



**Universidad
Europea**

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

CONTROL DE POTENCIA

© Todos los derechos de propiedad intelectual de esta obra pertenecen en exclusiva a la Universidad Europea de Madrid, S.L.U. Queda terminantemente prohibida la reproducción, puesta a disposición del público y en general cualquier otra forma de explotación de toda o parte de la misma.

La utilización no autorizada de esta obra, así como los perjuicios ocasionados en los derechos de propiedad intelectual e industrial de la Universidad Europea de Madrid, S.L.U., darán lugar al ejercicio de las acciones que legalmente le correspondan y, en su caso, a las responsabilidades que de dicho ejercicio se deriven.

Índice

Presentación	4
Entradas/salidas digitales (todo/nada)	6
Circuitos auxiliares (drivers de potencia) para salidas todo/nada. Relés	8
Circuitos auxiliares (drivers de potencia) para salidas todo/nada. Transistor	9
Pequeños motores de corriente continua (CC)	11
Drivers para motores de continua. Puente H (H-bridge)	12
Servomotores (servos)	13
Motores sin escobillas (brushless) de imán permanente	15
Motores brushless paso a paso (stepper)	16
Sonidos	17
Resumen	20
Referencias bibliográficas	21

Presentación

Los microprocesadores son **sistemas digitales**. A nivel de electrónica esto implica que los componentes están diseñados para funcionar con solo dos niveles de tensión (alto o bajo) y con una **circulación de corriente** muy pequeña, de forma que unos circuitos pueden conectarse a otros sin tener que preocuparse de ella. Pero eso no significa que no exista: siempre que entre dos puntos de un circuito haya diferencia de tensión, y una conexión entre ellos, circulará una corriente según la conocida **Ley de Ohm**:

$$\mathbf{V = i \cdot R \rightarrow i = \frac{V}{R}}$$

Donde la resistencia R modela la oposición del circuito a que circule la corriente. Un interruptor abierto significa por tanto una **resistencia infinita** (circuito abierto). Un interruptor cerrado es una resistencia nula (cortocircuito). Una resistencia nula implica una corriente infinita, lo que es una situación peligrosa.

Cuando se conecta un microprocesador al “mundo exterior”, este **no es digital**. Puede ser **todo/nada** (lo que se denomina discreto) o continuo, pero en todo caso es **analógico**. La implicación inmediata es que las corrientes que circularán no pueden ser ignoradas. En muchas ocasiones, demandarán más corriente de la que puede proporcionar el micro ¿Significa eso que no lo podemos conectar? Sí que podremos, pero necesitaremos de **electrónica auxiliar** que se encargue de “trasladar” las órdenes del micro acompañadas de la corriente necesaria.

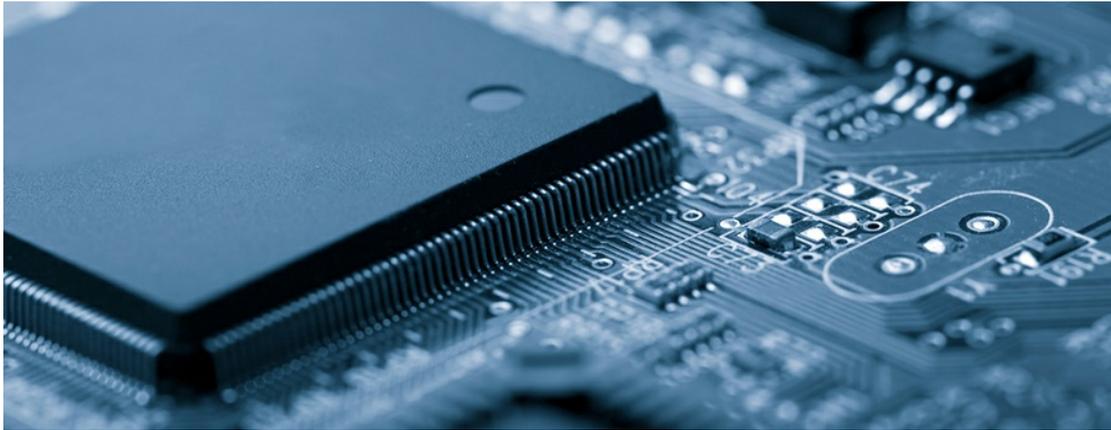
La potencia eléctrica en cualquier componente es el producto de la **tensión aplicada** por la **corriente** que demande:

$$\mathbf{P = V \cdot i = \frac{V^2}{R} = i^2 \cdot R}$$

Unidades de medida: potencia = Watios (W), corriente = Amperios (A), tensión = Voltios (V), resistencia = Ohmios (Ω).

