cuando una corriente circula por el mismo, un campo magnético es generado, el cual

tiene la dirección de las flechas. Cuando un metal se acerca al campo magnético éste es detectado e induce corrientes, llamadas de Foucault, en el material. Éstas, a su vez, generan un campo magnético que se opone al de la bobina del sensor, causando una reducción en la inductancia de la misma. Esta reducción en la inductancia de la bobina interna del sensor, trae aparejado una disminución en la impedancia de ésta y con ello se puede utilizar el fenómeno (Figura 19).

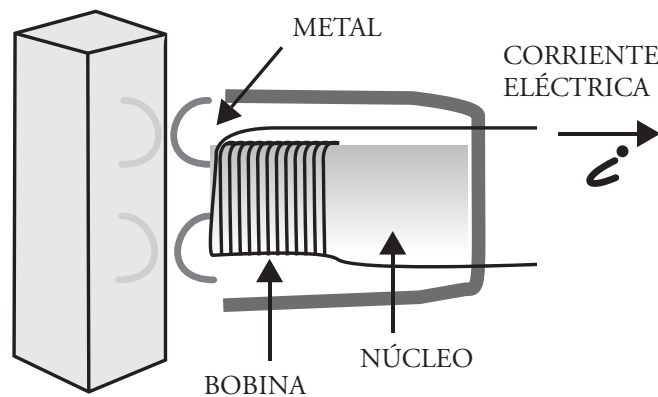


Figura 19. Núcleo de los sensores de corriente.

La inductancia es un valor intrínseco de las bobinas o inductores, que depende del diámetro de las espiras y el número de ellas. En sistemas de corriente alterna, la reactancia inductiva se opone al cambio del sentido de la corriente y se calcula de la siguiente manera:

$$X_L = 2\pi fL$$

Donde:

- X_L = Reactancia inductiva medida en ohms (Ω)
- π = Número π
- f = Frecuencia del sistema medida en Hertz (Hz)
- L = Inductancia medida en Henrios (H)

La impedancia, por tanto, queda alterada en la bobina si se introduce una superficie conductora en el campo magnético; cuanto más próximas las superficies mayor es el cambio de impedancia. La profundidad de penetración está dada por:

$$\delta = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2}$$

Donde:

- σ = es la conductividad del material
- μ = permeabilidad del material
- f = frecuencia de la corriente

Sensores de transformador con diferencial lineal (LDVT)

El transformador diferencial de variación lineal (LVDT, según sus siglas en inglés) es un tipo de sensor basado en la variación de la inductancia mutua de un devanado primario con respecto a dos secundarios de un transformador eléctrico, utilizado para medir desplazamientos lineales (Figura 20).

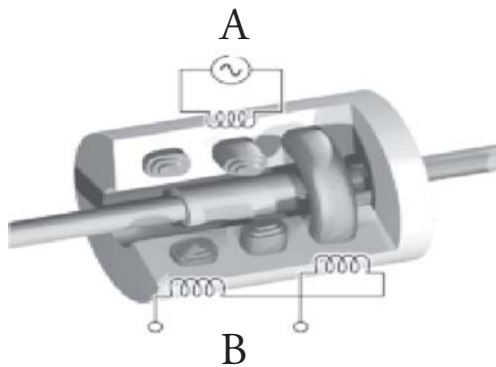


Figura 20. Sensores de transformador con diferencial lineal.

El transformador posee tres bobinas dispuestas extremo con extremo alrededor de un tubo. La bobina central es el devanado primario y las externas son los secundarios. Un centro ferromagnético de forma cilíndrica, sujeto al objeto cuya posición desea ser medida, se desliza con respecto al eje del tubo. Cuando una corriente alterna circula a través del primario, causa un voltaje que es inducido a cada secundario proporcionalmente (en función a N) a la inductancia mutua con el primario. A medida que el núcleo se mueve, la inductancia mutua cambia, causando que el voltaje inducido en el secundario cambie (Figura 21).

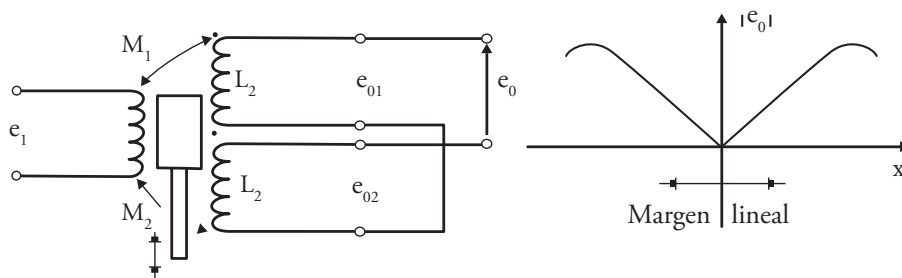


Figura 21. Composición del LDTV.

Las bobinas están conectadas en serie pero invertidas, así que el voltaje de salida es la diferencia (por eso es "diferencial") entre los dos voltajes secundarios. Cuando el núcleo está en su posición central, se encuentra equidistante a los dos secundarios, los voltajes inducidos son iguales pero de signo opuesto, así que el voltaje de salida es cero. Cuando el núcleo es desplazado en una dirección, el voltaje en una bobina aumenta mientras que en la otra disminuye, causando que el voltaje de salida también aumente desde cero hasta su máximo. Este voltaje tiene la misma fase que el del primario. La magnitud del voltaje de salida es proporcional a la distancia a la que fue desplazado el núcleo (hasta cierto límite), por eso el dispositivo es descrito como "lineal". La fase del voltaje indica la dirección del desplazamiento.

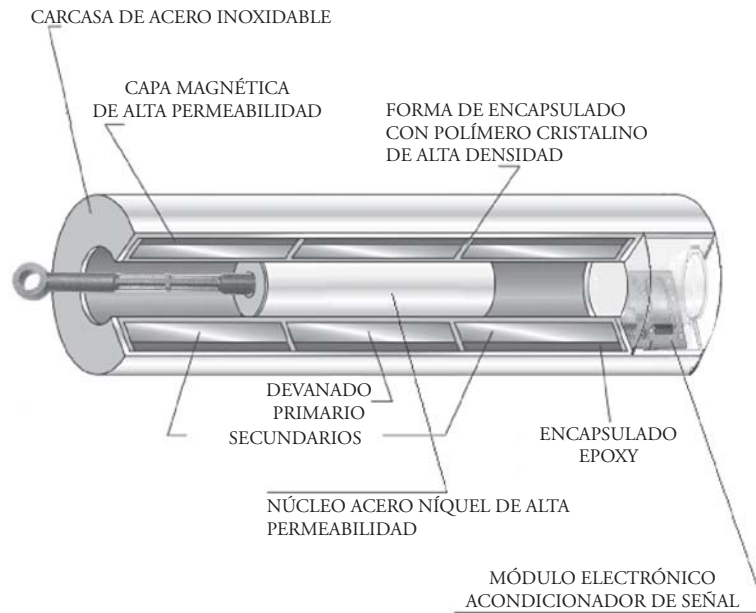


Figura 22. Parte del sensor LDVT.

Debido a que el núcleo deslizante no toca el interior del tubo, puede moverse prácticamente sin fricción, haciendo del LVDT un dispositivo muy fiable. La ausencia de contactos deslizantes o rotatorios permite que el LVDT sea completamente sellado (Figura 22).

Los LVDT (Figura 23) son usados para la realimentación de posición en servomecanismos y para la medición automática en herramientas y muchos otros usos industriales y científicos.



Figura 23. Sensores de LVDT.

Sensores basados en el efecto Hall (reed switch)

Suelen ser usados como detectores sin contacto para posición, desplazamiento y proximidad. Utilizan la presencia de un campo magnético en un semiconductor para producir un cambio en la corriente eléctrica generada. Cuando se utilice este tipo de sensor, el objeto que está siendo medido debe ser capaz de producir un campo magnético (Figura 24).

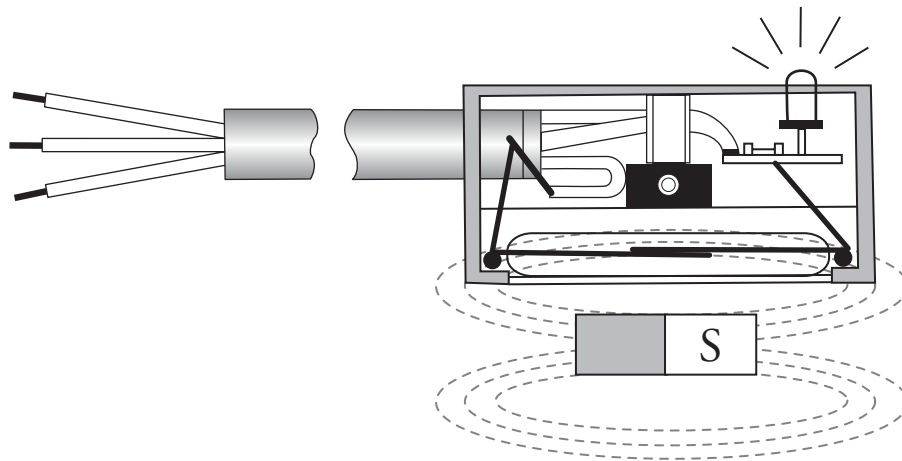


Figura 24. Efecto Hall.

Sensor óptico reflexivo

Tiene una construcción compacta donde el emisor de luz y el receptor se colocan en la misma dirección para detectar la presencia de un objeto por medio del empleo de la reflexión de haz de luz infrarroja (IR) sobre el objeto. El emisor es un diodo LED infrarrojo, y el detector, un fotodiodo o fototransistor (Figura 25).

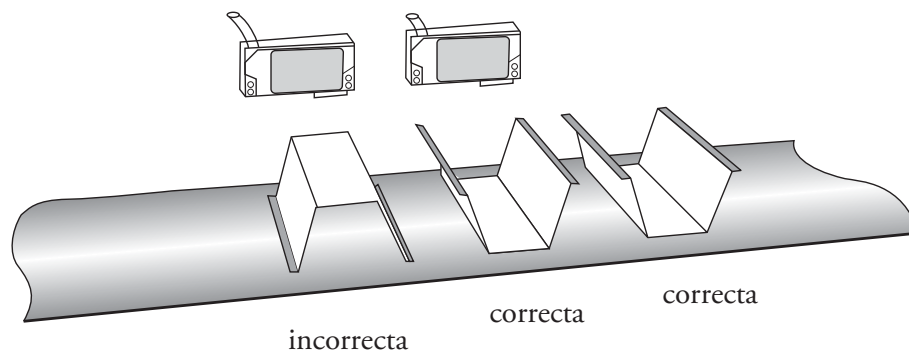


Figura 25. Detección del correcto acomodo de piezas en un proceso mediante un sensor óptico reflexivo.

Sensor óptico de barrera

Estos sensores también tienen como emisor un diodo infrarrojo y como receptor, un fototransistor. En este caso el emisor y el receptor están enfrentados a cierta distancia y entre ellos existe un espacio para que un objeto pueda introducirse y romper la barrera infrarroja (Figura 26).

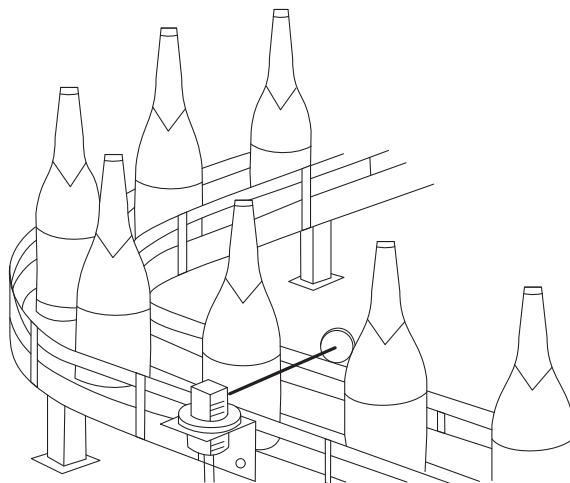


Figura 26. Sensor óptico de barrera.

Sensores infrarrojos

Son compactos, de alta sensibilidad para la detección y medida de la distancia. Estos dispositivos emplean el método de posición lineal (PSD) para determinar la distancia o presencia dentro de su campo de visión. En caso de encontrar un obstáculo, el haz de luz infrarrojo se refleja creando un triángulo formado por el emisor, el obstáculo y el detector.

La información de distancia se extrae midiendo el ángulo recibido. Si el ángulo es pequeño, entonces el objeto está lejos y el triángulo es largo y delgado. Si el ángulo es grande, el objeto se encuentra cerca y el triángulo es ancho y pequeño (Figura 27).

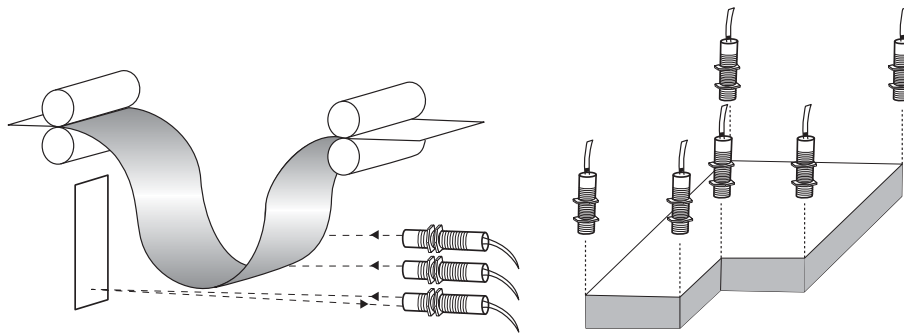


Figura 27. Sensor infrarrojo.

Encoders

A partir un desplazamiento angular o lineal estos sensores van a proporcionar una señal digital, lo que va permitir obtener una medida absoluta o incremental del desplazamiento. Los encoders (Figura 28) utilizan información óptica para determinar la magnitud de un desplazamiento, aunque fundamentalmente son utilizados para la determinación de posiciones angulares. Están formados por un sensor óptico de barrera por el cual pasa un disco óptico que tiene pequeñas perforaciones que permiten el paso del haz de luz infrarrojo.

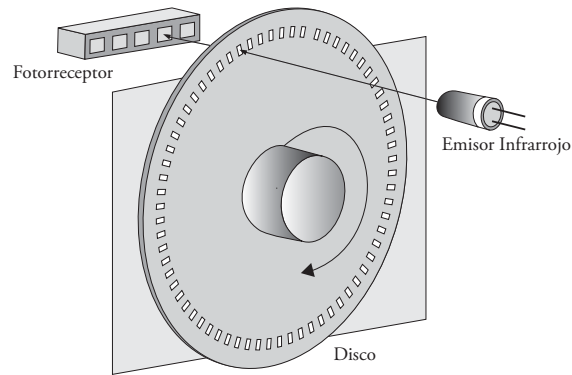


Figura 28. Encoders.

Sensores de ultrasonido

Los ultrasonidos son vibraciones del aire de la misma naturaleza que el sonido, pero de frecuencia superior a los 20 kHz, por lo que no son audibles por los seres humanos.

Los sensores de ultrasonido (Figura 29) funcionan emitiendo impulsos de ultrasonidos. Los impulsos emitidos viajan a la velocidad del sonido hasta alcanzar un objeto, entonces el sonido es reflejado y captado por el receptor de ultrasonido. El tiempo que tardan en volver los pulsos reflejados es proporcional a la distancia del objeto sobre el que se reflejan.

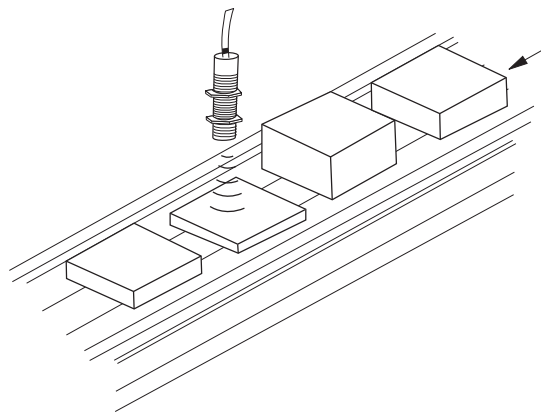


Figura 29. Sensor de ultrasonido.

1.4 Circuitos de control

Los circuitos de control tienen diversas combinaciones de dispositivos que emplean circuitos eléctricos, electromagnéticos y electrónicos. En estos circuitos destacan principalmente componentes tales como interruptores, relevadores, contactores, transistores, optoacopladores, SCR's y TRIAC's.

A continuación, en las figuras 30-36, se muestran ejemplos de circuitos de control que integran estos componentes.

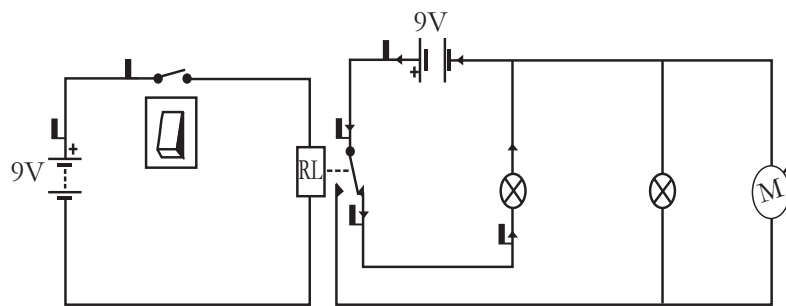


Figura 30. Circuito de control con relé de dos circuitos independientes.

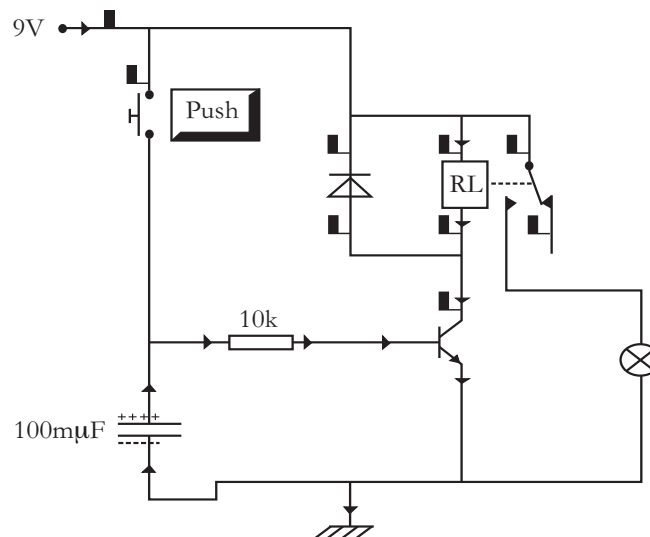


Figura 31. Circuito de control con transistor y relé.

Diagrama trifilar a 220V

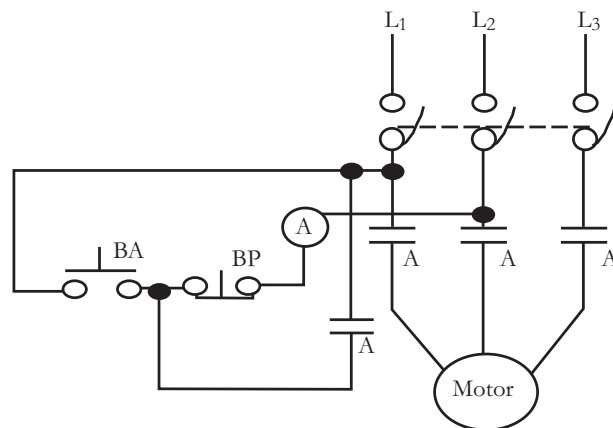


Diagrama bifilar a 220V

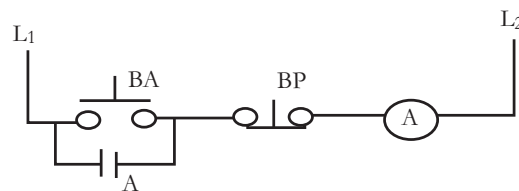


Diagrama unifilar a 220V

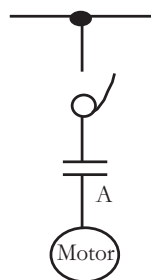


Figura 32. Circuito de control electromagnético para motor trifásico con contactores.

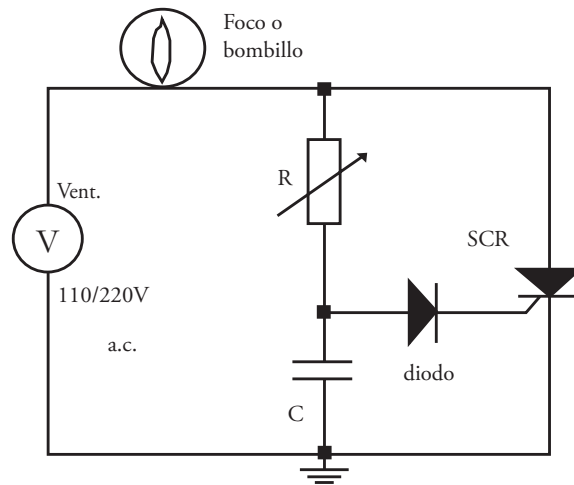


Figura 33. Circuito para controlar la potencia que se entrega a una carga resistiva (en el caso de la figura es un foco).

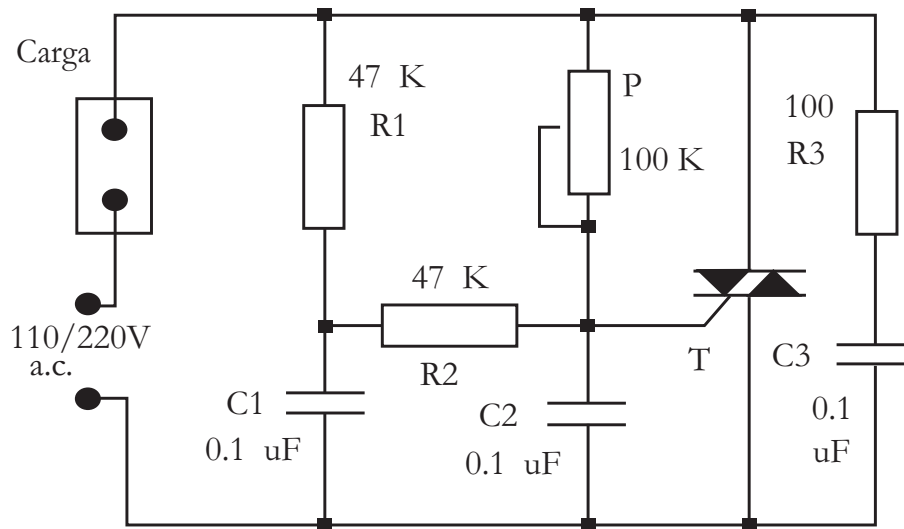


Figura 34. Circuito para controlar el nivel de iluminación de una habitación o control de velocidad para un taladro o un ventilador (motores de corriente alterna).

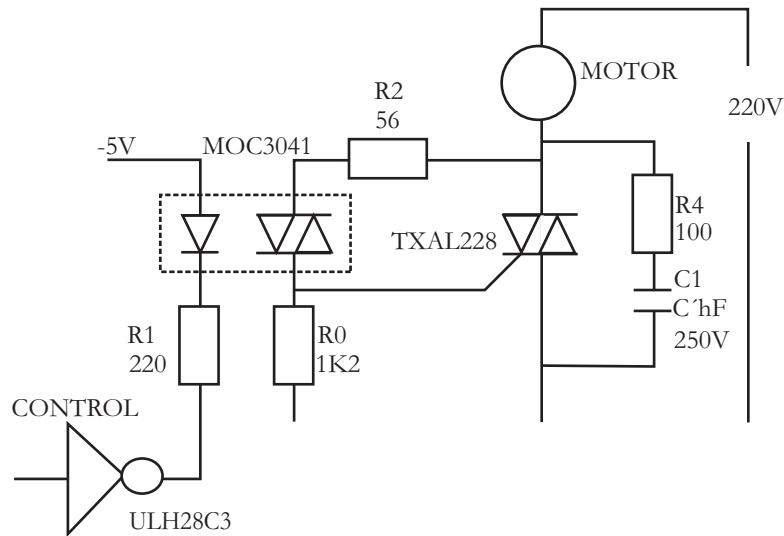


Figura 35. Circuito para controlar un motor de C.A. mediante un TRIAC y un optoacoplador.

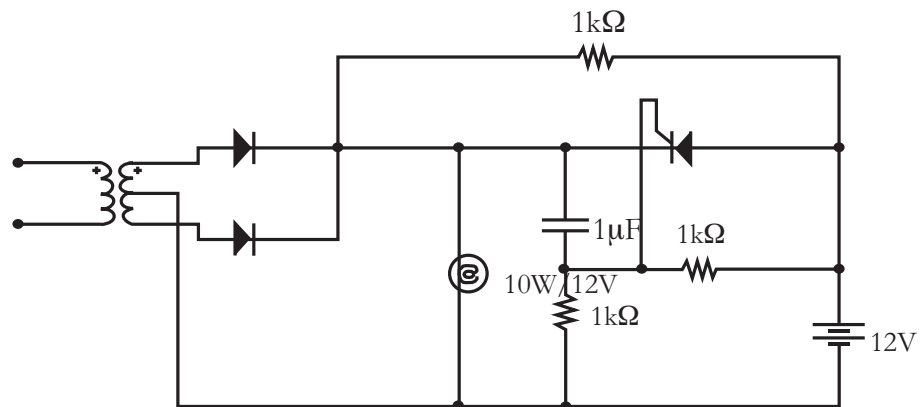


Figura 36. Circuito de control para un sistema de iluminación de emergencia de una sola fuente que mantendrá la carga en una batería para asegurar su disponibilidad y brindar también energía a una lámpara eléctrica si hay una interrupción eléctrica.

UNIDAD 2

COMPUERTAS LÓGICAS

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD
El alumno explicará el principio de comportamiento de las compuertas lógicas y las aplicará en circuitos de control lógico.

Introducción

EN LOS LIBROS *THE MATHEMATICAL Analysis of Logic* (1847) y *An Investigation of the Laws of Thought* (1854), del matemático George Boole (1815-1864), se desarrolla una herramienta en la cual las proposiciones lógicas pueden ser representadas mediante símbolos y teoría matemática. Esta representación lógica básica trabaja con operaciones que obedecen el procedimiento algebraico, por ello se le llama Álgebra de Boole o Álgebra del Sistema Binario.

Las proposiciones básicas de la lógica son aquellas que únicamente pueden tomar valores de sí/no, verdadero/falso (en Ingeniería Eléctrica prendido/apagado y conectar/desconectar). Las variables del álgebra booleana toman sólo dos valores: 0 y 1. Al valor 0 se le relaciona con bajo voltaje, apagado, desconectado, interruptor abierto, falso, no, y al valor 1 se le relaciona con alto voltaje, prendido, conectado, interruptor cerrado, verdadero, sí.

Para comprender de manera organizada los posibles valores que se obtendrán de una operación booleana se utilizan las tablas de verdad.

El número de operaciones posibles en una tabla de verdad está dado por la expresión:

$$V_x = 2^n$$

Donde:

n = Número de entradas a la operación.

V_x = Número de valores de x .

Por tanto, para una tabla de verdad de dos entradas se tendrán cuatro valores posibles para x ($V_x = 2^2 = 4$), si es de tres entradas se tendrán ocho salidas o combinaciones de x ($V_x = 2^3 = 8$).

Los dispositivos electrónicos que se utilizan para implementar las funciones lógicas son llamados compuertas. Éstas sirven en la práctica para diseñar y construir circuitos electrónicos utilizados en computadoras, equipos de telecomunicaciones modernas, control de máquinas y son la base de la electrónica digital.

En el álgebra booleana se utilizan tres operaciones lógicas fundamentales: función OR, AND y NOT. Éstas son conocidas como suma o adición, multiplicación o producto y función negada o inverso.

2.1 Compuerta AND

La operación lógica básica de la compuerta AND (Figura 1) se le conoce como “Y”, puede tener dos o más entradas y una única salida. Matemáticamente se identifica con la multiplicación o producto, esto quiere decir que para dos variables su salida será 1, si una entrada A y una entrada B tienen 1, en el caso de que una entrada o ambas tengan 0 su salida es 0.

La expresión lógica matemática de la compuerta AND es:

$$A \cdot B = F$$

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

Multiplicación binaria



Figura 1. Símbolo de la compuerta lógica AND. a) Norma ANSI, b) Norma IEEE.

Otra forma de explicar el funcionamiento de la compuerta AND es a partir de un circuito equivalente eléctrico (diagrama de escalera). El arreglo consiste en un par de interruptores en serie conectados a un foco, los cuales son alimentados por una fuente de tensión como lo muestra la Figura 2.

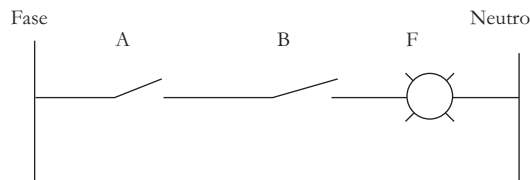


Figura 2. Circuito equivalente eléctrico de la compuerta AND.

Al asignarle el valor de 0 a interruptor abierto y el valor de 1 a interruptor cerrado, es evidente que el foco prenderá (1) cuando los dos interruptores estén cerrados (1); en el caso de que un interruptor o ambos estén abiertos (0) el foco estará apagado (0).

La tabla de verdad de la compuerta AND (Figura 3) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas. Las entradas son representadas por unos y ceros, donde un nivel alto (HIGH) es equivalente a uno y un nivel bajo (LOW) es equivalente a cero, trabajando con lógica positiva.

<i>Entradas</i>		<i>Salidas</i>
A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Figura 3. Tabla de verdad de la compuerta AND.

Las compuertas lógicas AND de tres o más entradas operan con el mismo principio. A sus símbolos sólo se les agregan más líneas de entrada asignándoles las correspondientes letras del alfabeto y tienen una sola salida (Figura 4).



Figura 4. Compuerta AND de tres entradas.

2.2 Compuerta OR

La operación lógica básica de la compuerta OR (Figura 5) se le conoce como “O”, puede tener dos o más entradas y una única salida. Matemáticamente se identifica con la suma o adición, esto quiere decir que para dos variables su salida será 1, cuando una o ambas entradas estén en 1 y será 0 cuando todas las entradas estén en 0.

La expresión lógica matemática de la compuerta OR es:

$$A + B = F$$

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

Suma binaria



Figura 5. Símbolo de la compuerta lógica OR. a) Norma ANSI, b) Norma IEEE.

Otra forma de explicar el funcionamiento de la compuerta OR es a partir de un circuito equivalente eléctrico (diagrama de escalera). El arreglo consiste en un par de interruptores en paralelo conectados a un foco y que son alimentados por una fuente de tensión como lo muestra la Figura 6.

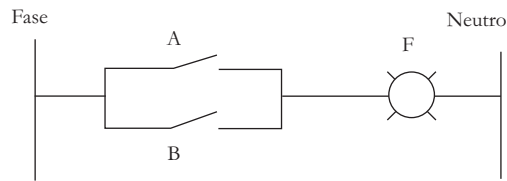


Figura 6. Circuito equivalente eléctrico de la compuerta OR.

Al asignarle el valor de 0 a interruptor abierto y el valor de 1 a interruptor cerrado, es evidente que el foco prenderá (1) cuando uno o los dos interruptores estén cerrados (1), en el caso de que ambos estén abiertos (0) el foco estará apagado (0).

La tabla de verdad de la compuerta OR (Figura 7) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas. Estas últimas son representadas por unos y ceros, donde un nivel alto (HIGH) es equivalente a uno y un nivel bajo (LOW) es equivalente a cero, trabajando con lógica positiva.

