

## Capítulo 4

---

### *Ruedas y motores*

#### *4.1 Tipos, dimensiones y material de las ruedas*

Las ruedas son el elemento que permite el desplazamiento del robot basados en el principio de fricción por lo que la correcta elección de ésta hará que se logre un mejor control sobre el comportamiento dinámico del robot, las ruedas también posibilitan hacer la medición del desplazamiento realizado por el robot mediante medir la rotación de las ruedas, es decir odometría, la forma más simple consiste en considerar que el desplazamiento lineal está directamente relacionado con la rotación mediante la expresión[19]:

$$L = 2 * \pi * r$$

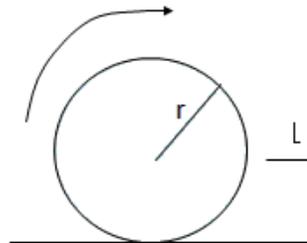


Figura 4.1 Relación ideal entre desplazamiento angular y lineal

Pero debe considerarse que esta relación no es adecuada para casos reales donde en general es difícil estimar el desplazamiento lineal con precisión debido a parámetros como la aceleración, carga, características del terreno, errores acumulados, etc.

El área de contacto entre las ruedas y el suelo para un mismo material de elaboración de la ruedas le permite al robot tener mayor fricción y posibilita que el robot alcance mayor velocidad y mejora la precisión de los movimientos con lo que la odometría se hace más confiable.

Existen diferentes tipos de ruedas destinadas a diferentes aplicaciones y que presentan características que las hacen adecuadas para una determinada aplicación.



Figura 4.2 Ruedas lisas

Para superficies lisas que no presentan irregularidades las ruedas regularmente son lisas, en contraste para superficies irregulares se emplean ruedas de sección transversal grande o todo terreno como se ve en la figura 4.3.



Figura 4.3 Ruedas todo terreno

Existen también ruedas omnidireccionales que dan tracción cuando se les impulsa de forma transversal y que de forma longitudinal no ofrecen resistencia alguna y sirven de soporte, comportamiento que le da al robot la posibilidad de desplazarse en un plano bidimensional sin ninguna restricción [20].

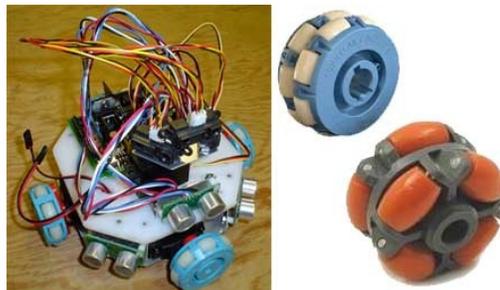


Figura 4.4 Ruedas omnidireccionales

Existen otras ruedas cuya función es la de servir de soporte para el robot, esto significa que estas ruedas no da dirección ni tracción, solamente soporte.



Figura 4.5 Ruedas locas o resbalones

Existen numerosos materiales de elaboración de ruedas como metales, por ejemplo el aluminio y distintas aleaciones, la ventaja de las ruedas metálicas radica en que son resistentes a la deformación y suelen ser más precisas al transmitir la energía mecánica que les proporcionan los motores, en contraparte suponen una carga extra para los motores que requieren mayor cantidad de energía para producir el desplazamiento angular además de que todo el sistema motriz requiere más tiempo en hacer cambios de velocidad o desplazamiento debido a la inercia mayor de éste tipo de ruedas comparadas con los materiales plásticos por ejemplo. Suelen ser muy caras.

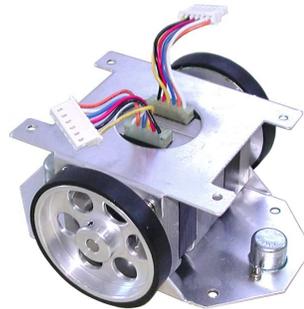


Figura 4.6 Ruedas hechas de materiales metálicos

Las ruedas hechas de materiales plásticos son ligeras y en general más fáciles de hacer e implementar pero presentan deformaciones y son frágiles, sus parámetros cambian más fácilmente con choques o con cargas.