Los **objetivos** que se pretenden alcanzar con este recurso son los siguientes:

- Realizar los **cálculos eléctricos** pertinentes a la hora de manejar dispositivos electrónicos, prestando especial atención a la demanda de corriente eléctrica.
- En particular, considerar el manejo de un **motor** (motor, servo o PaP), dado que es uno de los dispositivos que demanda mayor corriente (que convierte en potencia mecánica).
- Reconocer los **drivers de potencia** más habituales.



Entradas/salidas digitales (todo/nada)

Un **microprocesador** puede dar salidas de 5V, pero dando una corriente inferior a 1mA, que ni siquiera es suficiente para poder iluminar un LED (empieza a ser visible a partir de 10mA). Está pensado para conectarse solo a otros circuitos digitales. En cambio un **microcontrolador** está pensado para interactuar con el mundo exterior, por lo que las salidas del mismo pueden dar bastante más corriente. En el caso del ATmega328, cada pin de salida digital es capaz de entregar **hasta 40mA** (sin exceder un máximo de 200mA entre el total de los pines de un mismo puerto). Esto es suficiente para encender LEDs (como se indica en este [ejemplo](#)), interactuar con cualquier circuito digital, e incluso activar pequeños electroimanes y micromotores.

Ejemplo

Uso de un LED (Light Emitting Diode):

Es muy habitual utilizar una salida digital para encender un diodo LED. Si esto se realiza sin cuidado nos encontraremos que el LED apenas luce o, lo que es peor, podemos dañar el circuito con el que lo alimentamos y/o el propio LED.

Hay que proporcionar tensión positiva en el ánodo del diodo (terminal +) con respecto al cátodo (terminal -). El pin que corresponde al cátodo se marca con un **corte recto** en el encapsulado del LED, marcado con una flecha en la imagen de la derecha.



Fuente: Wikimedia Commons, (2005)

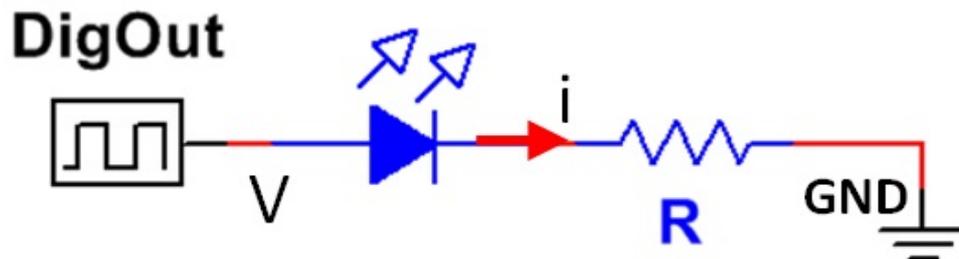
La tensión aplicada ha de superar una **caída de tensión V_D** que se produce en el LED para que este pueda emitir fotones. Esta caída de tensión es tanto mayor como más energético sea el color del LED (el rojo es el menos energético, y el azul el más energético). Un LED blanco emite a la vez en todos los colores visibles. Valores típicos de esta caída de tensión V_D según el color son:

IR: 1.5V; Rojo: 1.7V; Naranja: 2V; Amarillo: 2.1V; Verde: 2.5V; Azul: 3V; Violeta: 3.5V; Blanco: 3.5V; UV: 4V.

Los diodos infrarrojo (IR) y ultravioleta (UV) no son visibles al ojo humano, pero sí por un fotoreceptor que reciba esta luz. Se usan por ejemplo para sensores de distancia o

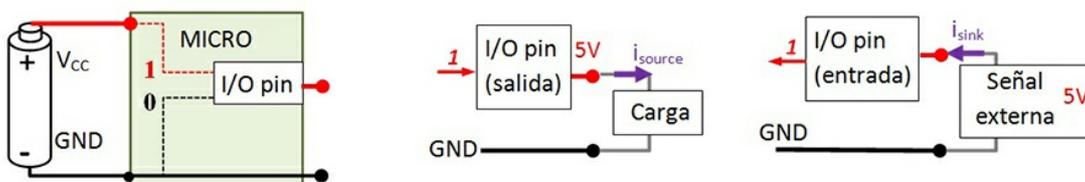
células fotoeléctricas, sobre todo los IR por requerir menos energía.

