

Circuitos de pulsos

- Introducción
- Pulsos y trenes de pulsos
- Pulsos ideales y pulsos reales
- Circuitos de reloj
- Ondas cuadradas
- Generadores y receptores de pulsos
- Terminología de circuitos de pulsos
- Actividad práctica Nº 10

Introducción

Los circuitos estudiados hasta el momento (codificadores, decodificadores, multiplexores, etc.) han sido configuraciones *estáticas* en las cuales el estado de la salida depende exclusivamente de las combinaciones de 1's y 0's aplicadas en sus entradas.

Las señales digitales estáticas son producidas por interruptores, sensores, etc. y para pasar de un estado a otro necesitan de una influencia externa.

En algunos experimentos y aplicaciones de este curso se han mostrado circuitos que generan o utilizan señales digitales que cambian de estado con el tiempo. Estas señales se denominan *pulsos*. Una señal de pulsos (figura 243) es una sucesión alterna de niveles **bajos** y **altos** de voltaje.

Señales de pulsos

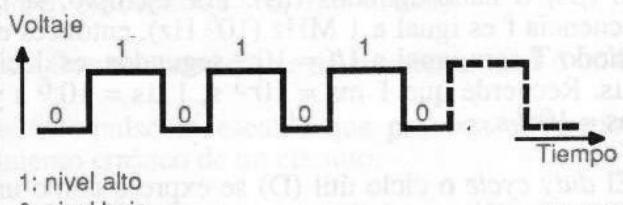


Fig. 243

Las señales de pulsos son *dinámicas*, es decir, están cambiando constantemente de estado y son las más comunes en la mayoría de circuitos digitales. Por su necesidad e importancia, trabajaremos constantemente con ellas en el resto del curso.

En las siguientes lecciones estudiaremos los circuitos de pulsos desde dos puntos de vista: los que generan o producen pulsos y los que requieren de señales de pulsos para operar. En esta lección destacaremos los aspectos básicos de la teoría de pulsos.

Pulsos y trenes de pulsos

Un *pulso* (figura 244) es una señal que realiza una transición de un estado al otro y regresa al estado inicial después de un cierto tiempo: si estaba en **bajo** pasa a **alto** y viceversa. En el primer caso se habla de pulsos positivos o activos en **alto** y en el segundo de pulsos negativos o activos en **bajo**.

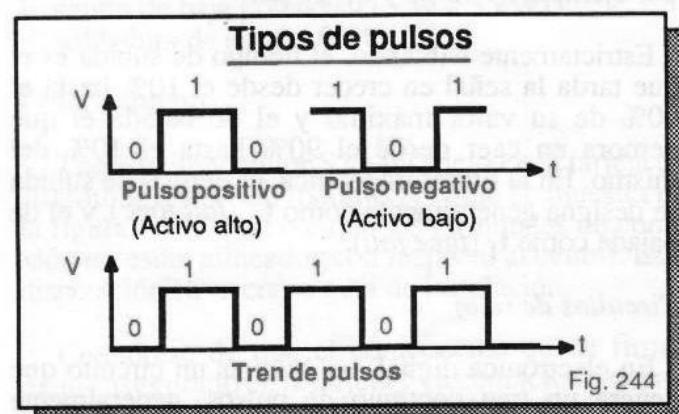


Fig. 244

Si estos cambios se producen en forma continua se tiene un *tren de pulsos*. Los puntos donde la señal cambia de estado se denominan *bordes* o *flancos*. El paso de 0 a 1 es el *flanco de subida* de la señal y el paso de 1 a 0 es su *flanco de bajada*.

Pulsos ideales y pulsos reales

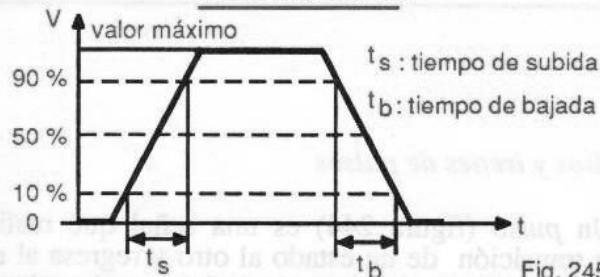
En electrónica siempre se tienen en cuenta los casos ideales y los casos reales de cada situación analizada. La electrónica digital no es la excepción. Un ejemplo son las señales de pulsos.

Los pulsos que hemos representado hasta ahora son *ideales*, es decir, la señal cambia de un estado al otro en forma instantánea. En la realidad, un circuito digital, a pesar de ser muy rápido, tarda un determinado tiempo (muy corto, pero tiempo al fin y al cabo) para cambiar de estado.

Este tiempo se denomina *retardo de propagación* (*propagation delay*) y es el parámetro que define la velocidad de respuesta de los circuitos digitales a sus señales de entrada. Como vimos en la lección 2, cada familia y subfamilia TTL o CMOS tiene unas características de velocidad definidas.

Como consecuencia de lo anterior, la obtención de pulsos ideales no es posible en la práctica. En su

Pulsos reales



En la gran mayoría, los pulsos reales tienen el aspecto mostrado en la figura 245 y se caracterizan por poseer tiempos de subida (t_s) y de bajada (t_b) finitos, por ejemplo $t_s=15 \mu s$ y $t_b=10 \mu s$.

Estrictamente hablando, el tiempo de subida es el que tarda la señal en crecer desde el 10% hasta el 90% de su valor máximo y el de bajada el que demora en caer desde el 90% hasta el 10% del mismo. En la literatura técnica, el tiempo de subida se designa generalmente como t_r (*fall time*), y el de bajada como t_f (*time fall*).

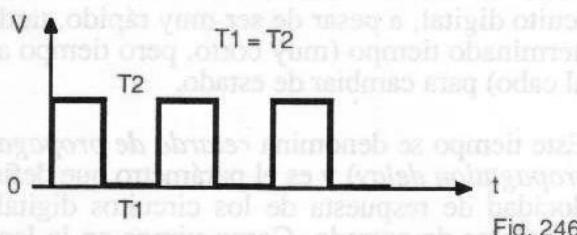
Circuitos de reloj

En electrónica digital, un *reloj* es un circuito que genera un tren continuo de pulsos, generalmente cuadrados. Los relojes se utilizan para sincronizar la operación de sistemas digitales y realizar funciones de temporización. El concepto de onda cuadrada se define a continuación.

Onda cuadrada

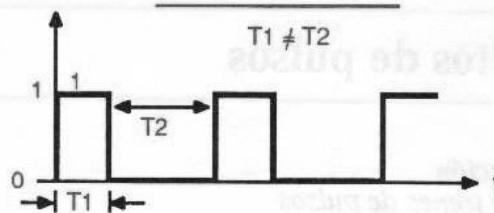
Una onda digital es una sucesión continua de pulsos cuyo nivel pasa alternativamente del estado **bajo** al **alto** y viceversa. Como se observa en la figura 246, la onda es **alta** durante un tiempo T_1 llamado *ancho del pulso* y **baja** durante un tiempo T_2 llamado *intervalo del pulso*.

Onda cuadrada



Cuando la señal permanece en **bajo** el mismo tiempo que en **alto**, es decir cuando $T_1=T_2$, la señal se denomina onda simétrica o *cuadrada*. Cuando

Onda asimétrica



estos tiempos son diferentes, la señal es una onda asimétrica o *pulso* (figura 247).

Las ondas digitales se caracterizan por poseer una frecuencia, un período, un ciclo útil (*duty cycle*) y una amplitud. Esta última es, simplemente, su valor máximo, es decir, el nivel de voltaje correspondiente al estado **alto**.

La *frecuencia* (f) se mide en *hertz* (Hz) o ciclos por segundo e indica cuántas veces se repite la onda básica en una unidad de tiempo. Por ejemplo, una onda cuadrada que se repite de la misma forma cada centésima de segundo, es decir 100 veces por segundo, es una onda de 100 Hz.

El *período* (T) se mide en segundos (s) y se refiere al tiempo que dura un solo ciclo de la onda. Se define como el inverso de la frecuencia y se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

En la práctica, este tiempo puede ser del orden de los segundos (s), milisegundos (ms), microsegundos (μs) o nanosegundos (ns). Por ejemplo, si la frecuencia f es igual a 1 MHz (10^6 Hz), entonces el período T será igual a $1/f = 10^{-6}$ segundos, es decir 1 μs . Recuerde que $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$, $1 \mu s = 10^{-6} \text{ s}$ y $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$.