Figura 4.7 Robot con ruedas de plástico

## 4.2 Motores de corriente directa

Los motores son dispositivos que transforman la energía eléctrica que se les suministra en energía mecánica rotacional con que se logra que los robots se desplacen. Este desplazamiento puede ser transversal como los robots que se mueven siguiendo una trayectoria o bien la energía que los motores proporcionan puede utilizarse para lograr movimientos de extremidades como en los robots manipuladores y de producción industrial.

Los motores de corriente continua tienen las características de poder controlar la posición, el par y la velocidad de forma precisa lo que los hace adecuados para aplicaciones de automatización de procesos, control y robótica desde luego, sin embargo la principal ventaja de los motores de corriente continua es que se les puede controlar la velocidad desde vacío hasta plena carga.

Un motor de corriente continua se compone principalmente de dos partes, una parte fija llamada estator que da forma y soporte al motor, generalmente incluye los polos que pueden ser imanes permanentes como los que se utilizan para robótica o estar hechos por bobinas que se encargan de generar los polos magnéticos.

Tienen una parte interna en la que se coloca una parte móvil llamada rotor que es la que se encarga de transmitir la energía mecánica rotacional fuera del motor, esta es de forma cilíndrica, devanada con conductores eléctricos y con un núcleo que sirve para dirigir el flujo magnético que hace funcionar la máquina, para poder transmitir la corriente eléctrica que necesita el rotor se utilizan escobillas.

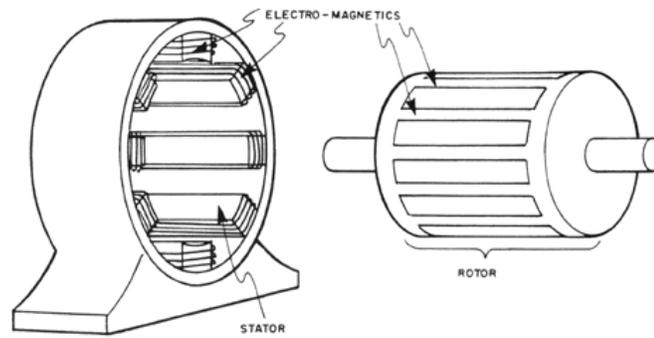


Figura 4.8 Estator y rotor de un motor

Sin embargo también existen motores de corriente directa que tienen los devanados en el estator y los polos en el rotor que ya no requieren escobillas llamados motores *brushless*.

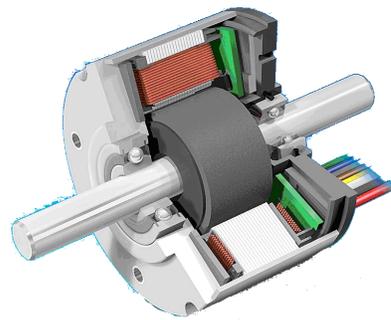


Figura 4.9 Motor sin escobillas o brushless

Los motores sin escobillas carecen de un sistema conmutador que transmita la energía al rotor, en su lugar la configuración tradicional se invierte, es decir que en el estator se produce la conmutación de la energía a través de los elementos magnéticos que produce fuerzas que generan reacciones de atracción o repulsión con un elemento de polaridad magnética fija en el estator. Ésta conmutación se hace de manera electrónica y elimina completamente los efectos electromagnéticos indeseables producidos en la operación de conmutación mecánica del conmutador en los motores tradicionales.

Las ventajas de estos motores frente a los motores tradicionales es que producen menos pérdidas por fricción debido a que solamente contienen dos rodamientos, además de no requerir el conmutador electromecánico. También pueden alcanzar mayor velocidad rotacional pues la conmutación es completamente electrónica [21].

También producen mayor potencia comparados con los motores convencionales de las mismas dimensiones, por lo que se les suele utilizar para aviones radiocontrolados y robos que requieran de levada velocidad y reducido peso, aunque son muy caros y su control es complicado.

Los motores *brushless* tienen muchas ventajas frente a los motores de corriente continua con escobillas y frente a los motores de inducción. Algunas de estas ventajas son:

- Mejor relación velocidad-par motor
- Mayor respuesta dinámica
- Mayor eficiencia
- Mayor vida útil
- Menor ruido
- Mayor rango de velocidad.

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se pueden emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido.

