

Introducción a los circuitos combinacionales

Los sistemas digitales se fundamentan en el sistema de numeración binario, que tiene como símbolos el 0 y el 1. El carácter binario de las señales que procesan estos sistemas reduce la influencia de perturbaciones en la transmisión y almacenamiento de la información, siendo inapreciables en comparación con los sistemas analógicos y mejorándose la calidad y fiabilidad de los productos y equipos electrónicos.

La aplicación de la electrónica a los proyectos aeroespaciales y militares impulsó a los fabricantes de componentes a reducir el tamaño de los circuitos electrónicos, integrando un gran número de componentes en un solo «chip». Así se consiguió una reducción importante del peso y volumen de los equipos. Estos circuitos integrados pueden realizar desde funciones sencillas, como los formados por puertas lógicas, hasta funciones muy complejas que realizan los microprocesadores que utilizan los ordenadores.

La implantación de las tecnologías digitales en campos como la automatización de procesos, la informática y las telecomunicaciones ha permitido que estas áreas experimenten actualmente un progreso vertiginoso. Los sistemas digitales están presentes en los productos electrónicos de consumo (televisión, vídeo, equipos de música, etc.) integrando calidad de imagen y sonido, en sistemas de control para todo tipo de aplicaciones, automatización de factorías de automóviles, comunicaciones vía satélite, y en los equipos informáticos.



Sistema de control digital.

ESQUEMA CONCEPTUAL

CIRCUITOS COMBINACIONALES

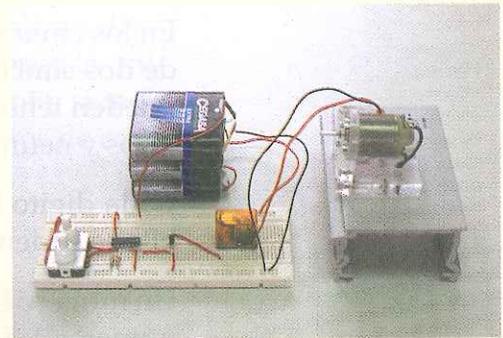
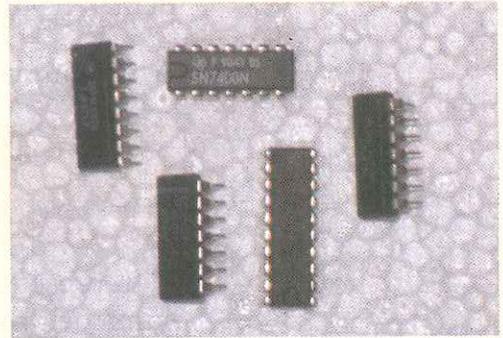
Sistema binario

Puertas lógicas
(AND, OR, NOT,...)

Familias lógicas

Función lógica

Circuitos lógicos



ACTIVIDADES INICIALES

1. Enumera el nombre de cinco equipos electrónicos que tengan algún dispositivo digital.
2. ¿Qué entiendes por circuito integrado?
3. ¿En qué consiste el sistema de numeración binario?

DESARROLLO DE CONTENIDOS

1. Sistemas de numeración

De todos los sistemas de numeración existentes, el más conocido es el decimal, que es el que utilizamos habitualmente. Este sistema se construye a partir de diez dígitos: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Cada dígito, además del valor que posee aisladamente, tiene un valor posicional o peso dependiendo de la posición que ocupa dentro de un grupo de dígitos del que forma parte.

Así, el número 1 286 se puede expresar de la siguiente forma:

$$1\ 286 = 1\ 000 + 200 + 80 + 6 = 1 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 6 \cdot 10^0$$

1 unid. mil 2 centenas 8 decenas 6 unidades

La representación de un número supone descomponerlo en una suma de productos de cada dígito por el peso correspondiente a su posición, siendo este una potencia de 10.

En los circuitos digitales se utiliza el **sistema binario**, compuesto de dos símbolos o dígitos 0 y 1 asimilables a los dos estados que pueden tener un gran número de dispositivos eléctricos, electrónicos y neumáticos (interruptores, relés, lámparas, transistores).

Cada dígito binario recibe el nombre de **bit**. A un conjunto de 8 bits se le denomina **byte**.

Un número binario está compuesto por agrupaciones de bits. Los números 1 001, 1 111 010, 101 y 10 están compuestos, respectivamente, por 4, 8, 3 y 2 bits o dígitos binarios.

A cada dígito binario le corresponde un valor posicional o peso. Cada posición es una potencia creciente de dos, siendo el bit que está más a la izquierda, el de mayor peso, y el primero el de menor peso.

Los pesos correspondientes a la combinación 1 010 se expresan de la siguiente forma:

2^3	2^2	2^1	2^0	
8	4	2	1	← <i>valor posicional</i>
1	0	1	0	← <i>número binario</i>
<i>bit de mayor peso</i>			<i>bit de menor peso</i>	

a) Conversión de un número binario a decimal

Para obtener el equivalente en decimal de un número binario, se suman los pesos correspondientes a las posiciones de los bits que tienen valor 1.

Ejemplo: Obtener el equivalente en decimal del número binario 11 101.

2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	
16	8	4	2	1	← Pesos
1	1	1	0	1	← Número binario

Se suman los pesos de las posiciones ocupadas por bits de valor 1.

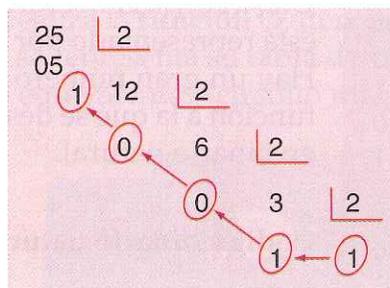
$$16 + 8 + 4 + 1 = 29$$

El equivalente en decimal del número 11 101 es el 29.

b) Conversión de un número decimal a binario

Para pasar un número decimal entero a binario, se realizan divisiones sucesivas entre dos hasta que el último cociente sea la unidad. El número binario se forma con el último cociente, siendo este el bit más significativo o de mayor peso, y los restos de cada división, tal como se indica en el ejemplo siguiente:

Pasar el número 25 de decimal a binario.