El *duty cycle* o ciclo útil (D) se expresa como un porcentaje (%) y se define como la relación entre el ancho del pulso (T_1) y el período (T). Se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ciclo útil (\%)} = D = \frac{\text{Ancho del pulso}}{\text{Período}} \times 100$$

$$D = \frac{T_1}{T} \times 100 \text{ (en \%)}$$

El *duty cycle* de una onda cuadrada, por ejemplo, es del 50%, porque $T_1=T/2$. Son comunes trenes de pulsos con un *duty cycle* del 25%, 40%, 80%, etc. A menor ancho del pulso, menor es el ciclo útil y viceversa.

Generadores y receptores de pulsos

Los circuitos generadores de pulsos se conocen también como *multivibradores* y son muy importantes en el mundo de la electrónica digital. En las próximas lecciones de este curso estudiaremos las configuraciones más importantes utilizadas en la práctica.

Los principales tipos de circuitos generadores de pulsos son los multivibradores semi-monoestables o detectores de flancos, los monoestables o *one-shot*, los astables o relojes y los osciladores controlados por voltaje o VCO. Estos últimos son el corazón de los lazos de amarre de fase o PLL (*phase-locked loop*).

Algunos ejemplos de circuitos que funcionan a base de pulsos son los *flip-flop* o multivibradores biestables, los registros de almacenamiento y de desplazamiento, los contadores, las memorias, los conversores A/D y los microprocesadores.

Terminología de circuitos de pulsos

Los siguientes son algunos términos muy comunes que se utilizan para describir el funcionamiento de circuitos que generan y manejan pulsos. Conoceremos otros a medida que avancemos en el curso.

astable: que no tiene estado estable.

biestable: que tiene dos estados estables.

contador ascendente: circuito que cuenta pulsos en orden ascendente (1, 2, 3, 4, etc.).

contador descendente: circuito que cuenta pulsos en orden descendente (10, 9, 8, 7, etc.).

flip-flop: circuito capaz de almacenar un **1** ó un **0**.

glitch: pulso indeseable que provoca el funcionamiento erróneo de un circuito.

monoestable: que tiene un sólo estado estable.

race (carrera): condición que provoca el funcionamiento erróneo de un circuito debido a diferencias en los tiempos de propagación.

circuitos secuenciales: circuitos lógicos en los cuales el estado de la salida depende del estado previo de la entrada.

registro de almacenamiento: grupo de *flip-flops* que almacena datos de varios *bits*.

registro de desplazamiento: registro capaz de desplazar datos hacia la derecha o hacia la izquierda.

ACTIVIDAD PRACTICA N° 10

Construcción del módulo 2. Parte 3

En esta actividad instalaremos en el circuito impreso del módulo 2 el interruptor lógico S2. Como se puede observar en la figura A11(página 132), la función de este componente es suministrar un nivel alto o bajo de voltaje a la entrada de un circuito digital conectado al terminal de acceso marcado S2.

Componentes y herramientas necesarios

- 1 interruptor miniatura tipo spdt. S2.
- 1 circuito impreso CEKIT EDM-2.
- 1 cautín de baja potencia (15 W a 35 W).
- soldadura de estaño 60/40.

Procedimiento

Tome el interruptor S2 e instálelo en la tarjeta de circuito impreso del módulo 2, como se muestra en la figura A13. Observe que los terminales de conexión no están alineados con respecto al centro. Esta disposición sirve como guía de instalación.

Cerciórese de que el componente quede firmemente asegurado en la tarjeta y en contacto muy próximo con el interruptor S1 instalado en la actividad anterior.

Al soldar, no aplique más calor del absolutamente necesario porque puede levantar los trazos de cobre que conectan los diferentes interruptores entre sí y la tarjeta con el mundo externo.

Una vez instalado y soldado el interruptor, es conveniente probar su apertura y cierre mediante un ohmetro o un medidor de continuidad. En la posición **0** el contacto del centro debe cerrarse con el contacto inferior y en la posición **1** debe hacerlo con el superior. No debe haber continuidad entre los contactos de los extremos.

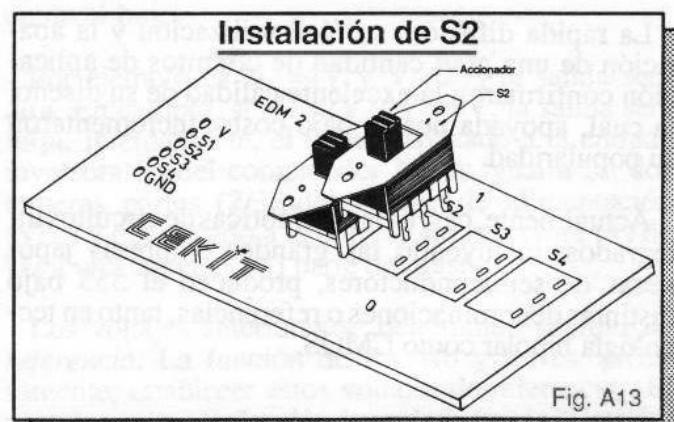


Fig. A13

El circuito integrado 555

- Introducción
- Descripción general
- Características eléctricas
- Teoría de funcionamiento
- Operación en el modo astable
- Experimento 16. Funcionamiento del 555 en el modo monoestable
- Operación en el modo monoestable
- Experimento 17. Funcionamiento del 555 en el modo astable
- El 555 como modulador de pulsos
- Experimento 18. Operación de un generador de tono variable con 555.
- El circuito integrado 555
- Circuitos de aplicación

Introducción

El circuito integrado 555 ha sido, junto con los microprocesadores, el *chip* más famoso en la breve historia de la microelectrónica. A pesar de que no se trata de una invención nueva, permanece tan actual como en sus primeros tiempos. Se utiliza tanto en aplicaciones sencillas como en computadores y complejos sistemas de control industrial.

Ha sido también objeto de una extensa literatura y sobre él se han escrito libros completos que describen numerosos circuitos y posibilidades de aplicación. Fue lanzado al mercado en el año de 1972 por Signetics para satisfacer la urgencia de un circuito generador de pulsos universal que se adaptaría a las necesidades de diseño más frecuentes.

Hasta ese entonces, todos los generadores de pulsos se realizaban utilizando componentes discretos (transistores, resistencias, condensadores, etc.). La aparición del 555 simplificó el diseño y construcción de estos circuitos y los hizo compactos, económicos y muy confiables.

La rápida difusión, su fácil utilización y la aparición de una gran cantidad de circuitos de aplicación confirmaron la excelente calidad de su diseño, la cual, apoyada por su bajo costo, incrementaron su popularidad.

Actualmente, casi todas las fábricas de circuitos integrados, incluyendo las grandes empresas japonesas de semiconductores, producen el 555 bajo distintas denominaciones o referencias, tanto en tecnología bipolar como CMOS.

Los siguientes son algunos ejemplos:

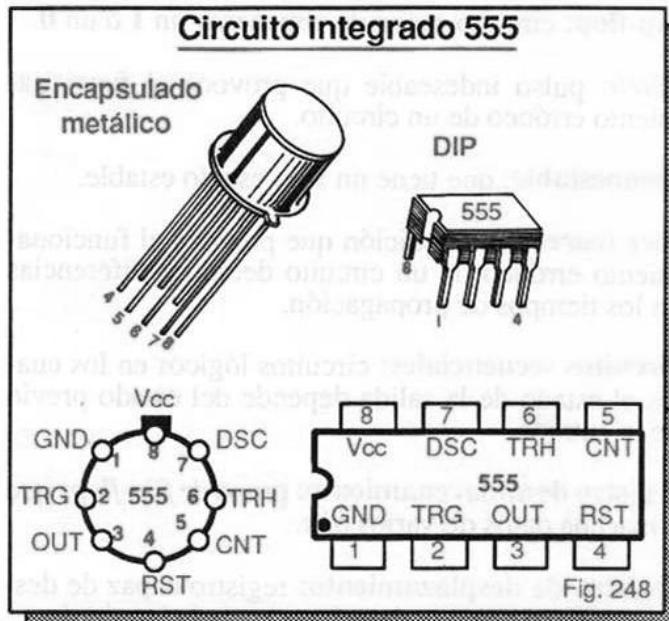
Signetics	NE555
Fairchild	μ A555
National Semiconductor	LM555
Texas Instruments	SN72555
Exar	XR-555
RCA	CA555
Philips/Sylvania	ECG955
Harris	HA1755
Motorola	MC1455
Toshiba	TA7555P

Una de las grandes ventajas del 555 es su compatibilidad con circuitos integrados digitales de la familia TTL y también su aplicación directa en circuitos analógicos. La versión CMOS del 555 es el circuito integrado 7555, caracterizado por su bajo consumo de potencia (ver lección 1, página 19).