Por otra parte, los motores brushless tienen dos desventajas, que son las siguientes:

- tienen un mayor costo
- requieren un control bastante más complejo

### **4.3 Motores de corriente alterna**

Aunque los motores de corriente alterna no se usan con frecuencia en la robótica conviene hacer una investigación de las tecnologías de éstos motores y su relación con la robótica.

Estos motores se emplean en aplicaciones donde se requieren potencias elevadas como en la industria de la manufactura donde se utilizan robots manipuladores. Anteriormente el control de las características dinámicas de los motores de corriente alterna como la velocidad y el torque eran difíciles de realizar, pero con el advenimiento de la electrónica de control moderna hoy es posible controlar esas variables por lo que los motores de corriente alterna se están haciendo opciones viables para la robótica donde se requiere por ejemplo manipular objetos pesados para los que las opciones solían ser actuadores hidráulicos o neumáticos.

Los tipos de motores de corriente alterna que se emplean masivamente en la industria son los siguientes:

#### **4.3.1 Motores universales**

Los motores universales trabajan con voltajes de corriente continua o corriente alterna. Se utiliza en la sierra eléctrica, taladro, utensilios de cocina, ventiladores, batidoras y otras aplicaciones donde se requiere gran velocidad con cargas débiles. Se distinguen

por su conmutador devanado y las escobillas. Los componentes de este motor son: Los campos (estator), la masa (rotor), las escobillas (los excitadores) y las tapas (las cubiertas laterales del motor). El circuito eléctrico es muy simple, tiene solamente una vía para el paso de la corriente, porque el circuito está conectado en serie. Tiene mayor flexibilidad en vencer la inercia cuando está en reposo, o sea, tiene un par de arranque excelente, pero tiene una dificultad que es que no está constituido para uso continuo o permanente [22].



Figura 4.10 Motor de indicción usando ampliamente para aplicaciones industriales y domésticas

Una desventaja de los motores universales son las emisiones electromagnéticas. Las chispas del colector (arco eléctrico) junto con su propio campo magnético generan interferencias o ruido en el espacio radioeléctrico. Esto se puede reducir por medio de los condensadores de paso, de 0,001  $\mu\text{F}$  a 0,01  $\mu\text{F}$ , conectados de las terminales de alimentación a la carcasa del motor.

### 4.3.2 Motores síncronos

Los motores síncronos son un tipo de motor eléctrico de corriente alterna. Su velocidad de giro es constante y depende de la frecuencia de la tensión de la red eléctrica a la que esté conectada y por el número de pares de polos del motor, siendo conocida esa velocidad como "velocidad de sincronismo".

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es:

$$n = (60 * f) / p$$

Dónde:

\* f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)

\* n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto, rpm)

Por ejemplo, si se tiene una máquina de cuatro polos (2 pares de polos) conectada a una red de 50 Hz, la máquina operará a 1.500 r.p.m.

El rotor de un alternador de dos polos debe hacer una vuelta completa para producir un ciclo de c-a (corriente alterna). Debe girar 60 veces por segundo (si la frecuencia fuera de 60 Hz), o 3.600 revoluciones por minuto (rpm), para producir una c-a de 60 Hz. Si se puede girar a 3.600 rpm tal alternador por medio de algún aparato mecánico, como por ejemplo, un motor de c-c, y luego se excita el inducido con una c-a de 60 Hz, continuará girando como un motor síncrono [23].

Su velocidad de sincronismo es 3.600 rpm. Si funciona con una c-a de 50 Hz, su velocidad de sincronismo será de 3.000 rpm. Mientras la carga no sea demasiado pesada, un motor síncrono gira a su velocidad de sincronismo y solo a esta velocidad. Si la carga llega a ser demasiado grande, el motor va disminuyendo velocidad, pierde su sincronismo y se para. Los motores síncronos de este tipo requieren excitación de c-c (corriente continua) para el campo (o rotor), así como una excitación de c-a para el estator.



Figura 4.11 Motor síncrono

### 4.3.3 Motores de jaula de ardilla

La mayor parte de los motores que funcionan con c-a de una sola fase tienen el rotor de tipo jaula de ardilla.