<i>Entradas</i>		<i>Salidas</i>
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Figura 7. Tabla de verdad de la compuerta OR.

Las compuertas lógicas OR de tres o más entradas operan con el mismo principio. A sus símbolos sólo se les agregan más líneas de entrada asignándoles las correspondientes letras del alfabeto y tienen una sola salida (Figura 8).

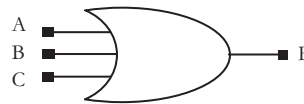


Figura 8. Compuerta OR de tres entradas.

2.3 Compuerta NOT

La operación lógica básica de la compuerta NOT (Figura 9) se le conoce como “NO”, tiene una entrada y una única salida. Se le conoce como inversor porque invierte el nivel lógico de la entrada binaria.

La expresión lógica matemática de la compuerta NOT es:

$$A = \overline{F}$$

$$0 = 1$$

$$1 = 0$$

Inversor binario

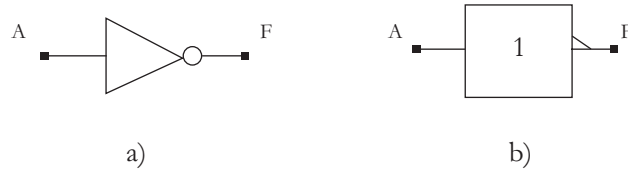


Figura 9. Símbolo de la compuerta lógica NOT. a) Norma ANSI, b) Norma IEEE.

Otra forma de explicar el funcionamiento de la compuerta NOT es a partir de un circuito equivalente eléctrico (diagrama de escalera). El arreglo consiste en conectar el interruptor en paralelo con un foco, ambos son alimentados por una fuente de tensión como lo muestra la Figura 10.

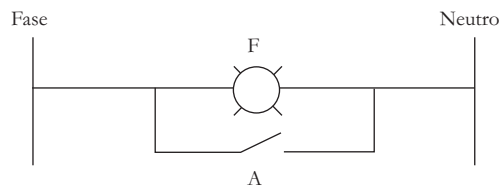


Figura 10. Circuito equivalente eléctrico de la compuerta NOT.

Al asignarle el valor de 0 a interruptor abierto y el valor de 1 a interruptor cerrado, es evidente que el foco prenderá (1) si el interruptor está abierto (0) y en el caso de que el interruptor este cerrado (1) el foco estará apagado (0).

La tabla de verdad de la compuerta NOT (Figura 11) muestra las dos combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas. Las entradas son representadas por unos y ceros, donde un nivel alto (HIGH) es equivalente a uno y un nivel bajo (LOW) es equivalente a cero, trabajando con lógica positiva.

<i>Entrada</i>	<i>Salida</i>
A	F
0	1
1	0

Figura 11. Tabla de verdad de la compuerta NOT.

2.4 Combinaciones y aplicaciones

Combinaciones

Compuerta NAND

Este dispositivo nace de la combinación de una compuerta AND y la conexión de su salida a la entrada de un inversor NOT, por tanto, la palabra NAND es la contracción de los términos NOT y AND. La operación de esta compuerta es opuesta a la AND, donde la salida será 1 si la entrada A o B o ambas son 0; por otro lado, cuando A y B son 1 la salida será 0 (Figura 12).

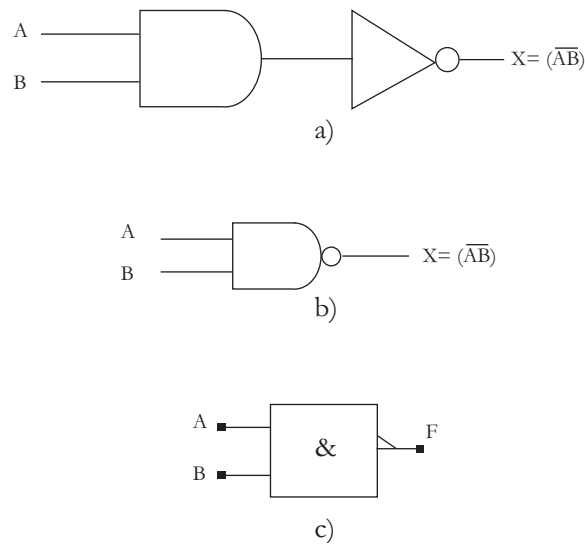


Figura 12. Símbolo de la compuerta lógica NAND. a) Su equivalente NOT-AND, b) Norma ANSI, c) Norma IEEE.

La expresión lógica matemática de la compuerta NAND es:

$$F = \underline{AB}$$

La tabla de verdad de la compuerta NAND (Figura 13) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas.

Entradas		Salidas
A	B	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 13. Tabla de verdad de la compuerta NAND.

Compuerta NOR

Este dispositivo nace de la combinación de una compuerta OR y la conexión de su salida a la entrada de un inversor NOT, por lo tanto, la palabra NOR es la contracción de los términos NOT y OR. La operación de esta compuerta es opuesta a la OR, donde la salida será 1 si ambas entradas A y B son 0; por otro lado, cuando A o B o ambas son 1 la salida será 0 (Figura 14).

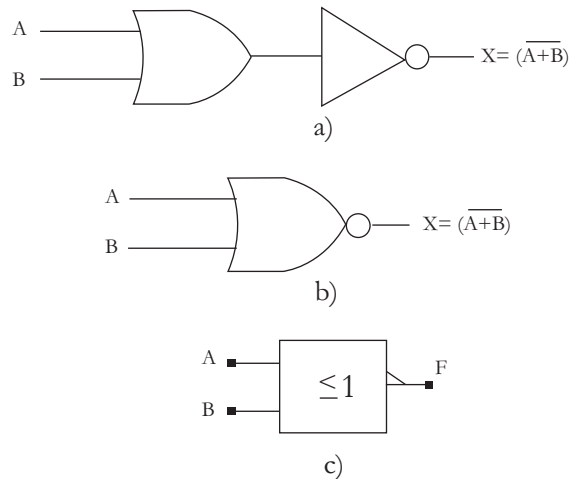


Figura 14. Símbolo de la compuerta lógica NOR. a) Su equivalente NOT-OR, b) Norma ANSI, c) Norma IEEE.

La expresión lógica matemática de la compuerta NOR es:

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

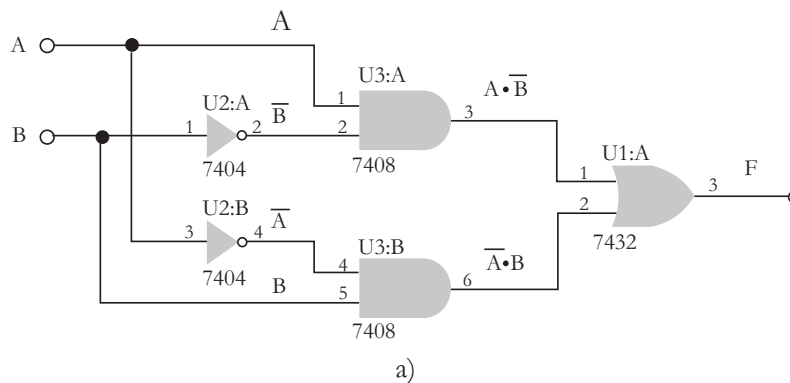
La tabla de verdad de la compuerta NOR (Figura 15) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas.

Entradas		Salidas
A	B	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Figura 15. Tabla de verdad de la compuerta NOR.

Compuerta XOR

Este dispositivo nace de la combinación de otras compuertas ya vistas. La compuerta OR exclusiva en forma abreviada XOR a diferencia de las demás compuertas no tiene más de dos entradas (Figura 16). La operación de esta compuerta es la siguiente: cuando las entradas A y B tienen entradas lógicas diferentes (0 y 1 o 1 y 0) la salida es 1; por otro lado, cuando A y B son ambas 0 o las dos 1 (entradas lógicas iguales) la salida será 0.



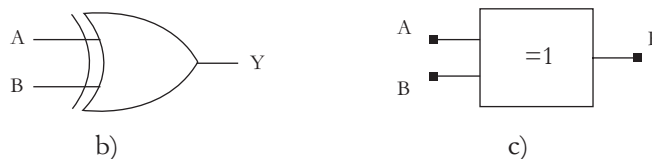


Figura 16. Símbolo de la compuerta lógica XOR. a) Su equivalente en otras compuertas, b) Norma ANSI, c) Norma IEEE.

La expresión lógica matemática de la compuerta XOR es:

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

La tabla de verdad de la compuerta XOR (Figura 17) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas.

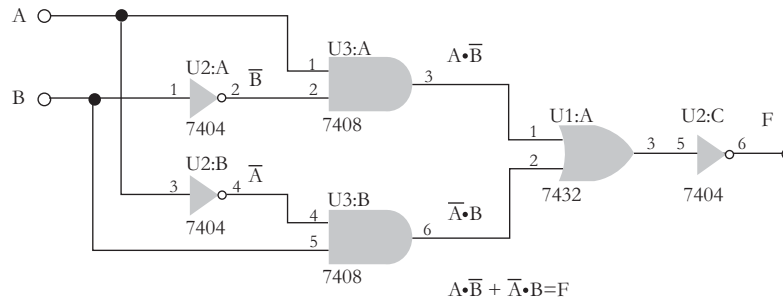
<i>Entradas</i>		<i>Salidas</i>
A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 17. Tabla de verdad de la compuerta XOR.

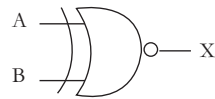
Compuerta XNOR

Este dispositivo nace de la combinación de una compuerta XOR y la conexión de su salida a la entrada de un inversor NOT, por tanto, la palabra XNOR es la contracción de los términos NOT y XOR y se conoce como compuerta NOR exclusiva y tiene sólo dos entradas (Figura 18).

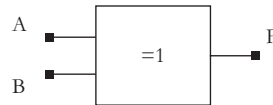
La operación de esta compuerta es la siguiente: cuando las entradas A y B tienen entradas lógicas diferentes (0 y 1 o 1 y 0) la salida es 0; por otro lado, cuando A y B son ambas 0 o las dos 1 (entradas lógicas iguales) la salida será 1.



a)



b)



c)

Figura 18. Símbolo de la compuerta lógica XNOR. a) Su equivalente en otras compuertas, b) Norma ANSI, c) Norma IEEE.

La expresión lógica matemática de la compuerta XNOR es:

$$F = \underline{A + B} = \underline{A\bar{B} + \bar{A}B}$$

La tabla de verdad de la compuerta XNOR (Figura 19) muestra todas las combinaciones de entradas con sus correspondientes salidas y puede aplicarse para cualquier número de entradas.

Entradas		Salidas
A	B	F
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Figura 19. Tabla de verdad de la compuerta XNOR.

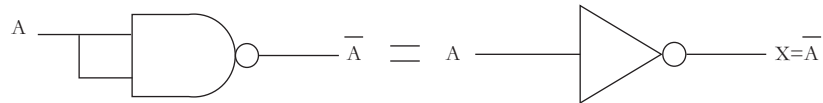
Aplicaciones

Compuertas universales

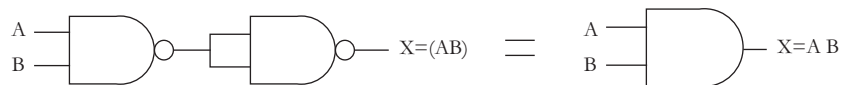
Las compuertas NAND y NOR son dispositivos electrónicos muy populares porque pueden trabajar como compuertas universales, esto quiere decir que, tanto las compuertas NAND como las compuertas NOR, pueden utilizarse para implementar o reemplazar operaciones como AND, OR, NOT, etc., o cualquier otra combinación o diseño que utilice estos dispositivos.

Propiedad universal de la compuerta NAND

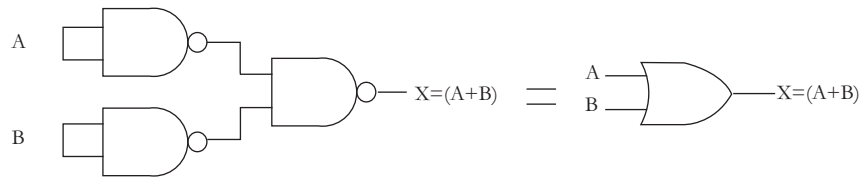
1. Una compuerta NAND usada como inversor.



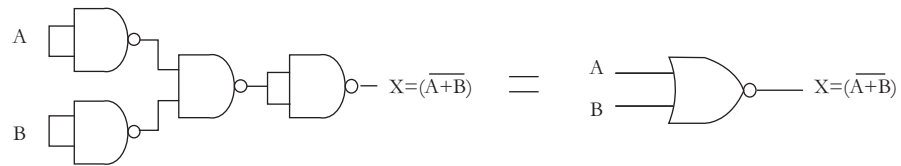
2. Dos compuertas NAND usadas como una compuerta AND.



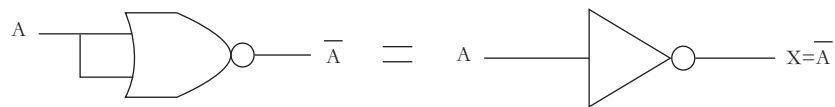
3. Tres compuertas NAND usadas como una compuerta OR.



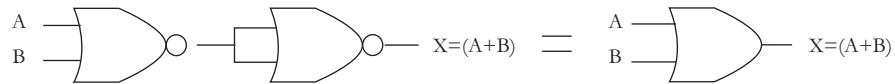
4. Cuatro compuertas NAND usadas como una compuerta NOR.

*Propiedad universal de la compuerta NOR*

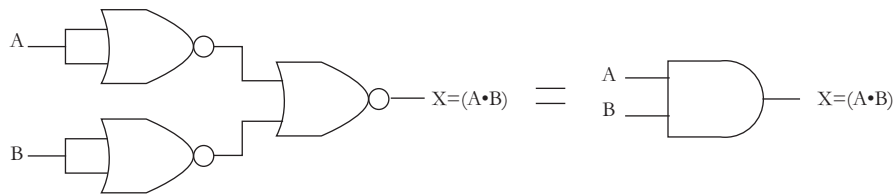
1. Una compuerta NOR usada como inversor.



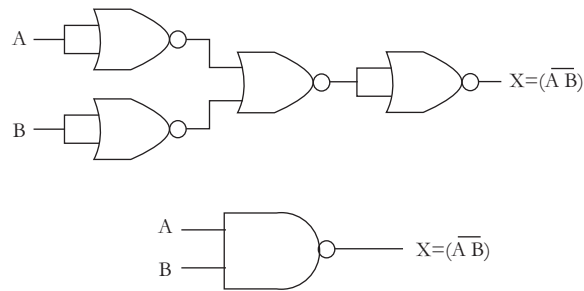
2. Dos compuertas NOR usadas como una compuerta OR.



3. Tres compuertas NOR usadas como una compuerta AND.



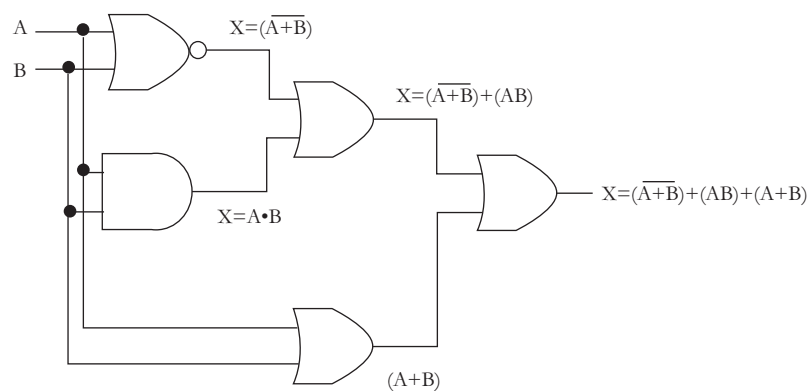
4. Cuatro compuertas NOR usadas como una compuerta NAND.

***Implementación de funciones lógicas por medio de circuitos con compuertas***

Las operaciones con álgebra booleana se pueden materializar o implementar utilizando circuitos con compuertas lógicas de tal manera que una ecuación con la expresión matemática binaria apropiada se puede construir en un circuito digital, a continuación se muestran unos ejemplos.

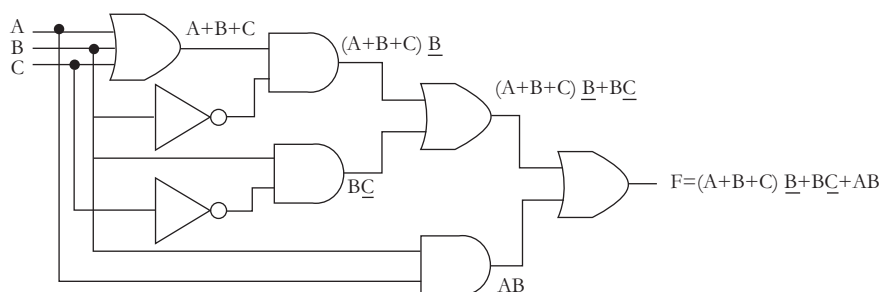
Ejemplo 1. Realizar con compuertas lógicas la función:

$$F = (\overline{A+B}) + AB + A + B$$



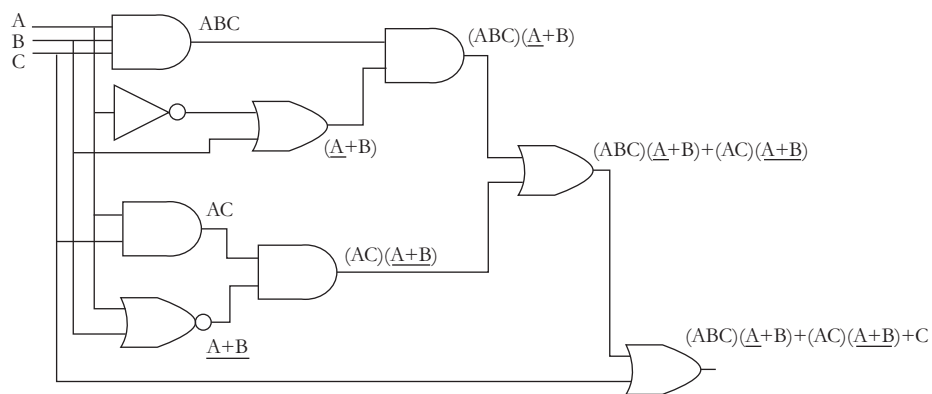
Ejemplo 2. Realizar con compuertas lógicas la función:

$$F = (A + B + C) \underline{B} + \underline{B}\underline{C} + AB$$



Ejemplo 3. Realizar con compuertas lógicas la función:

$$F = (ABC)(\underline{A} + B) + AC(\underline{A} + B) + C$$



2.5 Simulación con compuertas lógicas

Existen diferentes tipos de simuladores que se emplean tanto en la electrónica analógica como la electrónica digital y va a depender de las necesidades, habilidades y conocimiento del simulador que tenga la persona que diseña los circuitos digitales. En el mercado se disponen de diversos tipos de simuladores.

1. Simulador de construcción de circuitos digitales con escenarios virtuales y tutoriales interactivos

Desarrollado por el ingeniero Arturo Javier Miguel de Priego Paz Soldán, del Perú, dicho simulador sirve para construir circuitos digitales sobre un módulo digital virtual a partir de modelos lógicos de circuitos integrados estándares (familia TTL LS) y de aplicación específica (ASIC). Los circuitos pueden ser simulados en el módulo digital directamente y, en algunos casos, pueden ser validados con escenarios virtuales que representan al ambiente donde los circuitos operarán. Además, los circuitos hechos pueden ser almacenados, recuperados y editados. Este software ha sido diseñado para emplearse como una herramienta de enseñanza-aprendizaje del diseño digital y actualmente está orientado a cursos básicos o de introducción a los circuitos digitales, en el nivel universitario. El programa se ejecuta en MS Windows con una resolución de pantalla de al menos 1024 x 768.

Ventajas del programa

- Cuenta con un gran número de modelos de circuitos integrados de la familia TTL LS.
- Los circuitos construidos pueden ser almacenados y recuperados. Ello permite una verificación y una reutilización de los ejemplos tanto en la enseñanza como en el aprendizaje del diseño digital.

- Los tutoriales al lado del módulo digital permiten validar rápidamente el conocimiento adquirido.
- Los escenarios brindan una mejor perspectiva y facilitan una mejor primera especificación del diseño lógico.
- Se simplifican los diseños y se ahorra espacio en la tarjeta de alambrado (*protoboard*), y pueden ser usados como ejemplos de funcionamientos de los circuitos deseados. Esta característica puede servir, por ejemplo, para enseñar la partición del diseño digital.

Ejemplos de circuitos, escenarios y tutoriales

A continuación se muestran ejemplos de un tutorial, varios circuitos y dos escenarios incorporados en el programa.

La Figura 20 muestra un tutorial interactivo para la compuerta AND. El propósito de los tutoriales es que el usuario determine, identifique y/o descubra las funciones lógicas interactuando con los circuitos pre-construidos.

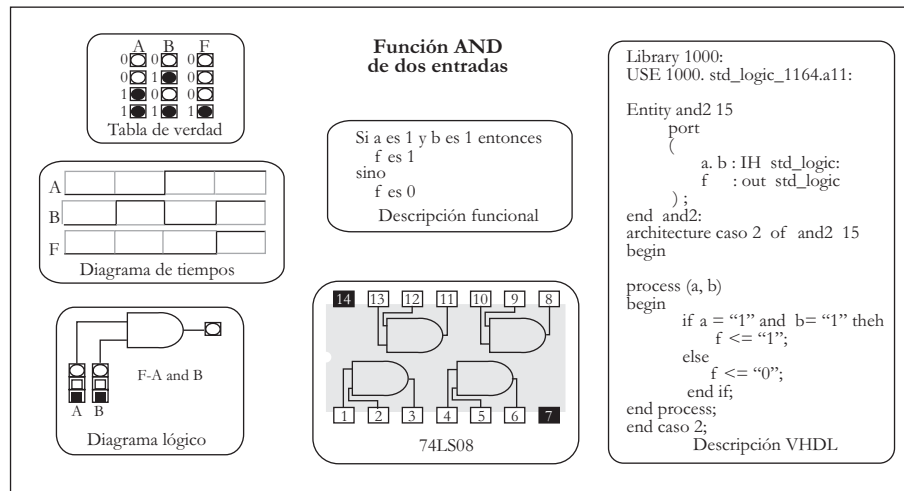


Figura 20. Ejemplo de un tutorial para la compuerta AND.

La Figura 21 muestra un circuito de prueba basado en un contador para probar todas las combinaciones de compuertas lógicas simples.

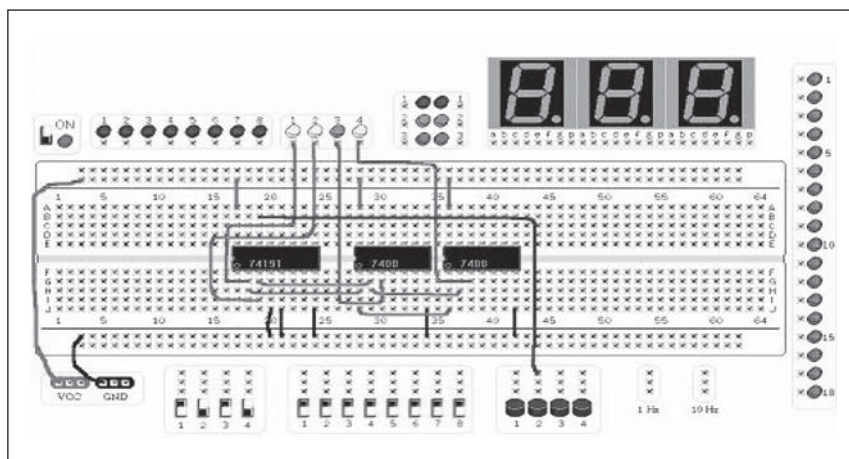


Figura 21. Circuito de prueba basado en contador.

La Figura 22 muestra un circuito de contador BCD con habilitación de cuenta ascendente/descendente de 0 a 999.

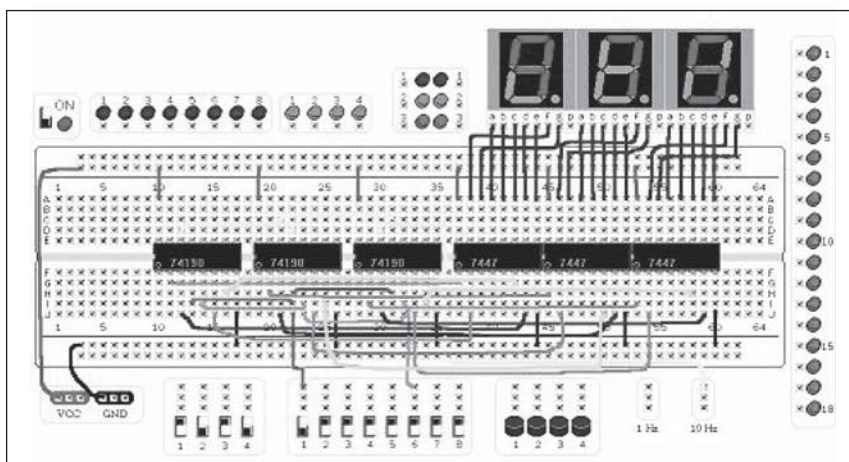


Figura 22. Circuito contador decimal de 0 a 999.

La Figura 23 muestra un caso de interacción entre un circuito construido sobre el módulo digital y un escenario para un tanque de agua que se llena con una bomba. Cuando el módulo está apagado, el escenario opera en modo de simulación, con un control independiente que muestra el comportamiento deseado. Cuando el módulo se enciende el escenario responde a las salidas del circuito construido sobre la tarjeta de pruebas.

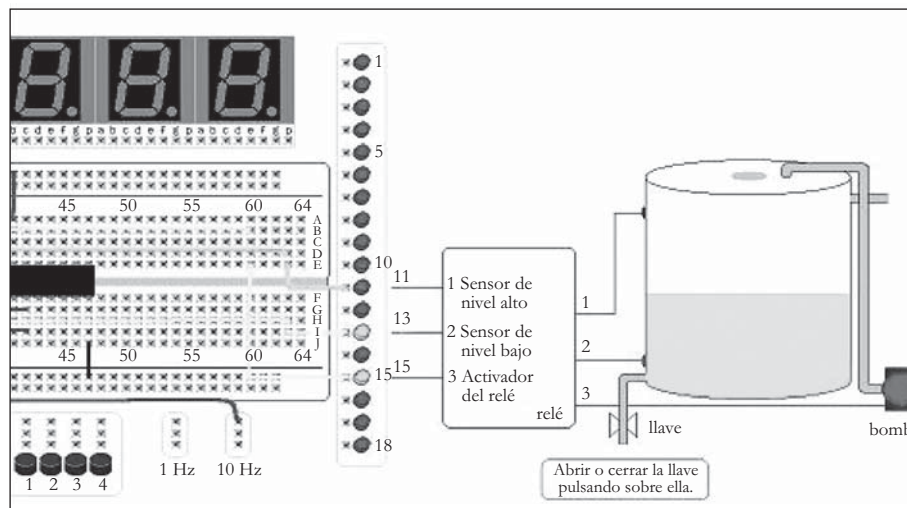


Figura 23. Interfaz entre módulo y escenario.

Descargas:

El programa puede ser descargado desde [SimuladorDigital_095.zip](#)

Una guía está en [GuiaPreliminar_095.zip](#)

Ejemplos de algunos circuitos están en [EjemplosDeCircuitos_095.zip](#)

2. Logicly

Es un simulador de electrónica digital, donde se pueden construir circuitos lógicos simples, utilizando las compuertas lógicas básicas y permite com-

probar el resultado del trabajo. Este programa es una herramienta muy útil para los estudiantes de ingeniería en electrónica digital, ya que sirve para comprender visualmente el funcionamiento de los circuitos, con la facilidad de experimentar virtualmente de una forma sencilla.

Para usar esta herramienta es necesario ingresar a <http://joshblog.net/projects/logic-gate-simulator/Logicly.html>.

3. Electronic Workbench

Este simulador es una herramienta para el análisis y la simulación de circuitos electrónicos analógicos y digitales asistido por computadora. El programa de simulación tiene tres partes: un editor de diagramas con una interfaz gráfica muy fácil de utilizar, un simulador SPICE y un visualizador de señales eléctricas en el monitor.

Este simulador permite implementar circuitos fácilmente y probarlos inmediatamente al energizarlos con voltaje; tiene un menú de diversos tipos de dispositivos digitales, los cuales pueden ser seleccionados y elegir las características electrónicas para conectarlos de acuerdo con el diseño que se necesite posteriormente se puede llevar a cabo la prueba de simulación para determinar su correcto funcionamiento.

Los componentes utilizados en la pantalla de la computadora tienen las mismas características típicas de dispositivos electrónicos reales que se pueden comprar en tiendas especializadas de componentes electrónicos.

UNIDAD 3

CIRCUITOS INTEGRADOS

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD
El alumno seleccionará los circuitos integrados requeridos en los equipos de potencia y control.

3.1 Selección de circuitos integrados en aplicaciones de potencia y control

LAS APLICACIONES EN CONTROL Y POTENCIA requieren la utilización de los siguientes circuitos integrados:

Optoacopladores

Se les conoce también como optoaisladores o dispositivos de acoplamiento óptico. Basan su funcionamiento en el empleo de un haz de radiación luminosa para pasar señales de un circuito a otro sin conexión eléctrica, principalmente usados para pasar de nivel bajo a nivel alto de potencia por su capacidad aisladora; los hay encapsulados DIP (Dual in Line Paket de 6, 8, 16 terminales) y expuestos (Figura 1). Son muy prácticos cuando se utilizan por ejemplo Microcontroladores, PLCs y PICs y/o PICAXE; si se quiere proteger un microcontrolador este dispositivo es una buena opción.



Figura 1. Optoacopladores.

Un aislador optoelectrónico contiene un diodo emisor de radiación infrarroja IRED (Infra Red Emission Diode) y un fotodetector en el mismo encapsulado, dispuestos de tal forma que la energía radiada desde el IRED esté acoplada de manera eficiente con el dieléctrico y el material que los rodea; además, éste proporciona protección contra la luz ambiental al dispositivo fotodetector. Existen dos topologías de construcción: coplanaria y cara a cara (Figura 2).

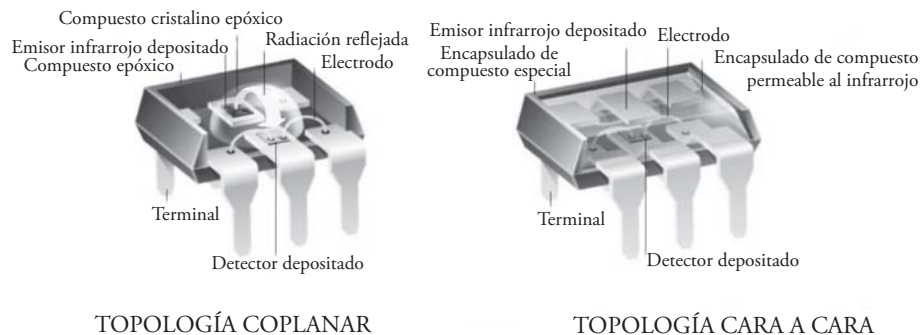
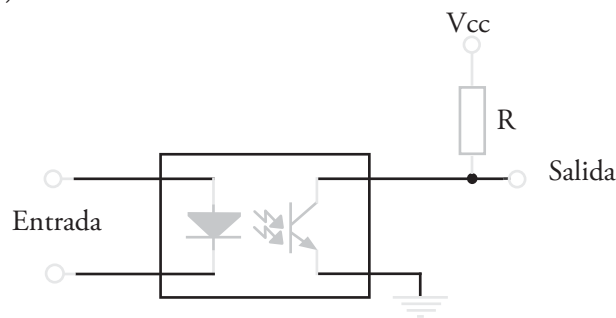


Figura 2. Topología coplanar y cara a cara.