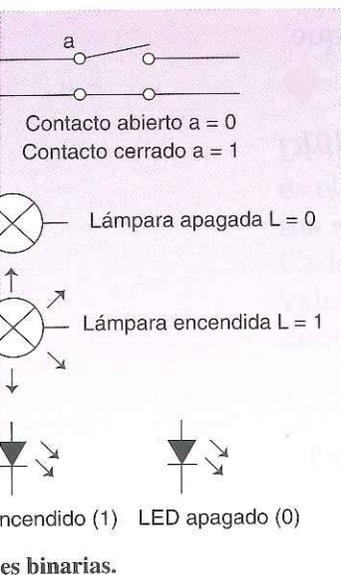


El equivalente en binario del número 25 es el 11 001

Actividades de enseñanza-aprendizaje

- 1 Obtener el número equivalente en el sistema decimal de los siguientes números binarios: 01010, 011, 101011, 11111, 1011011.
- 2 Pasar los siguientes números decimales al sistema binario: 9, 16, 24, 45, 64.

2. Variable binaria



Una variable a es una variable binaria si toma únicamente **dos valores** perfectamente diferenciados, que simbólicamente se designan por **0 y 1**. Estos símbolos se pueden asociar a los términos: sí-no, abierto-cerrado, tensión alta-baja.

Existe un gran número de dispositivos eléctricos, electrónicos, neumáticos o de magnitudes físicas que tienen dos estados posibles claramente definidos a los que se les asignan los valores 0 y 1, pudiéndoseles aplicar las leyes del **álgebra de Boole**.

Algunos de estos dispositivos se muestran en la figura 1. Un contacto eléctrico se puede representar por la letra a , teniendo **dos estados posibles**: abierto y cerrado. Una lámpara L o un diodo LED pueden tener dos estados posibles: encendido o apagado.

2.1. Códigos de numeración

Toda la información que procesan los sistemas digitales (ordenadores, calculadoras) está en forma de dígitos binarios o bits (0 y 1); por tanto, cualquier información que vaya a ser procesada por un sistema digital, ya sea un carácter numérico o alfanumérico, deberá ser traducida o **codificada** a un lenguaje de ceros y unos, que es el que entienden estos sistemas.

Decimal	sistema binario	sistema decimal	sistema binario
0	00	0	0000
1	01	1	0001
2	10	2	0010
3	11	3	0011
4		4	0100
5		5	0101
6		6	0110
7		7	0111
8	000	8	1000
9	001	9	1001
10	010	10	1010
11	011	11	1011
12	100	12	1100
13	101	13	1101
14	110	14	1110
15	111	15	1111

Una información está codificada cuando cada carácter está representado por un conjunto de dígitos binarios. Hay un gran número de códigos, dependiendo de la función a la que se destinen. El más sencillo es el código binario natural.

Código binario natural

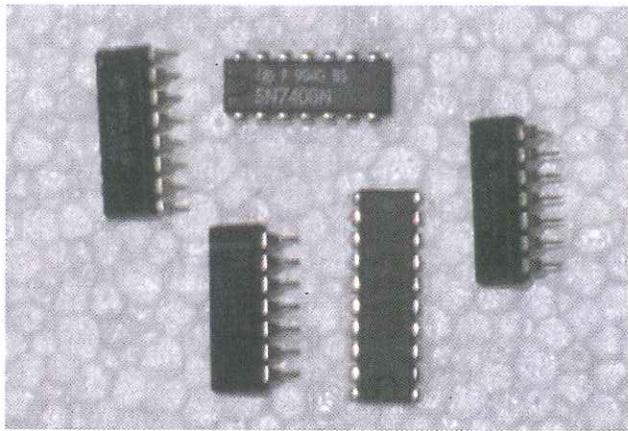
El sistema de numeración binario recibe el nombre de código binario natural. A cada número decimal le corresponde una combinación de bits en binario.

El número máximo de combinaciones en binario viene determinado por el número de bits de cada combinación. Con n bits se pueden obtener 2^n **combinaciones diferentes**.

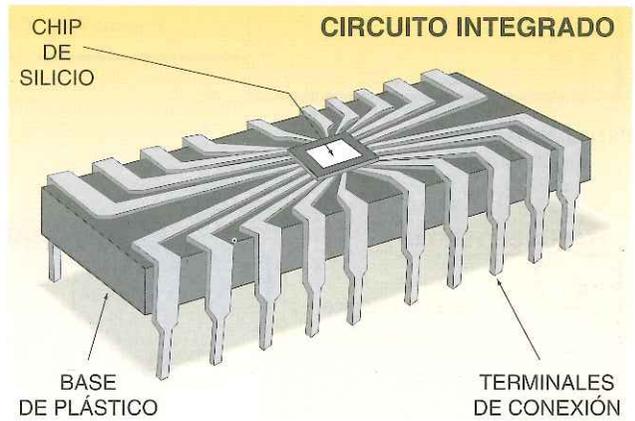
o binario-natural de 2, 3 y 4 bits.

3. Puertas lógicas

Se denominan **puertas lógicas** a los dispositivos u operadores, que realizan las **funciones lógicas básicas**. Las puertas lógicas se encuentran disponibles en el mercado en **circuitos integrados**. Estos circuitos tienen una gran densidad de componentes (transistores, diodos, resistencias), integrados en una **oblea de silicio** de reducidas dimensiones y encapsulada en un material plástico. Los circuitos integrados de puertas lógicas corresponden a un nivel de integración bajo, aproximadamente 100 componentes por circuito. El número aproximado de puertas lógicas que contiene un circuito integrado es de 4.



Circuitos integrados.



Circuito integrado.

3.1. Diferentes tipos de puertas lógicas

a. **Puerta OR**. Es la puerta que realiza la **función O**, denominada **suma lógica**. A continuación se representa su **tabla de verdad**, simbología, circuito eléctrico equivalente y circuito integrado.