Los conductores longitudinales de la jaula de ardilla son de cobre y van soldados a las piezas terminales de metal. Cada conductor forma una espira con el conductor opuesto conectado por las dos piezas circulares de los extremos. Cuando este rotor está entre dos polos de campos electromagnéticos que han sido magnetizados por una corriente alterna, se induce una fuerza electromotriz (*fem*) en las espiras de la estructura jaula de ardilla, una corriente muy grande las recorre y se produce un fuerte campo que contrarresta al que ha producido la corriente (ley de Lenz). Aunque el rotor pueda

contrarrestar el campo de los polos estacionarios, no hay razón para que se mueva en una dirección u otra y así permanece parado. Es similar al motor síncrono el cual tampoco se arranca solo. Lo que se necesita es un campo rotatorio en lugar de un campo alterno.



Figura 4.12 Motor jaula de ardilla

Cuando el campo se produce para que tenga un efecto rotatorio, el motor se llama de tipo de jaula de ardilla. Un motor de fase partida utiliza polos de campo adicionales que están alimentados por corrientes en distinta fase, lo que permite a los dos juegos de polos tener máximos de corriente y de campos magnéticos con muy poca diferencia de tiempo. Los arrollamientos de los polos de campo de fases distintas, se deberían alimentar por c-a bifásicas y producir un campo magnético rotatorio, pero cuando se trabaja con una sola fase, la segunda se consigue normalmente conectando un capacitor (o resistencia) en serie con los arrollamientos de fases distintas [24].

Con ello se puede desplazar la fase en más de  $20^\circ$  y producir un campo magnético máximo en el devanado desfasado que se adelanta sobre el campo magnético del devanado principal.

Desplazamiento real del máximo de intensidad del campo magnético desde un polo al siguiente, atrae al rotor de jaula de ardilla con sus corrientes y campos inducidos, haciéndole girar. Esto hace que el motor se arranque por sí mismo.

El devanado de fase partida puede quedar en el circuito o puede ser desconectado por medio de un conmutador centrífugo que le desconecta cuando el motor alcanza una velocidad determinada. Una vez que el motor arranca, funciona mejor sin el devanado de fase partida. De hecho, el rotor de un motor de inducción de fase partida siempre se desliza produciendo un pequeño porcentaje de reducción de la que sería la velocidad de sincronismo.

## 4.4 Motores a pasos

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

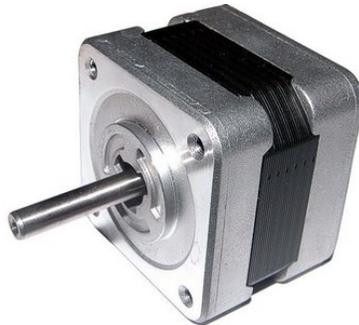


Figura 4.13 Típico motor a pasos

La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de tan solo  $1.8^\circ$ , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso ( $90^\circ$ ) y 200 para el segundo caso ( $1.8^\circ$ ), para completar un giro completo de  $360^\circ$ .

Estos motores poseen la capacidad de quedar fijos en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizadas, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

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

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



Figura 4.14 Rotor de un motor a pasos

Existen dos tipos de motores paso a paso de imán permanente, los que se explican en los siguientes párrafos.

#### 4.4.1 Motor a pasos bipolar

Estos tienen generalmente cuatro cables de salida. Necesitan ciertas consideraciones para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento. En figura 4.15 podemos apreciar un ejemplo de control de estos motores mediante el uso de un puente H (H-Bridge). Como se aprecia, será necesario un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), necesitaremos usar dos puentes iguales al de la figura 4.15. En general es recomendable el uso de puentes integrados como son los casos del L293 para corrientes pequeñas o el L298 para motores que requieren corrientes eléctricas mayores.