Ya que no hay conexión eléctrica entre la entrada y la salida, el emisor de arsenido de galio y detector de silicio no pueden revertir sus funciones; una señal es capaz de pasar a través del aislador en una sola dirección en un grado determinado por la capacitancia de entrada-salida del paquete y sus características dieléctricas; el dispositivo no responde a las señales de entrada de modo común y proporciona protección a la circuitería de entrada y salida del circuito.

La determinación de la capacidad de un aislador para pasar eficientemente una señal deseada se conoce comúnmente como Relación de Transferencia de Corriente. Esta depende de la eficiencia de radiación del IRED, la separación entre el IRED y su detector, el área de incidencia, el poder de amplificación y la sensibilidad del detector; además, está sujeta a la linealidad de ambos componentes o chips, causando una función de transferencia más bien compleja que debe ser evaluada estrechamente cuando se usa en condiciones no especificadas y la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes.

Una propiedad importante de los optoacopladores es el aislamiento eléctrico que puede establecerse entre los circuitos de entrada y salida (figuras 3 y 4).



Circuito típico con optoacoplador

Figura 3. Circuito típico con optoacoplador.

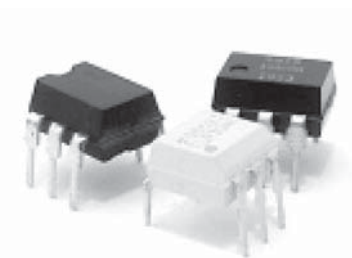


Figura 4. Encapsulado estándar de optoacopladores.

Existen varios dispositivos optoacopladores; la diferencia existe en los *dispositivos de salida* que se insertan en el componente. Existen en el mercado los siguientes tipos:

Fototransistor: se compone de un emisor de luz a la entrada (fotoemisor), con una etapa de salida formada por un transistor BJT (Figura 5).

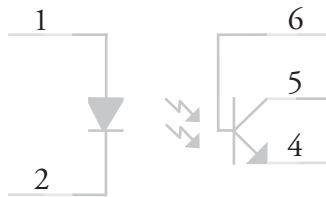


Figura 5. Optotransistor (símbolo).

Fototransistor con arreglo "Darlington": se compone de un emisor de luz a la entrada (fotoemisor), con una etapa de salida formada por un optotransistor, un transistor BJT en acoplamiento Darlington (Figura 6).

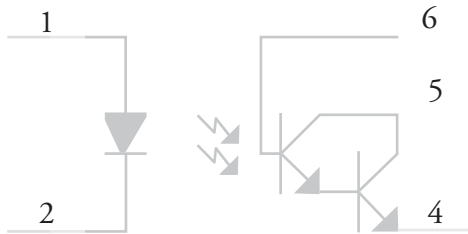


Figura 6. Optotransistor en configuración Darlington.

Fototiristor: se compone de un emisor de luz a la entrada (fotoemisor) con una etapa de salida formada por un tiristor activado por luz, de mucha utilidad en circuitos de control con corriente alterna y entre los que tenemos principalmente a los siguientes:

Fototriac de paso por cero: (Figura 7) tiene un emisor de luz a la entrada (fotoemisor) y en la etapa de salida se encuentra un TRIAC de cruce por cero (cuenta con una especie de disparador de shmit que evita el rebote). El circuito interno de cruce por cero conmuta al TRIAC sólo en los cruces por cero de la corriente alterna. Por ejemplo, el Motorola MOC3041.

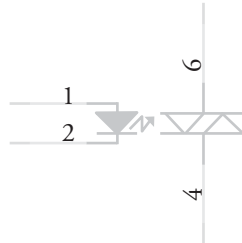


Figura 7. Fototriac.

Optotiristor FOTOSCR: diseñado para aplicaciones donde sea preciso un aislamiento (alta resistencia eléctrica) entre una señal lógica (circuito de control) y un circuito de fuerza conectado a la red. El emisor luminoso activa la compuerta de diodo controlado de silicio (Figura 8).

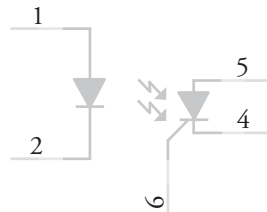


Figura 8. Foto SCR.

Componentes separados o acoplamiento “expuesto”: sus componentes se encuentran separados o juntos, son utilizados como interruptores ópticos o de distancia, ya que el emisor y el detector se encuentran o bien separados o en la misma dirección; es decir, de forma paralela, su funcionamiento se basa en la capacidad de reflexión. A los primeros también se les conoce como ranurados (figuras 9 y 10).

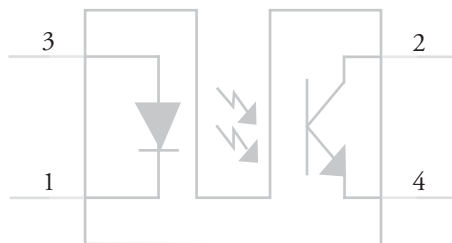


Figura 9. Optotransistor de encapsulado ranurado.



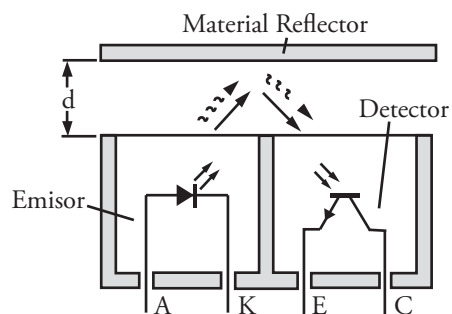


Figura 10. Optotransistor de encapsulado paralelo.

El siguiente diagrama de bloques (Figura 11) explica la conexión de un sistema digital a una etapa de potencia mediante el uso de un optoacoplador.

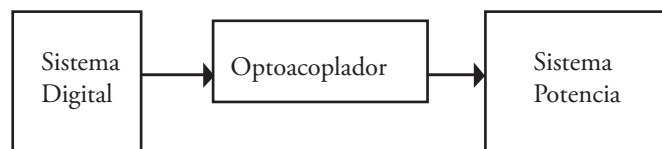


Figura 11. Diagrama de bloques para interconexión de un sistema digital y un sistema de potencia.

A continuación se presenta una recomendación de Motorola (Figura 12), uno de los fabricantes más importantes de circuitos integrados, para la aplicación de optoacopladores.

Optoisolator (Triac Driver) Application Circuits (continued)

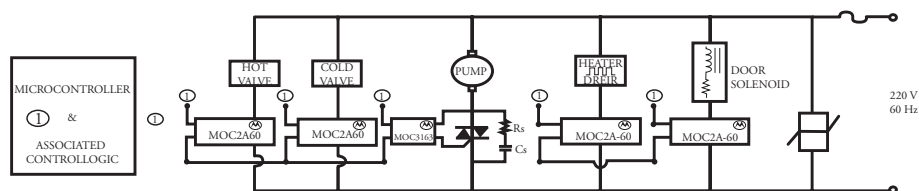


Figura 12. Optoisolador (Triac Driver).

Utilización de optoacopladores

A continuación (Figura 13) se tienen algunos dispositivos optoacopladores, extraídos del manual de reemplazos ECG (para dispositivos semiconductores), en donde se aprecian varios tipos de elementos de optoacoplamiento: por fototransistor, fotodarlington, fotoSCR, fotoTRIAC, fotoFET, etc. Todos ellos se estudian en la teoría de la optoelectrónica con dispositivos semiconductores basados en Silicio (Si) o Germanio (Ge).

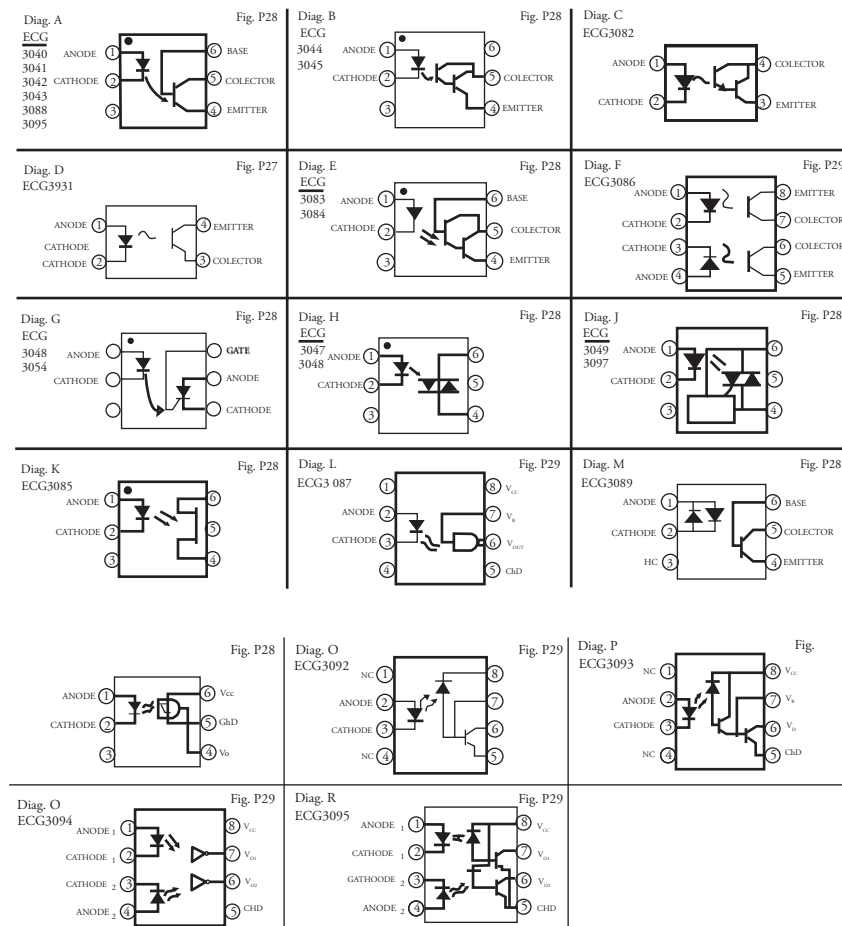


Figura 13. Diversos dispositivos optoacopladores.

Temporizadores

El dispositivo NE555 (Figura 15) es un circuito integrado monolítico que apareció en el mercado en la década de los setenta, fabricado por Signetics-Corporation y hasta la fecha todos los fabricantes de c. i. han desarrollado su propia versión en diversas presentaciones (Figura 14).

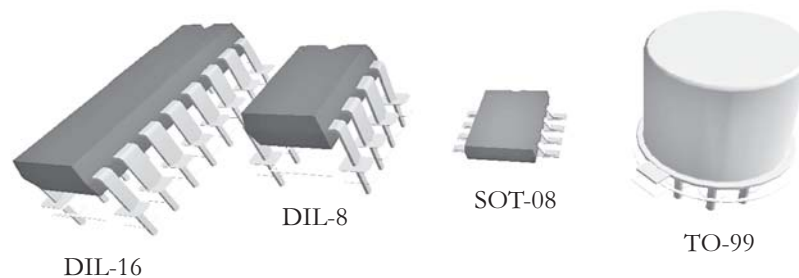


Figura 14. Diversos temporizadores.

Muy estable cuya función primordial es la de producir pulsos de temporización con una gran precisión, ya que, además, puede funcionar como oscilador. Sus características más destacables son:

Temporización desde microsegundos hasta horas

Modos de funcionamiento:

- Monoestable
- Aestable

Aplicaciones:

- Temporizador
- Oscilador
- Divisor de frecuencia

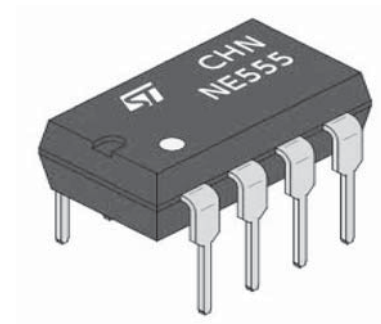


Figura 15. NE555.

- Modulador de frecuencia
- Generador de señales triangulares

Este Circuito Integrado es un dispositivo barato con el cual se pueden hacer muchos proyectos. Este temporizador es tan versátil que se puede utilizar para modular una señal en Amplitud Modulada (AM). Está constituido por una combinación de comparadores lineales, un *flip-flop* (biestable digital específico, al parecer RC), transistor de descarga y excitador inversor de salida. Su estructura interna se ve en la Figura 16.

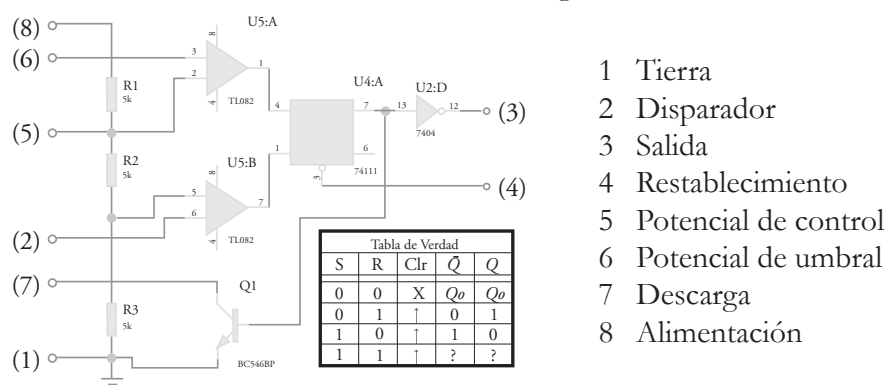


Figura 16. Estructura interna del 555.

PRINCIPALES PARÁMETROS ELÉCTRICOS	
Voltaje de alimentación	4.5 V 15 V
Corriente de alimentación	0.7 mA (por voltio de alimentación)
Corriente máxima de salida	200 Ma
Temperatura de trabajo	0 °C 70 °C
Potencia máxima de trabajo	600 Mw

Versión dual y tetra del NE555

Hay otros temporizadores dispuestos en un circuito integrado que alojan dos y cuatro temporizadores en una misma unidad. Son el 556, de 14 pines, y el poco conocido 558, que integra cuatro 555 y tiene 16 pines, como se observa en la Figura 17.

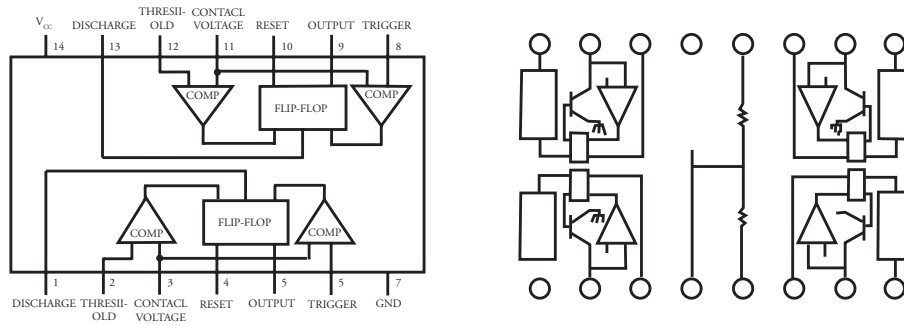


Figura 17. Temporizador NE556 y NE558.

Circuitos integrados compuestos por dos y cuatro temporizadores NE555

Existen muchos circuitos comerciales modernos con un circuito integrado 555 trabajando en él. Es muy popular para hacer osciladores que sirven como señal de reloj (base de tiempo) para el resto de los integrados.

Descripción de las terminales del Temporizador 555

- *GND* (normalmente la terminal 1): es el polo negativo de alimentación, identificado como tierra.
- *Disparo* (normalmente la terminal 2): es en esta patilla terminal donde se establece el inicio del tiempo de retardo o de funcionamiento, si el 555 es configurado como monoestable. Este proceso de disparo ocurre cuando este pin va por debajo del nivel de $1/3$ del voltaje de alimentación. Este pulso debe ser de corta duración, pues si se mantiene bajo por mucho tiempo la salida se quedará en alto hasta que la entrada de disparo pase a alto otra vez.
- *Salida* (normalmente la terminal 3): es el resultado de la operación del temporizador, ya sea que esté conectado como monoestable, a estable u otra aplicación. Cuando la salida es alta, el voltaje será el voltaje de alimentación (V_{CC}) menos 1.7 Voltios. Esta salida se puede obligar a

estar en casi 0 voltios con la ayuda de la terminal de restablecimiento (normalmente la 4).

- *Reset Restablecimiento* (normalmente la terminal 4): si se pone a un nivel por debajo de 0.7 Voltios, pone la terminal de salida a nivel bajo, ya que es la terminal de limpieza o borrado del circuito basculador. Si por algún motivo esta terminal no se utiliza, hay que conectarla a Vcc para evitar que el 555 se “resetee”.
- *Control de voltaje* (normalmente la terminal 5): cuando el temporizador se utiliza en el modo de controlador de voltaje, el voltaje en esta terminal puede variar casi desde Vcc (en la práctica como Vcc -1 voltio) hasta casi 0 V (aprox. 2 Voltios). Así es posible modificar los tiempos en que la salida está en alto o en bajo independiente del diseño (establecido por las resistencias y condensadores conectados externamente al 555). El voltaje aplicado a la patilla de control de voltaje puede variar entre 45 y 90% de Vcc en la configuración monoestable. Cuando se utiliza la configuración a estable, el voltaje puede variar desde 1.7 voltios hasta Vcc. Modificando el voltaje en esta terminal en la configuración a estable causará que la frecuencia sea modulada, FM. Si esta terminal no se utiliza, se recomienda ponerle un condensador de 0.01 μ F para evitar las interferencias.
- *Umbral* (normalmente la terminal 6): es una entrada a un comparador interno que tiene el 555 fijado a dos tercios de Vcc con la referencia deseada, y se utiliza para poner la salida a nivel bajo.
- *Descarga* (normalmente la terminal 7): Utilizado para descargar con efectividad por corto circuito lo que esté conectado a este terminal, como el condensador externo utilizado por el temporizador para su funcionamiento.
- *V+ alimentación* (normalmente la terminal 8): También llamada Vcc, es la alimentación, es el pin la terminal donde se conecta el voltaje de alimentación que va de 4.5 voltios hasta 18 voltios (máximo). Hay versiones militares de este integrado que llegan hasta 18 Voltios.

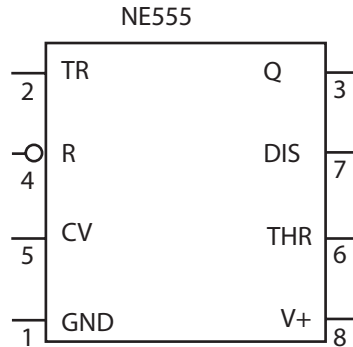


Figura 18. Pines del 555.

Funcionamiento del circuito integrado 555

Este circuito integrado de 8 terminales (Figura 18) es considerado de respuesta lineal con muchas aplicaciones en circuitos digitales debido a que puede desempeñar diversas funciones de acuerdo con la configuración de sus elementos de polarización externos.

Según su configuración (conexionado), podemos de una manera práctica clasificar el funcionamiento de este circuito integrado como:

- Multivibrador, oscilador monoestable de onda cuadrada
- Multivibrador, oscilador a estable o corrida libre de onda cuadrada

El temporizador 555 se puede conectar para que funcione de diferentes maneras, entre las más importantes están: como *multivibrador a estable* y como *multivibrador monoestable*. Puede también configurarse para, por ejemplo, generar formas de onda tipo Rampa.

Multivibrador a estable

La configuración a estable (no estable) nos permite generar una onda cuadrada de tal manera que podemos decir que el NE555 es un oscilador de onda cuadrada. Un ejemplo de ello se observa en la Figura 19.

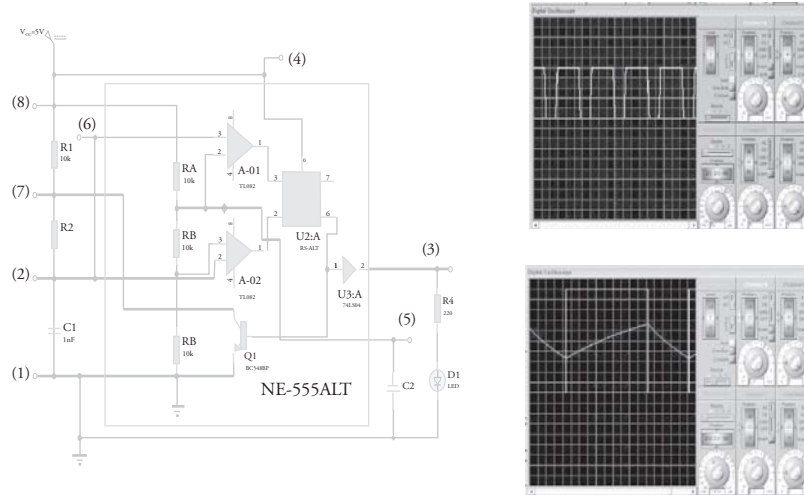


Figura 19. Esquema de la aplicación de multivibrador aestado del 555.

Funcionamiento. Cuando se energiza el circuito, es más rápida la respuesta del divisor de potencial del Circuito Integrado que el Tiempo de Carga del capacitor, por lo que en el Amplificador Operacional A-O1 su salida se hace Baja y el A-O2, ya que se encuentran conectadas las terminales 6 y 2 al mismo nodo, se hace Alta. En estas condiciones el basculador falso RS presenta a su salida complementada un potencial Alto activando al transistor Q1, descargando el Capacitor a través de R2.

Al descargarse el Capacitor vía R2 y que el capacitor esté conectado al bloque de disparo (entrada inversora del A-O2) solamente se podrá descargar hasta $V_{cc}/3$, por lo que el A-O1 cambia a Alto su salida y A-O2 cambia a Bajo; con estas condiciones el Basculador cambia su salida complementada a Baja desactivando Q1, por lo que se permite la carga del capacitor vía $(R1+R2)$ hasta el potencial de referencia del A-O1, llevando su salida a Baja y el A-O2 a Alta, que son las condiciones iniciales de descarga y carga del capacitor, por lo que se repite el ciclo de carga y descarga del capacitor (Figura 20).

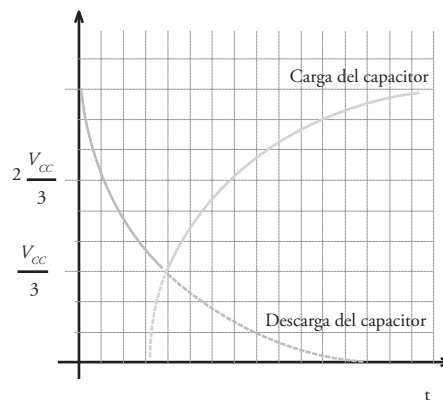


Figura 20. Gráfica V_{cc} -tiempo.

Bajo las condiciones anteriores se pueden determinar los parámetros de la señal de salida del Circuito Integrado NE555 con las siguientes expresiones matemáticas.

$$F = \frac{1.44}{(R_1 + R_2)C}$$

Este tipo de funcionamiento se caracteriza por una salida con forma de onda cuadrada (o rectangular) continua de ancho predefinido por el diseñador del circuito. El esquema de conexión es el que se muestra. La señal de salida tiene un nivel alto por un tiempo t_1 y un nivel bajo por un tiempo t_2 . La duración de estos tiempos depende de los valores de R_1 , R_2 y C , según las fórmulas siguientes:

$$t_1 = \ln(2) \cdot (R_1 + R_2) \cdot C \approx 0.693 \cdot (R_1 + R_2) \cdot C \text{ (En segundos)}$$

Y

$$t_2 = \ln(2) \cdot R_2 \cdot C \approx 0.693 \cdot R_2 \cdot C \text{ (En segundos)}$$

La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la fórmula:

$$F \approx \frac{1}{0.693 \cdot C \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)}$$

El periodo es simplemente:

$$T = \frac{1}{f}$$

Si se necesita un generador con frecuencia variable, (Figura 21), se debe variar la capacidad de condensador, ya que si el cambio lo hacemos mediante las resistencias R_1 y/o R_2 , también cambia el ciclo de trabajo o ancho de pulso a la relación de tiempo con respecto al tiempo; cuando la salida es alta o baja se le denomina ciclo de trabajo “D” de la señal de salida según la siguiente expresión:

$$D = \frac{R_1 + R_2}{(R_1 + 2 \cdot R_2)}$$

$$D = \frac{f_1}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$$

y

$$D = \frac{t_1}{T} = \frac{R_2}{R_1 + 2R_2}$$

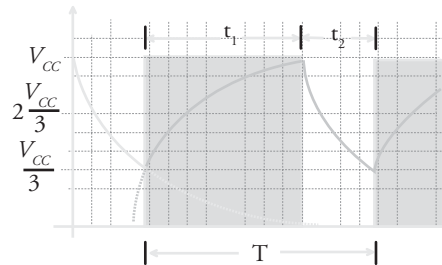


Figura 21. Frecuencia de voltaje.

Hay que recordar que el periodo es el tiempo que dura la señal hasta que ésta se vuelve a repetir. Si se requiere una señal cuadrada donde el ciclo de trabajo D sea del 50%, es decir, que el tiempo t_1 sea igual al tiempo t_2 , es necesario añadir un diodo en paralelo con R_1 , ya que, según las fórmulas, para hacer $t_1 = t_2$ sería necesario que R_1 fuera cero, lo cual en la práctica no funcionaría.

Multivibrador monoestable

En esta configuración este Circuito Integrado funciona como un circuito de un solo disparo a partir de un pequeño cambio en el estímulo aplicado a la terminal del disparador con una caída de potencial por debajo de un tercio del potencial de alimentación, donde t_w es independiente del potencial de alimentación, como se ve en la Figura 22.

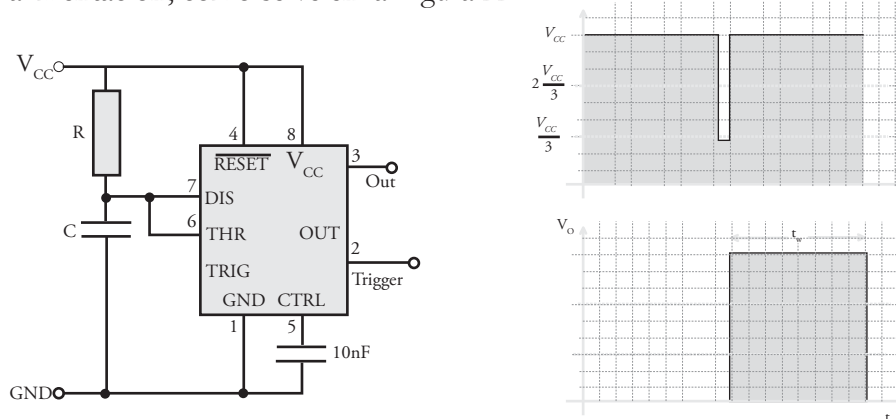


Figura 22. Configuración del multivibrador monoestable.

Si la entrada inversora del A-O₂ tiene un potencial por arriba de un tercio del valor de la fuente de alimentación, éste presentará a su salida un potencial Bajo (cero voltios lógicos); con esto el basculador activa su cerrojo a Alto (uno lógico), sus salidas, activando al transistor Q₁, quien cortocircuita al Capacitor C₁ y con esto la entrada no Inversora del A-O₁ es Baja, mayor que la Inversora, por lo que a su salida se tiene un potencial bajo; al mismo tiempo la salida complementada del basculador se aplica a un Amplificador Inversor para tener cero voltios en la salida del Circuito Integrado (Figura 23).

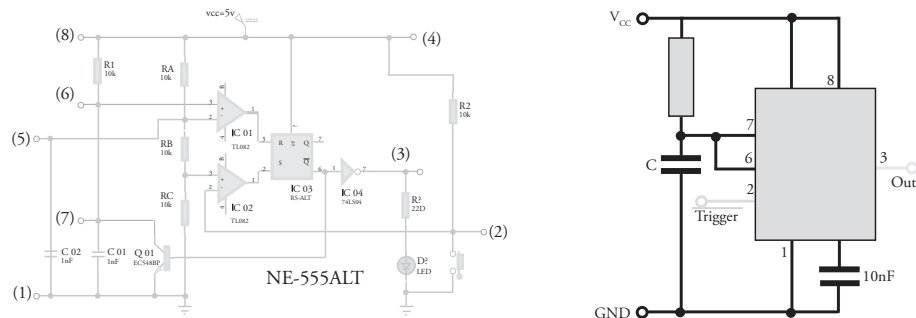


Figura 23. Diagramas básicos del circuito integrado.

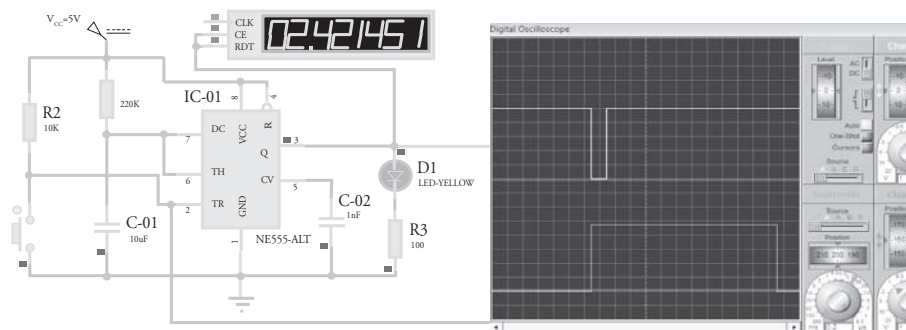


Figura 24. Esquema de la aplicación de multivibrador monoestable del 555.

En este caso el circuito entrega a su salida un solo pulso de un ancho establecido por el diseñador.

El esquema de conexión es el que se muestra en la Figura 24. La fórmula para calcular el tiempo de duración (tiempo en el que la salida está en nivel alto) es:

$$T = \ln 3 \cdot R \cdot C \text{ (En segundos).}$$

$$T = 1.1 \cdot R \cdot C \text{ (En segundos).}$$

Nótese que es necesario que la señal de disparo, en la terminal 2 del 555, sea de nivel bajo y de muy corta duración para iniciar la señal de salida.

Basculadores, circuitos basculantes o flip-flops

Todos los circuitos digitales utilizan datos binarios para funcionar correctamente. Los circuitos están diseñados para contar, sumar, separar, etc., los datos según nuestras necesidades, pero por el tipo de funcionamiento de las compuertas digitales, los datos presentes en las salidas de las mismas, cambian de acuerdo con sus entradas, y no hay manera de evitarlo; si las entradas cambian, las salidas lo harán también. Las memorias básicamente son sistemas que pueden almacenar uno o más datos evitando que se pierdan, hasta que nosotros lo consideremos necesario; es decir, pueden variar su contenido a nuestra voluntad.