Descripción general

El circuito integrado 555 es un dispositivo altamente estable que se utiliza para la generación de señales de pulsos. En la figura 248 se muestra su distribución funcional de pines y las dos formas de presentación más usuales: el encapsulado de doble fila o DIP (*Dual-In line Package*) y el metálico.

La presentación DIP de 8 pines es la más común. El encapsulado metálico se utiliza principalmente en aplicaciones militares e industriales. También está disponible en encapsulado de montaje superficial, con la referencia LM555CM de National.



El *chip* consta internamente de 23 transistores, 2 diodos y 12 resistencias. Opera con tensiones de alimentación desde 4.5 V hasta 18 V y puede manejar corrientes de salida hasta de 200 mA, una capacidad suficiente para impulsar directamente entradas TTL, LED, zumbadores, bobinas de relé, parlantes piezoelectrinos y otros componentes.

Asociado con unos pocos componentes externos (resistencias y condensadores, principalmente) el 555 se puede utilizar para generar trenes de pulsos, temporizar eventos y otras aplicaciones, tanto analógicas como digitales. En esta lección estudiaremos sus dos modos básicos de operación: el *astable* o reloj y el *monoestable* o temporizador.

En el modo *astable*, el circuito entrega un tren continuo de pulsos y en el *monoestable* suministra un pulso de determinada duración. La frecuencia y el ancho del pulso se programan externamente mediante resistencias y condensadores adecuados.

Otro modo de operación importante es como modulador de ancho de pulsos. En este caso, el *chip* trabaja en el modo monoestable pero la duración del pulso se controla mediante un voltaje externo aplicado al pin 5.

Antes de proceder al estudio detallado del 555, es conveniente conocer algunas de sus características eléctricas más importantes. Estos y otros parámetros son de gran utilidad para los diseñadores de circuitos. Una información más amplia se obtiene consultando los manuales y hojas de datos (*data sheets*) de los fabricantes.

Características eléctricas

Las siguientes son algunas de las características eléctricas más notables de los circuitos integrados LM555 y LM555C de National Semiconductor. Estos dos *chips* son funcionalmente idénticos pero se diferencian por su rango de temperaturas de trabajo.

El LM555 (versión estándar) puede trabajar en ambientes con temperaturas desde -55 °C hasta +125 °C y el LM555C (versión comercial) con temperaturas desde 0 °C hasta +70 °C.

Los datos de corriente están dados en miliamperios (mA), los de voltaje en voltios (V), los de potencia en milivatios (mW) y los de temperatura en grados Celsius (°C).

- *Rango de voltajes de alimentación*

LM555	4.5 V a 18 V
LM555C	4.5 V a 16 V
• <i>Máximo voltaje de alimentación</i>	18 V

- *Máxima disipación de potencia*

Cápsula DIP	760 mW
Cápsula metálica	1180 mW

- *Consumo de corriente* (sin carga y con Vcc=5V)

LM555	de 3 mA a 5 mA
LM555C	de 3 mA a 6 mA

- *Máximo voltaje de salida en bajo* (con Vcc=5V)

LM555	0.25 V
LM555C	0.35 V

- *Mínimo voltaje de salida en alto* (con Vcc=5V)

LM555	3.00 V
LM555C	2.75 V

- *Máxima corriente de salida*

200 mA

Teoría de funcionamiento

En la figura 249 se muestra la distribución interna de bloques del circuito integrado 555. Consta, básicamente, de dos comparadores de voltaje (U1 y U2), un *flip-flop* (U3), un amplificador de corriente o *buffer* (U4) y un transistor de descarga (Q1). Las resistencias Ra, Rb y Rc de 5 KΩ sirven como divisores de voltaje.

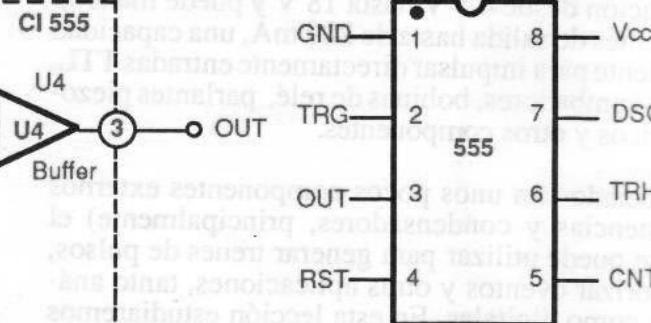
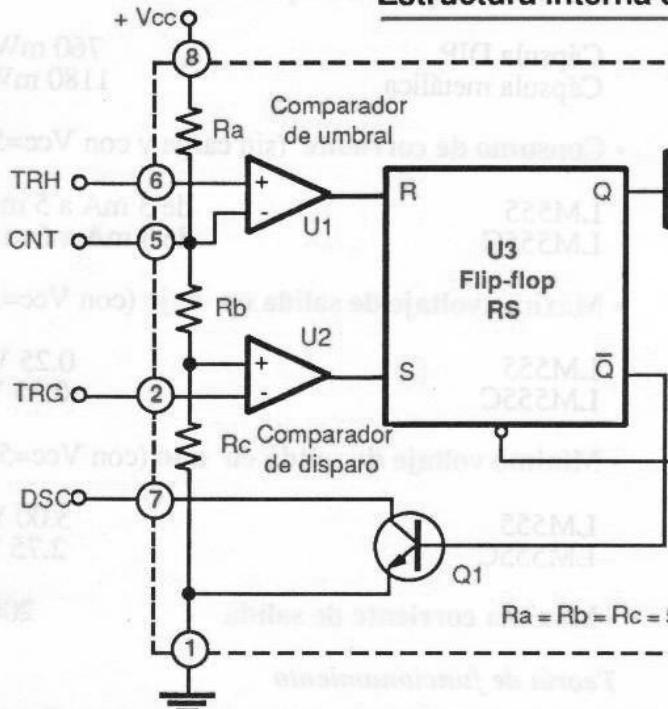
El comparador superior (U1) se denomina comparador de umbral o de *threshold* (léase *tresjol*) y el inferior (U2) comparador de disparo o de *trigger* (léase *triguer*). Como se muestra en la figura 249, cada comparador tiene dos entradas de voltaje: una *inversora*, marcada con el signo (-) y una *no inversora*, marcada con el signo (+).

El funcionamiento de cada comparador (figura 250) es muy sencillo: cuando en la entrada (+) se aplica un voltaje mayor que el de la entrada (-), la salida del comparador es un nivel *alto*. Si, por el contrario, en la entrada (+) se aplica un voltaje menor que el de la entrada (-), entonces la salida es un nivel *bajo*.

Por ejemplo, si $V^+ = 4V$ y $V^- = 2V$, la salida será *alta*. En cambio, si $V^+ = 2V$ y $V^- = 4V$, la salida será *baja*. Internamente, el voltaje aplicado a la entrada inversora (-) del comparador U1 es igual a las dos terceras partes (2/3) del voltaje de alimentación (Vcc) y el aplicado a la entrada no inversora (+) de U2 a una tercera (1/3) parte del mismo.

Los voltajes anteriores se denominan *voltajes de referencia*. La función de Ra, Rb y Rc es, precisamente, establecer estos voltajes de referencia. El voltaje externo aplicado a la entrada (+) de U1 se de-

Estructura interna de bloques del 555



GND: GROUND (Tierra)
 TRG: TRIGGER (Disparo)
 OUT: OUTPUT (Salida)
 RST: RESET (Inicialización)
 CNT: CONTROL (Voltaje control)
 TRH: THRESHOLD (Umbral)
 DSC: DISCHARGE (Descarga)
 Vcc: Voltaje de alimentación

Fig. 249

nomina *voltaje de umbral* y el aplicado a la entrada (-) de U2 *voltaje de disparo*.

(TRESHOLD o TRH) y la entrada inversora (-) del comparador de disparo (U2) por el pin 2 (TRIGGER o TRG).

El voltaje de referencia de ambos comparadores se puede variar mediante un voltaje externo aplicado al pin 5 (CONTROL o CNT). Este terminal se utiliza para *modular* pulsos, es decir para variar sus características de acuerdo a una señal de control. En condiciones normales, se recomienda conectar el pin 5 a tierra a través de un condensador de $0.01 \mu\text{F}$.