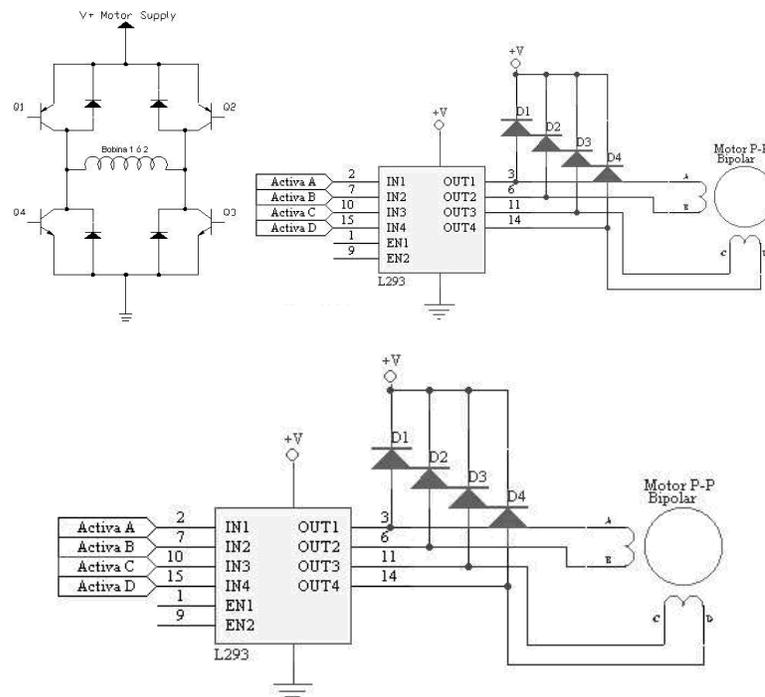


Figura 4.15 Circuitos de control para motores a pasos bipolares

### 4.4.2 Motores a pasos unipolares

Estos motores suelen tener 6 o 5 cables de salida, dependiendo de su conexión interna. El controlador es más simple que en el caso anterior. En la figura 4.17 se puede apreciar un ejemplo del conexionado para controlar un motor paso a paso unipolar mediante el uso de un ULN2803, el cual es un arreglo de 8 transistores tipo Darlington capaces de manejar cargas de hasta 500mA. Las entradas de activación (Activa A, B, C y D) pueden ser directamente manejadas por un microcontrolador.

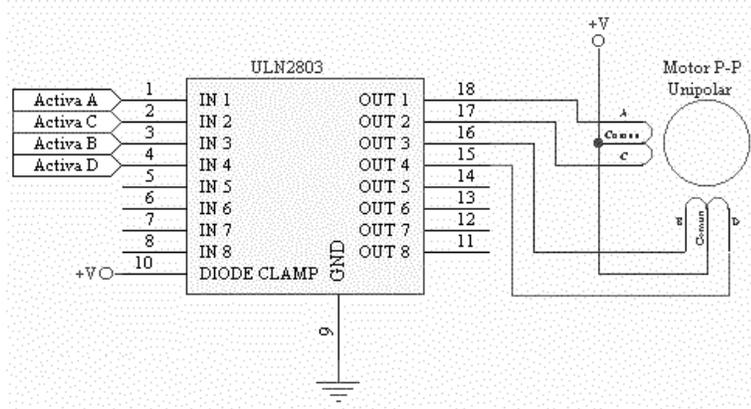


Figura 4.16 Ejemplo de un circuito de control para motores a pasos unipolares

## 4.5 Servomotores

Los servomotores son dispositivos actuadores que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y de mantenerse estable en dicha posición si se le envía la señal de control adecuada. Está formado por un motor de corriente continua, una caja reductora y un circuito de control.

El control de la posición se realiza de la siguiente manera: el punto de referencia o *setpoint* que es el valor de posición deseada para el motor que se indica mediante una señal de control cuadrada. El ancho de pulso de la señal indica el ángulo de posición: una señal con pulsos más anchos (es decir, de mayor duración) ubicará al motor en un ángulo mayor, y viceversa.

Mediante un amplificador de error se calcula el valor del error de posición, que es la diferencia entre la referencia y la posición en que se encuentra el motor. Un error de posición mayor significa que hay una diferencia mayor entre el valor deseado y el existente, de modo que el motor deberá rotar más rápido para alcanzarlo, la posición del motor está cerca de la deseada por el usuario, así que el motor tendrá que rotar más

lentamente. Si el servo se encuentra en la posición deseada, el error será cero, y no habrá movimiento.