El corazón de una memoria son los Basculadores o en inglés *flip flops* FF; este circuito es una combinación de compuertas lógicas, a diferencia de las características de las compuertas solas. Si se unen de cierta manera, éstas pueden almacenar datos que podemos manipular con reglas preestablecidas por el circuito mismo. Los FF pueden tener varias entradas dependiendo del tipo de las funciones internas que realicen y tienen dos salidas:

- La salida “Q” (salida normal)
- La salida “ $\overline{Q}$ ” (salida invertida, complementada o negada)

Las salidas de los FF sólo pueden tener dos estados (binarios) y siempre tienen valores contrarios, como se ve en la Tabla 1:

Tabla 1
Valores de salidas de un flip-flop

Salida	Símbolo	Estado 1	Estado 2	Información
Normal	Q	1	0	Estado 1 "Establecer" (SET) Estado 2 "Reestablecer" (RESET)
Invertida, Negada	$\bar{Q}$	0	1	

Las entradas de un FF obligan a las salidas a conmutar hacia uno u otro estado o hacer *flip flop* (término anglosajón). Más adelante explicaremos cómo interactúan las entradas con las salidas para lograr los efectos característicos de cada FF. El FF también es conocido como:

- “Registro Básico”, término utilizado para la forma más sencilla de un FF.
- “Multivibrador Biestable”, término pocas veces utilizado para describir a un FF.

Flip-flop básico “RS” construido con compuertas NAND. Este es el circuito más sencillo y básico de un FF, puede ser construido a partir de dos compuertas NAND o dos compuertas NOR con dos entradas. A continuación se ilustra con compuertas NAND, y es denominado “Registro Básico NAND”. La conexión queda de la siguiente manera, como se ve en la Figura 25:

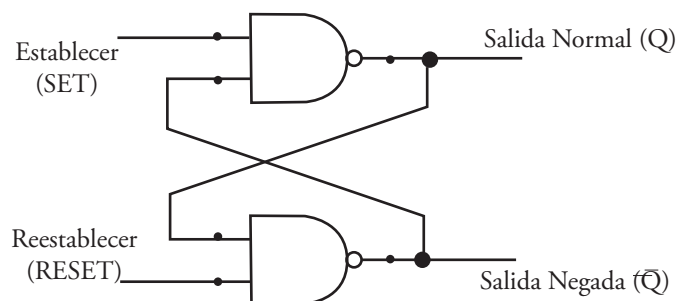


Figura 25. *Flip-flop* básico “RS” construido con compuertas NAND.

La siguiente tabla (2) muestra el estado inicial del Registro Básico NAND, cuando sus entradas se encuentran en Alto (Estado de reposo del FF). Para comenzar la acción de *flip-flop* será necesario enviar a Bajo alguna de las entradas, con su correspondiente cambio de estado a la salida.

Tabla 2
Estado inicial del flip-flop “RS”
construido con compuertas NAND

<i>Entrada</i>	<i>Estado</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>
Establecer	1	1	0
Reestablecer	1	0	1

La siguiente tabla (3) muestra los diferentes cambios de las salidas, según cada selección de entradas (La “X” significa que no importa el estado en el que se encuentren en ese momento):

Tabla 3
Cambios de las salidas del flip-flop “RS”
construido con compuertas NAND

<i>Cambios</i>	<i>Entrada</i>	<i>Estado</i>	<i>Q</i>	<i>Q</i>
Estado Actual	Set	1	Sin cambio	Sin cambio
	Reset	1		
Pulso Bajo a Reset	Set	1	0	1
	Reset	0		
Pulso Bajo a Set	Set	0	1	0
	Reset	1		
Pulso Bajo en Ambos	Set	0	1	1
	Reset	0		

Siguiendo los datos de la tabla se resume que:

- Si Set y Reset están en Alto, el FF mantiene sus salidas en el estado actual.

- Si Reset recibe un pulso Bajo, las salidas son forzadas a $Q = 0$ y $/Q = 1$
- Si set recibe un pulso Bajo, las salidas son forzadas a $Q = 1$ y $/Q = 0$
- Si las dos entradas reciben pulsos Bajos, las salidas son forzadas a $Q = 1$ y $/Q = 1$

Este último cambio normalmente se considera como no deseado, ya que el principio básico es que las salidas siempre estén invertidas.

La tabla de verdad (4) del Registro Básico NAND es la siguiente:

Tabla 4
Flip-flop básico “RS” construido
con compuertas NAND

<i>Set</i>	<i>Reset</i>		Q	$\bar{Q}$
1	1		Sin cambio	Sin cambio
1	0		0	1
0	1		1	0
0	0		1	1

Registro Básico con compuertas NOR.

La conexión del Registro Básico NOR es exactamente igual al del Registro NAND, pero los cambios en sus salidas son completamente inversas.

Tabla de verdad (5) del Registro Básico NOR.

Tabla 5
Flip-flop básico “RS” construido
con compuertas NOR

<i>Set</i>	<i>Reset</i>		Q	$\bar{Q}$
0	0		Sin cambio	Sin cambio
1	0		1	0
0	1		0	1
1	1		0	0

Agregando pulsadores u otras compuertas en las entradas, los usos más comunes para el Registro Básico NAND o NOR son:

- Eliminadores de ruido para pulsadores mecánicos.
- Sistemas de Encendido (On)/Apagado (Off) con dos pulsadores para diversos circuitos digitales y/o análogos.
- Sensores de movimiento mecánico (Fin o Inicio de carrera de una puerta, por ejemplo).
- Control Digital de otros circuitos.
- Diversas aplicaciones.

Señales de Reloj (clock) y FF controlados por reloj

Un Registro Básico tiene dos variables de entrada y responde de manera predecible a ellas. Todos los sistemas digitales tienen básicamente dos formas de operación:

- Operación en modo asíncrono: en este modo las salidas cambian de manera automática siguiendo las órdenes de las entradas.
- Operación en modo síncrono: en este modo las salidas cambian siguiendo las órdenes de las entradas, pero sólo cuando una señal de control, llamada reloj (clock, CLK, CP), es aplicada al registro.

Los circuitos digitales asíncronos son muy complicados en lo que a diseño y reparación se refiere, ya que, al encontrar una falla en un circuito de 10 registros interconectados, el rastreo de los cambios en todas las compuertas es muy complicado.

Los circuitos digitales síncronos son más fáciles de diseñar y reparar, debido a que los cambios de las salidas son eventos “esperados” (ya que fácilmente se sabe el estado de cada una de las entradas o salidas sin que estas cambien repentinamente), y los cambios dependen del control de una sola señal aplicada a todos los registros, la señal de reloj.

La señal de Reloj es una onda cuadrada o rectangular; los registros que funcionan con esta señal sólo pueden cambiar cuando la señal de Reloj hace

una transición o “flanco”, por lo tanto, la señal de reloj sólo puede hacer 2 transiciones (o Flancos):

- La transición con pendiente positiva (TPP) o Flanco positivo (FP): es cuando la señal de Reloj cambia del estado Bajo al estado Alto.
- La transición con pendiente negativa (TPN) o Flanco Negativo (FN): es cuando la señal de Reloj cambia del estado Alto al estado Bajo.

Principales características de los FF sincronizados por Reloj

- Todos los FF cuentan con una entrada con el rótulo (Reloj, Clock, CLK, CP) y un distintivo círculo para saber cómo debe ser la señal activa. Los que no tienen círculo son sincronizados por una TPP; los que cuentan con un círculo son sincronizados por una TPN.
- Todos los FF cuentan con entradas de control que determinan el cambio que van a tener las salidas, al igual que en los Registros Básicos, pero estas entradas no pueden modificar las salidas arbitrariamente, sólo podrán hacerlo cuando el FF reciba su transición activa.

Resumiendo, las entradas de control del FF nos permiten saber cómo van a cambiar las salidas, pero sólo la señal de Reloj podrá hacer efectivo este cambio.

Registro básico NAND tipo síncrono

La siguiente figura (26) muestra un Registro Básico Sincronizado por una señal de Reloj. Es la forma más básica de un FF controlado por la señal de Reloj. La falta del círculo en la entrada de CLK significa que sólo será activa en los TPP. Sólo se muestra la salida Normal (Q) porque, la salida negada siempre es inversa.

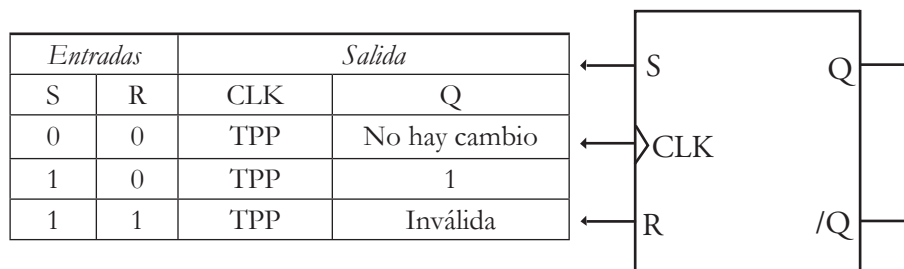


Figura 26. Tabla y símbolo electrónico de *flip-flop* básico controlado por señal de Reloj.

Flip-flop tipo "J-K"

Este FF es uno de los más usados en los circuitos digitales, y de hecho es parte fundamental de muchos circuitos avanzados, como contadores y registros de corrimiento, que ya vienen integrados en un chip.

Este FF cuenta con dos entradas de datos J y K; su función es en principio la misma que el Registro Básico NAND o NOR, pero con la diferencia que la condición en las entradas $J = 1$, $K = 1$, a diferencia del Registro NAND, que generaría una salida errónea o no deseada, en un FF J-K, obliga a las salidas a conmutar su estado al opuesto (Toggle) a cada pulso del Reloj. Esto lo convierte en un tipo de FF muy versátil (Figura 27).

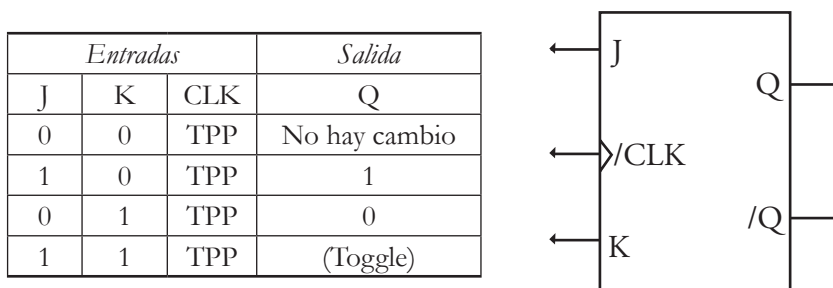


Figura 27. Tabla y símbolo electrónico de *flip-flop* tipo "J-K".

Observando la tabla de verdad, observamos los cambios que provoca en sus salidas este FF:

- Si J y $K = 0$, no hay cambios en las salidas.
- Si $J = 1$, y $K = 0$, se forzan las salidas a $Q = 1$, $/Q = 0$.
- Si $J = 0$, y $K = 1$, se forzan las salidas a $Q = 0$, $/Q = 1$.
- Si $J = 1$, y $K = 1$, las salidas conmutan su estado hacia el siguiente a cada pulso del Reloj (Toggle).

Flip-flop tipo “D” (datos, data)

A diferencia de los FF tipo J-K, el FF tipo “D” (Datos, Data) sólo cuenta con una entrada para hacer el cambio de las salidas. A cada pulso del Reloj (dependiendo si el FF utiliza una TPP o una TPN) el estado presente en la entrada “D” será transferido a la salida Q y $/Q$, como se ve en la Figura 28.

Entrada		Salida
D	CLK	Q
0	TPP	0
1	TPP	1

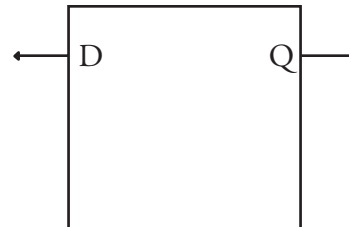


Figura 28. Tabla y símbolo electrónico de *flip-flop* tipo “D”.

Una de las aplicaciones de mayor uso para este tipo de FF es la de la transferencia de datos de forma paralela; conectando varios FF tipo “D” a X número de bits, podemos hacer que la información de todos los bits pase inmediatamente a la salida de cada FF con sólo un pulso de Reloj.

Entradas asíncronas en los FF

Cada FF tiene entradas que pueden cambiar el estado de las salidas de manera sincronizada con el pulso de Reloj.

La respuesta está en los FF síncronos de cualquier tipo que poseen entradas asíncronas; esto añade dos pines más de control a nuestros FF, los conocidos Set y Reset (los cuáles pueden ser activos en el estado Alto o Bajo). Entonces se tienen FF síncronos (Tipo “J - K”, o tipo “D”) con un par de entradas que no dependen en ningún momento del pulso de reloj, haciendo una combinación perfecta de entradas que controlan las salidas de manera automática (asíncronas) o controladas por un pulso de reloj (síncronas).

La siguiente figura (29) muestra los símbolos de los FF Tipo “J - K” y “D” con sus entradas asíncronas.

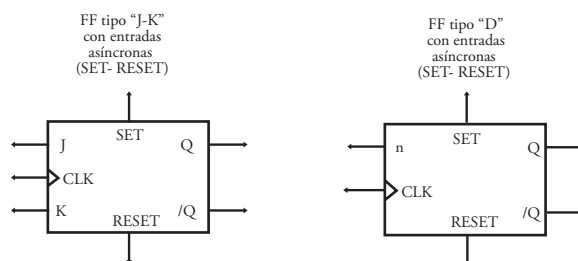


Figura 29. *Flip-flop* “J-K” y “D” con entradas asíncronas.

Tabla de verdad del FF tipo “J-K” con entradas asíncronas (Tabla 6)

Las “X” significan que no importa el estado actual de esa entrada. El FF tiene una entrada de Reloj que funciona con TPP. Las entradas asíncronas con activas altas.

Tabla 6
Flip-flop “J-K” con entradas asíncronas

Entradas					Salida
J	K	Set	Reset	CLK	Q
0	0	0	0	TPP	No hay cambio
1	0	0	0	TPP	1
0	1	0	0	TPP	0
1	1	0	0	TPP	(Toggle)
X	X	1	0	X	0
X	X	0	1	X	1

El funcionamiento básico sigue siendo el mismo, pero las salidas serán forzadas a Alto o Bajo, si se activan las entradas asíncronas correspondientes (Set, Reset) sin importar el estado de las entradas “J-K” o CLK.

Tabla de verdad del FF tipo “D” con entradas asíncronas (Tabla 7)

Las “X” significan que no importa el estado actual de esa entrada. El FF tiene una entrada de Reloj que funciona con TPP. Las entradas asíncronas con activas Altas.

Tabla 7
Flip-flop “D” con entradas asíncronas

<i>Entrada</i>			<i>Salida</i>	
D	SET	RESET	CLK	Q
0	0	0	TPP	0
1	0	0	TPP	1
X	1	0	X	0
X	0	1	X	1

El funcionamiento básico sigue siendo el mismo, pero las salidas serán forzadas a Alto o Bajo si se activan las entradas asíncronas correspondientes (Set, Reset) sin importar el estado de la entrada “D” o CLK.

Amplificadores operacionales

Un amplificador operacional (abreviado A.O. u op-amp, simplemente A-O) es un circuito electrónico inicialmente diseñado a válvulas termoiónicas polarizadas a altos voltajes para realizar Eléctricamente Operaciones Matemáticas como la suma, resta, multiplicación, división, integración, derivación, etc.; de ahí el nombre de amplificadores operacionales (Figura 30).



Figura 30. Primer amplificador operacional comercial no integrado GAP/R K2-W.

Actualmente son Circuitos Integrados en diversos encapsulados con bajos potenciales de trabajo, confiables, económicos e inclusive utilizan una sola fuente de alimentación (monopolares). El amplificador ordinario utiliza dos fuentes de alimentación, una decimos por comodidad positiva y otra negativa; por razones prácticas se suelen omitir en su símbolo electrónico (Figura 31).

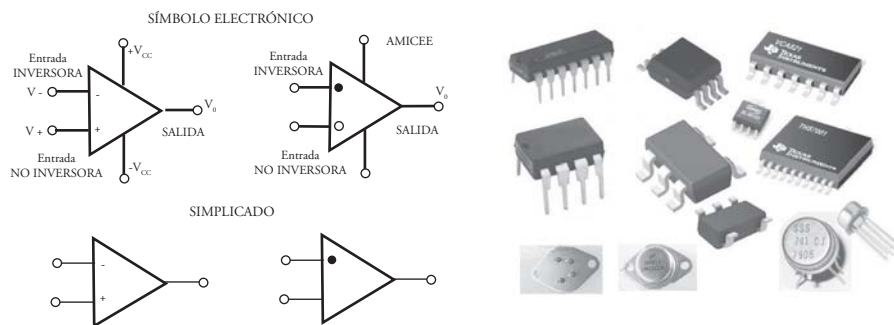


Figura 31. Diversos amplificadores y simbología.

Uno de los primeros A-O más comúnmente utilizados es el A-O $\mu A741$ fabricado por Fairchild de alto rendimiento, montado en una sola ficha de silicio mediante el proceso epitaxial de Fairchild con protección contra corto circuitos.

Notación

El símbolo de un amplificador es el mostrado en la siguiente figura (32):

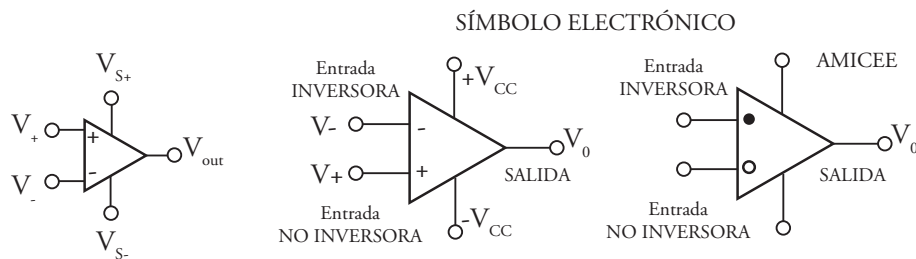


Figura 32. Símbolo del amplificador operacional (A-O).

Las terminales son:

- V_+ : entrada no inversora
- V_- : entrada inversora
- V_{OUT} : salida
- V_{S+} : alimentación positiva
- V_{S-} : alimentación negativa

Las terminales de alimentación pueden recibir diferentes nombres, por ejemplo en los A-O basados en FET V_{DD} y V_{SS} respectivamente. Para los basados en BJT son V_{CC} y V_{EE} . Normalmente las terminales de alimentación son omitidas en los diagramas eléctricos por claridad.

Las características reales de un A-O se relacionan con los circuitos asociados en su implementación y los dispositivos empleados; generalmente un A-O tiene el siguiente diagrama a cuadros.

El A-O ideal tiene una ganancia infinita, una impedancia de entrada infinita, un ancho de banda también infinito, una impedancia de salida nula, un tiempo de respuesta nulo y ningún ruido. Como la impedancia de entrada es infinita también se dice que las corrientes de entrada son cero, como se ve en la Tabla 8.

Tabla 8
Principales características del A-O

<i>Parámetros</i>		
Impedancia de entrada	Z_i	∞
Impedancia de salida	Z_o	0
Corriente de entrada	I_o	0
Ancho de banda	Bw	∞
Ganancia de voltaje	A_v	∞
Factor de rechazo MC	FR	∞
Balance perfecto $V_o=0$ cuando $V_1=V_2$		
Todas las características iguales a cualquier temperatura		

Nota: Los valores reales dependen del modelo; estos valores son genéricos y son una referencia. Si van a usarse amplificadores operacionales, es mejor consultar el manual de datos o características del fabricante *datasheet*.

Comportamiento en corriente continua

Lazo abierto

Si no existe realimentación la salida del A-O será la resta de sus dos entradas multiplicada por un factor. Este factor suele ser del orden de 100.000 (que se considerará infinito en cálculos con el componente ideal). Por tanto, si la diferencia entre las dos tensiones es de 1V, la salida debería ser 100.000V. Debido a la limitación que supone no poder entregar más tensión de la que hay en la alimentación, el A-O estará *saturado* si se da este caso. Si la tensión más alta es la aplicada a la patilla + la salida será la que corresponde a la alimentación V_{S+} , mientras que si la tensión más alta es la del pin - la salida será la alimentación V_{S-} .

Lazo cerrado o realimentado

Se conoce como lazo cerrado a la realimentación en un circuito. Aquí se supondrá *realimentación negativa*. Para conocer el funcionamiento de esta configuración se parte de las tensiones en las dos entradas exactamente iguales; se supone que la tensión en la terminal + sube y, por tanto, la tensión en la salida también se eleva. Como existe la realimentación entre la salida y la terminal -, la tensión en esta terminal también se eleva, por tanto la diferencia entre las dos entradas se reduce, disminuyéndose también la salida. Este proceso pronto se estabiliza, y se tiene que la salida es la necesaria para mantener las dos entradas, idealmente, con el mismo valor. Siempre que hay realimentación negativa se aplican estas dos aproximaciones para analizar el circuito:

$$V_+ = V_- \text{ (lo que se conoce como } \textit{principio del corto circuito virtual}).$$

$$I_+ = I_- = 0$$

Cuando se realimenta negativamente un amplificador operacional, al igual que con cualquier circuito amplificador, se mejoran algunas características del mismo como una mayor impedancia en la entrada y una menor impedancia en la salida. La mayor impedancia de entrada da lugar a que la corriente de entrada sea muy pequeña y se reduzcan así los efectos de las perturbaciones en la señal de entrada. La menor impedancia de salida permite que el amplificador se comporte como una fuente eléctrica de mejores características. Además, la señal de salida no depende de las variaciones en la ganancia del amplificador, que suele ser muy variable, sino la ganancia de la red de realimentación, que puede ser mucho más estable con un menor costo. Asimismo, la frecuencia de corte superior es mayor al realimentar, aumentando el ancho de banda.

Asimismo, cuando se realiza realimentación positiva (conectando la salida a la entrada no inversora a través de un cuadripolo determinado) se buscan efectos muy distintos. El más aplicado es obtener un oscilador para generar señales oscilantes.

Para analizar un circuito en el que haya A-O puede usarse cualquier método, pero uno habitual es:

1. Comprobar si tiene realimentación negativa.
2. Si tiene realimentación negativa se pueden aplicar las reglas del apartado anterior.
3. Definir las corrientes en cada una de las ramas del circuito.
4. Aplicar el método de los nodos en todos los nodos del circuito excepto en los de salida de los amplificadores (porque en principio no se puede saber la corriente que sale de ellos).
5. Aplicando las reglas del apartado 2 resolver las ecuaciones para despejar la tensión en los nodos donde no se conozca.

Comparador

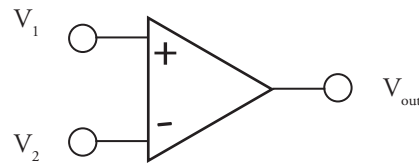


Figura 33. El A-O como comparador.

En la Figura 33 se observa una aplicación sin la retroalimentación. Compara entre las dos entradas y saca una salida en función de qué entrada sea mayor. Se puede usar para adaptar niveles lógicos.

$$V_{OUT} = \begin{cases} V_s + V_1 & \text{if } V_1 > V_2 \\ V_s - V_1 & \text{if } V_1 < V_2 \end{cases}$$

Seguidor

Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada (Figura 34).

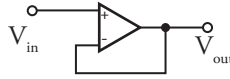


Figura 34. El A-O como seguidor.

Se usa como un buffer para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa).

Como la tensión en las dos patillas de entradas es igual: $V_{out} = V_{in}$

$$Z_{in} = \infty$$

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor la corriente pasa tanto por el sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.

Por ejemplo, si la resistencia interna del voltímetro es R_e (entrada del amplificador), la resistencia de la línea de cableado es R_l y la resistencia interna del sensor es R_g , entonces la relación entre la tensión medida por el voltímetro (V_e) y la tensión generada por el sensor (V_g) será la correspondiente a este divisor de tensión:

$$V_e = \frac{R_e}{R_g + R_l + R_e} \cdot V_g$$

Por ello, si la resistencia de entrada del amplificador es mucho mayor que la del resto del conjunto, la tensión a la entrada del amplificador será prácticamente la misma que la generada por el sensor y se podrá despreciar la caída de tensión en el sensor y el cableado.

Además, cuanto mayor sea la intensidad que circula por el sensor, mayor será el calentamiento del sensor y del resto del circuito por efecto Joule, lo cual puede afectar a la relación entre la tensión generada por el sensor y la magnitud medida.

Inversor

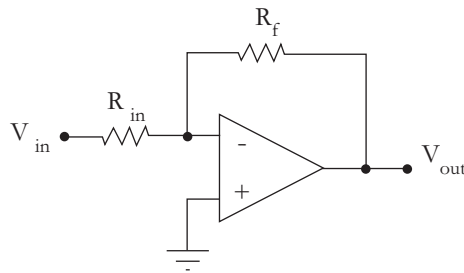


Figura 35. El A-O como inversor.

Se denomina inversor (Figura 35), ya que la señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) pero con la fase invertida 180 grados.

El análisis de este circuito es el siguiente:

$$V_+ = V_- = 0$$

Definiendo corrientes: $\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = -\frac{V_{out} - 0}{R_f}$ y de aquí se despeja

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}}$$

Para el resto de circuitos el análisis es similar.

$$Z_{in} = R_{in}$$

Por lo cual podemos controlar la impedancia de entrada mediante la elección de R_{in} .

Esta configuración es una de las más importantes porque gracias a ella se pueden elaborar otras configuraciones, como la configuración del derivador, integrador, sumador. En sistemas microelectrónicos se puede utilizar como buffer, poniendo 2 en cascada.

No inversor

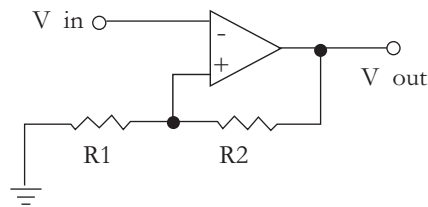


Figura 36. El A-O como no inversor.

Como observamos (Figura 36), el voltaje de entrada ingresa por el pin positivo, pero como conocemos que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, el voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo; conociendo el voltaje en el pin negativo podemos calcular la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada haciendo uso de un pequeño divisor de tensión.

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

$Z_{in} = \infty$, lo cual nos supone una ventaja frente al amplificador inversor.

Sumador inversor

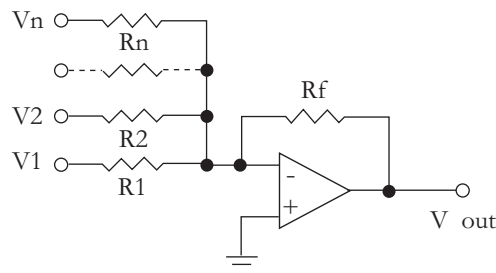


Figura 37. El A-O como sumador inversor.

La salida está invertida (Figura 37),
 Para resistencias independientes $R_1, R_2, \dots R_n$

$$V_{out} = -R_f \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

La expresión se simplifica bastante si se usan resistencias del mismo valor:

Impedancias de entrada: $Z_{in} = R_n$

Restador

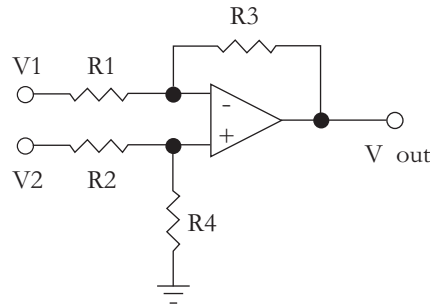


Figura 38. El A-O como restador.

Para resistencias independientes R_1, R_2, R_3, R_4 :

$$V_{out} = V_2 \left(\frac{(R_3 + R_1)R_4}{(R_4 + R_2)R_1} \right) - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right)$$

Igual que antes esta expresión puede simplificarse con resistencias iguales.

La impedancia diferencial entre dos entradas es $Z_{in} = R_1 + R_2$

Cabe destacar que este tipo de configuración tiene una *resistencia de entrada baja* en comparación con otro tipo de restadores como por ejemplo el amplificador de instrumentación.

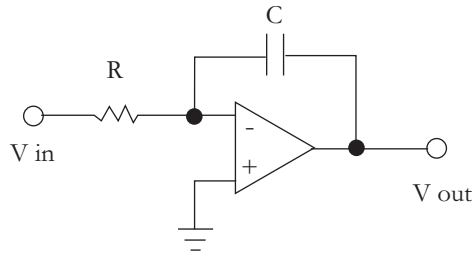
Integrador ideal

Figura 39. El A-O como integrador ideal.

Integra e invierte la señal (V_{in} y V_{out} son funciones dependientes del tiempo)

$$V_{out} = \int_0^t -\frac{V_{in}}{RC} dt + V_{inicial}$$

$V_{inicial}$ es la tensión de salida en el origen de tiempos

Nota: El integrador no se usa en la práctica de forma discreta, ya que cualquier señal pequeña de DC en la entrada puede ser acumulada en el capacitor hasta saturarlo por completo. Este circuito se usa de forma combinada en sistemas retroalimentados que son modelos basados en variables de estado (valores que definen el estado actual del sistema), donde el integrador conserva una variable de estado en el voltaje de su capacitor.

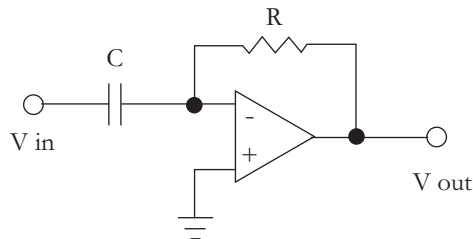
Derivador ideal (Figura 40)

Figura 40. El A-O como derivador ideal.

Deriva e invierte la señal respecto al tiempo

$$V_{out} = -RC \frac{dV_{in}}{dt}$$

Este circuito también se usa como filtro

Nota: Es un circuito que no se utiliza en la práctica porque no es estable. Esto se debe a que al amplificar más las señales de alta frecuencia se termina amplificando mucho el ruido.

Convertor de corriente a voltaje

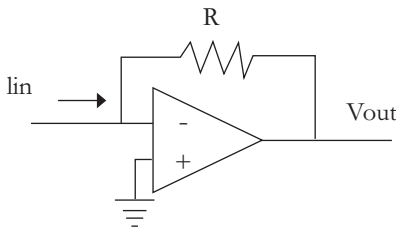


Figura 41. El A-O como convertor de corriente a voltaje.

El convertor de corriente a voltaje (Figura 41) se conoce también como amplificador de trans-impedancia. Llegada a éste una corriente (I_{in}), la transforma en un voltaje proporcional a ésta, con una impedancia de entrada muy baja, ya que está diseñado para trabajar con una fuente de corriente.

Con el resistor R como factor de proporcionalidad, la relación resultante entre la corriente de entrada y el voltaje de salida es:

$$V_{out} = -R \cdot I_{in}$$

Función exponencial y logarítmica

El logaritmo y su función inversa, la función exponencial, son ejemplos también de configuraciones no lineales (Figura 42), las cuales aprovechan

el funcionamiento exponencial del diodo, logrando una señal de salida proporcional al logaritmo o a la función exponencial de la señal de entrada.

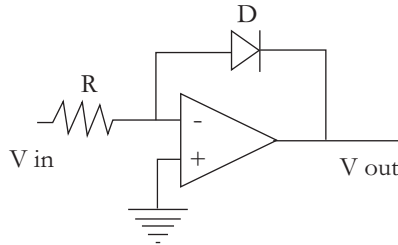


Figura 42. El A-O en configuración logarítmica.

La señal de entrada desarrollará una corriente proporcional al logaritmo de su valor en el diodo en aproximación. Ello en conjunto con la resistencia de salida R, la dependencia de la tensión de salida (V_{out}) como producto de la tensión de entrada (V_{in}) es:

$$V_{out} = -m \cdot \ln \left(\frac{V_{in}}{n \cdot R} \right)$$

Los factores n y m son factores de corrección que se determinan por la temperatura y de los parámetros de la ecuación del diodo.