La salida de U1 está conectada internamente a la entrada R (*reset*) del *flip-flop* (U3) y la salida de U2 a la entrada S (*set*) del mismo. La función de este circuito es memorizar un nivel **alto** o **bajo** de voltaje en su salida Q, dependiendo del estado de las entradas R y S. La salida \bar{Q} tiene siempre un estado contrario al de la salida Q.

La operación del *flip-flop* (figura 251) es muy simple: cuando se aplica momentáneamente un **alto** a la entrada S y la entrada R está en **bajo** la salida Q se hace **alta**. En cambio, si se aplica un **alto** a R y S está en **bajo**, la salida Q se hace **baja**.

En el primer caso, se dice que el *flip-flop* está *set*, es decir con un 1 en su salida, y en el segundo que está *reset*, es decir con un 0.

Cuando las entradas R y S se hacen ambas bajas, el estado de salida previamente establecido se mantiene, es decir queda *memorizado*. Cuando R y S se hacen altas, el estado de la salida Q es ambiguo.

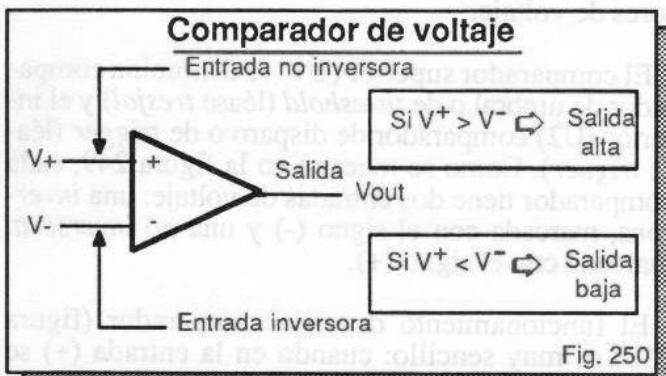


Fig. 250

Utilizando un voltaje de alimentación de **9V** ($V_{cc}=9V$) por ejemplo, el voltaje de referencia de la entrada (-) de U1 es igual a **6V** y el de la entrada (+) de U2 es igual a **3V**. Los voltajes de umbral y de disparo pueden adoptar cualquier valor entre 0 y 9V.

Si, en estas condiciones, se aplica un voltaje de umbral de 7V a la entrada (+) de U1 y un voltaje de disparo de 5V a la entrada (-) de U2, la salida de U1 será alta, porque $7V > 6V$, y la salida de U2 será baja, porque $3V < 5V$. Del mismo modo se procede para analizar otras situaciones.

La entrada no inversora (+) del comparador de umbral (U1) es accesible externamente por el pin 6

Flip-flop R - S

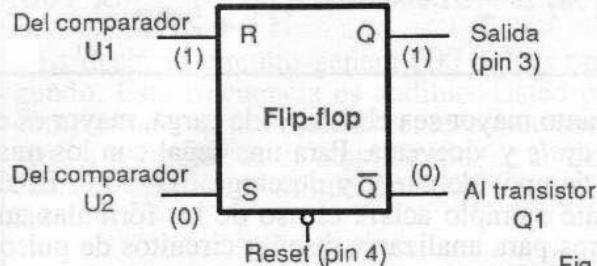


Fig. 251

Como se desprende del análisis anterior, el *flip-flop* se comporta como una especie de interruptor o caja de seguridad con memoria que atrapa o captura un **1** ó un **0**, y no cambia de estado hasta que no se establezca la combinación apropiada de niveles en las entradas R y S. Los *flip-flops* se estudian en detalle en la lección 20 de este curso.

El pin 4 (RESET o RST) hace **baja** la salida Q cuando recibe un nivel **bajo**, sin importar el estado de las entradas R y S. En condiciones normales, este pin debe mantenerse a un nivel **alto** para que el dispositivo opere correctamente. No se recomienda dejarlo al aire.

La salida Q del *flip flop* alimenta el *buffer* o amplificador de corriente U4 y la salida \bar{Q} la base del transistor Q1. El propósito del *buffer* es aumentar la capacidad de corriente del *flip-flop*. La salida del *buffer* es accesible externamente desde el pin 3 (OUTPUT o OUT). Este pin es la salida del *chip*.

El transistor Q1 se utiliza como un interruptor controlado digitalmente. Cuando la salida \bar{Q} es **alta**, Q1 conduce, es decir se cierra, y cuando Q es **baja** deja de conducir, es decir, se abre. En el primer caso, se dice que Q1 está *on* o *saturado* y en el segundo que está *off* o en corte.

Una vez comprendido el funcionamiento y el propósito de cada uno de los elementos que constituyen el circuito integrado 555, resultará muy sencillo entender cómo trabaja el dispositivo cuando se controla mediante componentes externos. En las siguientes secciones analizaremos en detalle sus modos de operación astable y monoestable.

Operación en el modo astable

En la figura 252 se muestra la forma de conectar el circuito integrado 555 en el modo astable, es decir como generador de trenes de pulsos. Esta configuración se denomina comúnmente circuito de reloj o, simplemente, *reloj*. Observe que la entrada de umbral (TRH, pin 6) está conectada a la entrada de disparo (TRG, pin 2).

Multivibrador astable 555

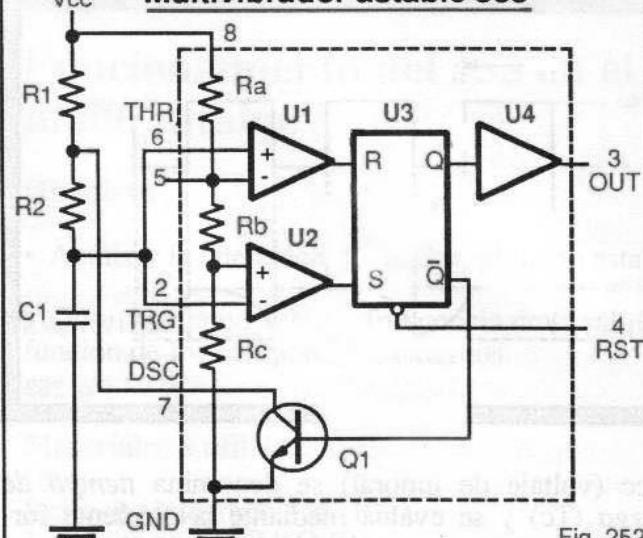


Fig. 252

El circuito formado por las resistencias R1 y R2 y el condensador C1 controla el voltaje de entrada de los comparadores. Cuando se conecta la fuente de alimentación, este voltaje es de 0 V porque C1 está completamente descargado. Bajo esta condición, el comparador de umbral aplica un **bajo** a la entrada R del *flip-flop* y el de disparo un **alto** a la entrada S.

Como resultado, la salida del circuito (OUT, pin 3) es de nivel **alto**. Al mismo tiempo, la salida \bar{Q} del *flip-flop* es de nivel **bajo**, el transistor de descarga está *off*, es decir en estado de corte, y C1 comienza a cargarse libremente a través de R1 y R2. A medida que C1 se carga, el voltaje en sus terminales crece hasta alcanzar el valor de umbral (2/3 de Vcc).

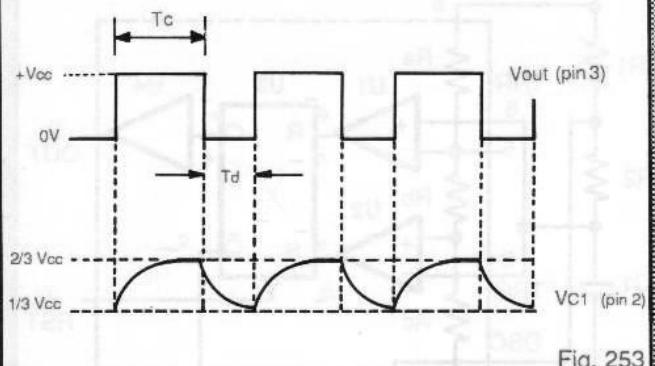
Cuando esto sucede, el comparador de umbral aplica un **alto** a la entrada R del *flip-flop* y el de disparo un **bajo** a la entrada S del mismo. Como resultado, la salida del circuito (OUT, pin 3) se hace **baja**, la salida \bar{Q} se hace **alta**, el transistor pasa al estado *on*, es decir conduce, y el condensador C1 comienza a descargarse a través de la resistencia R2.