TABLA DE VERDAD

a	b	S = a + b
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Siempre que una de las entradas es 1, la salida vale 1.

SIMBOLOGÍA

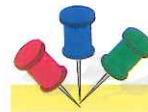
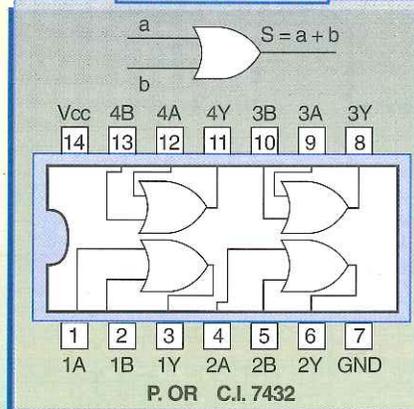
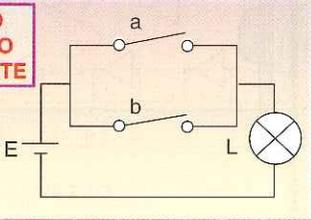


Tabla de verdad: es una representación gráfica de todas las posibles combinaciones de las variables de entrada y del valor de la salida para cada combinación de ellas.

CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

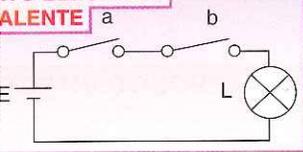


Puerta OR.

Tabla de Verdad

$S = a \cdot b$ La salida solamente toma el estado lógico «1» cuando las dos variables de entrada a y b, toman el valor «1» para las demás combinaciones de las variables de entrada.

Circuito Eléctrico Equivalente



AND.

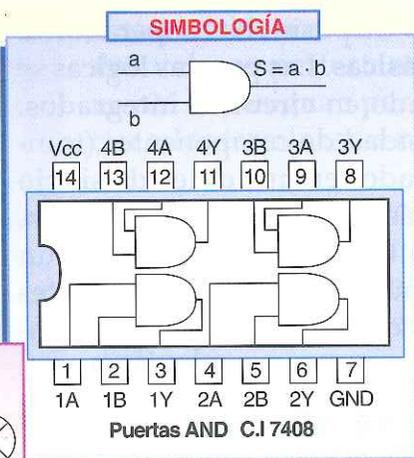
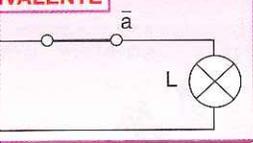


Tabla de Verdad

$S = \bar{a}$ El estado lógico de la salida es el inverso del de la entrada.

Circuito Eléctrico Equivalente



inversora.

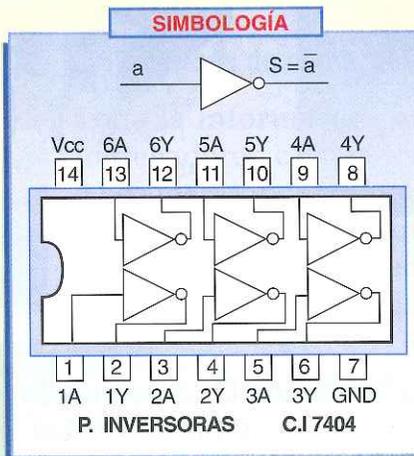
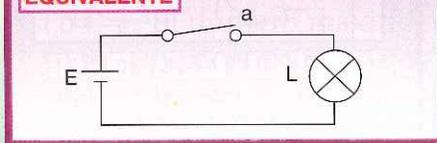


Tabla de Verdad

a	S = a
0	0
1	1

Circuito Eléctrico Equivalente



Puerta no inversora.

El circuito integrado 7432 está formado por 4 puertas OR de dos entradas cada una todas realizan la misma función. El número de terminales o pins es de 14. El terminal 14 es el de alimentación, 5 V, y el 7 corresponde a masa (cero voltios). Estos dos terminales son comunes para todas las puertas. El resto de terminales corresponden a las entradas y salidas de las puertas. Existen en el mercado circuitos integrados de 2, 3, 4 y 8 entradas cada puerta, dependiendo del tipo de puerta lógica. La función que realizan es la misma; la única diferencia está en el número de variables con las que opera simultáneamente.

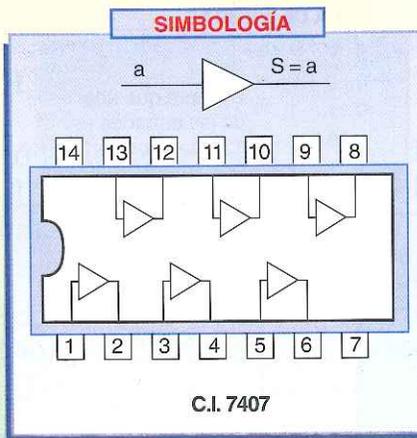
b. Puerta AND

Esta puerta realiza la función lógica Y o producto lógico.

c. Puerta NOT (inversora)

Realiza la función negación, invirtiendo el valor de la variable que tiene en su entrada. También se denomina puerta inversora.

d. Puerta no inversora. Realiza la función igualdad.



Experiencia 1 Comprobación de circuitos integrados de puertas lógicas OR y AND

Se trata de comprobar el correcto funcionamiento de las puertas de los circuitos integrados de puertas OR y AND, viendo si cumplen su tabla de verdad.

- Los circuitos integrados a utilizar van a ser: SN 7432 de puertas OR y un SN 7408 de puertas AND.

Material

Una placa de conexiones Board.

Un circuito integrado SN 7432.

Un diodo LED.

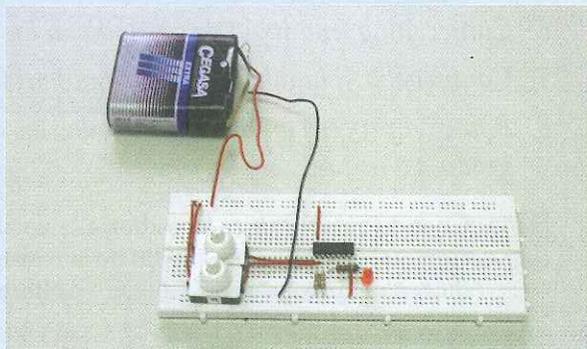
Una resistencia de 220Ω , 1/2 w.