Para lograr la potenciación, simplemente se necesita cambiar la posición del diodo y de la resistencia para dar lugar a una nueva función; esta ecuación también acompañada por los factores de corrección n y m (Figura 43), muestra la siguiente dependencia de la tensión de salida con relación a la de entrada:

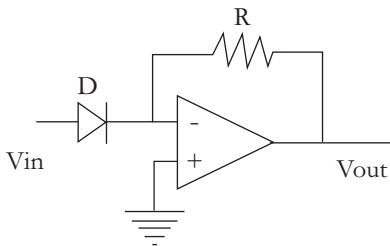


Figura 43. El A-O en configuración de función exponencial.

$$V_{out} = -n \cdot R \cdot e^{\frac{V_{in}}{m}}$$

En la práctica la realización de estas funciones en un circuito son más complicadas de construir, y en vez de usarse un diodo se conectan transistores bipolares para minimizar cualquier efecto no deseado, como es generalmente la temperatura donde se trabaja. No obstante, queda claro que el principio de funcionamiento de la configuración queda inalterado.

En la realización de estos circuitos también podrían hacerse conexiones múltiples. Por ejemplo, en el amplificador antilogarítmico las multiplicaciones son adiciones, mientras que en el logarítmico las adiciones son multiplicaciones. A partir ello, por ejemplo, se podrían realizar la combinación de dos amplificadores logarítmicos, seguidos de un sumador, y a la salida, un antilogarítmico, con lo cual se habría logrado un multiplicador analógico en el que la salida es el producto de las dos tensiones de entrada.

Otros

- Osciladores
- Convertidores carga-tensión
- Filtros activos
- Girador que permite construir convertidores de inmitancias (simular un inductor empleando un condensador, por ejemplo).

Aplicaciones

- Calculadoras analógicas
- Filtros
- Preamplificadores y buffers de audio y video
- Reguladores
- Conversores
- Evitar el efecto de carga
- Adaptadores de niveles (por ejemplo CMOS y TTL)

Estructura interna del 741

Los diseños varían entre cada fabricante y cada producto, pero todos los A-O tienen básicamente la misma estructura interna, que consiste en tres etapas:

1. Amplificador diferencial: es la etapa de entrada que proporciona una baja amplificación del ruido y gran impedancia de entrada. Suele tener una salida diferencial.
2. Amplificador de tensión: proporciona una ganancia de tensión.
3. Amplificador de salida: proporciona la capacidad de suministrar la corriente necesaria, tiene una baja impedancia de salida y, usualmente, protección frente a cortocircuitos. Como se ve en la Figura 44.

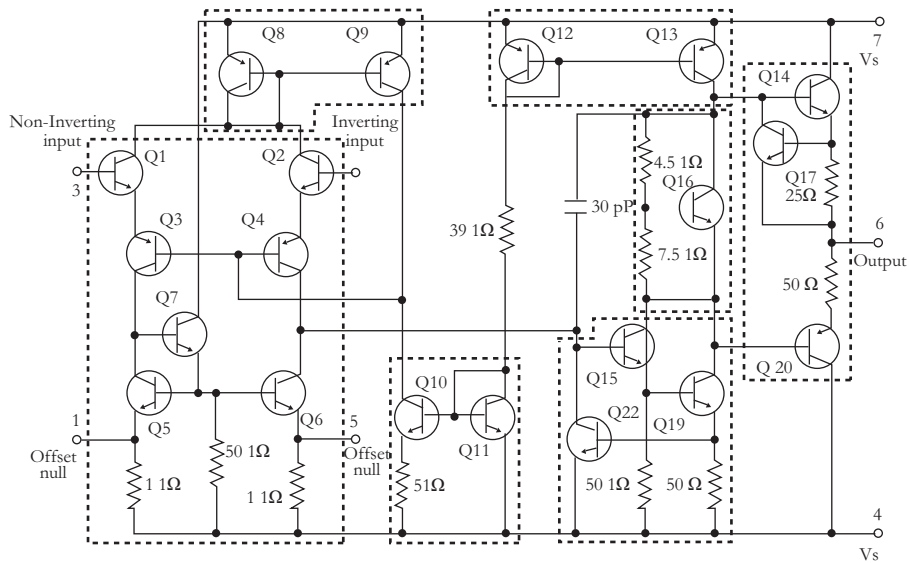


Figura 44. Diagrama electrónico del A-O 741.

Circuito de polarización de salida

El bloque delineado donde se encuentra el transistor Q16 es un desplazador de nivel de tensión (o multiplicador de V_{be}); un tipo de fuente de tensión. En

el circuito se puede ver que Q16 suministra una caída de tensión constante entre colector y emisor independientemente de la corriente que lo atraviesa. Si la corriente de base del transistor es despreciable, y la tensión entre base y emisor (y a través de la resistencia de $7.5\text{ k}\Omega$) es 0.625 V (un valor típico para un BJT en la región activa), entonces la corriente que atraviesa la resistencia de $4.5\text{ k}\Omega$ será la misma que atraviesa $7.5\text{ k}\Omega$, y generará una tensión de 0.375 V . Esto mantiene la caída de tensión en el transistor, y las dos resistencias en $0.625 + 0.375 = 1\text{ V}$, lo cual sirve para polarizar los dos transistores de salida ligeramente en condición reduciendo la distorsión “crossover”. En algunos amplificadores con componentes discretos esta función se logra con (generalmente dos en serie) diodos de silicio.

- Algunos dispositivos (uA748, LM301, LM308) no tienen compensación interna (necesitan un condensador externo entre la salida y algún punto intermedio en el amplificador operacional, si se utilizan en aplicaciones de baja ganancia de lazo cerrado).
- Algunos dispositivos modernos tienen excursión completa de salida entre las tensiones de alimentación (menos unos pocos milivolts).

Parámetros

- *Ganancia en lazo abierto*. Indica la ganancia de tensión en ausencia de realimentación. Se puede expresar en unidades naturales (V/V , V/mV) o logarítmicas (dB). Son valores habituales 100.000 a $1.000.000\text{ V/V}$.
- *Tensión en modo común*. Es el valor medio de tensión aplicado a ambas entradas del operacional.
- *Tensión de Offset*. Es la diferencia de tensión aplicada a través de resistencias iguales, entre las entradas de un operacional que hace que su salida tome el valor cero.
- *Corriente de Offset*. Es la diferencia de corriente entre las dos entradas del operacional que hace que su salida tome el valor cero.
- *Margen de entrada diferencial*. Es la mayor diferencia de tensión entre las entradas del operacional que mantienen el dispositivo dentro de las especificaciones.

- *Corrientes de polarización (Bias) de entrada.* Corriente media que circula por las entradas del operacional en ausencia de señal.
- *Slew rate.* Es la relación entre la variación de la tensión de salida máxima respecto de la variación del tiempo. El amplificador será mejor cuanto mayor sea el *Slew Rate*. Se mide en $V/\mu s$, $kV/\mu s$ o similares. El slew rate está limitado por la compensación en frecuencia de la mayoría de los amplificadores operacionales. Existen amplificadores no compensados (con mayor slew rate) usados principalmente en comparadores, y en circuitos osciladores, debido de hecho a su alto riesgo de oscilación.
- *Relación de Rechazo en Modo Común (RRMC, o CMRR en sus siglas en inglés).* Relación entre la ganancia en modo diferencial y la ganancia en modo común.

Limitaciones

Saturación

Un A-O típico no puede suministrar más de la tensión a la que se alimenta, normalmente el nivel de saturación es del orden del 90% del valor con que se alimenta. Cuando se da este valor se dice que satura, pues ya no está amplificando. La saturación puede ser aprovechada por ejemplo en circuitos comparadores.

Característica tensión-frecuencia

Al A-O típico también se le conoce como amplificador realimentado en tensión (VFA). En él hay una importante limitación respecto a la frecuencia: el producto de la ganancia en tensión por el ancho de banda es constante.

Como la ganancia en lazo abierto es del orden de 100.000, un amplificador con esta configuración sólo tendría un ancho de banda de unos pocos Hercios. Al realimentar negativamente se baja la ganancia a valores del orden de 10 a cambio de tener un ancho de banda aceptable. Existen modelos de diferentes A-O para trabajar en frecuencias superiores. En

estos amplificadores prima mantener las características a frecuencias más altas que el resto, sacrificando a cambio un menor valor de ganancia u otro aspecto técnico.

3.2 Operación con equipos de control por medio de tiristores y TRIACS

1. La siguiente alarma para auto funciona con el muy conocido circuito integrado LM555 conectado en configuración monoestable.

El primer 555 provee el tiempo necesario de retardo para poder salir del auto, y se activa por el conductor antes de salir del mismo presionando el interruptor (switch) de salida.

El tiempo de retardo sólo funciona con la puerta del conductor.

Al presionar este interruptor se dispara el primer temporizador 555, poniendo a su salida (pin 3) un nivel alto por el tiempo establecido por R_a y C_a . Simultáneamente se activa el SCR que conduce y lleva el extremo izquierdo del resistor de 1k a 0 voltios. Hay que notar que con esto no se ha disparado en ningún momento el segundo 555, pues su pin 2 (TRI) de activación no ha pasado a nivel bajo (cerca a los 0 voltios), como se ve en la Figura 45.

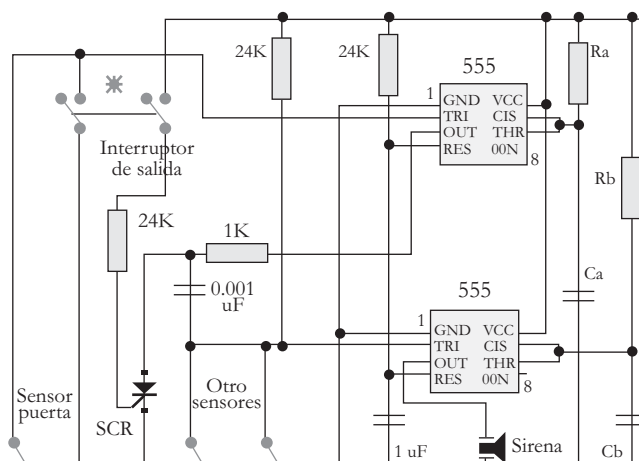


Figura 45. Diagrama de alarma de auto con temporizador 555 y tiristor SCR.

Este pin (pin 2) está a 12 voltios a través del resistor de 24 Kohmios. El capacitor de 0.001 uF está cargado todo el tiempo a 12 Voltios.

2. Temporizador luces escalera (Figura 46). El circuito es bien simple y consta de sólo dos elementos activos. El primero, un temporizador 555, el cual está configurado en nuestro caso como monoestable. Luego éste gobierna un triac, que hace las veces de conmutador de potencia.

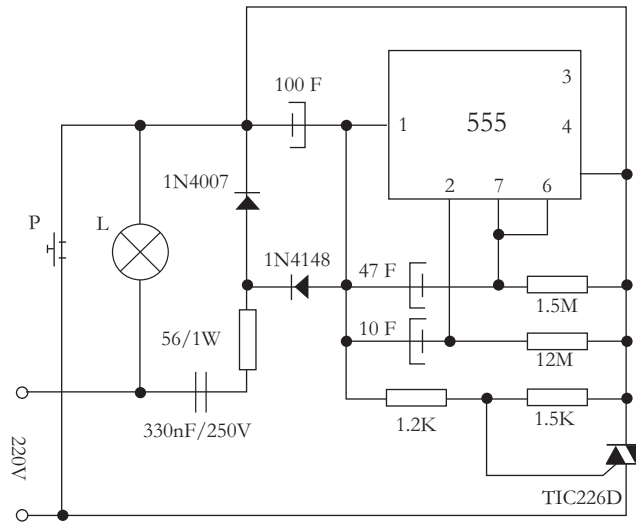


Figura 46. Diagrama del temporizador con 555 y TRIAC.

Si se superan los 500W de consumo se debe colocar disipador térmico al TRIAC.

3. Control de carga con TRIAC y optoacoplador. Este diagrama (Figura 47) es un control básico de carga de C.A. comúnmente conocido como dimmer para controlar intensidad luminosa de lámparas incandescentes.

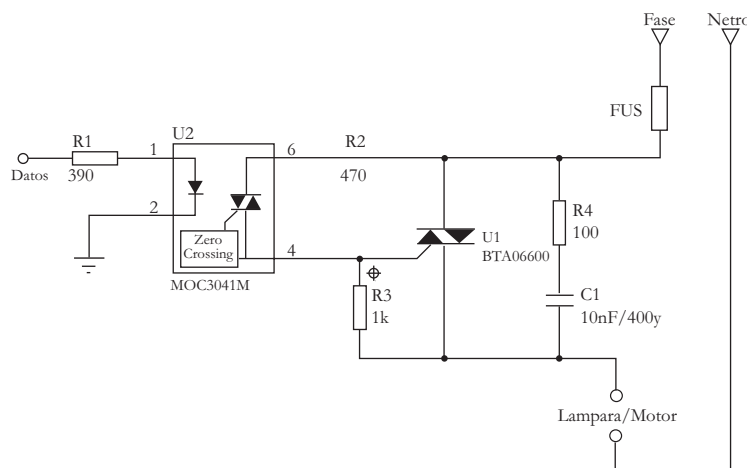


Figura 47. Diagrama de control de carga con optoacoplador y TRIAC.

4. Este proyecto permite manejar cargas de corriente alterna, por ejemplo una lámpara incandescente o un pequeño motor, desde un circuito electrónico que genera señales de control de bajo nivel.

Un relé de estado sólido, como su nombre lo indica, es un dispositivo que utiliza un interruptor de estado sólido (por ejemplo un transistor o un tiristor), en lugar de contactos mecánicos (como los de los relés normales), para conmutar cargas de potencia a partir de señales de control de bajo nivel. Estas últimas pueden provenir, por ejemplo, de circuitos digitales, y estar dirigidas a motores, lámparas, solenoides, calefactores, etc. El aislamiento entre los circuitos de control y la etapa de potencia lo proporciona generalmente un optoacoplador. La conmutación propiamente dicha puede ser realizada por transistores bipolares, MOSFETs de potencia, TRIACS, SCRs, etcétera.

Un relé de estado sólido ofrece varias ventajas notables respecto a los tradicionales relés y contactores electromecánicos: son más rápidos, silenciosos, livianos y confiables, no se desgastan, son inmunes a los choques y a las vibraciones, pueden conmutar altas corrientes y altos voltajes sin producir arcos ni ionizar el aire circundante, generan muy poca interferencia, proporcionan varios kilovoltios de aislamiento entre la entrada y la salida,

etc. El proyecto es un relé de estado sólido cuya salida se hace a través de un TRIAC, por lo tanto, está destinado a manejar cargas de corriente alterna. En la Figura 48 se muestra el diagrama esquemático del circuito.

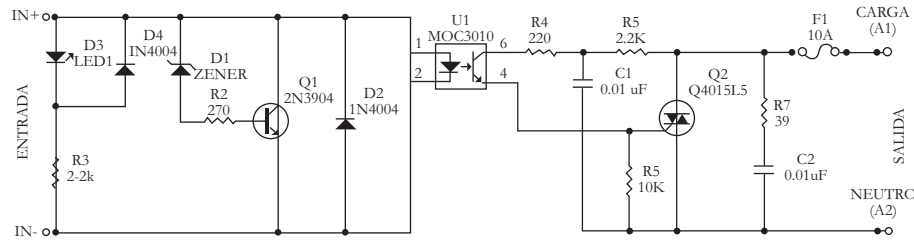


Figura 48. Diagrama de control de carga de C.A. con TRIAC.

5. Un secuenciador de luces es un circuito que maneja una determinada cantidad de lámparas distribuidas en distintas formas para dar la sensación visual de luces en movimiento.

Antes de la aparición de los circuitos integrados digitales, estos secuenciadores se construían con un motor de baja velocidad que llevaba en su eje una escobilla, la cual activaba secuencialmente unos contactos eléctricos fijos situados a su alrededor.

Estos contactos servían de interruptores para las lámparas. Este sistema funciona bien pero tiene la desventaja del desgaste mecánico de los contactos, lo cual con el tiempo produce un mal funcionamiento del circuito.

Descripción del proyecto

La Figura 49 muestra el diagrama de bloques completo del circuito. Está formado por una etapa de control, un bloque de interfase y una etapa de potencia.

La etapa de control la conforman tres bloques: el reloj, el contador y el decodificador.

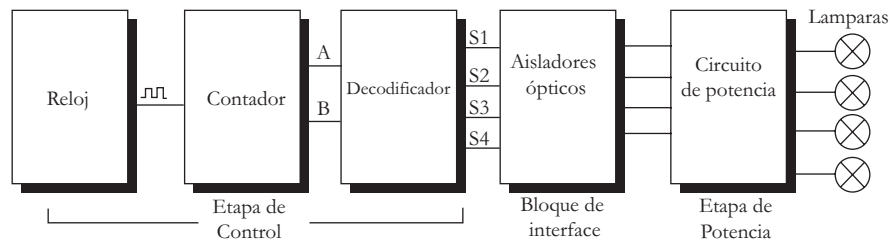


Figura 49. Son las salidas de la etapa de control ($n=1, 2, 3, 4$).

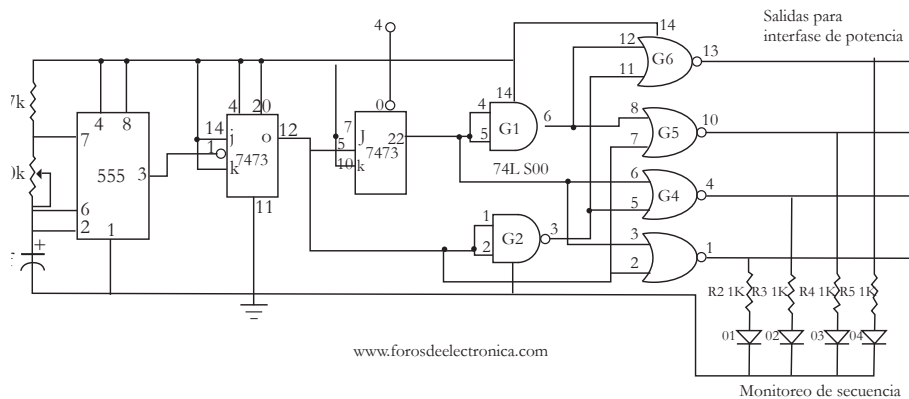
Podemos ver en la sección del circuito que se le pone un fusible como medida de protección, ya que estamos trabajando con potencia, entonces el sistema por lo menos debe tener un fusible en general. Si ampliaríamos el sistema se debería instalar un fusible por canal.

Para calcular la corriente del fusible se utiliza lo siguiente:

$$I_{\text{fusible}} = 1.25 \times I_{\text{circuito}}$$

$$I_{\text{fusible}} = 3,4 \text{ A}$$

Como este valor no es comercial, debe usarse un fusible ligeramente mayor (Figura 50).



Continúa...

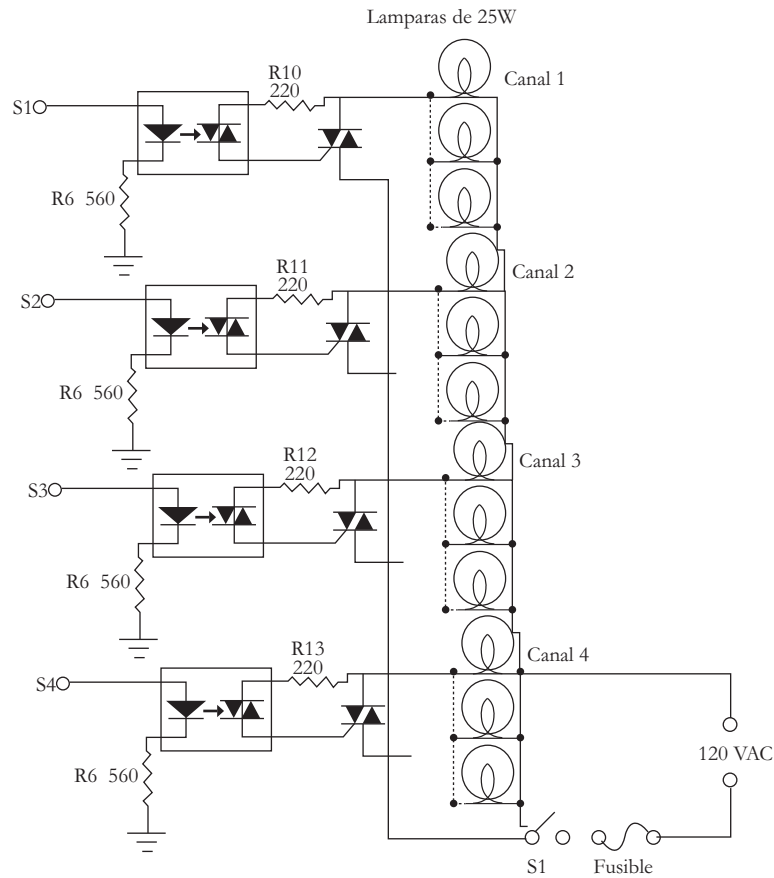


Figura 50. Diagramas de secuenciador de luces.

Luces rítmicas

Cada canal controla una salida de 220 voltios en función de una frecuencia fundamental. Dado que el funcionamiento y esquema de los canales es idéntico, se mostrará y explicará sólo uno.

La señal de audio se inyecta al circuito a través del potenciómetro R1. Luego ingresa a un filtro pasa-bajo formado por C3 y R7 en el primer canal. Nótese que los valores de capacidad deberán de ser distintos en el filtro pasa-bajo, por tanto cada canal poseerá distinta frecuencia de corte. Para

estos valores las frecuencias están prefijadas para bajos, medios y agudos, como se ve en la Figura 51.

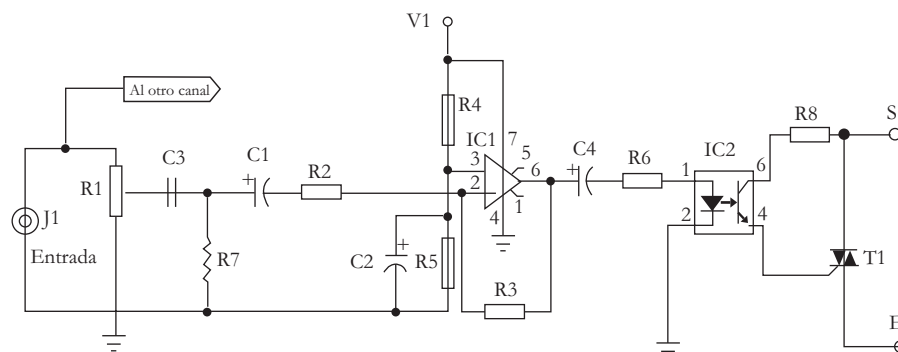


Figura 51. Diagrama de luces rítmicas con amplificador operacional (A-O) y TRIAC.

Luego del filtro la señal es amplificada por IC1 y a través de IC2 aísla el circuito de los 220 voltios de red. Finalmente T1 actúa como conmutador para encender o apagar las lámparas.

3.3 Aplicación en variadores de velocidad

Variador de velocidad

El Variador de Velocidad (VSD, por sus siglas en inglés *Variable Speed Drive*) es, en un sentido amplio, un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores. También es conocido como Accionamiento de Velocidad Variable (ASD, también por sus siglas en inglés *Adjustable-Speed Drive*). De igual manera, en ocasiones es denominado mediante el anglicismo Drive, costumbre que se considera inadecuada.

La maquinaria industrial generalmente es accionada a través de motores eléctricos, a velocidades constantes o variables, pero con valores precisos. No obstante, los motores eléctricos generalmente operan a velocidad constante o cuasi-constante, y con valores que dependen de la alimentación y

de las características propias del motor, los cuales no se pueden modificar fácilmente. Para lograr regular la velocidad de los motores, se emplea un controlador especial que recibe el nombre de variador de velocidad. Los variadores de velocidad se emplean en una amplia gama de aplicaciones industriales, como en ventiladores y equipo de aire acondicionado, equipo de bombeo, bandas y transportadores industriales, elevadores, llenadoras, tornos y fresadoras, etcétera.

Un variador de velocidad puede consistir en la combinación de un motor eléctrico y el controlador que se emplea para regular la velocidad del mismo. La combinación de un motor de velocidad constante y de un dispositivo mecánico que permita cambiar la velocidad de forma continua (sin ser un *motor paso a paso*) también puede ser designado como variador de velocidad.

Necesidades para emplear variadores de velocidad

El control de procesos y el ahorro de la energía son dos de las principales razones para el empleo de variadores de velocidad. Históricamente, los variadores de velocidad fueron desarrollados originalmente para el control de procesos, pero el ahorro energético ha surgido como un objetivo tan importante como el primero (Figura 52).

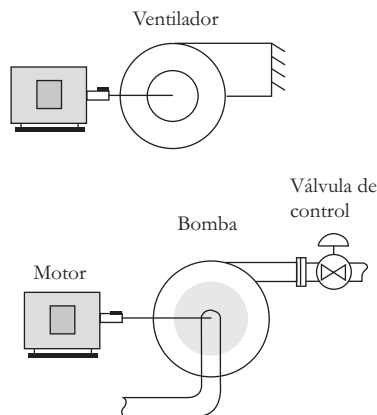


Figura 52. Aplicaciones de los variadores en bombas y ventiladores.

Velocidad como una forma de controlar un proceso

Entre las diversas ventajas en el control del proceso proporcionadas por el empleo de variadores de velocidad destacan:

- Operaciones más suaves
- Control de la aceleración
- Distintas velocidades de operación para cada fase del proceso
- Compensación de variables en procesos variables
- Permitir operaciones lentas para fines de ajuste o prueba
- Ajuste de la tasa de producción
- Permitir el posicionamiento de alta precisión
- Control del Par motor (torque)

Ahorro de energía mediante el uso de variadores de velocidad

Un equipo accionado mediante un variador de velocidad emplea generalmente menor energía que si dicho equipo fuera activado a una velocidad fija constante. Los ventiladores y bombas representan las aplicaciones más llamativas. Por ejemplo, cuando una bomba es impulsada por un motor que opera a velocidad fija, el flujo producido puede ser mayor al necesario. Para ello, el flujo podría regularse mediante una válvula de control dejando estable la velocidad de la bomba, pero resulta mucho más eficiente regular dicho flujo controlando la velocidad del motor, en lugar de restringirlo por medio de la válvula, ya que el motor no tendrá que consumir una energía no aprovechada.

Tipos de variadores de velocidad

En términos generales, puede decirse que existen tres tipos básicos de variadores de velocidad: mecánicos, hidráulicos y eléctrico-electrónicos. Dentro de cada tipo pueden encontrarse más subtipos, que se detallarán a continuación. Cabe aclarar que los variadores más antiguos fueron los

mecánicos, que se emplearon originalmente para controlar la velocidad de las ruedas hidráulicas de molinos y la velocidad de las máquinas de vapor.

Los variadores de velocidad mecánicos e hidráulicos generalmente son conocidos como transmisiones cuando se emplean en vehículos, equipo agroindustrial o algunos otros tipos de maquinaria.

Variadores mecánicos

Variador de paso ajustable: este dispositivo emplea poleas y bandas en las cuales el diámetro de una o más poleas puede ser modificado.

Variador de tracción: transmite potencia a través de rodillos metálicos. La relación de velocidades de entrada/salida se ajusta moviendo los rodillos para cambiar las áreas de contacto entre ellos y así la relación de transmisión.

Variadores hidráulicos

- *Variador hidrostático:* consta de una bomba hidráulica y un motor hidráulico (ambos de desplazamiento positivo). Una revolución de la bomba o el motor corresponde a una cantidad bien definida de volumen del fluido manejado. De esta forma la velocidad puede ser controlada mediante la regulación de una válvula de control, o bien, cambiando el desplazamiento de la bomba o el motor.
- *Variador hidrodinámico:* emplea aceite hidráulico para transmitir par mecánico entre un impulsor de entrada (sobre un eje de velocidad constante) y un rotor de salida (sobre un eje de velocidad ajustable). También llamado acoplador hidráulico de llenado variable.
- *Variador hidrovíscoso:* consta de uno o más discos conectados con un eje de entrada, los cuales estarán en contacto físico (pero no conectados mecánicamente) con uno o más discos conectados al eje de salida. El par mecánico (torque) se transmite desde el eje de entrada al de salida a través de la película de aceite entre los discos. De esta forma, el par transmitido es proporcional a la presión ejercida por el cilindro hidráulico que presiona los discos.

Variadores eléctrico-electrónicos

Existen cuatro categorías de variadores de velocidad eléctrico-electrónicos:

- Variadores para motores de CC.
- Variadores de velocidad por corrientes de Eddy.
- Variadores de deslizamiento.
- Variadores para motores de CA (también conocidos como variadores de frecuencia).

Los variadores eléctrico-electrónicos incluyen tanto el controlador como el motor eléctrico, sin embargo es práctica común emplear el término variador únicamente al controlador eléctrico.

Los primeros variadores de esta categoría emplearon la tecnología de los tubos de vacío. Con los años se han ido incorporando dispositivos de estado sólido, lo cual ha reducido significativamente el volumen y costo, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los dispositivos.

Variadores para motores de CC

Estos variadores permiten controlar la velocidad de motores de corriente continua serie, derivación, compuesto y de imanes permanentes. Para el caso de cualquiera de las máquinas anteriores se cumple la siguiente expresión:

$$V_t = K \cdot F_M \cdot N_m \dots \quad (1)$$

Donde:

- V_t es el voltaje terminal (V)
- K es la constante de la máquina
- F_M Flujo magnético producido por el campo (Wb)
- N_m Velocidad mecánica (rpm)

Despejando la velocidad mecánica, se obtiene:

$$Nm = \frac{Vt}{K \cdot FM} \quad (2)$$

Entonces, de (2) puede observarse que la velocidad mecánica de un motor de CC es directamente proporcional al voltaje terminal (VT) e inversamente proporcional al flujo magnético (FM), el cual a su vez depende de la corriente de campo (IF). Aprovechando esta situación es que este tipo de variadores puede controlar la velocidad de un motor de CC: controlando su voltaje terminal, o bien, manipulando el valor de la corriente de campo.

Variadores por corrientes de Eddy

Un variador de velocidad por corrientes de Eddy consta de un motor de velocidad fija y un embrague de corrientes de Eddy. El embrague contiene un rotor de velocidad fija (acoplado al motor) y un rotor de velocidad variable, separados por un pequeño entrehierro. Se cuenta, además, con una bobina de campo, cuya corriente puede ser regulada, la cual produce un campo magnético que determinará el par mecánico transmitido del rotor de entrada al rotor de salida. De esta forma, a mayor intensidad de campo magnético, mayor par y velocidad transmitidos, y a menor campo magnético menores serán el par y la velocidad en el rotor de salida. El control de la velocidad de salida de este tipo de variadores generalmente se realiza por medio de lazo cerrado, utilizando como elemento de retroalimentación un tacómetro de CA.

Variadores de deslizamiento

Este tipo de variadores se aplica únicamente para los motores de inducción de rotor devanado. En cualquier *motor de inducción*, la velocidad mecánica (nM) puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$Nm = \frac{120 \cdot f \cdot (1 - s)}{P} \quad (3)$$

Donde s es el deslizamiento del motor, cuyo valor oscila entre 0 y 1. De esta forma, a mayor deslizamiento, menor velocidad mecánica del motor. El deslizamiento puede incrementarse al aumentar la resistencia del devanado del rotor, o bien, al reducir el voltaje en el devanado del rotor. De esta forma es que puede conseguirse el control de la velocidad en los motores de inducción de rotor devanado. Sin embargo, este tipo de variadores es de menor eficiencia que otros, razón por la cual en la actualidad tiene muy poca aplicación.