Cuando el voltaje sobre C1 se hace ligeramente inferior al voltaje de disparo (1/3 de Vcc), el comparador de disparo aplica un **alto** a la entrada S del *flip-flop* y el de umbral un **bajo** a la entrada R. La salida del circuito se hace nuevamente **alta** y se repite el mismo ciclo anterior.

Como resultado de la carga y descarga de C1, la salida oscila indefinidamente entre los niveles **alto** y **bajo**, entregando de esta forma un tren continuo de pulsos de determinada frecuencia. En la figura 253 se resume gráficamente el proceso.

El tiempo que demora el condensador C1 en cargarse desde Vcc/3 (voltaje de disparo) hasta 2/3 de

Proceso de carga y descarga del CI 555



V_{CC} (voltaje de umbral) se denomina *tiempo de carga* (T_C) y se evalúa mediante la siguiente fórmula:

$$T_{Carga} = T_C = 0.693 (R_1 + R_2) C_1$$

Durante el tiempo de carga, la salida del circuito (OUT, pin 3) es de nivel **alto**. El tiempo que demora C_1 en descargarse desde $2/3$ de V_{CC} hasta $1/3$ de V_{CC} se denomina *tiempo de descarga* (T_d) y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$T_{descarga} = T_d = 0.693 R_2 C_1$$

Durante el tiempo de descarga, la salida del circuito (OUT, pin 3) es de nivel **bajo**. El tiempo de descarga es siempre más rápido que el de carga porque depende únicamente de los valores de R_2 y C_1 . La suma de los tiempos de carga y descarga define el período (T) de la señal de salida. Por tanto:

$$T = T_C + T_d = 0.693 (R_1 + 2R_2) C_1$$

El inverso del período ($1/T$) es, por definición, la frecuencia, es decir el número de pulsos que se producen en un segundo. Por consiguiente:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.693 (R_1 + 2R_2) C_1}$$

La relación porcentual entre el tiempo de carga y el período (T_C/T) define el *duty cycle* o ciclo útil (D) de la señal de salida. Es decir:

$$D (\%) = \frac{T_C}{T} \times 100 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \times 100$$

Cuanto mayor sea el tiempo de carga, mayor es el *duty cycle* y viceversa. Para una señal con los mismos tiempos de carga y descarga, $D=50\%$. El siguiente ejemplo aclara el uso de las fórmulas anteriores para analizar y diseñar circuitos de pulsos con el 555.

Ejemplo. Determine los tiempos de carga y de descarga del condensador C_1 así como el período, la frecuencia y el *duty cycle* de la señal de salida para el circuito de la figura 252 si $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 120 K\Omega$ y $C_1 = 0.01 \mu F$.

Se puede instalar un condensador de $0.01 \mu F$ entre el pin 5 del 555 y tierra para mejorar la estabilidad de la frecuencia de salida del circuito.

Solución. Remplazando R_1 , R_2 y C_1 por sus valores correspondientes, calculamos cada uno de los parámetros solicitados.

Para evaluar el tiempo de carga de C_1 , utilizamos la fórmula de T_C :

$$\begin{aligned} T_C &= 0.693 (R_1 + R_2) C_1 \\ T_C(s) &= 0.693 \times 121 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \\ T_C &= 838.5 \times 10^{-6} s \approx 839 \mu s \end{aligned}$$

Durante estos $839 \mu s$ de carga, la señal de salida permanece en el estado **alto**.

Para evaluar el tiempo de descarga de C_1 , utilizamos la fórmula de T_d :

$$\begin{aligned} T_d &= 0.693 R_2 C_1 \\ T_d(s) &= 0.693 \times 120 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \\ T_d &= 831.6 \times 10^{-6} s \approx 832 \mu s \end{aligned}$$

Durante estos $832 \mu s$ de descarga, la salida permanece en **bajo**. Como puede deducirse de este resultado, el tiempo de descarga ($832 \mu s$) es menor que el de carga ($839 \mu s$).

Para evaluar el período de la señal de salida, utilizamos la fórmula de T :

$$\begin{aligned} T &= T_C + T_d \\ T &= 839 \mu s + 832 \mu s = 1671 \mu s \approx 1.67 \times 10^{-3} s \\ T &= 1.67 ms \end{aligned}$$

Este tiempo ($1.67 ms$) es el que dura un solo ciclo de la señal de salida. Para evaluar la frecuencia (número de ciclos que se producen en un segundo) utilizamos la fórmula de f :

$$f = 1/T$$

$$f(\text{Hz}) = 1/(1.67 \times 10^{-3})$$

$$f = 598.8 \text{ Hz} \approx 600 \text{ Hz}$$

Es decir, el circuito genera 600 pulsos por segundo. Esta frecuencia es audible. Usted puede comprobarlo experimentalmente conectando el pin 3 a la entrada de un amplificador de audio. Escuchará un tono continuo de 600 Hz en el parlante.

El oído humano puede captar frecuencias entre 20 Hz y 20 KHz. Otros seres vivos, por ejemplo las ratas y los insectos, pueden escuchar *ultrasonidos*, es decir frecuencias por encima de 20 KHz. Aprovechando este fenómeno natural, los generadores de ultrasonidos se pueden utilizar como repelentes de plagas en graneros, campanarios y otros sitios donde es común su presencia.

Para evaluar el *duty cycle* o ciclo útil de la señal de salida, utilizamos la fórmula de D:

$$D(\%) = (T_c/T) \times 100$$

$$D = (839/1671) \times 100 = 50.2\% \approx 50\%$$

Este valor de *duty cycle* (50%) implica que la señal de salida es simétrica, es decir, dura prácticamente el mismo tiempo en **alto** que en **bajo**. En otras palabras, se trata de una onda cuadrada.

En el siguiente experimento comprobaremos la operación del 555 en el modo astable, es decir como generador de pulsos o reloj.

EXPERIMENTO N° 16

Funcionamiento del 555 en el modo astable

Objetivos

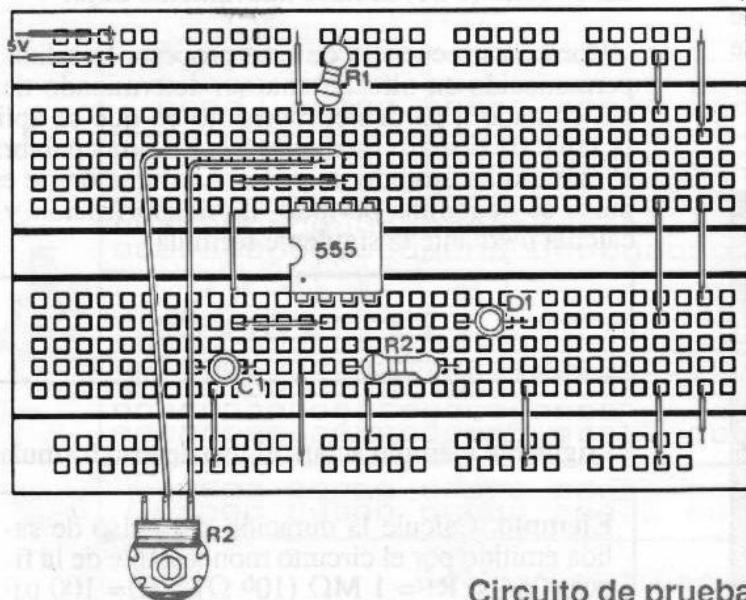
- Analizar la operación del 555 en el modo astable.
- Observar cómo varía la frecuencia de la salida en función de los componentes externos.

Materiales a utilizar

- 1 circuito integrado 555 (IC1).
- 1 resistencia de 10 KΩ (R1).
- 1 potenciómetro de 1 MΩ (R2).
- 1 resistencia de 220 Ω (R3).
- 1 condensador de 10 μF/16V (C1).
- 1 LED (D1).
- 1 Fuente de 5V, 1 A (*kit CEKIT K11 ó similar*) o una pila alcalina de 9V con conector (B1).
- 1 *Protoboard*.
- Puentes de alambre telefónico #22 ó #24.