La corriente necesaria debe mantenerse entre 3mA (para una luz tenue) y 20mA (luz brillante). Siempre debe colocarse una **resistencia en serie** con el diodo para **ajustar este corriente**. Si la tensión aplicada es V (ej, 5V) y la corriente que queremos conseguir es i (ej. 10mA), la resistencia R a colocar valdrá (para un LED rojo):



$$R = \frac{V - V_D}{i} = \frac{5 - 1,7}{0,01} = 330\Omega$$

Recordemos que la tensión es la diferencia de potencial eléctrico **entre dos puntos**. Uno de ellos es el pin de entrada/salida (I/O) digital, el segundo punto (conocido como **referencia**) es llamado **ground (GND)**, que está conectado al terminal negativo de la alimentación del micro, como muestra el siguiente diagrama:



Configurado como **salida**, cuando el pin se **eleva** a 5V (da un 1 lógico), habitualmente **entrega (source)** corriente al circuito externo; esta corriente se obtiene de la alimentación del micro. Cuando **baja** a 0V (da un 0 lógico), puede entregar o **drenar (sink)** una pequeña corriente al/del circuito externo, según el diseño de este último.

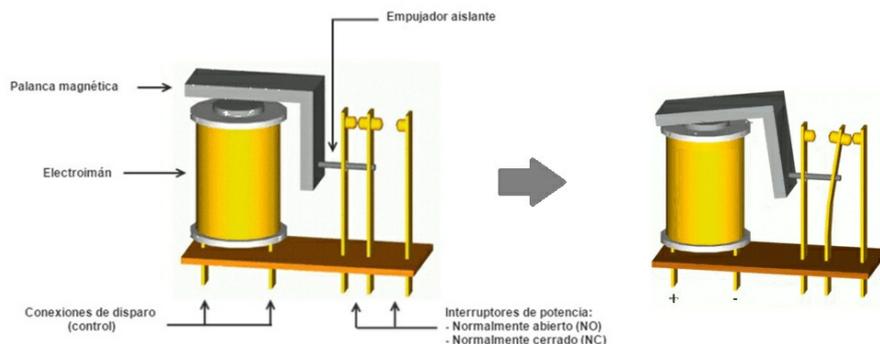
Configurado como **entrada**, es el circuito externo el que impone el nivel de tensión (alto o bajo), y el pin del micro siempre drena una pequeña corriente (unos pocos μA) que ha de proporcionar el circuito externo.

Circuitos auxiliares (drivers de potencia) para salidas todo/nada. Relés

Para poder conectar/desconectar cargas de cierta potencia (bombillas, calefactores, etc.) se debe disponer de electrónica intermedia entre el micro y la carga. Esta electrónica intermedia se suele denominar **driver de potencia** o simplemente driver. Ojo, no confundir con un **driver software**, el código que encapsula en funciones de alto nivel el código máquina necesario para hacer funcionar hardware electrónico (registros de configuración, etc.).



Cuando solo hay que conectar/desconectar la carga de vez en cuando, se puede emplear un contactor mecánico o **relé**. Un pequeño electroimán en el lado de control (que puede ser activado directamente por la salida del microcontrolador) atrae una pieza metálica, que empuja una pieza aislante que abre o cierra contactos en el lado de potencia. Los contactos de potencia quedan **aislados** de la entrada de control, y **flotantes** (no conectados a nada). Hay relés que con 5V (y 10 mA) en el lado de control pueden gobernar potencias de varios kW. El funcionamiento se muestra en la siguiente imagen:



Fuente: Wikimedia Commons, (2009).

Circuitos auxiliares (drivers de potencia) para salidas todo/nada. Transistor

Si la carga debe conmutarse a menudo, un contactor mecánico se deteriora rápidamente. Es necesario disponer de un “interruptor electrónico”, que se consigue utilizando un transistor. El transistor se activa o desactiva desde el microcontrolador, haciéndole trabajar en las zonas que se conocen como **saturación** y **corte**:

Saturación (estado on)	El transistor conduce lo mejor posible, como un interruptor mecánico cerrado.
Corte (estado off)	El transistor bloquea la tensión externa, de manera que a corriente es 0, como un interruptor mecánico abierto.