2 resistencias de 470Ω 1/2 w.

2 interruptores.

Hilo de conexión.

Fuente de alimentación o pila de 4,5 V.



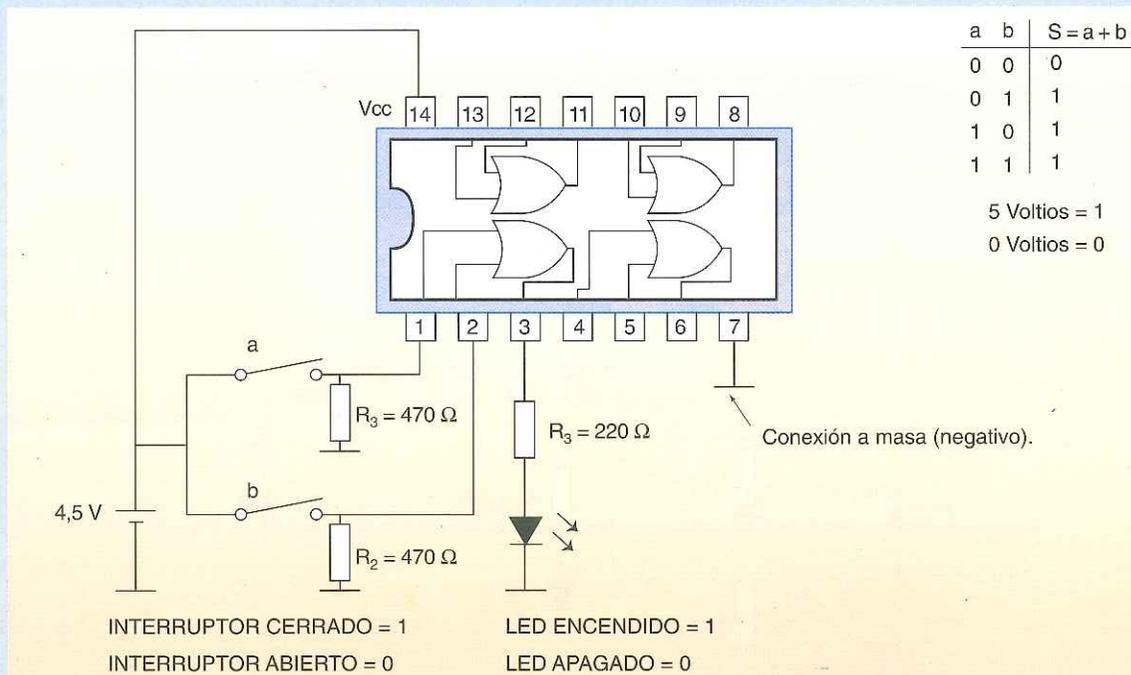
Montaje práctico en placa Board.

Herramientas

Tijeras.

Pinzas.

Proceso



Esquema electrónico.

Monta en la placa Board el circuito integrado y el resto de los componentes, según el esquema de la figura.

Comprueba si, con los dos interruptores abiertos, se enciende el diodo LED conectado a la salida de la puerta.

Cierra el interruptor *a*, y comprueba si el diodo LED conectado a la salida de la puerta se enciende.

Repite el proceso cerrando el interruptor *b*.

Cierra los dos interruptores, *a* y *b*, y comprueba si el diodo LED se enciende

Confecciona una tabla de verdad con los valores obtenidos.

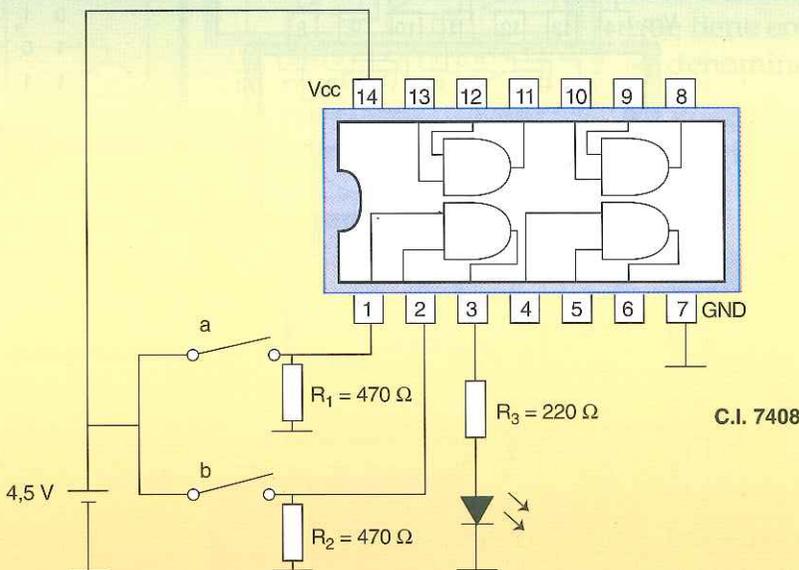
Comprueba si la tabla de verdad obtenida coincide con la correspondiente a la puerta OR.

Repite el proceso anterior para todas las demás puertas lógicas que contiene el circuito integrado.

NOTA: Cuando se aplican cero voltios a la entrada de las puertas, es necesario unirlos a masa, operación que se realiza por medio de la resistencia «R» de 470 Ω. Si no se une a masa, la entrada queda «en el aire» y es equivalente a aplicar un nivel alto de tensión (un uno).

Experiencia 2

Repite el proceso anterior con un circuito integrado de puertas lógicas AND, realizando el siguiente montaje.



a	b	S = a · b
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Esquema electrónico.

3.1. Otras puertas lógicas

Existen otras puertas lógicas, que realizan funciones lógicas combinadas.

- a. **Puerta NOR.** Realiza la función **NO-O**. Efectúa la suma lógica de las dos entradas, e invierte el resultado de la operación. A continuación se representa su tabla de verdad, simbología y circuito integrado de puertas NOR de dos entradas.