Para que el amplificador de error pueda calcular el error de posición, debe restar dos valores de voltaje analógicos. La señal de control PWM se convierte entonces en un valor analógico de voltaje, mediante un convertidor de ancho de pulso a voltaje. El valor de la posición del motor se obtiene usando un potenciómetro de realimentación acoplado mecánicamente a la caja reductora del eje del motor: cuando el motor gira, el potenciómetro también lo hace, variando el voltaje que se introduce al amplificador de error.

Una vez que se ha obtenido el error de posición, éste se amplifica con una ganancia, y posteriormente se aplica a los terminales del motor.

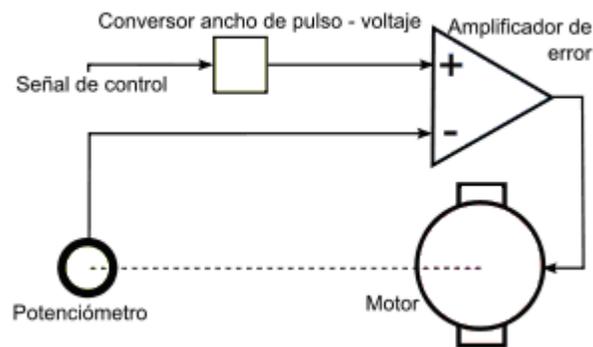


Figura 4.17 Diagrama esquemático de un servomotor

Dependiendo del modelo del servo, la tensión de alimentación puede estar comprendida entre los 4 y 8 voltios. El control de un servo se reduce a indicar su posición mediante una señal cuadrada de voltaje, el ángulo de ubicación del motor depende de la duración del nivel alto de la señal.

Cada servo, dependiendo de la marca y modelo utilizado, tiene sus propios márgenes de operación. Por ejemplo, para algunos servos los valores de tiempo de la señal en alto están entre 1 y 2 ms, que posicionan al motor en ambos extremos de giro ( $0^\circ$  y  $180^\circ$ , respectivamente). Los valores de tiempo de alto para ubicar el motor en otras posiciones se halla mediante una relación completamente lineal: el valor 1,5 ms indica la posición central, y otros valores de duración del pulso dejarían al motor en la posición proporcional a dicha duración.

La duración del pulso alto para conseguir un ángulo de posición  $\theta$  estará dada por la expresión en la figura 4.18.

$$t = 1 + \frac{\phi}{180}$$

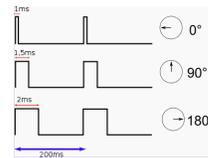


Figura 4.18 Señales que se aplican a los servomotores y los efectos sobre el eje del motor

Los servomotores se limitan a girar dentro de un rango de 180 grados aproximadamente debido a un tope mecánico que le impide al eje trasladarse fuera de éstos límites. El potenciómetro da menos de una vuelta, de modo que no puede dar giros completos en un mismo sentido. Es por esto que los servos tienen una cantidad limitada de giro, y no pueden girar continuamente en un mismo sentido. Es posible, sin embargo, realizar modificaciones al servo, las que se mencionan a continuación. Hay dos tipos de modificación realizables. El primero es la completa eliminación del sistema de control del circuito, para conservar únicamente el motor de corriente continua y el sistema de engranajes reductores. Con esto se obtiene simplemente un motor de corriente continua con caja reductora en un mismo empaquetado, útil para aplicaciones donde no se necesite del control de posición incorporado del servo. La segunda modificación realizable consiste en un cambio en el sistema de control, de modo que se obtenga un sistema de control de velocidad. Para ello, se desacopla el potenciómetro de realimentación del eje del motor, y se hace que permanezca estático en una misma posición. Así, la señal de error del sistema de control dependerá directamente del valor deseado que se ajuste (que seguirá indicándose mediante pulsos de duración variable). Ambos tipos de modificación requieren que se elimine físicamente la pestaña limitadora de la caja reductora.

La modificación es un proceso destructivo, es decir no se podrá recuperar la funcionalidad original. La idea es quitar el tope mecánico y desacoplar el potenciómetro del eje de salida del servomotor, sin embargo se necesita mantener el control sobre la velocidad con la misma señal de pulsos, se coloca otro potenciómetro que servirá para fijar el punto de velocidad nula con una señal de 1.5 ms, de modo que la velocidad de rotación del servomotor será mayor cuanto más se aleje la señal de su punto medio de 1.5 ms, es decir con 2 ms la velocidad será máxima en un sentido de giro y con una señal de 1 ms también será máxima pero en sentido contrario.