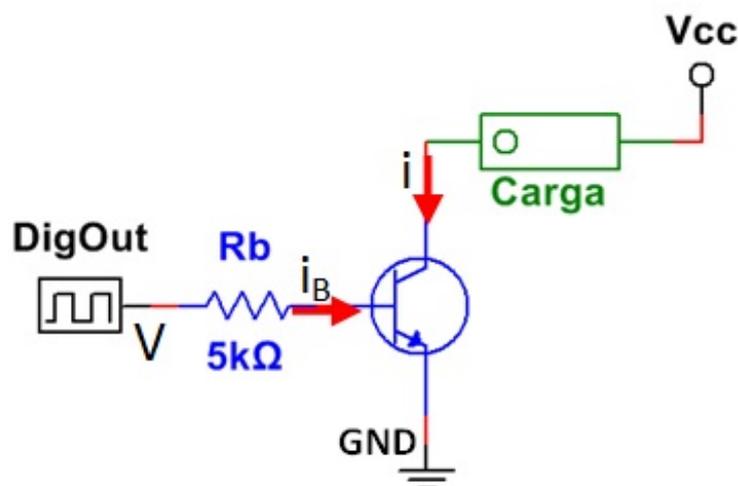
Puede usarse un transistor bipolar (que se dispara dándole corriente en el terminal de base) o **MOSFET** (que se dispara simplemente dando tensión al terminal de puerta, y la corriente de disparo que piden es despreciable). Esta es la mejor opción: los MOSFET de la familia IRL (como el IRL540 del fabricante Vishay) están diseñados para ser disparados con 5V, perfectos para integrarse con puertas lógicas y microcontroladores, y pueden bloquear varios cientos de voltios y conducir varios cientos de amperios.



Gráfico

Driver con transistor bipolar (2N2222, hasta 1A)

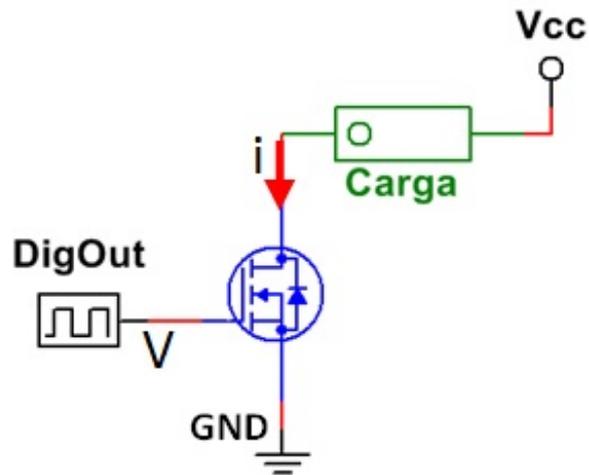
Driver con transistor bipolar (2N2222, hasta 1A)





Gráfico

Driver con MOSFET de potencia (IRL540, hasta 100A)

Driver con MOSFET de potencia (IRL540, hasta 100A)

Estas configuraciones son de propósito general: en el lugar donde se coloca la carga puede ir un LED (con su resistencia para ajustar la corriente), la bobina de un relé, un electroimán, o cualquier otro circuito externo.

Pequeños motores de corriente continua (CC)

Un uso muy habitual de un microcontrolador es **comandar un motor** de corriente continua. Los motores usados para pequeñas potencias son de imanes permanentes, y solo requieren dos cables para funcionar.



- Si se le aplica tensión en un sentido dado, el motor girará en sentido horario.
- Si se le aplica tensión en el sentido contrario, el motor pasará a girar en sentido antihorario.

Las salidas del microcontrolador solo dan tensión positiva (o nula) respecto de la referencia GND, por lo que en principio solo podremos hacer girar el motor en un solo sentido. Si se desea poder utilizar ambos sentidos de giro, hace falta un **driver** de potencia que permita **invertir la tensión aplicada**.

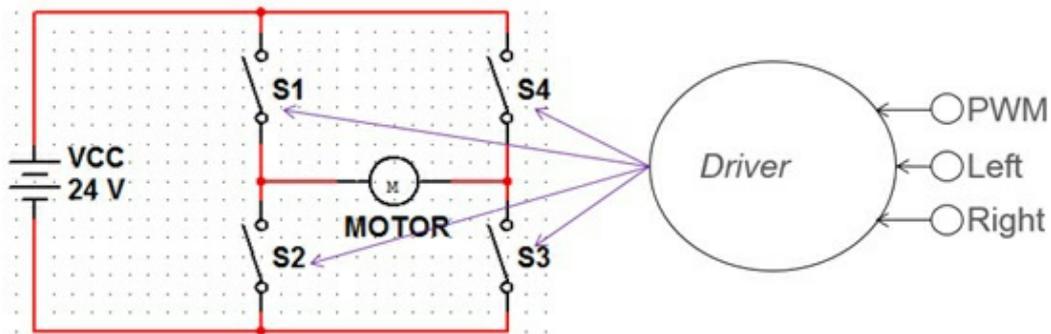
Es importante tener en cuenta que la **velocidad** de giro del motor es proporcional a la **tensión** aplicada (a más tensión tratará de girar más deprisa). Pero por otra parte, cuanto más **fuerza** tenga que vencer el motor (la fuerza de giro se denomina **PAR**), más corriente va a demandar.