TABLA DE VERDAD

a	b	a+b	S = $\overline{a+b}$
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

Realiza la función inversa de la puerta OR.

SIMBOLOGÍA

CIRCUITO INTEGRADO

P. NOR C.I. 7402

Puerta NOR.

- b. **Puerta NAND.** Realiza la función **NO-Y**. Esta puerta efectúa el producto lógico entre las variables de entrada, invirtiendo el resultado obtenido.

TABLA DE VERDAD

a	b	a · b	S = $\overline{a \cdot b}$
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

SIMBOLOGÍA

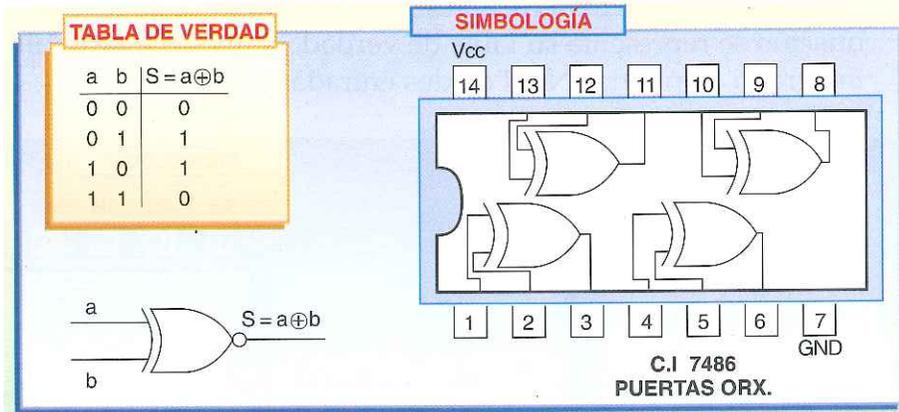
CIRCUITO INTEGRADO

P. NAND. C.I. 7400

Puerta NAND.

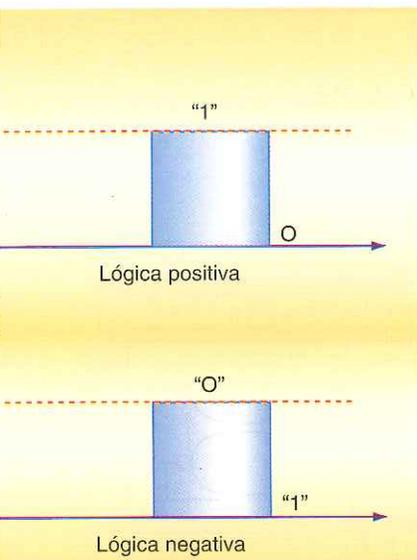
La salida solamente toma el estado lógico «0» y cuando las dos variables de entrada a y b, toman el valor «1», siendo la salida «1» para todas las demás combinaciones posibles de las variables de entrada.

- c. **Puerta O-Exclusiva (ORX).** Realiza la función O-Exclusiva de dos variables **a** y **b**. El estado lógico de la salida es «1», siempre que una de las entradas se encuentre en estado «1» y la otra entrada esté en estado «0». Cuando las dos entradas tienen el mismo estado lógico, la salida toma el valor «0».



Puerta ORX.

3.2. Lógica positiva y lógica negativa



Para **diferenciar** los estados lógicos 0 y 1, se asignan niveles de tensión. Cuando a un «1» se le asigna un nivel de tensión alto y a un «0» un nivel de tensión bajo, esta asignación de niveles recibe el nombre de **lógica positiva**. Si se asigna un «1» al nivel de tensión bajo y un «0» al nivel de tensión alto, esta correspondencia recibe el nombre de **lógica negativa**.

Las puertas lógicas de los circuitos integrados anteriores trabajan con lógica positiva. Un «1» está representado por 5 voltios, y un «0» por 0 voltios. Al nivel alto de tensión también se le designa por la letra «H», y al nivel bajo por la letra «L».

Los fabricantes de circuitos integrados nos especifican la función que realizan y la lógica con la que trabajan.

◆ 4. Familias lógicas

Existe una gran variedad de **tecnologías de fabricación** de circuitos integrados. Las más utilizadas son **TTL** y **CMOS**. Las características que buscan los fabricantes en todas las familias lógicas son fundamentalmente conseguir un gran número de

componentes por mm^2 , el mínimo consumo, un bajo coste y velocidades de trabajo muy rápidas. Las hojas de características que suministran los fabricantes nos indican los parámetros principales comunes a todas las familias.

a) **Familia TTL** (Lógica-transistor-transistor). Los circuitos que forman las puertas lógicas están constituidos por resistencias, diodos y transistores bipolares. Esta familia dispone de una gran variedad de circuitos integrados, no sólo de puertas lógicas, sino de otras funciones más complejas. La más conocida es la **serie 74**, que incluye todo tipo de puertas lógicas y también funciones más complejas (como contadores, decodificadores y multiplexores). Esta familia es una de las de mayor aplicación y más comercializada para la realización de circuitos lógicos por su facilidad de manipulación y bajo precio.

La tensión de **alimentación es de 5 voltios**. En tecnología TTL se trabaja generalmente en lógica positiva. Al estado 1 se le asigna la tensión de 5 voltios y al estado lógico 0 se le asignan 0 voltios. El estado 1 también se representa por H (*High* = Alto) y el estado 0 por L (*Low* = Bajo).

b) **Familia CMOS**. Se denomina así porque el elemento básico de los circuitos integrados de esta familia son los transistores unipolares MOS. Con este tipo de transistores se consigue una mayor densidad de integración (componentes/ mm^2) que en TTL. Realizan funciones semejantes a la familia TTL.

La serie estándar de esta tecnología es la **familia 4000**. La más utilizada es la serie 4000B.