Descripción del circuito de prueba

En la figura E27 se muestra el circuito que vamos a utilizar en este experimento para comprobar la operación del 555 en el modo astable (reloj). Las resistencias R1 y R2 y el condensador C1 establecen las características de la señal de salida. Para de-



Circuito de prueba con 555 en modo astable

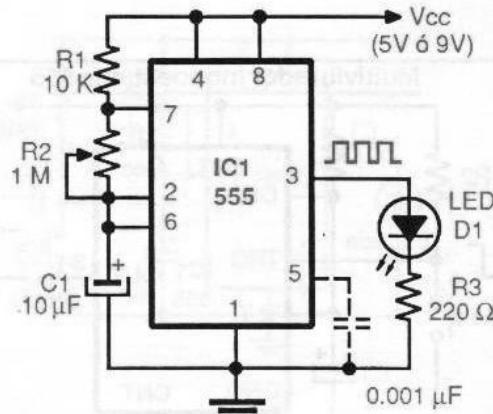


Fig. E27

tectar la presencia de pulsos se utiliza el monitor lógico formado por el LED D1 y la resistencia R3.

Cuando la salida es **alta**, D1 se prende y cuando es **baja** se apaga. Como resultado el LED parpadea a una determinada frecuencia, ajustable mediante el potenciómetro R2.

Procedimiento

Paso 1. Arme sobre el *protoboard* el circuito de la figura E27. Conecte el potenciómetro R2 mediante dos alambres de longitud adecuada y debidamente soldados. Tenga especial precaución con la instalación del CI 555. Antes de encender la fuente verifique bien todas las conexiones y sitúe R2 en una posición intermedia.

Paso 2. Conecte la fuente y observe lo que sucede en el LED D1. Notará que este último parpadea a una cierta velocidad o frecuencia. Gire el potenciómetro de un extremo a otro. Observará que la frecuencia cambia, siendo mínima en un extremo y máxima en el otro. De esta forma hemos comprobado que la frecuencia depende del valor de R2.

Puede cambiar R2 por resistencias fijas de diferentes valores. Lo mismo, puede remplazar C1 por condensadores de otros valores. En todos los casos encontrará que la frecuencia cambia.

Operación en el modo monoestable

En la figura 254 se muestra la forma de conectar el circuito integrado 555 en el modo monoestable, es decir como generador de pulsos de duración definida. Esta configuración se denomina comúnmente temporizador o *one-shot*. Observe que la entrada de umbral (TRH, pin 6) está conectada a la salida de descarga (DSC, pin 7).

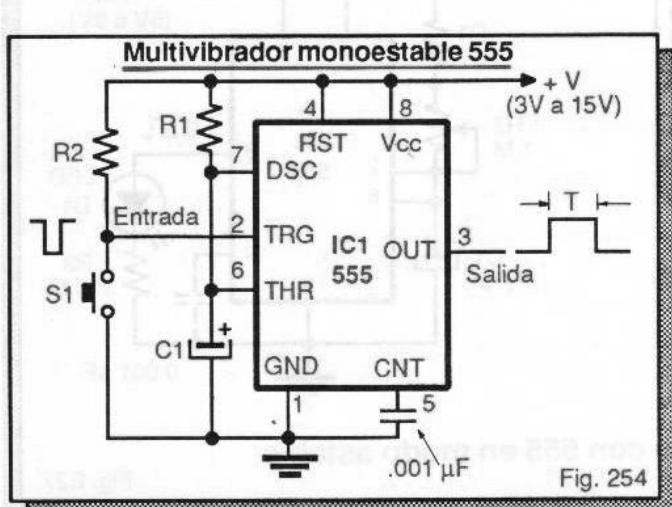


Fig. 254

El circuito formado por la resistencias R1 y R2, el condensador C1 y el pulsador S1 controla el voltaje de entrada aplicado a cada comparador y establece el momento de arranque y la duración del pulso de salida.

En condiciones normales, con el pulsador S1 abierto, la entrada de disparo (TRG, pin 2) está conectada a +Vcc a través de R2 y el comparador de disparo (U2) aplica un **bajo** a la entrada S del *flip-flop*.

Al mismo tiempo, la salida del temporizador (OUT, pin 3) es de nivel **bajo**, la salida Q del *flip-flop* es **alta**, el transistor Q1 está *on*, es decir saturado y su colector (DSC, pin 7) descarga el condensador C1 y conecta a tierra la entrada de umbral (TRH, pin 6).

Como resultado, el comparador de umbral aplica un **bajo** a la entrada R del *flip-flop*. Puesto que la entrada S del mismo es también de nivel **bajo**, el estado previo de la salida (OUT, pin 3) se mantiene, es decir sigue en **bajo**.

Cuando se pulsa momentáneamente S1, el pin 2 (TRG) recibe un **bajo** y el comparador de disparo aplica un **alto** a la entrada S del *flip-flop*. Como resultado, el pin 3 (OUT) pasa del estado **bajo** al estado **alto**. Al liberar S1, la entrada S retorna otra vez al estado **bajo** pero la salida se mantiene **alta**.

Al mismo tiempo, la salida Q del *flip-flop* es **baja**, el transistor Q1 está *off* y el condensador C1 comienza a cargarse a través de la resistencia R1. Cuando el voltaje sobre C1 se hace ligeramente superior a los 2/3 de Vcc, el comparador de umbral aplica un **alto** a la entrada R del *flip-flop* y la salida del circuito (OUT) se hace nuevamente **baja**.

Como consecuencia de este proceso, la salida ha permanecido en **alto** durante un determinado tiempo, contado a partir del momento en que se aplicó la señal de disparo mediante S1. En otras palabras, el circuito ha emitido un *pulso*. La duración de este pulso se denomina *periodo de temporización* y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$T = 1.1 \times R_1 \times C_1$$

El siguiente ejemplo aclara el uso de esta fórmula.

Ejemplo. Calcule la duración del pulso de salida emitido por el circuito monoestable de la figura 254 si $R_1 = 1 \text{ M}\Omega (10^6 \Omega)$ y $C_1 = 100 \mu\text{F} (100 \times 10^{-6} \text{ F})$.

Solución. Remplazando R1 y C1 por sus valores correspondientes, obtenemos:

$$T = 1.1 \times R1 \times C1$$

$$T = 1.1 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-6} = 110 \text{ s}$$

Es decir, el circuito genera un pulso de 110 segundos de duración (casi dos minutos) contados a partir del momento en que se acciona el interruptor de arranque. Este pulso puede utilizarse para varios propósitos, especialmente para temporizar eventos.

En el circuito de la figura 254, el 555 se dispara manualmente, presionando un botón. En la mayoría de aplicaciones prácticas, es deseable disparar el monoestable por métodos electrónicos.

Si este es el caso, la señal de disparo debe comunicarse desde un valor superior a 2/3 de Vcc hasta un valor inferior a 1/3 de Vcc. El ancho del pulso requerido para disparar electrónicamente el 555 debe ser mayor de 100 ns (nanosegundos) pero menor que el ancho del pulso de salida deseado. Este tema lo ampliaremos en la lección 16.

En el siguiente experimento comprobaremos el funcionamiento del 555 en el modo monoestable, es decir como temporizador. Verificaremos la presencia del pulso de salida mediante un LED. Se puede utilizar un cronómetro para medir su duración.

EXPERIMENTO Nº 17

Funcionamiento del CI 555 en el modo monoestable

Objetivos

- Analizar la operación del 555 en el modo monoestable, es decir, como temporizador.
- Demostrar el efecto del pulso de disparo sobre la señal de salida del temporizador.
- Observar cómo la duración del pulsos depende del valor de los componentes externos.

Materiales a utilizar

- 1 circuito integrado 555 (IC1).
- 1 resistencia de 47 KΩ (R1).
- 1 potenciómetro de 250 KΩ (R2).
- 1 resistencia 220 Ω (R3).
- 1 resistencia de 15KΩ (R4).
- 1 condensador de 33 μF/16V (C1).
- 1 LED (D1).
- 1 pulsador (S1).
- 1 fuente de 5V (*kit CEKIT K11 o similar*) o una pila alcalina de 9V.
- 1 *protoboard*.
- Puentes de alambre telefónico.