Cuando el motor gire en vacío (sin arrastrar ninguna carga, venciendo solo el rozamiento) apenas demandará corriente. Pero cuando queramos arrastrar alguna carga mecánica (una rueda, un brazo robótico, etc.) consumirá tanto más corriente cuanto más fuerza deba hacer. Es necesario emplear un driver que entregue esta corriente.

Por lo tanto, el driver a emplear tiene un papel doble: poder invertir la tensión para invertir el **sentido de giro**, y entregar al motor la corriente que este demande cuando le pedimos que haga fuerza (par).

Drivers para motores de continua. Puente H (H-bridge)

El esquema de 4 interruptores (transistores) de la figura se denomina **puente H**. En función de las señales digitales *left/right*, el driver aplicará al motor tensión positiva (cerrando S1 y S3) o negativa (cerrando S2 y S4), lo que permite cambiar el sentido de giro. Por otra parte, la velocidad se controla por medio de la señal **PWM**: la tensión que “ve” el motor es el valor medio, y la velocidad de giro será proporcional a ella.



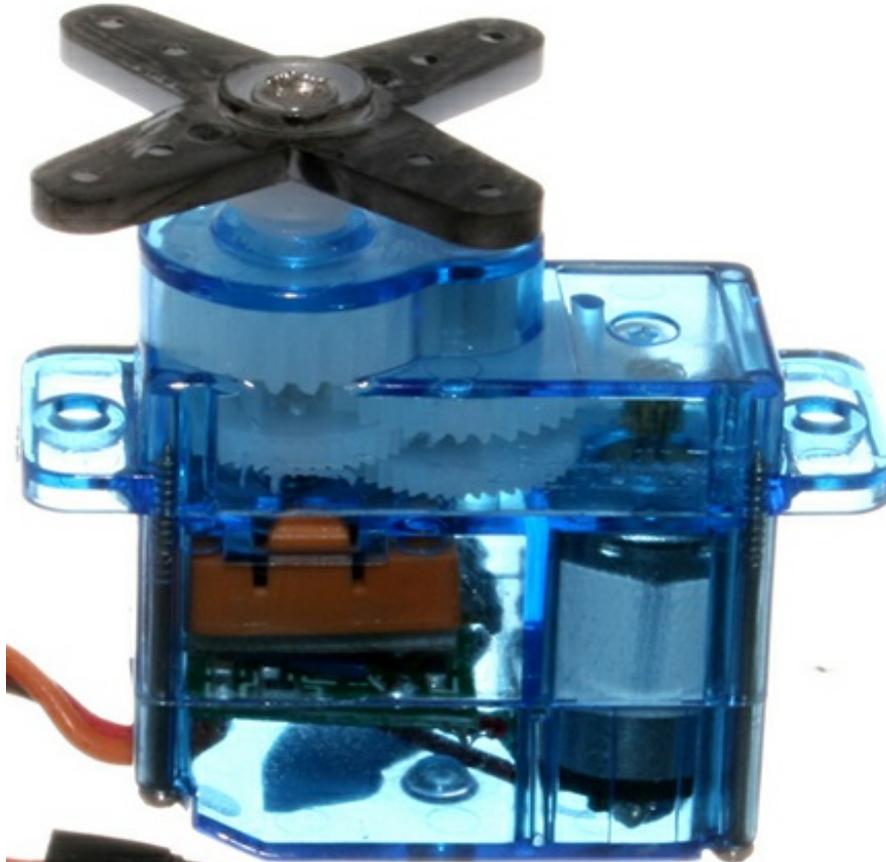
Si los 4 interruptores se mantienen abiertos (como en la figura) no hay tensión aplicada en el motor, por lo que este queda “libre” y girará solo si le arrastra la carga externa (lo que se conoce como “*free running*”). Por otra parte, si se cierran los interruptores S2 y S3, el motor se fuerza a 0V, lo que tiene efecto de **frenado**.