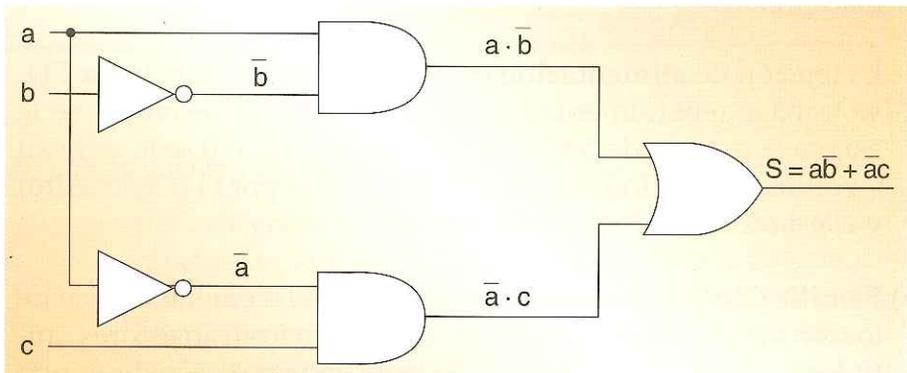
- La tensión de **alimentación** varía **entre 3 y 18 voltios**, según la serie o el fabricante. Se recomienda no superar los **15 voltios** de tensión máxima.
- Para comparar las características de las familias TTL y CMOS recurrimos a las hojas de características que suministra el fabricante, en las cuales se indican todos sus parámetros característicos: tensión de alimentación, velocidad de trabajo, potencia disipada, temperatura de funcionamiento, niveles de tensión de trabajo. Según **la aplicación** a la que vayan a ser destinadas se elegirá una familia u otra, en función de las prestaciones que deseemos obtener.

5. Función lógica

Una función lógica es una variable binaria, cuyo valor depende de una expresión algebraica formada por otras variables binarias que están relacionadas entre sí, por medio de suma lógica, producto lógico e inversión. Puede venir dada por una expresión algebraica o por su tabla de verdad.

En la función lógica $S = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot c$, el valor de la variable S , depende del valor que tomen las variables a , b y c , y que están relacionadas entre sí por las funciones básicas AND, OR y NOT.

Utilizando la simbología de cada una de las funciones básicas, el circuito lógico que realiza la función anterior es:



Circuito lógico.

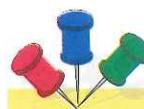
5.1. Tabla de verdad de una función lógica

Es una forma de representación gráfica de una función lógica. En ella se reflejan todas las posibles combinaciones que se pueden formar con las variables de entrada (2^n combinaciones, siendo n el número de variables). Las combinaciones van ordenadas en orden creciente, figurando al lado de cada combinación su equivalente en decimal.

Se representa por 1 o 0 el valor que toma la función S para cada combinación de entrada.

Las variables están ordenadas de menor a mayor peso, empezando por la variable que está situada a la derecha. A continuación se representa una tabla de verdad de una función lógica de tres variables. Las tablas de verdad constituyen un buen método para describir el funcionamiento de un automatismo o circuito lógico.

	Variables de entrada			Salida
	a	b	c	S
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	0
7	1	1	1	1



Forma directa: variable sin complementar.

Forma inversa: variable complementada.

Para obtener la expresión matemática de la función lógica a partir de la tabla de verdad, se observa para qué combinaciones de las variables de entrada la función de salida toma el valor 1. Cada una de estas combinaciones se expresa en forma de producto lógico, asignándole al estado 1 la variable en su **forma directa**, y al estado 0 la variable en su **forma inversa**.

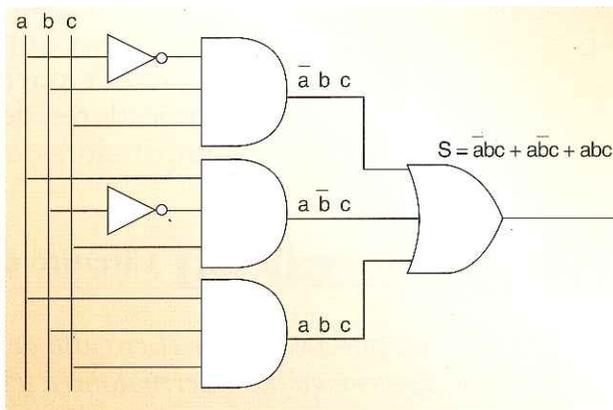
En la tabla de verdad anterior, para la combinación 011, el producto lógico obtenido es: $\bar{a} b c$.

Para la combinación 101 es: $a \bar{b} c$, y para la combinación 111 es $a b c$.

La expresión matemática de la función lógica es la **suma de los productos lógicos** de las combinaciones de entrada que toman el valor 1 obtenidos.

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

A partir de la **función lógica** se obtiene el circuito con puertas lógicas.



Circuito con puertas lógicas de la función S.



Actividad de enseñanza-aprendizaje

1 Dada la siguiente tabla de verdad obtener:

- La función lógica de la variable de salida S.
- Dibujar el circuito lógico que realiza la función.

a	b	c	s
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

6. Circuitos combinacionales



Los circuitos combinacionales son circuitos lógicos que están constituidos por un conjunto de puertas lógicas, con un número de entradas y otro de salidas. Los valores de las salidas (1 ó 0) dependen únicamente de los valores que tengan las variables de entrada en ese momento.

Para **diseñar** un circuito combinacional con puertas lógicas, se procede de la siguiente forma:

- Identificación de todas las variables de entrada y salida que intervienen en el planteamiento del problema a resolver.
- Realización de la tabla de verdad, reflejando las situaciones descritas en el planteamiento del problema.
- De la tabla de verdad se obtienen las funciones lógicas de salida.
- Realización del circuito lógico con puertas lógicas.