Variadores para motores de CA

Los variadores para motores de CA o frecuencia (siglas AFD, del inglés Adjustable Frequency Drive; o bien VFD Variable Frequency Drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado) como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (4)$$

Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$N_m = \frac{120 \cdot f (1-s)}{P} \quad (5)$$

Donde:

- N_s = velocidad síncrona (rpm)
- N_m = velocidad mecánica (rpm)
- f = frecuencia de alimentación (Hz)
- s = deslizamiento (adimensional)
- P = número de polos

Como puede verse en las expresiones (4) y (5), la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

Estos variadores mantienen la razón Voltaje/Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor, y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

UNIDAD 4

CONTROL ELECTRÓNICO DE MOTORES A PASOS

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD
--

El alumno construirá circuitos electrónicos para el control de motores a pasos.

Introducción

HOY EN DÍA, EN LA MAYORÍA DE APLICACIONES de control o robótica se encuentran presentes los motores paso a paso, principalmente donde se requieren movimientos precisos.

Un motor “paso a paso” (“P-P”) es un dispositivo electromecánico capaz de convertir una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos. Esto significa que, a diferencia de un motor convencional (que gira de forma continua), es capaz de avanzar una serie de grados (o pasos) a la vez, dependiendo del estado de sus entradas de control. Un motor paso a paso se comporta de la misma manera que un convertidor digital-analógico y puede ser gobernado por impulsos procedentes de sistemas lógicos, como microcontroladores o computadoras.

Existen al menos tres tipos fundamentales de motores paso a paso: el llamado motor de reluctancia variable, el motor de magnetización permanente y el motor paso a paso híbrido.

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan sólo 1.8° , es decir, que se

necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 en el segundo caso (1.8°) para completar un giro de 360° .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición, o bien, totalmente libres. Si una o más de sus bobinas está energizada, el motor quedará enclavado en la posición correspondiente y, por el contrario, estará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas. En este capítulo se estudiarán solamente los motores P-P del tipo de imán permanente, ya que son los más usados en robótica.

Principio de funcionamiento

Básicamente, estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van colocados distintos imanes permanentes y un cierto número de bobinas excitadoras, embobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.

Los motores paso a paso están constituidos por dos partes: una fija, llamada estator, y una móvil, llamada rotor.

El estator está construido con base en una serie de cavidades en las que se ubican las bobinas. Cuando una corriente eléctrica atraviesa una de estas bobinas, se forman los polos norte-sur necesarios para impulsar el motor.

El rotor puede basarse en un imán permanente o un inducido ferromagnético, siempre con el mismo número de pares de polos que el contenido en una sección de la bobina del estator. Todo esto se monta sobre un eje que a su vez se apoya en dos cojinetes que le permiten girar libremente.

Si las bobinas se energizan en el orden y con la frecuencia adecuados, se puede hacer que el motor avance un paso en uno u otro sentido. Para ello se necesita de un sistema de control adecuado: ahí es donde se puede hacer uso de un microcontrolador. Con el programa adecuado se consigue excitar el estator, creando los polos N-S. Al variar dicha excitación, de modo que el campo magnético formado efectúe un movimiento giratorio, el motor seguirá el movimiento de dicho campo, produciéndose, así, el giro del rotor.

Otra característica importante es que estos motores poseen la habilidad de quedar “enclavados” en una posición determinada. De tal forma que si una o más de sus bobinas están alimentadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente. Si, por el contrario, no circula corriente por ninguna de sus bobinas, el rotor queda totalmente libre.

4.1 Procedimientos para controlar un motor a pasos

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor, sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes, y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator.

Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente. Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador.

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente.

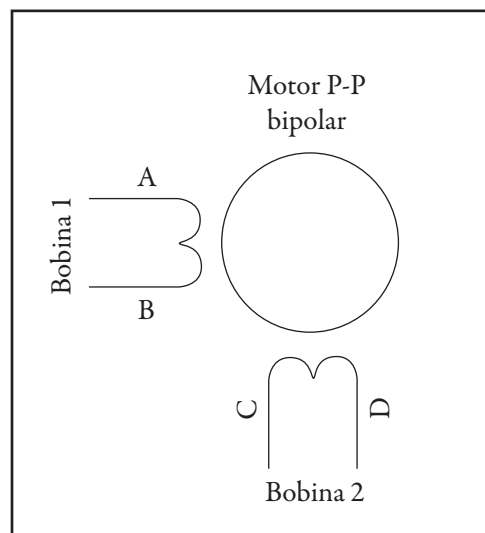


Figura 1. Motor P-P bipolar.

Bipolar: éstos tienen generalmente cuatro cables de salida (Figura 1). Necesitan ciertos arreglos para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de control de estos motores mediante el uso de un puente en H (H-Bridge). Como se aprecia, será necesario un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), se necesitan dos puentes H iguales al de la Figura 2. En general es recomendable el uso de puentes H integrados, como en los casos del L293 (véase Figura 3).

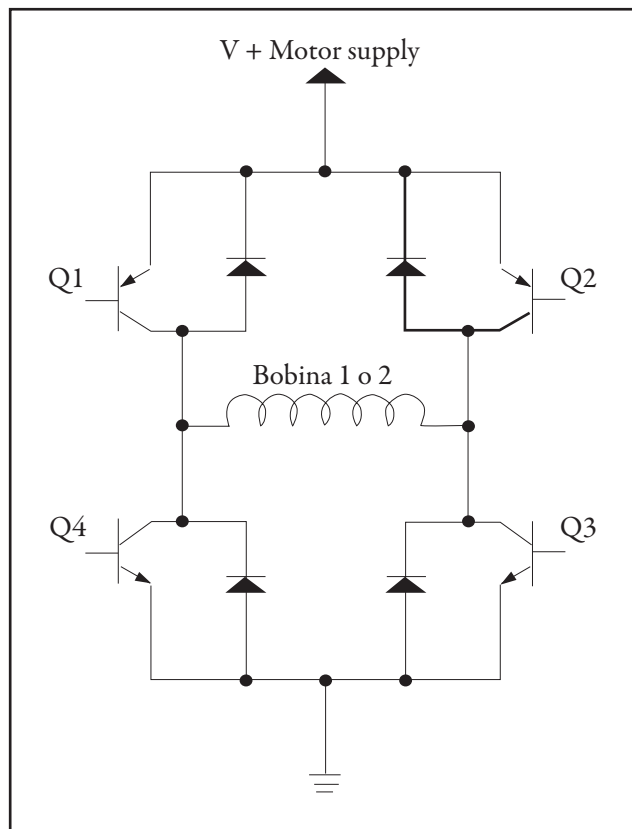


Figura 2. Puente en H (H-Bridge).

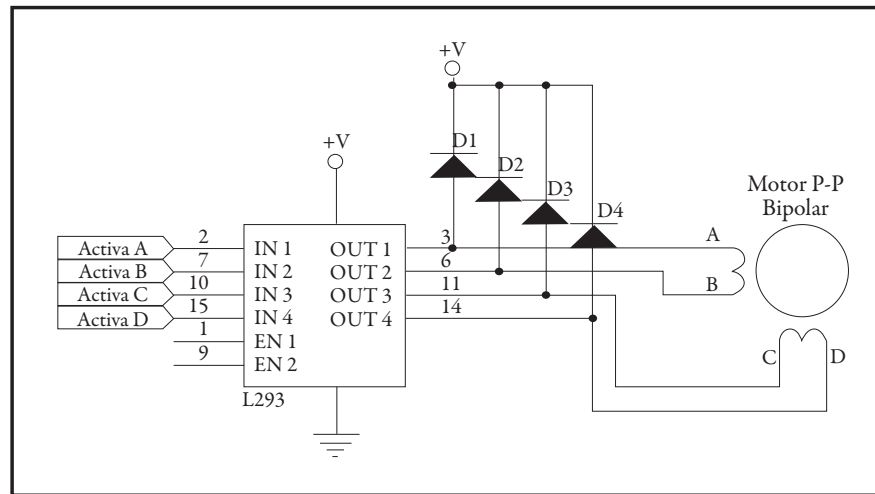


Figura 3. Circuito integrado de Puente en H (H-Bridge).

Unipolar: estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexionado interno (véase Figura 4). Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar. En la Figura 5 se puede apreciar un ejemplo de conexionado para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, el cual es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (activa A, B, C y D) pueden ser directamente activadas por un microcontrolador.

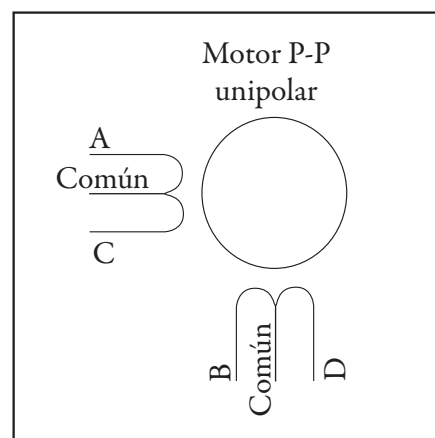


Figura 4. Motor P-P unipolar.

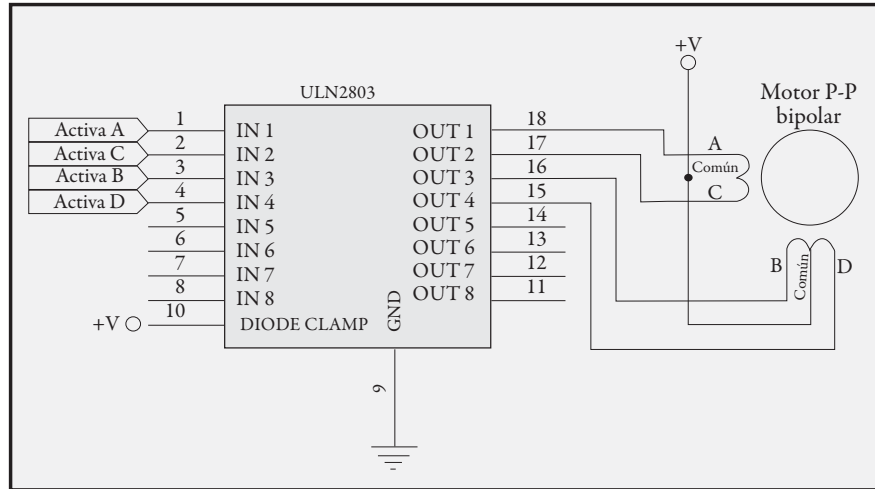


Figura 5. Motor P-P unipolar controlado por circuito integrado.

Secuencias para manejar motores paso a paso bipolares

Como se dijo anteriormente, estos motores necesitan la inversión de la corriente que circula en sus bobinas en una secuencia determinada. Cada inversión de la polaridad provoca el movimiento del eje en un paso, cuyo sentido de giro está determinado por la secuencia seguida.

A continuación se puede ver la Tabla 1 con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo bipolares.

Tabla 1
Secuencia para controlar motores P-P bipolares

Paso	Terminales			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares

Existen tres secuencias posibles para este tipo de motores, las cuales se detallan a continuación. Todas las secuencias comienzan nuevamente por el paso 1 una vez alcanzado el paso final (4 u 8). Para revertir el sentido de giro, simplemente se deben ejecutar las secuencias en modo inverso.

Secuencia normal. Ésta es la secuencia más usada y la que generalmente recomienda el fabricante. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez, y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención (Tabla 2).

Tabla 2
Secuencia normal para controlar motores P-P unipolares

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

Secuencia del tipo wave drive. En esta secuencia se activa sólo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. La contrapartida es que al estar sólo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor (Tabla 3).

Tabla 3
Secuencia wave drive para controlar motores P-P unipolares

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

Secuencia del tipo medio paso. En esta secuencia se activan las bobinas para brindar un movimiento igual a la mitad del paso real. Para ello se activan

primero dos bobinas y luego sólo una, y así sucesivamente. En la Tabla 4 se observa la secuencia completa que consta de 8 movimientos en lugar de 4.

Tabla 4
Secuencia del tipo medio paso para controlar motores P-P unipolares

Paso	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	

Continúa...

<i>Paso</i>	<i>Bobina A</i>	<i>Bobina B</i>	<i>Bobina C</i>	<i>Bobina D</i>	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

Es importante señalar que los motores paso a paso son dispositivos mecánicos y como tales deben vencer ciertas inercias; el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta. En tal sentido el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas:

- Puede que no realice ningún movimiento en absoluto.
- Puede comenzar a vibrar pero sin llegar a girar.
- Puede girar erráticamente.
- Puede llegar a girar en sentido opuesto.

Para obtener un arranque suave y preciso, es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada, sin superar la máxima tolerada. El giro en reversa deberá

también ser realizado previamente bajando la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación.

Una referencia importante

Cuando se trabaja con motores P-P usados o nuevos, pero de los cuales no tenemos hojas de datos, es posible averiguar la distribución de los cables a los bobinados y el cable común en un motor de paso unipolar de 5 o 6 cables siguiendo las instrucciones que se detallan a continuación.

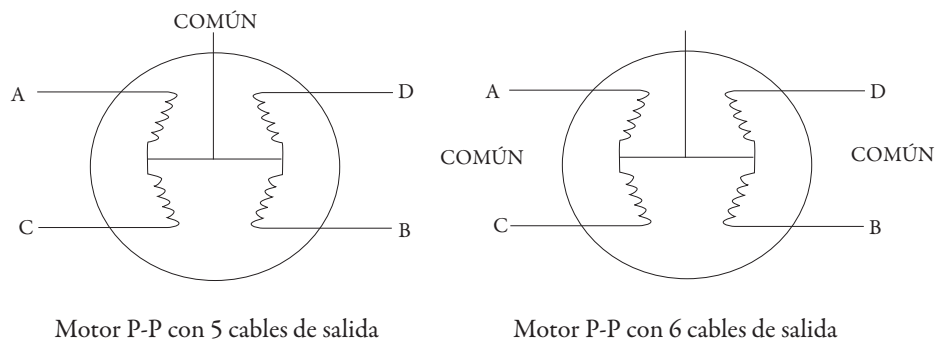


Figura 6. Distribución de los cables.

1. Aislado el (los) cable(s) común(es) que va a la fuente de alimentación. Como se aprecia en la Figura 5, en el caso de motores con 6 cables, éstos poseen dos cables *comunes*, pero generalmente tienen el mismo color, por lo que lo mejor es unirlos antes de comenzar las pruebas, usando un multímetro para medir resistencia entre pares de cables; el cable común será el único que tenga la mitad del valor de la resistencia entre ella y el resto de los cables.
Esto es debido a que el cable *común* tiene una bobina entre él y cualquier otro cable, mientras que cada uno de los otros cables tienen dos bobinas entre ellos. De ahí la mitad de la resistencia medida en el cable *común*.

2. Identificando los cables de las bobinas (A, B, C y D): aplicar un voltaje al cable *común* (generalmente 12 volts, pero puede ser más o menos) y manteniendo uno de los otros cables a tierra (GND) mientras vamos poniendo a GND cada uno de los demás cables de forma alternada y observando los resultados. El proceso se puede apreciar en la Tabla 5.

Tabla 5
Procedimiento de identificación de cables

Seleccionar un cable y conectarlo a tierra. Será llamado cable A.	
Manteniendo el cable A conectado a tierra, probar cuál de los tres cables restantes provoca un paso en sentido antihorario al ser conectado también a GND. Será el cable B.	
Manteniendo el cable A conectado a masa, probar cuál de los dos cables restantes provoca un paso en sentido horario al ser conectado a tierra. Será el cable D.	
El último cable debería ser el cable C. Para comprobarlo, basta con conectarlo a tierra, lo que no debería generar movimiento alguno debido a que es la bobina opuesta a la A.	

Nota: La nomenclatura de los cables (A, B, C, D) es totalmente arbitraria.

Identificando los cables en motores P-P bipolares

Para el caso de motores paso a paso bipolares (generalmente de 4 cables de salida), la identificación es más sencilla. Simplemente tomando un multímetro en modo ohmetro (para medir resistencias) se pueden hallar los pares de cables que corresponden a cada bobina, debido a que entre ellos deberá haber continuidad (en realidad una resistencia muy baja). Luego sólo se determina la polaridad de la misma, la cual se obtiene fácilmente probando. Es decir, si conectado de una manera no funciona, simplemente se intercambian las conexiones de una de las bobinas y entonces ya debe funcionar correctamente. Si el sentido del giro es inverso a lo esperado, simplemente se deben invertir las conexiones de ambas bobinas y el puente H. Como referencia:

- Un motor de paso con 5 cables es, casi seguramente, de 4 fases y unipolar.
- Un motor de paso con 6 cables también puede ser de 4 fases y unipolar, pero con 2 cables comunes para alimentación, y éstos pueden ser del mismo color.
- Un motor de pasos con sólo 4 cables es comúnmente bipolar.

4.2 Aplicaciones

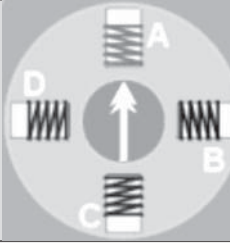
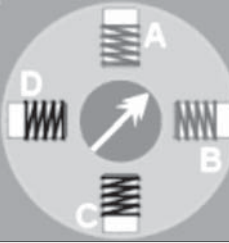
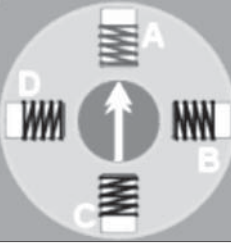
Entre las principales aplicaciones de estos motores se pueden mencionar la robótica en general, la tecnología aeroespacial, el control de discos duros, de discos flexibles (disquetes), unidades de CD-ROM o de DVD e impresoras de todo tipo. Todos estos aparatos, una vez desechados, pueden emplearse como fuente de motores P-P para utilizarlos en nuevos proyectos.

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos.

En los motores P-P se puede regular la velocidad y la dirección de giro como en los convencionales, pero tienen la gran diferencia de que se pueden dejar en una posición fija y se puede hacer un giro del número de grados o de vueltas que deseemos. El estator está hecho con varias bobinas y el rotor consta de un imán permanente con un número de polos que

depende del ángulo de cada paso. El número de pasos por vuelta de estos motores suele ser de 200, 96, 48 o 24. El giro del motor se hace conectando secuencialmente las bobinas y atrayendo hacia ellas al rotor. Dependiendo de cómo se vayan activando esas bobinas podemos hacer girar el motor de tres modos diferentes (Tabla 6).

Tabla 6
Modos de operación del motor P-P

		
Funcionamiento simple: las bobinas se activan una a una por separado; de esta forma se consigue un poco menos de fuerza pero el consumo es menor.	Funcionamiento doble: cada vez se activan dos bobinas, así el motor tiene más fuerza ya que son dos bobinas las que arrastran y sujetan el rotor.	Medio paso: es una mezcla de las dos anteriores; primero se activa una bobina y luego dos, así el ángulo de los pasos se reduce a la mitad al igual que la velocidad.

Ejemplo de circuito de aplicación. Características:

- Permite controlar dos motores unipolares con 4 pulsadores o desde el PC.
- Velocidad regulable desde 1 a 255 milisegundos por paso.
- Dirección seleccionable.
- Modo de avance de medio paso o de paso completo.
- Desde el PC podemos activar en modo *timer* para que pare al cabo de un tiempo de 1 a 255 minutos.
- Desde el PC podemos enviar comando de avance de un número de pasos de 1 a 255.

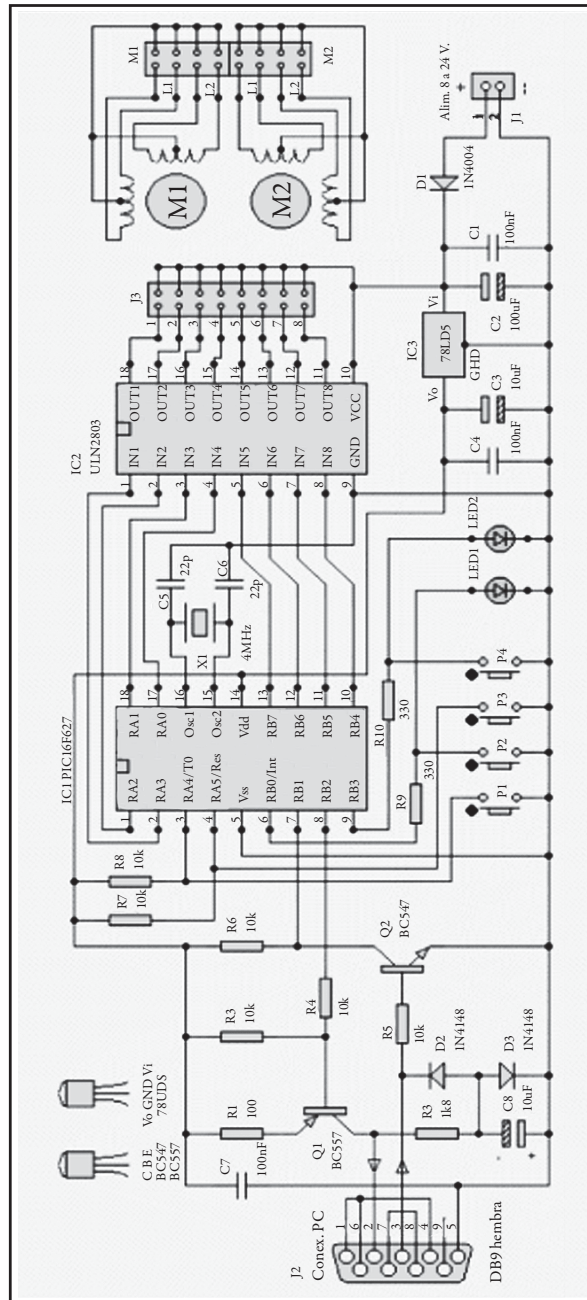


Figura 7. Motor P-P unipolar operado por microcontrolador.

El circuito de la Figura 7 se ha diseñado pensando en los motores unipolares, que son los más corrientes y más sencillos de manejar. El microcontrolador PIC16F627 es el componente principal, él se comunica con el PC a través de la UART a 9600 bps, recibe del PC las órdenes y contesta con el estado de los motores (velocidad, dirección, etc.). Como el número de pines del PIC es limitado, dos de ellos (PB0 y PB3) se han usado para la conexión de los pulsadores P2 y P4 y además para el control de los indicadores LED1 y LED2, éstos indican el estado de los motores, el LED1 indica el estado del motor 1 y el LED2 indica el estado del motor 2; si están parados los LEDs, estarán apagados; si los motores están en pausa, los LEDs estarán intermitentes; y si están en marcha, los LEDs estarán encendidos.

La alimentación del circuito debe ir de acuerdo con la tensión de los motores que vamos a usar. Se ha puesto el diodo D1 para proteger el circuito ante las inversiones de polaridad.

Funciones de los pulsadores. El pulsador P1 sirve para seleccionar el motor que vamos a controlar: si está sin apretar, controlamos el motor 1, y si está pulsado, controlaremos el motor 2; el resto de pulsadores P2, P3 y P4 nos permiten poner en marcha o parar el motor, variar la velocidad, etcétera.

Pulsador P1. Si no se pulsa se controla el motor 1 con el resto de pulsadores, si está apretado se controla el motor 2.

Pulsador P2. Disminuye la velocidad si el motor está en marcha, si está parado lo pone en pausa y cada pulsación avanza un paso, si se mantiene apretado, el motor girará continuamente a la izquierda.

Pulsador P3. A cada pulsación pone en marcha o para el motor. Si se pulsa más de 5 segundos graba en la memoria del PIC el estado actual de los motores (velocidad, dirección, etc.) y será como estarán al encender. Si se mantiene pulsado y al mismo tiempo se pulsa P1, la dirección del motor será a la izquierda, y si en lugar de P1 se pulsa P4, irá a la derecha.

Pulsador P4. Aumenta la velocidad si el motor está en marcha, si está parado lo pone en pausa y cada pulsación avanza un paso; si se mantiene apretado el motor girará continuamente a la derecha.

Configuración del tipo de avance. Se enciende el circuito manteniendo un pulsador apretado, los LEDs se pondrán intermitentes para indicarlo; según el pulsador que hayamos apretado el avance será de un paso o de

medio, esta configuración será guardada permanentemente en la memoria del PIC.

P1: avance de medio paso en el motor 1; P2: avance de un paso en el motor 1; P3: avance de medio paso en el motor 2; P4: avance de un paso en el motor 2.

Notas

- Todos los motores tienen un límite para la velocidad máxima; dependiendo del tipo de motor y del número de pasos, unos admiten más velocidad que otros. Para algunos motores el tiempo mínimo entre cada paso es de 5 milisegundos, si se pone menos vibran pero no giran.
- Las revoluciones por minuto dependen del número de pasos, a un motor de 200 pasos puesto a 2 milisegundos por paso le corresponden 150 R.P.M.; a uno de 96 pasos, 312 R.P.M.; a uno de 48 pasos, 625 R.P.M.; y a uno de 24 pasos, 1250 R.P.M.
- Si desde la computadora se quiere enviar un número de pasos determinado (por ejemplo, una vuelta) es mejor poner antes en pausa el motor para que esté alimentado antes y después del giro y el eje quede sujeto.
- La diferencia entre pausa y paro es que en pausa el motor está alimentado y fijo en una posición, en paro el motor está sin alimentación y el eje libre.
- Si un motor está mucho tiempo en pausa puede calentarse demasiado, especialmente si está en modo de avance doble.
- No todos los motores tienen unos cables de colores estándar para distinguir las bobinas, pero algunos tienen naranja y amarillo para una bobina, y marrón y negro para otra; otros tienen rojo y rojo-blanco para una, y verde y verde-blanco para otra.

La principal aplicación de motor paso a paso se puede dividir en las categorías siguientes:

- Aplicaciones en instrumentación (con bajo torque)
- Equipo periférico de cómputo y equipos de oficina

- Control numérico de máquinas herramientas y la robótica
- Electromedicina

Algunos ejemplos por categorías:

Aplicaciones en Instrumentación

1. Relojes de cuarzo
2. Relojes sincronizados
3. Funcionamiento de obturación de cámaras digitales

Motor paso a paso en periféricos de computadoras

1. Impresoras
2. Unidades de disco
3. Plotter digital XY
4. Transporte de la cinta magnética
5. Unidad de cinta de papel

Equipo de oficina

1. Máquina de escribir electrónica
2. Máquinas de facsímil

Aplicaciones en máquinas, herramientas y fresadoras

1. Sistemas de control numérico para fresadora
2. Índice de tabulación

Robótica

Electromedicina, aplicaciones 1

1. Máquinas de rayos X
2. Las unidades de terapia de radiación
3. Escáneres CAT y escáner ultrasonido

Aplicaciones diversas

1. Reactores nucleares
2. Tecnología aeroespacial
3. Aplicaciones industriales

UNIDAD 5

CONTROLADORES INDUSTRIALES POR PLC'S

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD
El alumno construirá circuitos para el control de procesos industriales por medio de Controles Lógicos Programables (PLC's).

5.1 Introducción a los PLC's

EL CONTROLADOR LÓGICO Programable (PLC) tiene la estructura de varios sistemas programables, como una microcomputadora. La estructura básica del hardware de un PLC (Figura 1) propiamente está constituido por:

- Fuente de alimentación
- Unidad central de procesamiento (CPU)
- Módulos de interfaces entradas/salidas (E/S)
- Módulo de memorias
- Unidad de programación

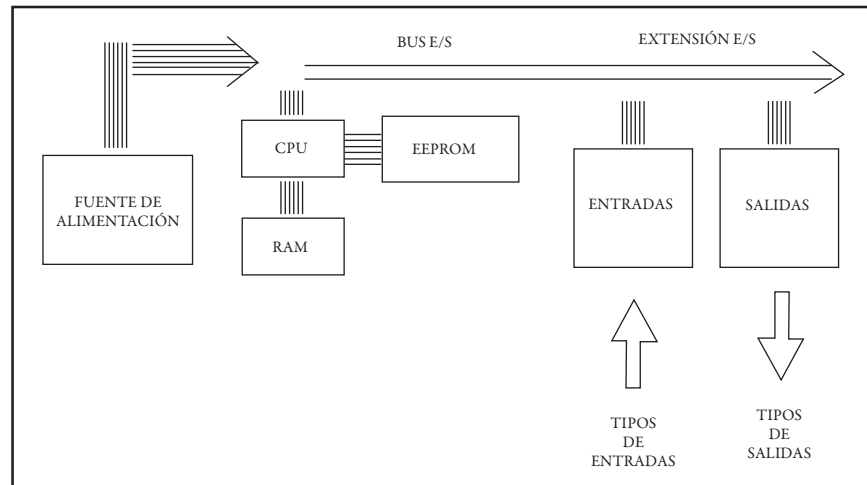


Figura 1. Estructura del PLC.

Cuando el trabajo que debe realizar el controlador es más sofisticado, se incluyen módulos inteligentes.

Fuente de alimentación

La fuente de alimentación de un controlador suministra la energía a la CPU y demás tarjetas o periféricos que configuran el PLC. Las tensiones que comúnmente proporciona son las siguientes:

- + 5 V para alimentar a todas las tarjetas
- + 5.2 V para alimentar al programador
- + 24 V para los canales de lazo de corriente 20 mA

Unidad Central de Procesamiento (CPU)

La unidad central de procesamiento está diseñada a base de microprocesadores y memorias cuya operación es leer los estados de las señales de las entradas, ejecutar el programa de control y gobernar las salidas; el procesamiento es permanente y a gran velocidad. El CPU contiene los siguientes elementos:

- Una unidad de control
- La memoria interna del programador RAM
- Temporizadores
- Contadores
- Memorias internas tipo relé
- Imágenes del proceso entradas/salidas, etcétera.

Módulos o interfaces de entrada y salida (E/S)

Proporcionan el vínculo entre la CPU del controlador y los dispositivos de campo del sistema. A través de ellos se origina el intercambio de información, ya sea para la adquisición de datos o la del mando para el control de máquinas del proceso.

Tipos de módulos de entrada y salida

Ya que existe una gran variedad de dispositivos exteriores (captadores actuadores), se tienen diferentes tipos de módulos de entrada y salida, cada uno de los cuales sirve para manejar cierto tipo de señal (discreta o análoga) a determinado valor de tensión o de corriente en DC o AC (Tabla 1).

Tabla 1
Tipos de E/S del PLC

<i>Tipos de entradas</i>	<i>Tipos de salidas</i>
<i>Discretas</i>	<i>Discretas</i>
Rectificador	Circuito lógico de salida
Acondicionador de señal	Optoaislación
Optoaislación	Circuito de conexión
Circuito lógico de entrada	Protección
(Indicador de estado)	(Indicador de estado)
<i>Analógicas</i>	<i>Analógicas</i>
Protección	Buffer
Filtro analógico	Optoaislación
Multiplexado	A/D
A/D	Protección
Optoaislación	
Buffer	

Módulos de memorias

Son los dispositivos destinados a guardar información de manera provisional o permanente. Se cuenta principalmente con dos tipos de memorias:

- Volátiles (RAM)
- No volátiles (EPROM y EEPROM)

Unidad de programación

Las terminales de programación son el medio de comunicación entre el hombre y la máquina; estos dispositivos están constituidos por teclados y dispositivos de visualización.

Existen tres tipos de programadores: los manuales Hand Held, tipo de calculadora; los de video, tipo PC, y la computadora.

5.2 Tipos de programación de PLC's

Conceptos generales de programación

Antes de comenzar con el proceso de programación, es conveniente tener claros algunos conceptos preliminares respecto a la organización de los programas en la memoria del procesador.