Circuito de prueba con 555 en modo monoestable

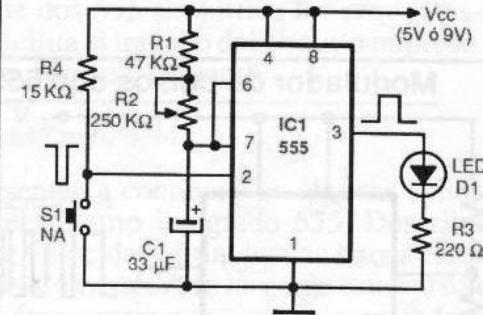
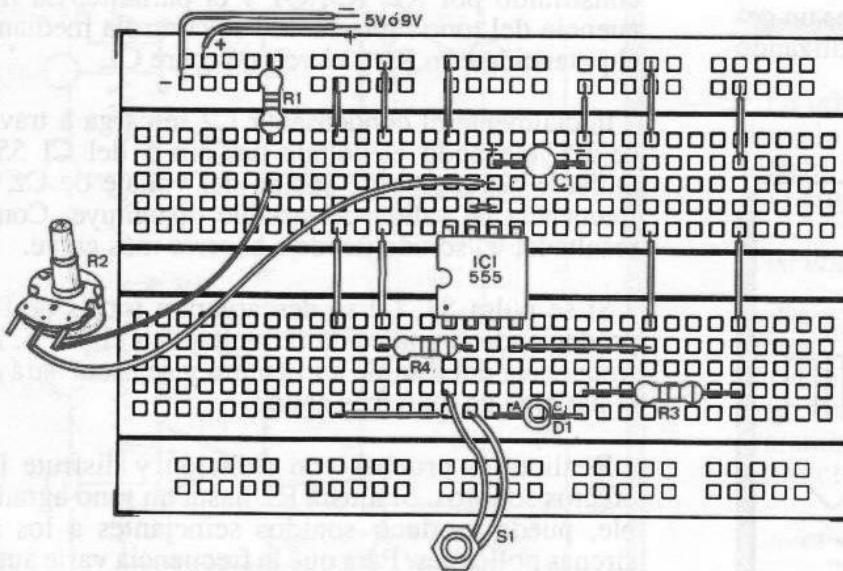


Fig. E28

Descripción del circuito

En la figura E28 se muestra el circuito de prueba de un monostable con 555. El LED D1 visualiza el estado de la señal de salida. La resistencia R3 limita la corriente del LED a un valor seguro.

La resistencia R4 y el pulsador S1 configuran el circuito de disparo. La resistencia R1, el potenciómetro R2 y el condensador C1 determinan el ancho del pulso de salida.

Procedimiento

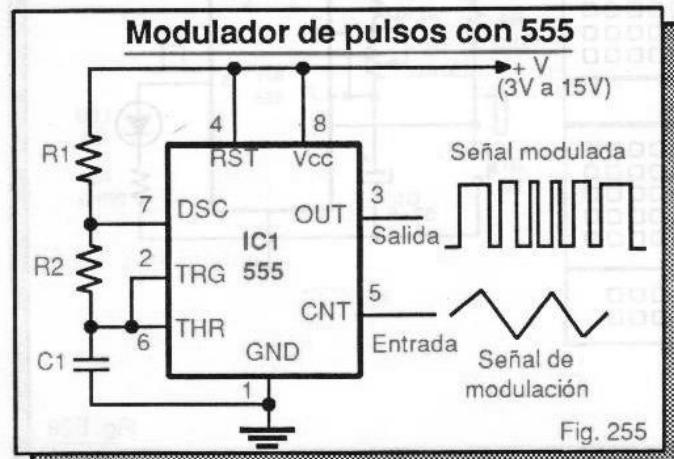
Paso 1. Arme el circuito de la figura E28 en su *protoboard*. Conecte el potenciómetro R2 y el pulsador S1 mediante alambres de longitud adecuada. Antes de encender la fuente, asegúrese de que todas sus conexiones estén correctas.

Paso 2. Conecte la fuente de alimentación y observe lo que sucede en el LED D1. Notará que permanece apagado. Sitúe R2 en su posición media. Pulse S2. Observará que el LED se prende y permanece encendido durante un tiempo, al cabo del cual se apaga. Compare este tiempo con los obtenidos cuando el potenciómetro se sitúa en otros puntos.

El 555 como modulador de pulsos

En la figura 255 se ilustra la forma de conectar el CI 555 como modulador de pulsos. En esta aplicación, el *chip* trabaja en el modo astable y la frecuencia de la señal de salida se controla mediante un voltaje aplicado al pin 5 (CONTROL o CNT). Esta señal varía el voltaje de referencia del comparador de umbral y desplaza la posición de los pulsos.

En el siguiente experimento construiremos un generador de tonos de frecuencia variable utilizando un 555 como modulador de pulsos.



EXPERIMENTO N° 18

Generador de tono variable con el CI 555

Objetivos

- Analizar la operación de un circuito modulador de pulsos de audio basado en el 555.
- Observar el efecto de la aplicación de un voltaje de control sobre la frecuencia de la señal de salida.

Materiales a utilizar

- 1 circuito integrado 555 (IC1).
- 1 resistencia de 47 K (R1).
- 1 resistencia de 100 Ω (R2).
- 1 resistencia de 10 K (R3).
- 1 resistencia de 2.2 K (R4)
- 1 resistencia de 10 Ω (R5).
- 1 potenciómetro de 100 K (R6).
- 1 condensador de 0.01 μF/16V (C1).
- 1 condensador de 1000 μF/16V (C2).
- 1 transistor 2N3904 (Q1).
- 1 fuente de 5V (*kit* CEKIT K11 o similar) o una pila alcalina de 9V con conector.
- 1 pulsador N.A (S1).
- 1 parlante de 8 Ω.
- 1 *protoboard*.

Puentes de alambre telefónico # 22 ó # 24.

Descripción del circuito

En la figura E29 se muestra el circuito de un generador de tonos con 555. El sistema suministra pulsos de frecuencia variable al amplificador de audio constituido por R2, R5, Q1 y el parlante. La frecuencia del tono reproducido se controla mediante el potenciómetro R6 y el voltaje sobre C2.

Inicialmente el condensador C2 se carga a través de R3, elevando el voltaje del pin 5 del CI 555. Durante el proceso de subida del voltaje de C2, la frecuencia de salida del astable disminuye. Como resultado, el sonido tiende a hacerse más grave.

Si se pulsa S1, C2 se descargará a través de R4, produciéndose una caída de voltaje en el pin 5. La frecuencia del astable aumentará y se escuchará en el parlante un tono más agudo.

Realice las pruebas con atención y disfrute los efectos sonoros. Si ajusta R2 hasta un tono agradable, puede producir sonidos semejantes a los de sirenas policiales. Para que la frecuencia varíe automáticamente, retire R3, R4 y C2 y conecte el pin 5 a la salida de un oscilador.

Generador de tono variable con 555

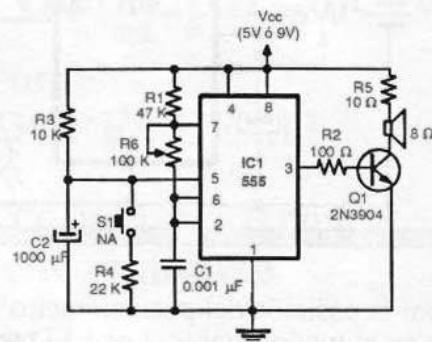
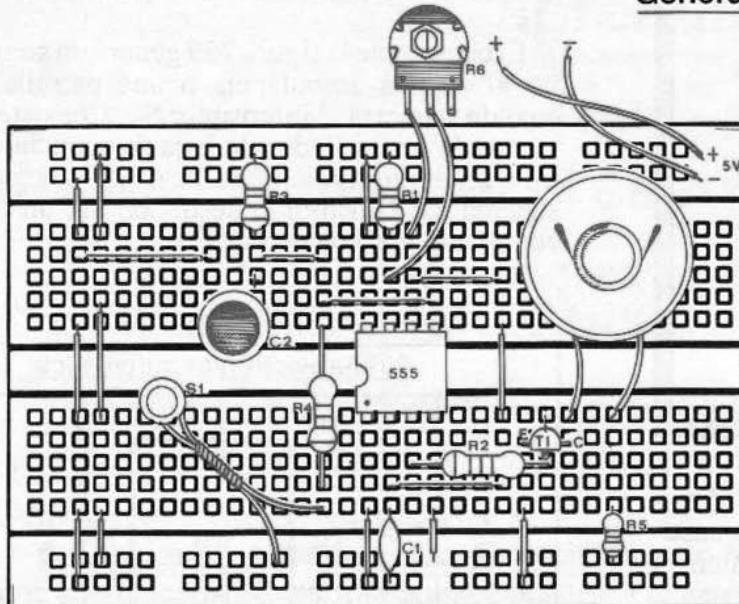


Fig. E29

El circuito integrado 556

El circuito integrado 556 (figura 256) es un *chip* muy versátil que contiene dos temporizadores 555 idénticos y completamente independientes en una misma cápsula DIP de 14 pines. La tensión de alimentación se aplica entre los pines 14 (Vcc) y 7 (GND). La tabla 14-1 compara la equivalencia de pines entre el 556 y el 555.