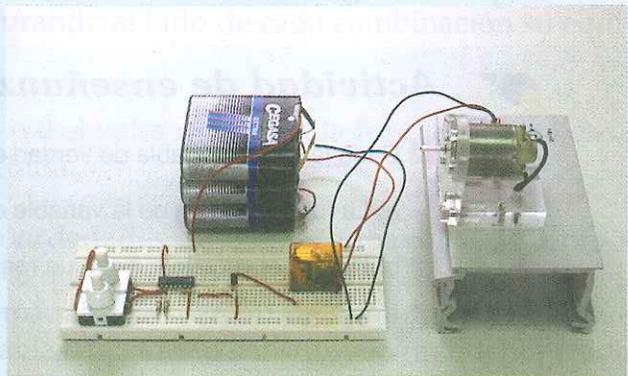
Existe una gran variedad de circuitos combinacionales de funciones más complejas, que integran en un solo integrado un gran número de puertas. Según la función que realicen pueden ser: codificadores, decodificadores, multiplexores, demultiplexores, comparadores, sumadores.

Experiencia 3 Circuito de control

Monta con puertas lógicas el circuito de control de un motor. Debe funcionar únicamente cuando se accionan dos interruptores a y b.

Material

- P1 placa de montaje Board.
- 1 C.I. 7408.
- Pilas de 4,5 voltios o fuente de alimentación.
- 1 relé de dos contactos, de 12 V.
- 1 transistor BC 547.
- 2 interruptores.
- 1 motor c.c 0-12 V.
- 2 resistencias de 470 Ω .
- 1 resistencia de 1 k Ω .
- Hilo de conexión.



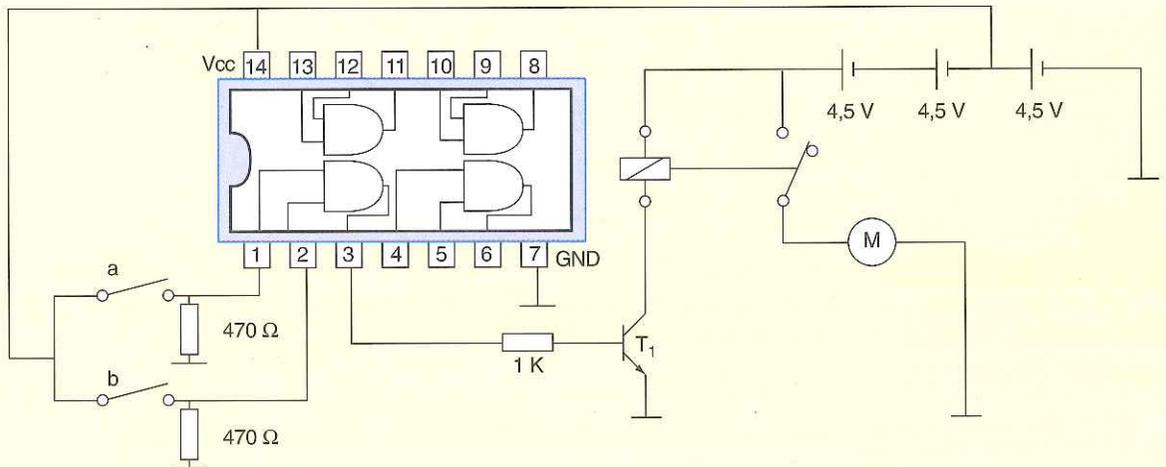
Montaje práctico.

▼ Herramientas ▼

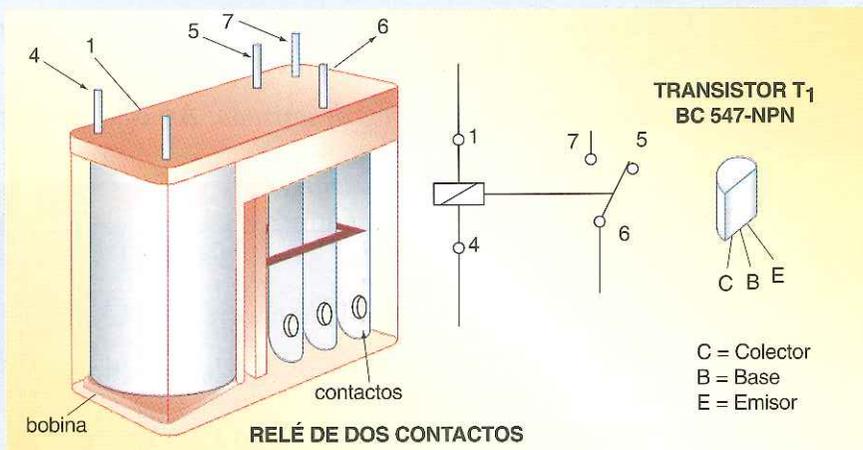
Tijeras.

Pinzas.

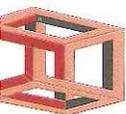
▼ Proceso ▼



Esquema electrónico.



1. Realiza la tabla de verdad en la que se refleje el comportamiento del circuito.
2. Obtén la expresión de la función lógica de salida.
3. Obtén el circuito lógico que realiza la función.
4. Realiza el montaje del circuito de la figura.
5. Explica el funcionamiento del circuito.
6. Comprueba que al cerrar los interruptores a y b, el motor comienza a funcionar, y que, para todos los demás casos, el motor no funciona.



DISEÑANDO: un sistema automático

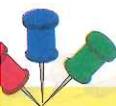
Planteamiento del problema

Se desea diseñar el circuito de control de un distribuidor automático de desayunos, que suministre los siguientes productos:

- Pulsando un botón A, se obtendrá café solo.
- Pulsando el botón A y C café y leche.
- Pulsando B y C cacao y leche.

Si se pulsan los botones de cualquier otra forma, no se obtiene nada. La salida de los recipientes de café, leche-café, y cacao-leche está regulada por tres electroválvulas E_c , E_l , E_k .

El funcionamiento de las electroválvulas se simulará con tres diodos LED: rojo, verde y amarillo.



Electroválvula: Válvula accionada por corriente eléctrica.

Proceso de diseño

1º En primer lugar se obtienen las funciones lógicas a partir de la tabla de verdad o de funcionamiento.

Asignación de variables de entrada: A= café, B= cacao, C= leche.

- Funciones lógicas de salida:

- E_c = electroválvula para el recipiente de café.