También es importante reconocer las diferentes representaciones de los lenguajes de programación, así como su representación y notación en diferentes marcas de PLC.

Programa, programación y lenguajes de programación

Para un PLC, un programa es un conjunto de instrucciones o proposiciones bien definidas que le dicen lo que tiene que hacer. Cada instrucción le indica al autómata lo siguiente:

- Qué operación realizará paso a paso.
- De dónde obtendrá los datos que necesita para realizarla.
- Dónde guardará los resultados de la operación.

Para el usuario, un programa integra todas las especificaciones de un conjunto de operaciones que debe llevar a cabo el computador para lograr resolver una determinada tarea.

Un programa se escribe en un lenguaje de programación, éstos permiten simplificar la creación de programas debido a su fácil descripción de las instrucciones que ha de ejecutar el procesador; en algunos casos, lo hace agrupando varias instrucciones y dando un solo nombre al conjunto, de tal forma que la lista de operaciones se reduce considerablemente, resultando fácil la comprensión y resolución de programas. También varios cientos de instrucciones simples se pueden expresar con una lista de unas cuantas líneas.

Finalmente, a la acción de realizar un programa se le conoce como programación.

En conclusión, al conjuntar estos tres conceptos se define que “Un programa se escribe en un lenguaje de programación y a la actividad de expresar un algoritmo en forma de programa se le denomina programación”.

A menudo, al lenguaje de programación se le llama software de programación, cuando se emplea un término genérico, a fin de distinguirlo del hardware.

Clasificación de los programas

A continuación, se definen dos tipos de programas.

Programas del sistema

Existe cierto número de instrucciones propias del PLC que proporcionan servicios vitales a los programas del usuario o que realizan funciones operativas internas del controlador; estos programas, incluyendo los traductores de lenguaje, reciben la denominación colectiva de programas del sistema o software del sistema. Un elemento notable es el sistema operativo, cuyos servicios incluyen el manejo de los dispositivos de entrada y salida del PLC, el almacenamiento de la información durante largos periodos de tiempo, la organización del procesamiento de los programas del usuario o aplicación, etcétera.

Estos programas están almacenados en memoria EPROM dentro de la CPU; por tanto, no se pierden ni alteran en caso de pérdida de alimentación del equipo. El usuario no tiene acceso a ellos.

Programas de aplicación del usuario

Es el conjunto de instrucciones o proposiciones que programa el usuario, con el fin de resolver tareas de automatización específica. El usuario diseña el programa de acuerdo con la representación del lenguaje de programación que mejor se adapte a su trabajo o, en dado caso, del que tenga un mejor

dominio. Es importante señalar que algunos fabricantes no emplean todos los tipos de representaciones de los lenguajes de programación; no obstante, el usuario tendrá que adaptarse a la representación que se disponga o investigar en los manuales del PLC (Figura 2).

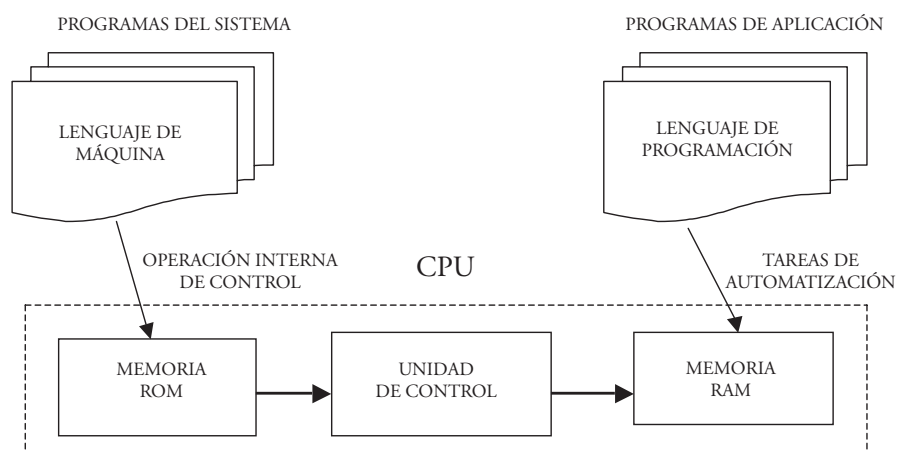


Figura 2. Programas de aplicación del usuario.

Representación de los lenguajes de programación y la norma IEC 1131-3

En la actualidad cada fabricante diseña su propio lenguaje de programación, ya que existe una gran variedad de PLCs. Las formas que adopta el lenguaje de programación usado para realizar programas se denomina representación del lenguaje de programación.

Hasta el momento son tres los tipos de representaciones más difundidos a nivel mundial, los cuales cada fabricante emplea para su programación:

- Lista de instrucciones
- Plano de funciones
- Diagrama de contactos o plano de contactos

Es obvio que la gran diversidad de lenguajes de programación da lugar a que cada fabricante tenga su propia representación, originando cierta incomodidad al usuario cuando programa más de un PLC.

Con el objetivo de uniformizar estas representaciones, se ha establecido una norma internacional IEC 1131-3, que se encarga de estandarizar los lenguajes de programación.

Lista de instrucciones

Son instrucciones del tipo booleanas, utilizando para su representación letras y números. Dado que se usan abreviaturas nemotécnicas, no se requiere gran memoria para tareas de automatización.

La desventaja radica en la magnitud del trabajo necesario para su programación, especialmente si el programa consta de unos cientos de instrucciones.

Plano de funciones

Es una representación gráfica orientada a las puertas lógicas AND, OR y sus combinaciones. Las funciones individuales se representan con un símbolo, en cuyo lado izquierdo se ubican las entradas y en el derecho las salidas. Los símbolos usados son iguales o semejantes a los que se utilizan en los esquemas de bloques en electrónica digital.

Diagrama de contactos

Es la representación gráfica que tiene cierta analogía con los esquemas de contactos en Ingeniería Eléctrica según la norma NEMA.

Su estructura obedece a la semejanza que tiene con los circuitos de control con lógica cableada; es decir, utiliza la misma representación de los contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados, con la diferencia de que su interpretación es totalmente distinta (Figura 3).

Además de los simples contactos de los que dispone, existen otros elementos que permiten realizar cálculos aritméticos, operaciones de comparación, implementar algoritmos de regulación, etc. Su gran difusión se debe a que facilita el trabajo a los usuarios.

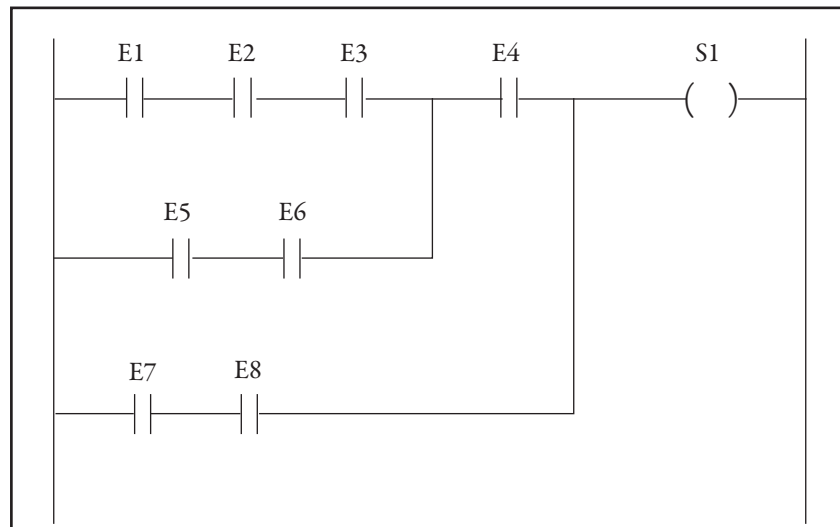


Figura 3. Diagrama de escalera o contactos.

Lenguajes de programación típicos

Son varios los lenguajes o sistemas de programación posibles en los autómatas programables; por esto, cada fabricante indica en las características generales de su equipo cuál es el lenguaje o los lenguajes con los que se puede programar.

Los lenguajes de programación más usuales son aquellos que transfieren directamente el esquema de contactos y las ecuaciones lógicas (éstos no son los únicos).

Los lenguajes y métodos gráficos más utilizados son:

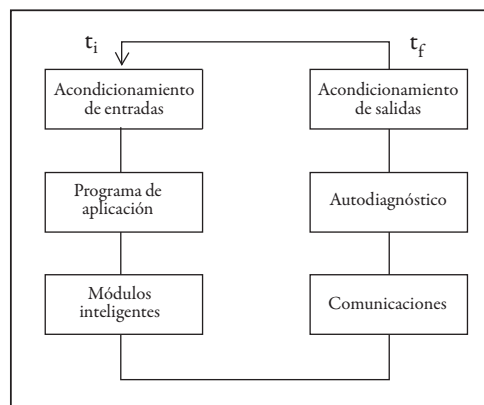
- Nemónico, también conocido como lista de instrucciones, booleano, abreviaturas nemotécnicas, AWL. Es un lenguaje en el cual cada instrucción se basa en las definiciones del álgebra de Boole o álgebra lógica.
- Diagrama de contactos (*ladder diagram*), plano de contactos, esquema de contactos, KOP.

A diferencia del nemónico, el ladder tiene como base su representación gráfica, pero todos ellos deben ir acompañados del correspondiente cuadro o lista de programación, esto es, la relación de líneas de programa que lo configuran.

5.3 Programación básica de PLC's

El concepto original de los PLC se fundamentaba en poder programar fácilmente el dispositivo, utilizando una representación efectiva de la lógica necesaria para controlar la máquina o el proceso.

En la Figura 4, el PLC ejecuta el programa SCAN que tiene en su memoria, y ésta es su forma cíclica de operar, leer y actualizar sus entradas y salidas.



$$\text{Tiempo de SCAN} = t_f - t_i$$

Figura 4. Programación del PLC.

Esta representación involucraba el uso de los símbolos y expresiones ya existentes en los diagramas lógicos eléctricos. Con base en esto se obtiene un lenguaje de programación gráfico que es denominado lenguaje de escalera.

Diagrama de escalera

El diagrama de escalera es una técnica de programación gráfica utilizada en el desarrollo de algoritmos de control de sistemas o procesos basados en controladores lógicos programables.

Inicialmente el lenguaje de escalera utilizaba instrucciones básicas, pero con el paso de los años se le han incorporado funciones cada vez más complejas y poderosas, con lo que se ha obtenido un lenguaje avanzado de programación.

La clasificación de las instrucciones en cada uno de los grupos puede ser variable; sin embargo, existe una división típica aceptada que genera una clasificación, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Clasificación de las instrucciones

<i>Básicas</i>	<i>Avanzadas</i>
Contactos	Aritmética de doble precisión
Bobinas	Raíces cuadradas
Temporizadores	Mover registros
Contadores	Rotar registros
Bobinas retenidas (set y reset)	Diagnosticar bloques
Saltos	Transferir bloques
Suma	Secuenciadores
Resta	Funciones PID
Multiplicación	Manejo de redes
División	
Comparaciones	

La representación de los diagramas de escalera está compuesta fundamentalmente por un área que contiene las condiciones que son evaluadas y por la salida asociada a dichas condiciones (Figura 5).

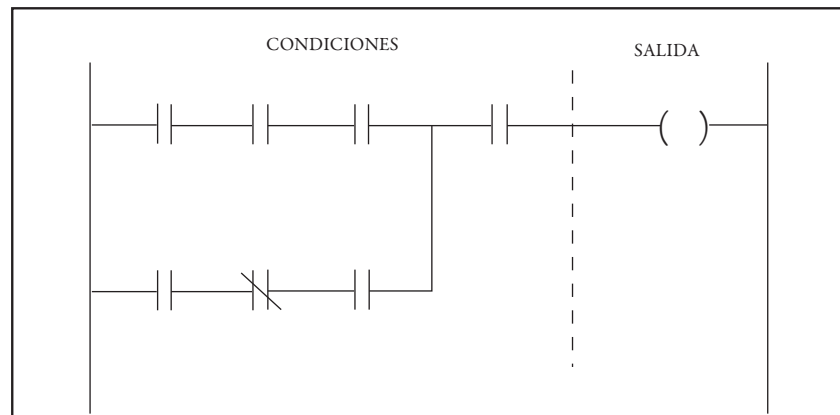


Figura 5. Condiciones y salida de un diagrama de escalera.

Bloques funcionales

Igualmente, en el diagrama de escalera se pueden incorporar funciones avanzadas, que se representan en el esquema como bloques funcionales. En la Figura 6 se presenta un diagrama de escalera con bloques funcionales, el cual posee líneas de habilitación, es decir, que las funciones se ejecutarán cuando las condiciones lógicas asociadas se cumplan.

La programación en diagramas de escalera es una ventaja debido a la naturaleza gráfica de su representación, ya que facilita la visualización de las funciones o relaciones entre los diferentes elementos de un proceso.

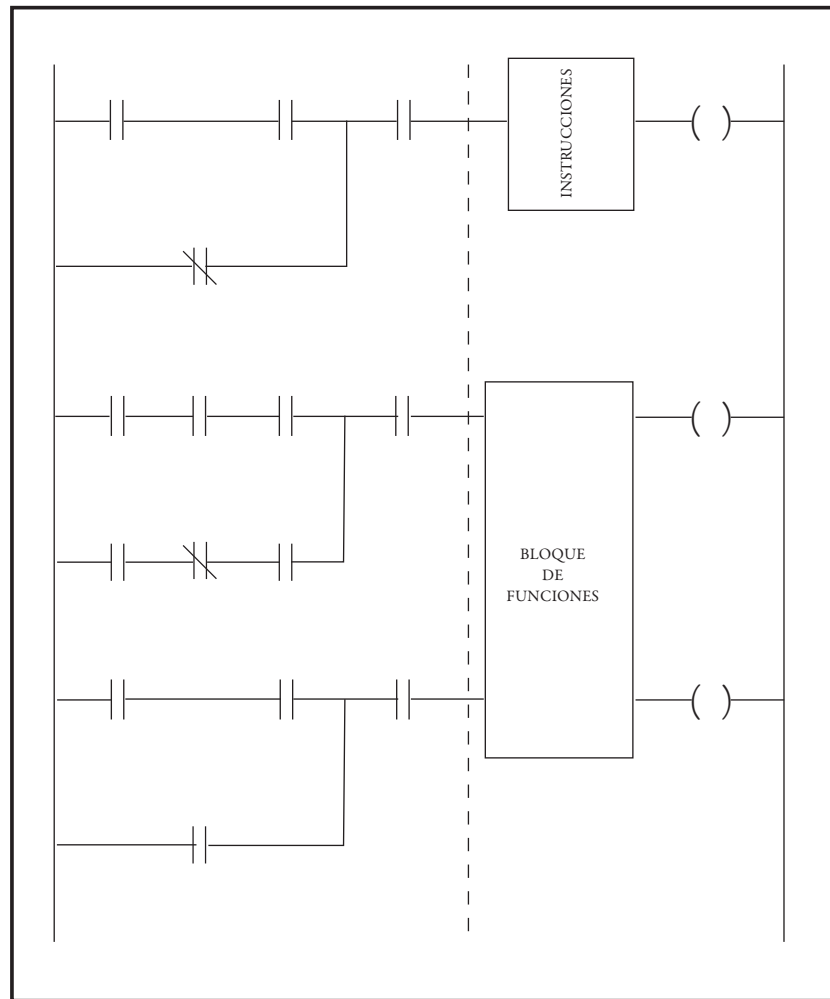


Figura 6. Diagrama de escalera con bloques funcionales.

Cuando se tiene un diagrama lógico basado en relé y se desea implementar las funciones a través de un diagrama de escalera, se utilizan contactos normalmente abiertos (NO), normalmente cerrados (NC) y bobinas, con las direcciones apropiadas, los cuales deben coincidir con las asignaciones de entradas y salidas en los módulos respectivos (Figura 7).

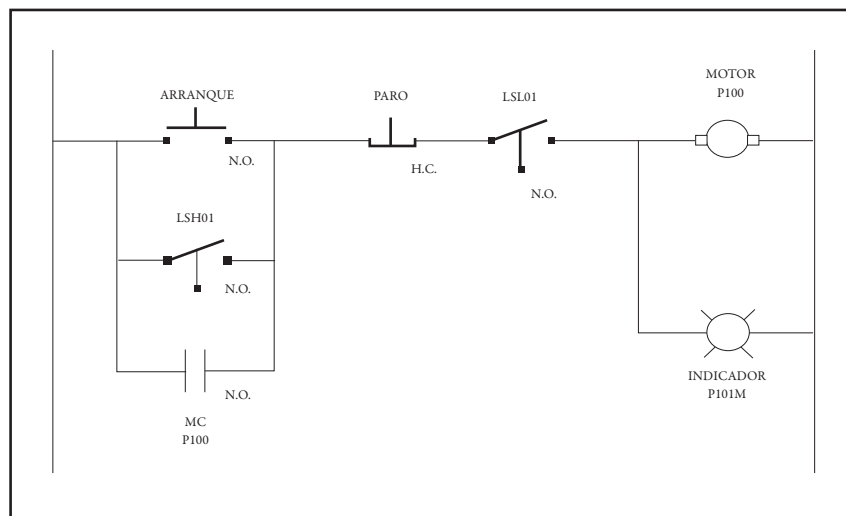


Figura 7. Diagrama de relé del proceso.

La representación gráfica del diagrama de relé es muy similar al resultado obtenido al implementarse en un diagrama de escalera. A continuación se presenta un proceso sencillo, el diagrama de control basado en relé y el equivalente en diagrama de escalera (Figura 8).

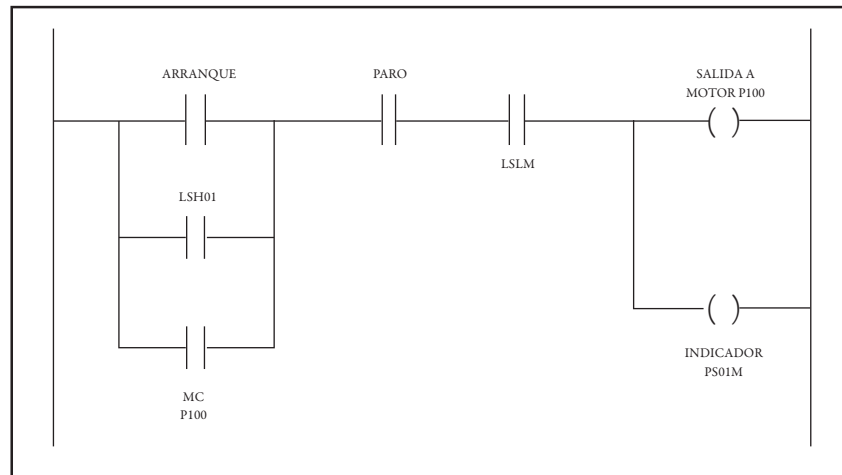


Figura 8. Diagrama de escalera de la Figura 3.

Diagrama de proceso

En muchos sistemas secuenciales las condiciones de activación de algunos elementos están dadas por combinaciones tipo AND y OR de diferentes señales del proceso. En estos casos la realización de estas funciones utilizando diagramas de escalera es muy sencilla y directa, y lo que hay que cuidar es la correcta agrupación de los elementos que conforman ciertas partes de la lógica, para que el resultado sea el deseado.

La ecuación booleana es una función que asocia a una salida y las combinaciones de elementos que definen su estado. Para lograrlo se deben utilizar llaves, paréntesis y corchetes que establezcan las prioridades de la ejecución de la lógica de los elementos. Ejemplo: Dadas las siguientes ecuaciones booleanas:

$$A) X = (A.B.C + E.F.G).D$$

$$B) X = A.(B.C.D + E.F) + (G.H + J.K).T$$

La implementación en diagrama de escalera (Figuras 9 y 10) estará dada por:

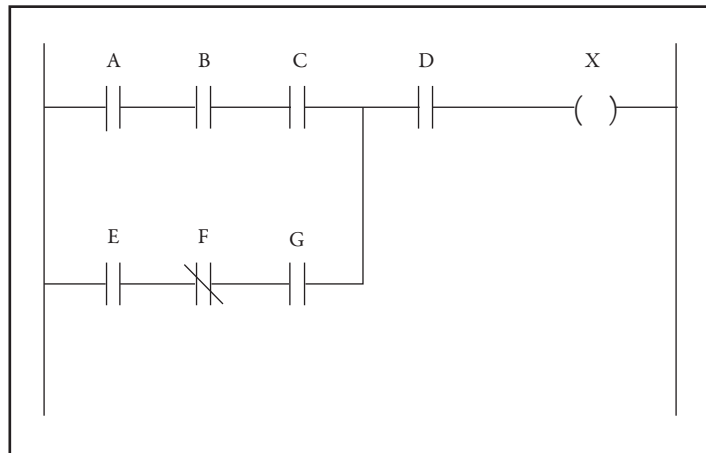


Figura 9. Diagrama de escalera de la ecuación A.

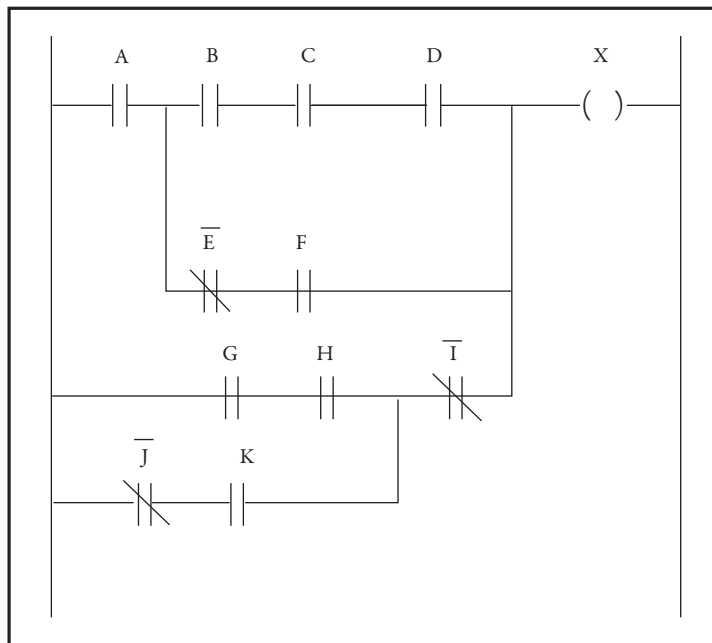


Figura 10. Diagrama de escalera de la ecuación B.

Los diagramas lógicos se fundamentan en la utilización de símbolos básicos y no básicos para realizar funciones binarias que permiten representar operaciones del proceso, como enclavamientos, secuencias de arranque y parada, condiciones de alarma y modos de operación de equipos.

Los diagramas lógicos se leen de arriba abajo y de izquierda a derecha. Esta forma de leer permite fijar la secuencia de operación del proceso.

Para realizar el diagrama de escalera a partir de un diagrama lógico es necesario entender bien el funcionamiento o la secuencia de operación del proceso, y utilizar las instrucciones en el lenguaje de escalera adecuado que permitan reproducir el comportamiento descrito en el diagrama lógico.

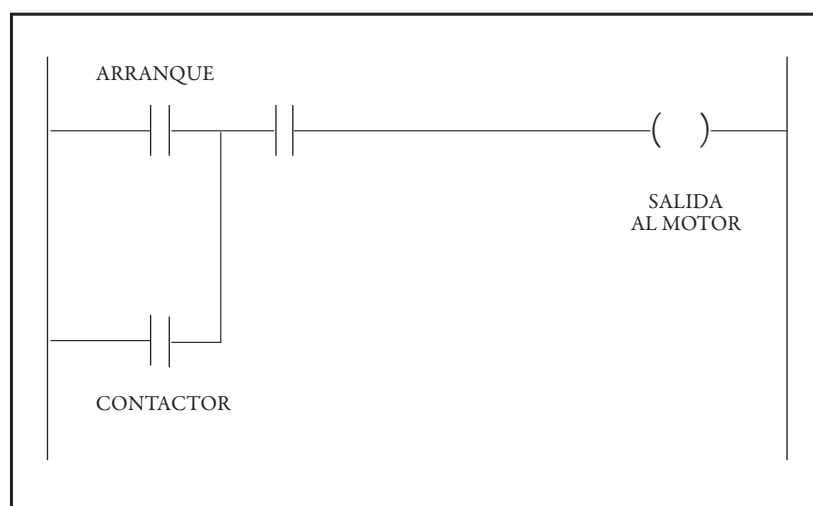


Figura 11. Diagrama de escalera de control de motor eléctrico.

Por ejemplo, en el caso de un diagrama de escalera típico para controlar un motor eléctrico (Figura 11) se tiene que recordar la unidad 2, en donde se identifica que al tener dos interruptores en serie se puede implementar en el PLC una compuerta AND, y que al tener dos interruptores en paralelo se puede colocar una compuerta OR, de esta manera el diagrama de escalera se transforma en un diagrama lógico (Figura 12).

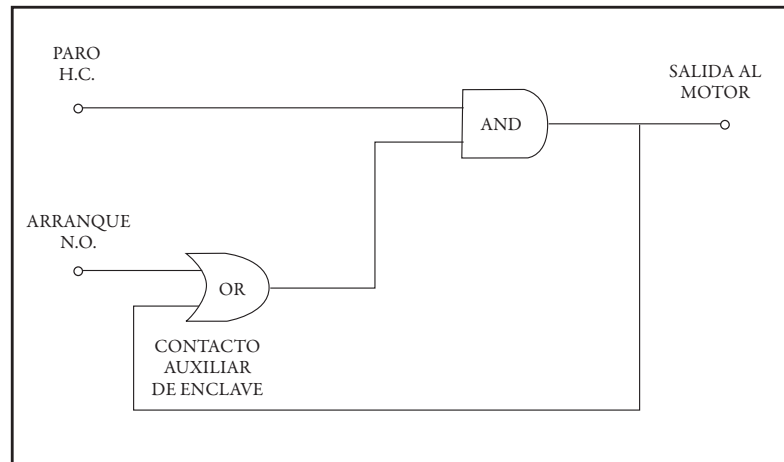


Figura 12. Diagrama lógico del control de motor eléctrico.

La norma ISA S5A, indica los símbolos utilizados para la presentación de diagramas lógicos.

5.4 Aplicaciones

El PLC, por sus especiales características de diseño, tiene un campo de aplicación muy extenso. La constante evolución del hardware y software amplía constantemente este campo para poder satisfacer las necesidades que se detectan en el espectro de sus posibilidades reales.

Su utilización se da fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control, señalización, etc.; su aplicación abarca desde procesos de fabricación industriales de cualquier tipo a transformaciones industriales, control de instalaciones, etcétera.

Sus reducidas dimensiones, la extrema facilidad de su montaje, la posibilidad de almacenar los programas para su posterior y rápida utilización, la modificación o alteración de los mismos, etc., hacen que su eficacia se

aprecie fundamentalmente en procesos en los que se producen necesidades tales como:

- Espacio reducido
- Procesos de producción periódicamente cambiantes
- Procesos secuenciales
- Maquinaria de procesos variables
- Instalaciones de procesos complejos y amplios
- Chequeo de programación centralizada de las partes del proceso

Ejemplos de aplicaciones generales:

A) Maniobras de máquinas:

- Maquinaria industrial del mueble y la madera
- Maquinaria en proceso de grava, arena y cemento
- Maquinaria en la industria del plástico
- Máquinas-herramientas complejas
- Maquinaria de ensamblaje
- Máquinas de transferencia

B) Maniobra de instalaciones:

- Instalaciones de aire acondicionado y calefacción
- Instalaciones de seguridad
- Instalaciones de almacenamiento y transporte
- Instalaciones de plantas embotelladoras
- Instalaciones en la industria automotriz
- Instalación de tratamientos térmicos
- Instalaciones de la industria azucarera

Ventajas e inconvenientes

No todos los autómatas ofrecen las mismas ventajas sobre la lógica cableada, ello se debe, principalmente, a la variedad de modelos existentes en el

mercado y a las innovaciones técnicas que surgen constantemente. Tales consideraciones me obligan a referirme a las ventajas que proporciona un autómata de tipo medio.

Ventajas

Menor tiempo empleado en la elaboración de proyectos debido a que:

- No es necesario dibujar el esquema de contactos.
- No es necesario simplificar las ecuaciones lógicas, ya que, por lo general, la capacidad de almacenamiento del módulo de memoria es lo suficientemente grande.
- La lista de materiales queda sensiblemente reducida, y al elaborar el presupuesto correspondiente se eliminará la parte del problema que supone el contar con diferentes proveedores y distintos plazos de entrega.
- Posibilidad de introducir modificaciones sin cambiar el cableado ni añadir aparatos.
- Mínimo espacio de ocupación.
- Menor coste de mano de obra de la instalación.
- Economía de mantenimiento. Además de aumentar la fiabilidad del sistema, al eliminar contactos móviles los mismos autómatas pueden indicar y detectar averías.
- Posibilidad de gobernar varias máquinas con un mismo autómata.
- Menor tiempo para la puesta en funcionamiento del proceso al quedar reducido el tiempo de cableado.
- Si por alguna razón la máquina queda fuera de servicio, el autómata sigue siendo útil para otra máquina o sistema de producción.

Inconvenientes

- Como inconvenientes podríamos mencionar, en primer lugar, la falta de un programador, lo que obliga a adiestrar a uno de los técnicos en tal

sentido, pero hoy en día ese inconveniente está solucionado porque las universidades ya se encargan de dicho adiestramiento.

- El coste inicial también puede ser un inconveniente.

Funciones básicas de un PLC

- Detección: lectura de la señal de los captadores distribuidos por el sistema de fabricación.
- Mando: elaborar y enviar las acciones al sistema mediante los accionadores y preaccionadores.
- Diálogo hombre máquina: mantener un diálogo con los operarios de producción, obedeciendo sus consignas e informando del estado del proceso.
- Programación: para introducir, elaborar y cambiar el programa de aplicación del autómatas. El diálogo de programación debe permitir modificar el programa incluso con el autómatas controlando la máquina.
- Redes de comunicación: permiten establecer comunicación con otras partes de control. Las redes industriales permiten la comunicación y el intercambio de datos entre autómatas en tiempo real. En unos cuantos milisegundos pueden enviarse telegramas e intercambiar tablas de memoria compartida.
- Sistemas de supervisión: también los autómatas permiten comunicarse con ordenadores provistos de programas de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza por una red industrial o por medio de una simple conexión por el puerto serie del ordenador.
- Control de procesos continuos: además de dedicarse al control de sistemas de eventos discretos, los autómatas llevan incorporadas funciones que permiten el control de procesos continuos. Disponen de módulos de entrada y salida analógicas y la posibilidad de ejecutar reguladores PID que están programados en el autómatas.
- Entradas-salidas distribuidas: los módulos de entrada-salida no tienen por qué estar en una zona específica del autómatas. Pueden estar distribuidos por la instalación; se comunican con la unidad central del autómatas mediante un cable de red.

- Buses de campo: mediante un solo cable de comunicación se pueden conectar al bus captadores y accionadores, reemplazando al cableado tradicional. El autómata consulta cíclicamente el estado de los captadores y actualiza el estado de los accionadores.

Como ejemplo, en el caso de Ingeniería Eléctrica se presenta la conexión control/fuerza típica de un motor de CA trifásico jaula de ardilla, como se observa en la Figura 13.

En este esquema se identifica plenamente el circuito de control del motor que es el que se muestra en la Figura 14.

Con esta representación es posible construir el diagrama de escalera (Figura 15), que se introduce en la programación del PLC.