Así pues, para comandar el motor necesitamos emplear **dos salidas digitales** del micro (*left/right*) para indicar el sentido de giro, y **una salida PWM** para indicar la velocidad. El driver se encargará de entregar la corriente que el motor pida sin cargar al micro.

Para motores de pequeña potencia existen puentes H integrados en un solo chip (como el L293). Para potencias mayores, el puente H se puede implementar con transistores separados.

Servomotores (servos)

Un **servomotor** es un sistema realimentado que contiene un motor de continua (junto con su driver) y un **controlador** que **mide** el ángulo girado por el motor, lo compara con una **referencia** del ángulo que queremos, y automáticamente le da las **órdenes** de giro oportunas para que gire hasta el ángulo deseado.



Servomotor. Fuente: Wikimedia Commons, (2009)

A continuación, se describe el **funcionamiento** de los servomotores y servomotores de rotación continua:

Servomotor controlado en posición

Para usar el servomotor simplemente debemos indicar el valor de la **posición angular** a la que queremos que gire, y la controladora interna se encarga de todo. Esta referencia de posición se envía utilizando una señal PWM con $T_{BASE}=20ms$ (50Hz), donde el tiempo a nivel alto t_{ON} indica la posición requerida, típicamente 1.5ms para indicar la posición central, 1.25ms para un extremo y 1.75ms para el otro extremo (aunque estos valores pueden cambiar de un servo a otro). Estos dispositivos son muy usados en radiocontrol y modelismo, para mover elementos de control (timones, volantes, etc.).



Servomotores de rotación continua

También existen servomotores de rotación continua, donde el ángulo girado no está **limitado** y la señal PWM indica la velocidad de giro. Entonces un t_{ON} de 1.5ms indica paro, 1.25ms velocidad plena en un sentido, y 1.75 ms velocidad plena en sentido contrario.

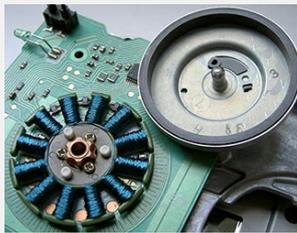
Para potencias mayores existen servomotores industriales que emplean drivers electrónicos propios.

Motores sin escobillas (*brushless*) de imán permanente

Los motores de continua clásicos necesitan tener en su interior unos **contactos rozantes** (llamados escobillas) que se desgastan con el tiempo, limitando su vida útil. Para motores que requieren un funcionamiento intensivo existen diseños alternativos que evitan el uso de escobillas (se denominan, por tanto, *brushless*).

Los motores *brushless* de **imán permanente** utilizan un bloque giratorio (rotor) imantado. En la parte fija del motor (estator) se sitúan una serie de electroimanes repartidos como las horas de un reloj. El imán del rotor tratará de alinearse con el electroimán del estator que esté activo, por lo que para hacerlo girar se van activando y desactivando los electroimanes en orden para arrastrar así al imán del rotor. Su comportamiento es análogo a los motores síncronos trifásicos.

Una controladora propia se encarga de generar la **secuencia de pulsos**, y esta es comandada desde el micro mediante señales PWM. Para pequeñas potencias, la secuencia de señales se puede obtener directamente usando las salidas digitales del microcontrolador (que ataca directamente los electroimanes de motor).



Motor de una unidad de disco

El imán del rotor rodea al estator.



Motor para una hélice

El imán del rotor queda en el interior del estator.

En general, estos motores se emplean en aplicaciones donde buscamos controlar una **velocidad de giro elevada**, por ejemplo arrastre de unidades de disco, rotores para drones, etc.

Fuente de las imágenes: Wikimedia Commons, (2016)

Motores *brushless* paso a paso (*stepper*)

Los motores paso a paso (*stepper*) disponen de un rotor de **material ferromagnético** (no necesariamente imantado) con pequeños dientes en la periferia. El estator tiene unas zonas salientes (polos) electroimanes en ellos. Estos polos también tienen pequeños dientes que siempre quedan ligeramente desalineados respecto a los del rotor.

Cuando se activa un electroimán, el rotor solo gira un pequeño ángulo (paso o *step*) hasta que se alinean los dientes del polo y del rotor. Esto hace que queden desalineados respecto a todos los demás polos desactivados. Al activar el electroimán de un nuevo polo (y desactivar el primero), el rotor vuelve a girar un paso hasta volver a **alinearse** los dientes.