- E_l = electroválvula para el recipiente de leche-café.

- E_k = electroválvula para el recipiente de cacao-leche.

A B C	E_c	E_l	E_k
0 0 0	0	0	0
0 0 1	0	0	0
0 1 0	0	0	0
0 1 1	0	0	1
1 0 0	1	0	0
1 0 1	0	1	0
1 1 0	0	0	0
1 1 1	0	0	0

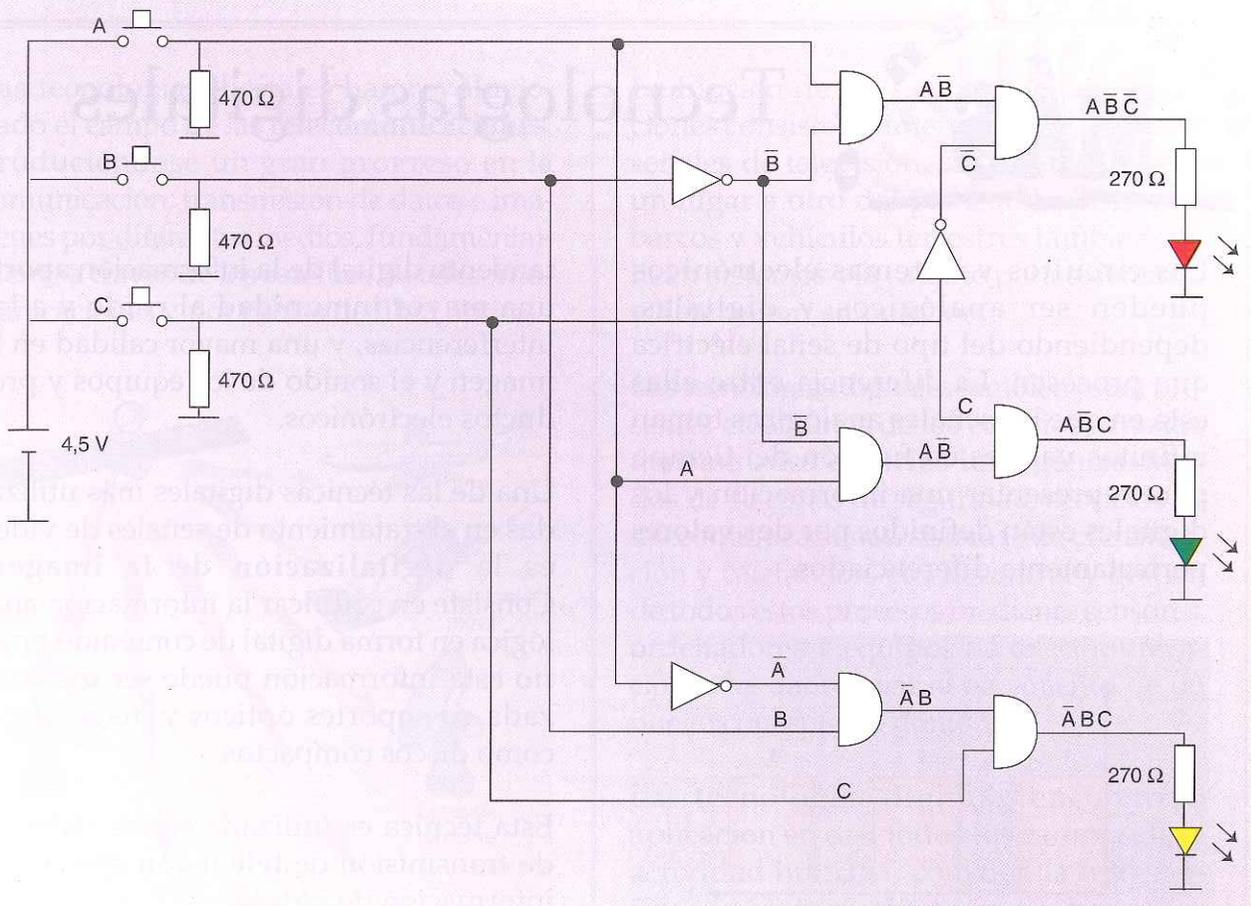
Resultando las funciones lógicas:

$$E_c = A \bar{B} \bar{C}$$

$$E_l = A \bar{B} C$$

$$E_k = \bar{A} B C$$

2º Se dibuja el esquema del circuito combinacional, a partir de las funciones lógicas de salida. El funcionamiento de las electroválvulas se simulará con tres diodos LED: rojo, verde y amarillo, respectivamente.



Circuito lógico.

3º Obtenido el circuito lógico, se seleccionan los circuitos integrados y el material a utilizar. En este caso:

2CI - 7408-Puertas AND (Tecnología TTL).

1CI - 7404-Puertas inversoras.

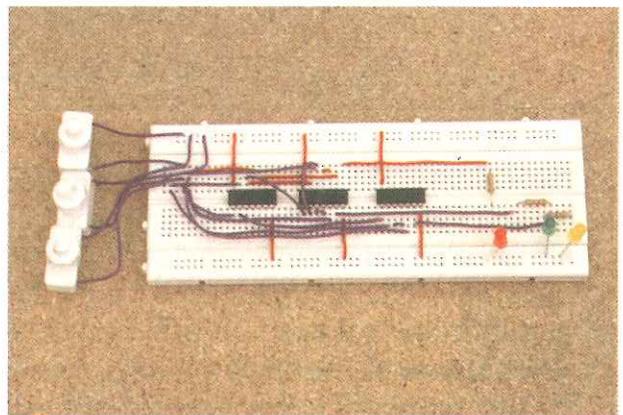
Diodos LED (rojo, verde amarillo).

1 pila de 4,5 V, o fuente de alimentación.

Resistencias de 470 Ω y 270 Ω.

4º Se colocan los circuitos integrados en la placa Board, y se realiza el montaje, siguiendo paso a paso el esquema obtenido.

5º Una vez realizado el montaje, se comprueba el funcionamiento, verificando si se cumplen las condiciones del problema.



Montaje práctico.