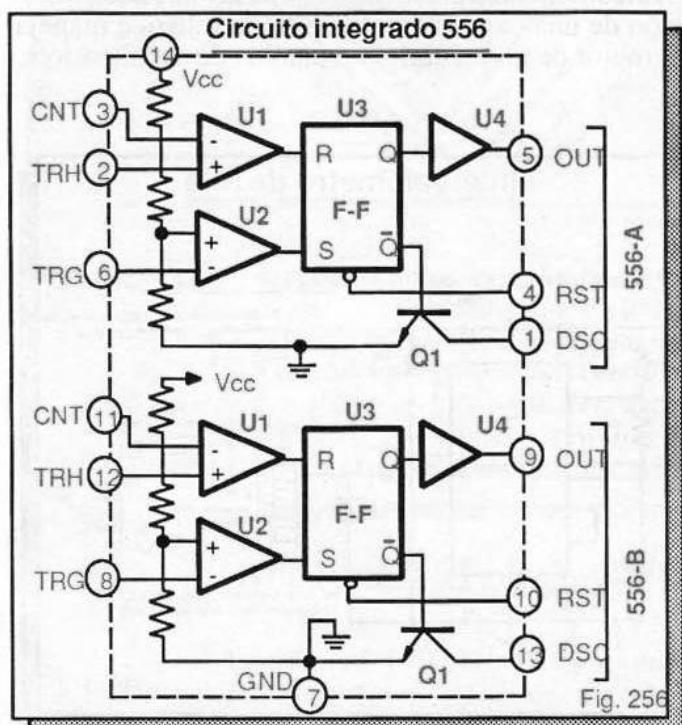


Fig. 256

Equivalencia de pines 555-556

Función	555	556-A	556-B
Tierra (GND)	1	7	7
Activación (TRIGGER)	2	6	8
Salida (OUTPUT)	3	5	9
Desactivación (RESET)	4	4	10
Control vol (CONTROL)	5	3	11
Umbral (THRESHOLD)	6	2	12
Descarga (DISCHARGE)	7	1	13
Alimentación (Vcc)	8	14	14

Tabla 14-1

La utilización de un circuito integrado 556 en sustitución de dos 555 simplifica los requisitos de cableado, facilita el trazado del circuito impreso y ahorra tiempo, dinero y esfuerzo.

Circuitos de aplicación

Se presentan a continuación algunas aplicaciones típicas del circuito integrado 555. Describiremos, una luz de velocidad variable, una sirena electrónica y un intervalómetro. A lo largo de este curso encontraremos frecuentemente este *chip* en todo tipo de proyectos y circuitos de aplicación.

Luces de velocidad variable (kit CEKIT K3)

El circuito de la figura 257 ilumina alternativamente los LED D1 y D2 a una frecuencia determinada.

Luces de velocidad variable

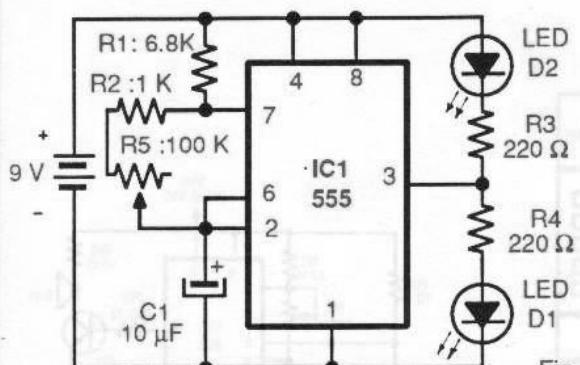


Fig. 257

da por la posición del potenciómetro R5. El 555 trabaja en el modo astable. Los LED se pueden sustituir por optoacopladores y triacs para producir el mismo efecto en lámparas de potencia.

Temporizador variable (kit CEKIT K5)

El circuito de la figura 258 ilumina el LED D1 durante un intervalo de tiempo determinado a partir del momento en que se pulsa el interruptor S1. La duración del evento se controla mediante el potenciómetro R4. Para temporizar cargas de potencia, se puede conectar a la salida la interface de relé mostrada en la misma figura 258.

Temporizador variable

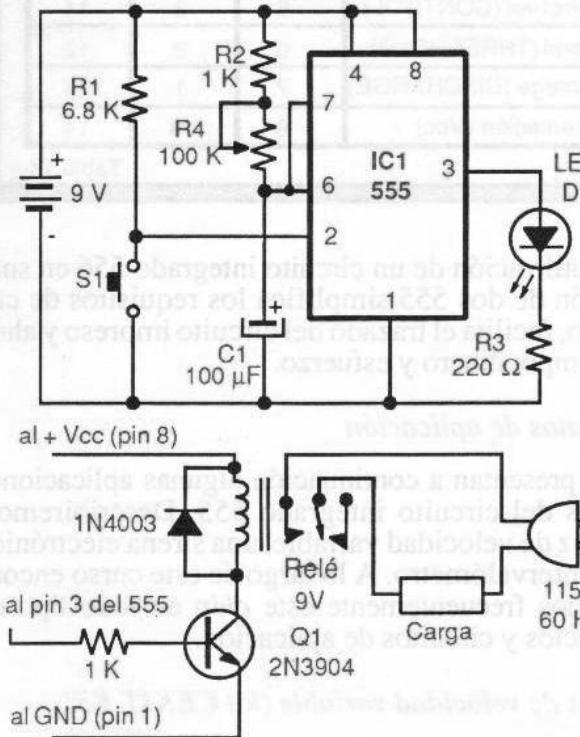


Fig. 258

Sirena electrónica automática (kit CEKIT K16)

El circuito de la figura 259 genera un sonido similar al de una ambulancia o una patrulla policial cuando se cierra el interruptor S1. Consiste, básicamente de un oscilador de baja frecuencia que controla un multivibrador astable de alta frecuencia. El sistema así constituido se denomina un oscilador controlado por voltaje (VCO).

Sirena electrónica automática

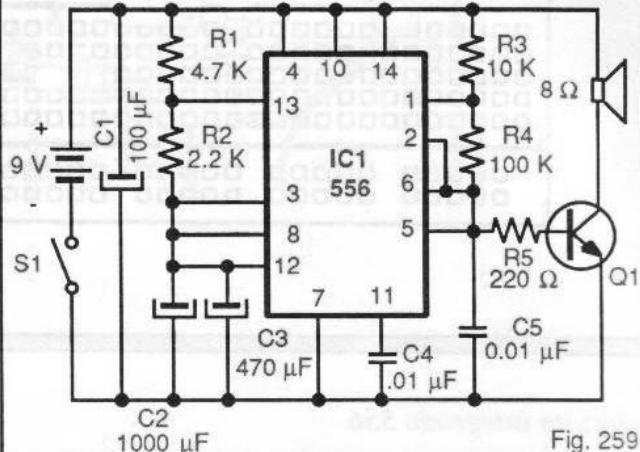


Fig. 259

Intervalómetro de relé

El circuito de la figura 260 genera tiempos de encendido y apagado muy precisos, los cuales se repiten periódicamente, a intervalos regulares. La señal generada puede utilizarse para controlar automáticamente los períodos de activación o desactivación de una carga, por ejemplo, un relé que maneja el motor de un parabrisas o una luz de señalización.

Intervalómetro de relé

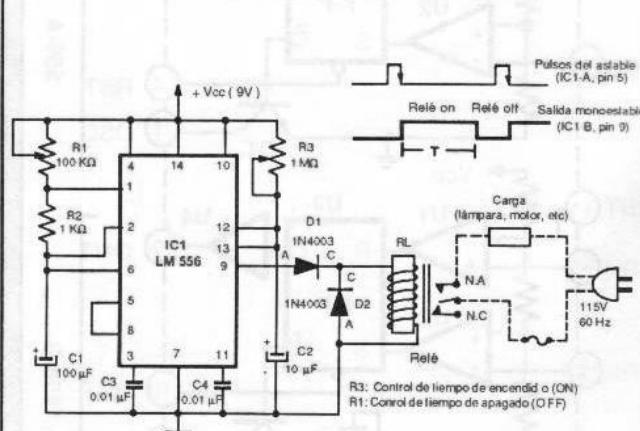


Fig. 260