Así, cada activación de un electroimán solo mueve el rotor un ángulo fijo (paso). Contando el número de pasos sabemos la cantidad girada, y controlando el número de pasos por segundo, la **velocidad de giro**.



Estator y rotor de un motor paso a paso. Fuente: Wikimedia Commons, (2015)

Estos motores se emplean en aplicaciones donde se necesita gran **precisión** en la posición (y la velocidad no necesita ser muy elevada), por ejemplo para mover ejes de máquinas de control numérico (como una impresora 3D).

Sonidos

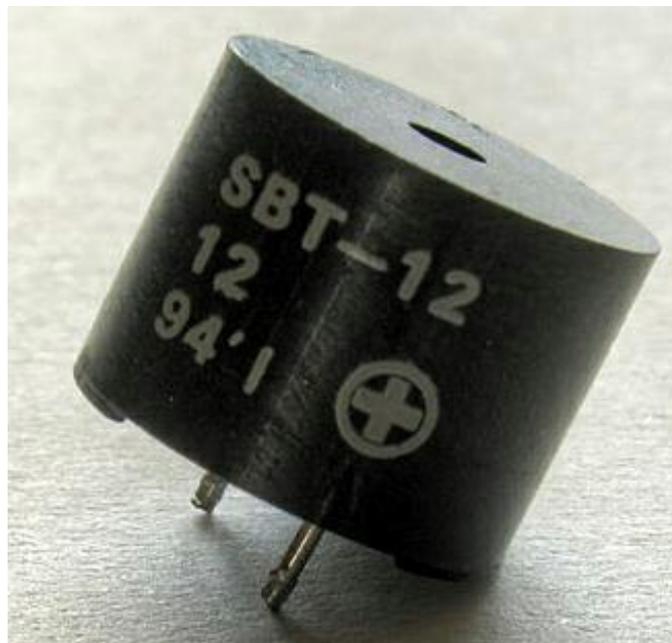
La salida digital del microcontrolador puede usarse para reproducir sonidos empleando pequeños altavoces ([speaker](#)) o zumbadores ([buzzer](#)).

Speaker



Fuente: Wikimedia Commons, (2013).

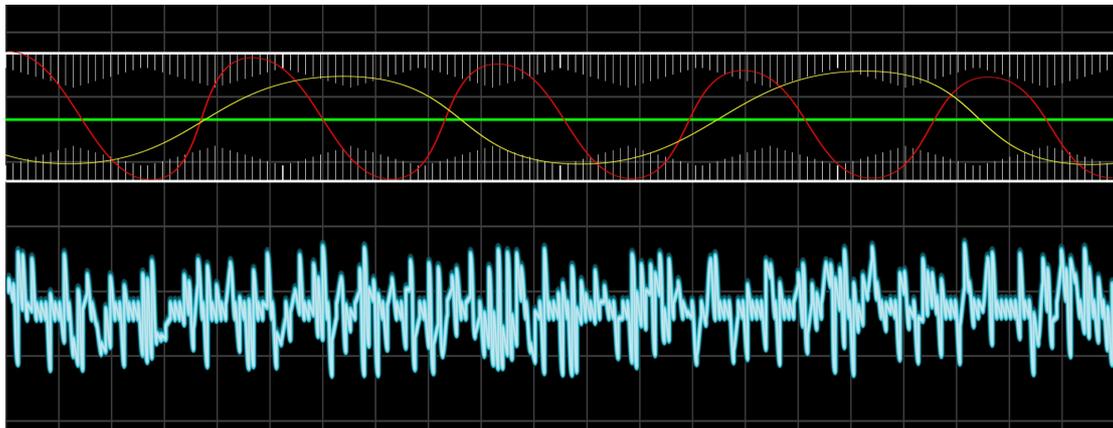
Buzzer



Fuente: Wikimedia Commons, (2014)