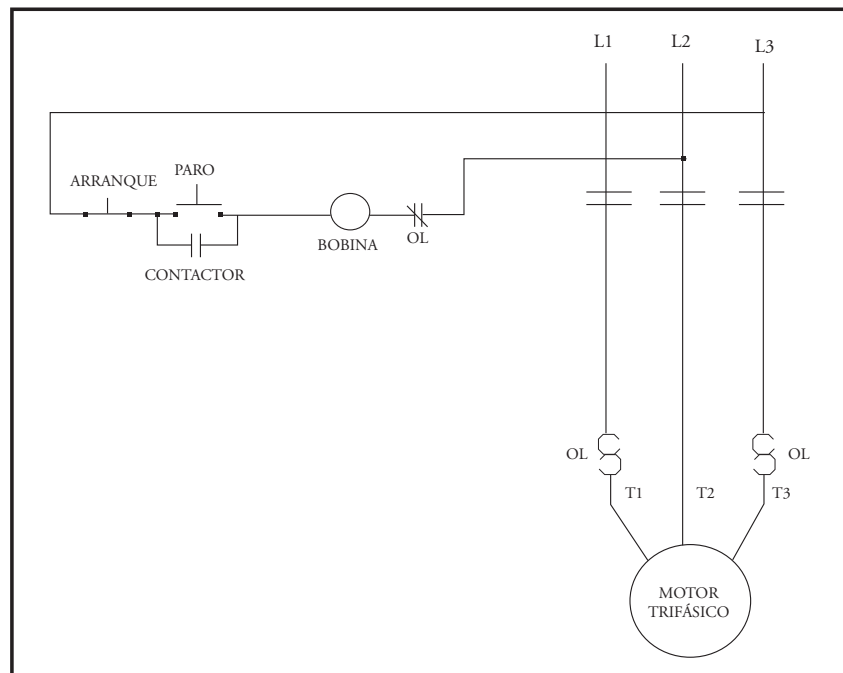


Figura 13. Diagrama de conexión eléctrica de un motor trifásico.

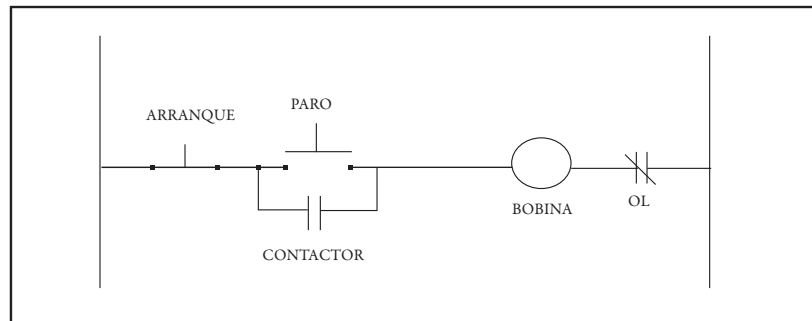


Figura 14. Circuito de control del motor trifásico.

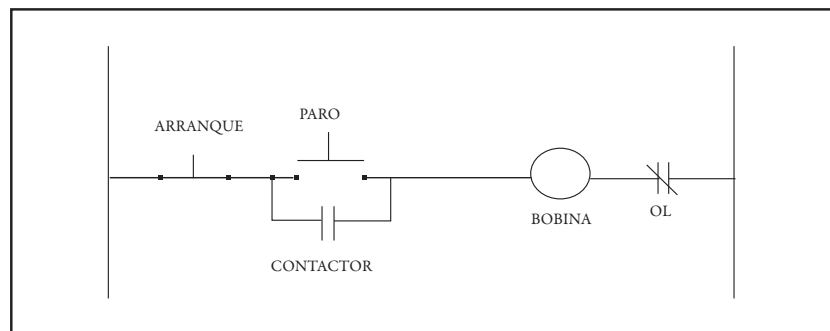


Figura 15. Diagrama de escalera.

UNIDAD 6

MICROCONTROLADORES

OBJETIVOS PARTICULARES DE LA UNIDAD
El alumno describirá los principios de funcionamiento y programación de los microcontroladores.

Introducción

Controladores y microcontroladores

UN CONTROLADOR ES UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO encargado de controlar uno o más procesos. En el caso de un sistema de aire acondicionado, recogerá la información de los sensores de temperatura, los procesará y actuará en consecuencia.

Al principio, los controladores estaban formados exclusivamente por componentes discretos. Posteriormente se emplearon procesadores rodeados de memorias, circuitos de E/S, etc., sobre una placa de circuito impreso (PCB). En la actualidad los controladores integran todos los dispositivos antes mencionados en un pequeño chip. Esto es lo que hoy se conoce con el nombre de *microcontrolador*.

Diferencia entre microcontrolador y microprocesador

Los términos de microcontrolador y microprocesador se deben diferenciar, ya que el *microcontrolador* es un sistema completo, con prestaciones limitadas

que no pueden modificarse y que lleva a cabo las tareas para las que ha sido programado de forma autónoma.

Un *microprocesador*, en cambio, es simplemente un componente que conforma el sistema y lleva a cabo ciertas tareas que en conjunto con otros componentes, forman un microcontrolador.

La diferencia entre microcontrolador y microprocesador radica en que el primero es un sistema autónomo e independiente, mientras que el segundo es un componente esencial, que forma parte de un sistema mayor.

Los PIC son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Technology Inc. y derivados del PIC1650, originalmente desarrollado por la división de microelectrónica de General Instrument.

El nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como *Peripheral Interface Controller* (Controlador de Interfaz Periférico).

El PIC original se diseñó para ser usado con la nueva CPU de 16 bits CP16000. Siendo en general una buena CPU, ésta tenía malas prestaciones de E/S, y el PIC de ocho bits se desarrolló en 1975 para mejorar el rendimiento del sistema quitando peso de E/S a la CPU. El PIC utilizaba microcódigo simple almacenado en ROM para realizar estas tareas.

El PIC se mejoró con EPROM para conseguir un controlador de canal programable. En la actualidad los PIC vienen con varios periféricos incluidos (módulos de comunicación serie, UART, núcleos de control de motores, etc.) y con memoria de programa desde 512 a 32.000 palabras (una *palabra* corresponde a una instrucción en lenguaje ensamblador, y puede ser 12, 14 o 16 bits, dependiendo de la familia específica de PICmicro).

Los viejos PIC con memoria PROM o EPROM se están renovando gradualmente por chips con memoria Flash. Asimismo, el juego de instrucciones original de 12 bits del PIC1650 y sus descendientes directos ha sido suplantado por juegos de instrucciones de 14 y 16 bits. Microchip todavía vende versiones PROM y EPROM de la mayoría de los PIC para soporte de aplicaciones antiguas o grandes pedidos.

Se pueden considerar tres grandes gamas de PIC en la actualidad: los básicos (Linebase), los de medio rango (Mid Range) y los de alto desempeño (High Performance). Los PIC18 son considerados de alto desempeño y tienen entre sus miembros a los PIC con módulos de comunicación y protocolos avanzados (USB, Ethernet, Zigbee por ejemplo).

Recibe el nombre de controlador el dispositivo empleado para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera señales adecuadas que accionan los efectores que regularán el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado con frecuencia. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta, posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han incluido en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

- Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al reemplazar el microcontrolador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.
- Reducción del tamaño en el producto acabado: la integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los *stocks*.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador empotrado (*embedded controller*).

Diferencia entre microprocesador y microcontrolador

El microprocesador es un circuito integrado que contiene la Unidad Central de Proceso (UCP), también llamada procesador, de un computador. La UCP está formada por la Unidad de Control, que interpreta las instrucciones, y el Camino de Datos, que las ejecuta.

Las terminales de un microprocesador sacan al exterior las líneas de sus buses de direcciones, datos y control, para permitir conectarle con la Memoria y los Módulos de E/S y configurar un computador implementado por varios circuitos integrados. Se dice que un microprocesador es un sistema abierto porque su configuración es variable de acuerdo con la aplicación a la que se destine (Figura 6.1).

Si sólo se tiene un modelo de microcontrolador, éste debe tener muy potenciados todos sus recursos para adaptarse a las exigencias de las diferentes aplicaciones. Esta potenciación supondría en muchos casos un despilfarro. En la práctica cada fabricante de microcontroladores oferta un elevado nú-

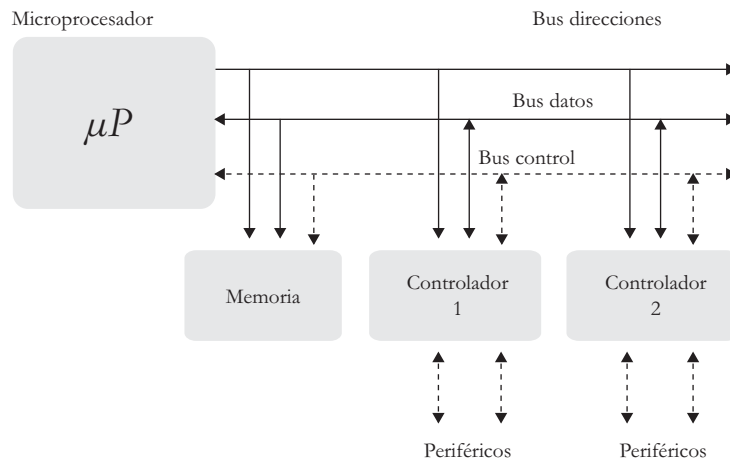


Figura 1. Estructura de un sistema abierto basado en un microprocesador. La disponibilidad de los buses en el exterior permite que se configure a la medida de la aplicación.

mero de modelos diferentes, desde los más sencillos hasta los más poderosos. Es posible seleccionar la capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S, la cantidad y potencia de los elementos auxiliares, la velocidad de funcionamiento, etc. Por todo ello, un aspecto muy destacado del diseño es la selección del microcontrolador a utilizar (Figura 2).

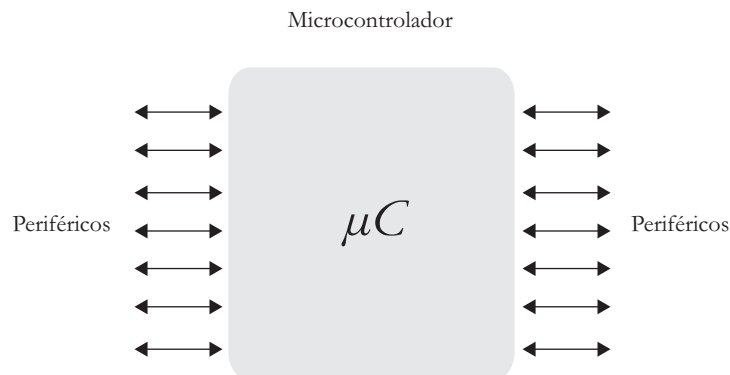


Figura 2. El microcontrolador es un sistema cerrado. Todas las partes del computador están contenidas en su interior y sólo salen al exterior las líneas que gobiernan los periféricos.

6.1 Principios de funcionamiento

Juego de instrucciones y entorno de programación

El PIC usa un juego de instrucciones tipo RISC, cuyo número puede variar desde 35 para los PIC de gama baja a 70 para los de gama alta. Las instrucciones se clasifican entre las que realizan operaciones entre el acumulador y una constante, entre el acumulador y una posición de memoria, instrucciones de condicionamiento y de salto/retorno, implementación de interrupciones y una para pasar a modo de bajo consumo llamada sleep.

Microchip proporciona un entorno de desarrollo freeware llamado MPLAB que incluye un simulador software y un ensamblador. Otras empresas desarrollan compiladores C y BASIC. Microchip también vende compiladores para los PIC de gama alta (“C18” para la serie F18 y “C30” para los dsPIC) y se puede descargar una edición para estudiantes del C18 que inhabilita algunas opciones después de un tiempo de evaluación.

Para el lenguaje de programación Pascal existe un compilador de código abierto, JAL, lo mismo que PicForth para el lenguaje Forth. GPUTILS es una colección de herramientas distribuidas bajo licencia GPL que incluye ensamblador y enlazador, y funciona en Linux, MacOS y Microsoft Windows. GPSIM es otra herramienta libre que permite simular diversos dispositivos hardware conectados al PIC.

Uno de los más modernos y completos compiladores para lenguaje C es [mikroC], que es un ambiente de desarrollo con editor de texto, bibliotecas con múltiples funciones para todos los módulos y herramientas incorporadas para facilitar enormemente el proceso de programación.

Arquitectura central

La arquitectura del PIC es sumamente minimalista. Está caracterizada por las siguientes prestaciones:

- Área de código y de datos separadas (Arquitectura Harvard).
- Un reducido número de instrucciones de largo fijo.

- La mayoría de las instrucciones se ejecutan en un solo ciclo de ejecución (cuatro ciclos de clock), con ciclos de único retraso en las bifurcaciones y saltos.
- Un solo acumulador (W), cuyo uso (como operador de origen) es implícito (no está especificado en la instrucción).
- Todas las posiciones de la RAM funcionan como registros de origen y/o de destino de operaciones matemáticas y otras funciones.
- Una pila de hardware para almacenar instrucciones de regreso de funciones.
- Una relativamente pequeña cantidad de espacio de datos direccionable (típicamente, 256 bytes), extensible a través de manipulación de bancos de memoria.
- El espacio de datos está relacionado con el CPU, puertos y registros de los periféricos.
- El contador de programa está también relacionado dentro del espacio de datos, y es posible escribir en él (permitiendo saltos indirectos).

A diferencia de la mayoría de otros CPU, no hay distinción entre los espacios de memoria y los espacios de registros, ya que la RAM cumple ambas funciones, y ésta es normalmente referida como “archivo de registros” o simplemente, registros.

Espacio de datos (RAM)

Los microcontroladores PIC tienen una serie de registros que funcionan como una RAM de propósito general. Los registros de propósito específico para los recursos de hardware disponibles dentro del propio chip también están direccionados en la RAM. La direccionabilidad de la memoria varía dependiendo la línea de dispositivos, y todos los dispositivos PIC poseen algún tipo de mecanismo de manipulación de bancos de memoria que pueden ser usados para acceder a la memoria adicional. Las series más recientes de dispositivos disponen de funciones que pueden cubrir todo el espacio direccionable, independientemente del banco de memoria seleccionado. En los dispositivos anteriores, esto debía lograrse mediante el uso del acumulador.

Para implementar direccionamiento indirecto, se usa un registro de “selección de registro de archivo” (FSR) y de “registro indirecto” (INDF), es decir, un número de registro es escrito en el FSR, lo cual hace que las lecturas o escrituras al INDF serán realmente hacia o del registro apuntado por el FSR. Los dispositivos más recientes extienden este concepto con pos y preincrementos/decrementos para mayor eficiencia en acceder secuencialmente a la información almacenada. Esto permite que se pueda tratar al FSR como un puntero de pila.

La memoria de datos externa no es directamente direccionable, excepto en algunos microcontroladores PIC 18 de gran cantidad de pines.

Tamaño de palabra

El tamaño de palabra de los microcontroladores PIC es fuente de muchas confusiones. Todos los PIC (excepto los dsPIC) manejan datos en trozos de ocho bits, con lo que se deberían llamar microcontroladores de ocho bits. Pero a diferencia de la mayoría de los CPU, el PIC usa Arquitectura Harvard, por lo que el tamaño de las instrucciones puede ser distinto del de la palabra de datos. De hecho, las diferentes familias de PIC usan tamaños de instrucción distintos, lo que hace difícil comparar el tamaño del código del PIC con el de otros microcontroladores. Por ejemplo, un microcontrolador tiene 6,144 bytes de memoria de programa: para un PIC de 12 bits esto significa 4,096 palabras y para uno de 16 bits, 3,072 palabras.

6.2 Fundamentos de programación

Programación del PIC

Para transferir el código de una computadora al PIC normalmente se usa un dispositivo llamado programador. La mayoría de los PIC que Microchip distribuye hoy en día incorporan ICSP (In Circuit Serial Programming, programación serie incorporada) o LVP (Low Voltage Programming, programación a bajo voltaje), lo que permite programar el PIC directamente en

el circuito destino. Para la ICSP se usan los pines RB6 y RB7 (en algunos modelos pueden usarse otros pines como el GP0 y GP1 o el RA0 y RA1) como reloj y datos y el MCLR para activar el modo programación aplicando un voltaje de 13 voltios. Existen muchos programadores de los PIC, desde los más simples que dejan al software los detalles de comunicaciones, a los más complejos, que pueden verificar el dispositivo a diversas tensiones de alimentación e implementan en hardware casi todas las funcionalidades. Muchos de estos programadores complejos incluyen ellos mismos PIC preprogramados como interfaz para enviar las órdenes al PIC que se desea programar. Uno de los programadores más simples es el TE20, que utiliza la línea TX del puerto RS232 como alimentación y las líneas DTR y CTS para mandar o recibir datos cuando el microcontrolador está en modo programación. El software de programación puede ser el ICprog, muy común entre la gente que utiliza este tipo de microcontroladores. Entornos de programación basados en intérpretes BASIC ponen al alcance de cualquiera proyectos que parecieran ser ambiciosos.

Se pueden obtener directamente de Microchip muchos programadores/depuradores.

Una buena recopilación de herramientas de desarrollo para los PIC puede encontrarse aquí.

Programadores

- PICStart Plus (puerto serie y USB).
- Promate II (puerto serie).
- MPLAB PM3 (puerto serie y USB).
- ICD2 (puerto serie y USB).
- ICD3 (USB).
- PICKit 1 (USB).
- IC-Prog 1.06B.
- PICAT 1.25 (puerto USB2.0 para PICs y Atmel).
- WinPic 800 (puerto paralelo, serie y USB).
- PICKit 2 (USB).
- PICKit 3 (USB).

- Terusb1.0.
- Eclipse (PIC y AVR USB).
- Master Prog (USB).
- Además es posible hacer un programador de manera casera, en <<http://microspics.blogspot.com>> hay una lista con los más utilizados.

Depuradores integrados

- ICD (Serie).
- ICD2 (Serie o full speed USB-2M bits/s).
- ICD3 (High speed USB-480M bits/s).

Emuladores

- Proteus-ISIS.
- ICE2000 (puerto paralelo, convertidor a USB disponible).
- ICE4000 (USB).
- PIC EMU.
- PIC CDlite.

Características

Los PIC actuales vienen con una amplia gama de mejoras hardware incorporadas:

- Núcleos de CPU de 8/16 bits con Arquitectura Harvard modificada.
- Memoria Flash y ROM disponible desde 256 bytes a 256 kilobytes.
- Puertos de E/S (típicamente 0 a 5,5 voltios).
- Temporizadores de 8/16 bits.
- Tecnología Nanowatt para modos de control de energía.
- Periféricos serie síncronos y asíncronos: USART, AUSART, EUSART.
- Conversores analógico/digital de 8-10-12 bits.

- Comparadores de tensión.
- Módulos de captura y comparación PWM.
- Controladores LCD.
- Periférico MSSP para comunicaciones I²C, SPI, y I²S.
- Memoria EEPROM interna con duración de hasta un millón de ciclos de lectura/escritura.
- Periféricos de control de motores.
- Soporte de interfaz USB.
- Soporte de controlador Ethernet.
- Soporte de controlador CAN.
- Soporte de controlador LIN.
- Soporte de controlador Irda.

Set de instrucciones

A continuación en la Tabla 6.1 se muestra una lista de todas las instrucciones del PIC16F628.

Tabla 1
Set de instrucciones de un PIC 16F628

<i>Operandos</i>	<i>Descripción</i>	<i>Afecta status</i>
<i>Operaciones de registros de direcciones orientadas a byte</i>		
addwf f, d	Suma W y f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	C, DC, Z
andwf f, d	Hace el and de W y f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
clrf f	Limpia el registro con dirección f	Z
clrW	Limpia el acumulador	Z
comf f, d	Hace el complemento de f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
decf f, d	Decrementa f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
decfsz f, d	Decrementa f y salta si da 0, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	
incf f, d	Incrementa f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
incfsz f, d	Incrementa f y salta si da 0, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	
iorwf f, d	OR entre W y f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
movf f, d	mueve el valor de f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
movWf f	mueve W a f.	
nop	no operative (esta instrucción no hace nada)	
rlf f, d	rota a la izquierda a través del carry, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	C
rrf f, d	rota a la derecha a través del carry, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	C
subWf f, d	A f le resta W, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	C, DC, Z
swapf f, d	Intercambia mitades del byte, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	
xorWf f, d	Hace el OR exclusivo entre W y f, lo guarda en f si d = 0, en W sino.	Z
<i>Operaciones de registros de direcciones orientadas a bit</i>		
bcf f, b	Pone en 0 el bit de posición b en f.	
bsf f, b	Pone en 1 el bit de posición b en f.	
btsc f, b	Testea el bit de posición b en f y salta si es 0.	
btfs f, b	Testea el bit de posición b en f y salta si es 1.	
<i>Operaciones de literales y control</i>		
addlW k	Suma k y W.	C, DC, Z
andlW k	Hace el and entre W y k	Z
call k	Llama la subrutina en la posición de memoria k.	
clrWdt	Limpia el timer del Watch Dog	$\overline{\text{TO}}$, $\overline{\text{PD}}$
goto k	Salta a la dirección k.	
iorlw k	Hace el OR entre W y k.	Z
movlW k	Mueve el valor de k a W.	Z
retfie	Vuelve de una rutina de interrupción.	
retlw k	Vuelve con el valor de k en W.	
return	Vuelve de una subrutina	
sleep	Entra en stand by.	$\overline{\text{TO}}$, $\overline{\text{PD}}$

Continúa...

Operandos	Descripción	Afecta status
<i>Operaciones de registros de direcciones orientadas a byte</i>		
sublw k	A k le resta W.	C, DC, Z
xorlw k	Hace el OR exclusivo entre k y W	Z

Variaciones del PIC

PIC modernos

Los viejos PIC con memoria PROM o EPROM se están renovando gradualmente por chips con memoria Flash. Asimismo, el juego de instrucciones original de 12 bits del PIC1650 y sus descendientes directos ha sido suplantado por juegos de instrucciones de 14 y 16 bits. Microchip todavía vende versiones PROM y EPROM de la mayoría de los PIC para soporte de aplicaciones antiguas o grandes pedidos.

Se pueden considerar tres grandes gamas de MCU PIC en la actualidad: los básicos (Linebase), los de medio rango (Mid Range) y los de alto desempeño (High Performance). Los PIC18 son considerados de alto desempeño y tienen entre sus miembros a los PIC con módulos de comunicación y protocolos avanzados (USB, Ethernet, Zigbee por ejemplo).

6.3 Aplicaciones

Aplicaciones de los microcontroladores

Cada vez existen más productos que incorporan un microcontrolador con el fin de aumentar sustancialmente sus prestaciones, reducir su tamaño y coste, mejorar su fiabilidad y disminuir el consumo.

Algunos fabricantes de microcontroladores superan el millón de unidades de un modelo determinado producidas en una semana. Este dato puede dar una idea de la masiva utilización de estos componentes.

Los microcontroladores están siendo empleados en multitud de sistemas presentes en nuestra vida diaria, como pueden ser juguetes, horno de

microondas, frigoríficos, televisores, computadoras, impresoras, módems, sistemas de arranque de automóviles, etc. Y otras aplicaciones con las que seguramente no estaremos tan familiarizados, como instrumentación electrónica, control de sistemas en una nave espacial, etc. Una aplicación típica podría emplear varios microcontroladores para controlar pequeñas partes del sistema. Estos pequeños controladores podrían comunicarse entre ellos y con un procesador central, probablemente más potente, para compartir la información y coordinar sus acciones, como, de hecho, ocurre ya habitualmente en cualquier PC.

A continuación se muestra el programa de un secuenciador de LEDs con PIC donde se incluye el circuito electrónico que se arma y conecta al PIC.

La programación es la siguiente:

```
#INCLUDE <16F628A.H>//PicC
#include <STDIO.H>
#define USE_DELAY(CLOCK=4MHZ)//PicC
#define FUSES INTRC_IO,NOWDT,NOMCLR,PUT,NOLVP,BROWNOUT//PicC
void main (void)
{
    int b;
    int const nombres
    [44]={0xAA,0x55,0xAA,0x55,0xAA,0x55,0xAA,0x55,0x01,0x02,0x04,0x
    08,0x10,0x20,0x40,
    0x80,0x81,0x82,0x84,0x88,0x90,0xA0,0xC0,0xC1,0xC2,0xC4,0xC8,0x
    D0,0xE0,0xE1,0xE2,0xE4,0xE8,0xF0,0xF1,
    0xF2,0xF4,0xF8,0xF9,0xFA,0xFC,0xFD,0xFE,0xFF};
    SET_TRIS_B(0x00);//PicC
    while(input(PIN_A0));//PicC
    while(true){
        for (b=0;b<44;b++){
            output_b(nombres[b]);
            delay_ms(500);
        }
    }
```

El circuito electrónico con el arreglo de LEDS es el que se muestra en las figuras 3 y 4.

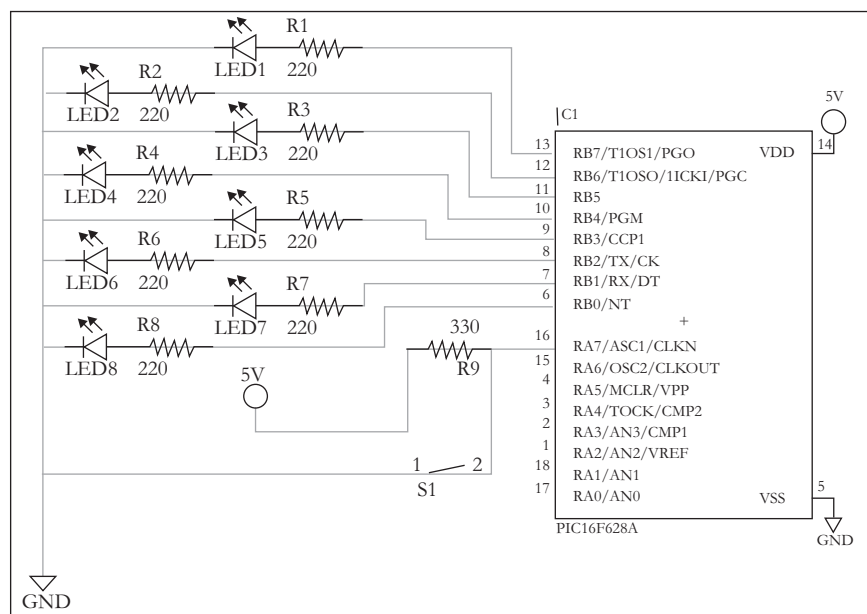


Figura 3. Circuito electrónico de secuencia de LEDS con PIC.

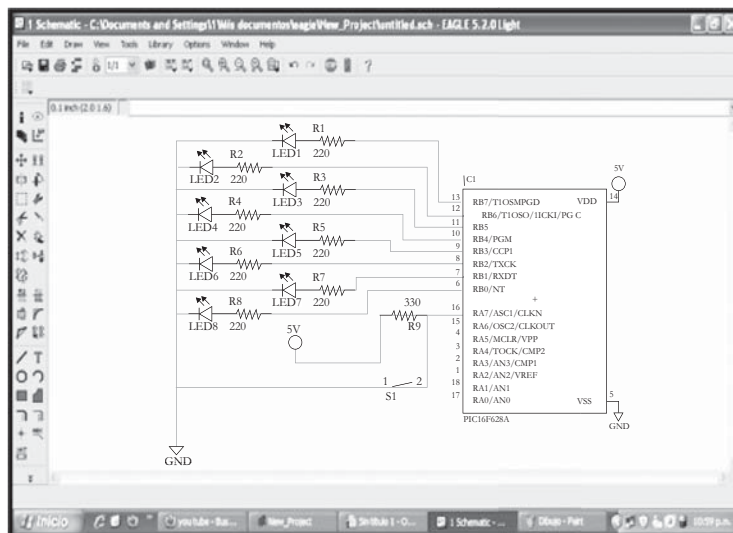


Figura 4. Simulación del circuito secuenciador de LEDS.

BIBLIOGRAFÍA

- Balabanian, Norman y Bradley, Carlson (2002). *Principios de diseño lógico digital*. CECSA, México.
- Benavent G., José Manuel; Abellán G., Antonio y Figueres M., Emilio (2000). *Electrónica de potencia, teoría y aplicaciones*. Alfaomega, México.
- Carman A., Samuel (1989). *Electrónica en Ingeniería Eléctrica*. Tesis ESIME-IPN, México.
- Cathey, Jimmie J. (1991). *Dispositivos electrónicos y circuitos*. McGraw-Hill, México.
- Couëdic, Marc (2000). *Circuitos integrados para tiristores y triacs*. Alfaomega, Macombo.
- Del Toro, Vincent (1988). *Fundamentos de Ingeniería Eléctrica*. Prentice Hall Hispanoamericana, México.
- Enríquez H., Gilberto (1998). *Control de motores eléctricos*. Noriega-Limusa, México.
- Enríquez H., Gilberto (2002). *Fundamentos de control de motores eléctricos en la industria*. Noriega-Limusa, México.
- Fabricius, D. Eugene (1996). *Diseño lógico moderno y teoría de la conmutación*. CECSA, México.
- Figueres A., Emilio; Benavent G., José Manuel y Garcerá S., Gabriel (2001). *Simulación de circuitos electrónicos de potencia con Pspice*. Alfaomega, México.
- Floyd, L. Thomas (1996). *Electrónica. Dispositivos electrónicos*. Noriega-Limusa, México.
- Floyd, L. Thomas (1996). *Fundamentos de electrónica digital*. 3 volúmenes. Noriega-Limusa, México.
- Hermosa D., Antonio (1995). *Electrónica digital fundamental*. Alfaomega, Marcombo.
- Kenneth, B. Rexford (1993). *Electrical Control for Machines*. Delmar Publishers.
- Maloney, Timothy J. (1983). *Electrónica industrial*. Prentice Hall Hispanoamericana, México.

- Mandado P., Enrique; Acevedo, Jorge Marcos y Pérez L., Serafín Alfonso (1999). *Controladores lógicos y autómatas programables*. Alfaomega, Marcombo.
- Ogayar F., Blas; López V., Andrés (2001). *Teoría de circuitos con Orcad, 20 prácticas de laboratorio*. Alfaomega-RaMa, México.
- Pallas A., Ramón (2007). *Instrumentos Electrónicos Básicos*. Alfaomega, Marcombo.
- Pallas A., Ramón (2007). *Sensores y acondicionadores de señal*. Alfaomega, Marcombo.
- Rosenberg, Robert (1970). *Reparación de motores eléctricos*. 2 tomos. Gustavo Gili, Barcelona.
- Ruiz V., Francisco (2007). *Electrónica digital fácil para electricistas y técnicos de mantenimiento*. Alfaomega, Marcombo.
- Séguier, Guy (1982). *Electrónica de potencia*. Gustavo Gili, Barcelona.
- Tokheim, L. Roger (1996). *Fundamentos de los microprocesadores*. McGraw-Hill, México.
- Valdés P., Fernando E. (2007). *Microcontroladores, fundamentos y aplicaciones con PIC*. Alfaomega, Marcombo.
- Zhar B., Paul (2006). *Prácticas de electrónica*. Alfaomega/IPN, México.

Electrónica Digital Aplicada para Ingeniería Mecánica, se terminó de imprimir el 15 de diciembre de 2013, en los talleres de Ediciones Verbolibre, S.A. de C.V., 1o. de mayo núm. 161-A, Col. Santa Anita, Deleg. Iztacalco, México, D.F., C.P. 08300. Tel.: 3182-0035.
<edicionesverbolibre@gmail.com>.

La edición consta de 1 000 ejemplares.