<p>Generar un sonido</p>	<p>Para hacerlos sonar, se debe generar una señal pulsada a una cierta frecuencia, que corresponderá con el tono del sonido generado. El oído humano es sensible a frecuencias de aprox. 20Hz (graves) a 20kHz (agudos).</p> <p>Si la señal generada fuese senoidal, se obtendría una nota musical pura correspondiente a esa frecuencia. Por ejemplo, la nota “La” de la 4ª octava (La_4) es a 440Hz. Una octava se divide en 12 notas (semitonos). Cada octava superior es al doble de frecuencia que la octava precedente, por ejemplo $La_3=220\text{Hz}$, $La_5=880\text{Hz}$.</p>
<p>Sonido con salidas PWM</p>	<p>En la práctica, desde el micro se utilizarán las salidas PWM para generar una señal cuadrada de la frecuencia deseada (con un ciclo de trabajo del 50%). Al no ser senoidal los sonidos obtenidos no serán notas puras, pero aun así la frecuencia de la onda generada establecerá el tono dominante del sonido generado.</p>

Es necesario asegurarse de la corriente máxima que puede llegar a pedir el altavoz/zumbador. Un altavoz con una impedancia de 8Ω , alimentado a 5V, demandará 600mA, mucho más de lo que puede dar un pin. Se debe emplear al menos un transistor como **driver** para el altavoz, como se vio anteriormente, o una **etapa de potencia** de audio.





Resumen

En este tema se han revisado muchos de los actuadores disponibles para poder realizar acciones desde un microcontrolador, como diodos luminosos (LED), relés y transistores como interruptores de potencia, diferentes tipos de motores, altavoces, etc.

Un tema frecuentemente ignorado en los múltiples foros de internet es la **corriente eléctrica** asociada a las señales de salida del microcontrolador. Si bien la corriente se suele ignorar en circuitos digitales, la conexión del micro con el “mundo exterior” deja de ser digital. Puede ser continua o todo/nada, pero aparecerán consumos de corriente que el micro debe ser capaz de entregar.

Un pin de un puerto del microcontrolador ATmega328 puede entregar o absorber una corriente de hasta 40mA (sin exceder de 200mA en el total de pines del puerto). Para conectar a elementos externos que demanden corrientes superiores a 40mA se debe disponer de electrónica auxiliar, llamada **driver de potencia**. De lo contrario el funcionamiento no será el esperado, con la posibilidad añadida de dañar permanentemente el microcontrolador.

La **potencia** eléctrica es el **producto tensión por corriente**. Un pin puede dar $5V \times 40mA = 200mW$. Para potencias superiores es imprescindible emplear un driver de potencia. Los drivers de potencia más habituales son relés, transistores, o circuitos integrados específicos (como puentes H y otras controladoras).

¡Enhorabuena! Has finalizado con éxito.

Referencias bibliográficas

- L293 x Quadruple Half-H Drivers. Disponible en <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf> [Consultado el 31 de mayo de 2016].
- IRL540 Vishay Siliconix. Disponible en <http://www.vishay.com/docs/91300/91300.pdf> [Consultado el 31 de mayo de 2016].
- Wikimedia Commons (2013). PC Speakers and Buzzers. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/71/PC-Speaker_IMG_8161.JPG/640px-PC-Speaker_IMG_8161.JPG [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons (2014). A typical electromagnetic buzzer. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/Electromagnetic_buzzer_03.jpg [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons (2014). Floppy drive spindle motor open. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Floppy_drive_spindle_motor_open.jpg/800px-Floppy_drive_spindle_motor_open.jpg [Consultado el 31 de Mayo del 2016].
- Wikimedia Commons (2015). Stepper motor MICROCON SX17-1705; 1.8°; 0.5Nm; 1.7A; 0.35kg. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4f/Stepper_motor_1.jpg [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons (2015). Struttura interna di un motore passo-passo. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Struttura_motore_passo-passo.jpg [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons (2016). Un moteur sans balais. Disponible en: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T-motor-mt3506-pro-short-shaft-brushless-motor-650kv-329-p\(1\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T-motor-mt3506-pro-short-shaft-brushless-motor-650kv-329-p(1).jpg) [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons, (2009). Micro servo. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Micro_servo.jpg?uselang=es [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons, (2009). Relay principle. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a0/Relay_principle_horizontal_new.gif/270px-Relay_principle_horizontal_new.gif [Consultado el 31 de mayo del 2016].
- Wikimedia Commons, (2011). 3V DC Motor connected to an Arduino Uno and Motor Shield just for display. Disponible en:



<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e4/3V_DC_Motor_Connected_to_an_Arduino_Uno_and_Motor_Shield.jpg>[Consultado el 31 de mayo del 2016].

- Wikimedia Commons, (2015). Led. Disponible en: <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e8/LEDs.jpg/1200px-LEDs.jpg>> [Consultado el 31 de Mayo del 2016].