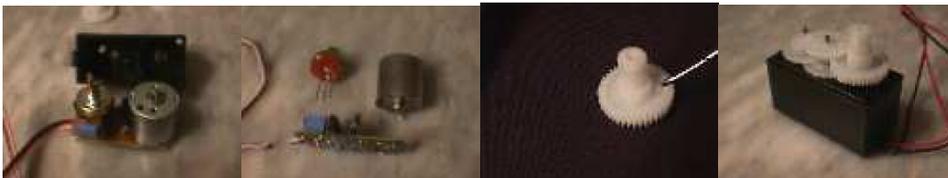


Figura 4.19 Modificaciones que se realizan los servomotores para lograr la rotación continua

## 4.6 Control de motores y servomotores

### 4.6.1 Control de motores de corriente continua

En los motores de corriente continua interesa controlar la velocidad y dirección del eje de rotación. Esta tarea se puede realizar con un dispositivo electrónico denominado puente H. Un puente H es un circuito electrónico que permite a un motor eléctrico girar en ambos sentidos, avance y retroceso. Son ampliamente usados en robótica. Están disponibles como circuitos integrados, pero también pueden construirse a partir de componentes discretos.

El término puente H proviene de la típica representación gráfica del circuito. Se construye con 4 interruptores (mecánicos o mediante transistores). Cuando los interruptores S1 y S4 (ver primera figura 4.20) están cerrados (y S2 y S3 abiertos) se aplica una tensión positiva en el motor, haciéndolo girar en un sentido. Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo el giro en sentido inverso del motor.

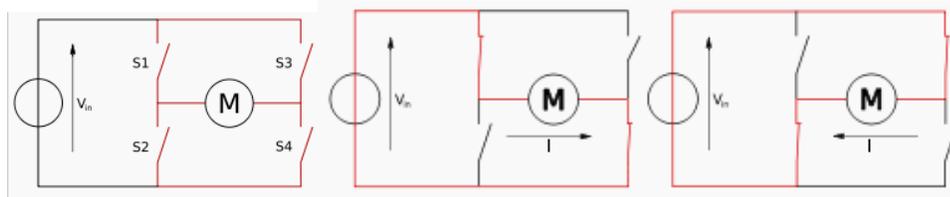


Figura 4.20 Esquema del funcionamiento de un Puente H para el control del sentido de giro de motores

Un puente H también puede usarse para frenar el motor, al hacer un corto entre los bornes del motor, o incluso puede usarse para permitir que el motor frene bajo su propia inercia, cuando desconectamos el motor de la fuente que lo alimenta. En el siguiente cuadro se resumen las diferentes acciones.

Tabla 4.1 Señales de control en un Puente H y el resultado en el sentido de giro del motor

S1	S2	S3	S4	Resultado
1	0	0	1	El motor gira en <i>avance</i>
0	1	1	0	El motor gira en <i>retroceso</i>
0	0	0	0	El motor se detiene bajo su inercia
0	1	0	1	El motor frena ( <i>fast-stop</i> )

Los circuitos de control puente H también pueden aplicar una señal modulada en ancho de pulso lo que permite controlar la velocidad y el par que genera el motor.

### 4.6.2 Secuencias para manejar motores paso a paso bipolares

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

A continuación se puede ver la tabla 4.2 con la secuencia necesaria para controlar motores paso a paso del tipo bipolar:

Tabla 4.2 Secuencia de control para los motores a pasos bipolares

PASO	TERMINALES			
	A	B	C	D
1	+V	-V	+V	-V
2	+V	-V	-V	+V
3	-V	+V	-V	+V
4	-V	+V	+V	-V

### 4.6.3 Secuencias para manejar motores paso a paso unipolares

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

### 4.6.3.1 Secuencia Normal

Esta es la secuencia más usada y la que generalmente recomiendan los fabricantes. Con esta secuencia el motor avanza un paso por vez y debido a que siempre hay al menos dos bobinas activadas, se obtiene un alto torque de paso y de retención.

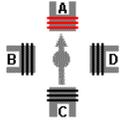
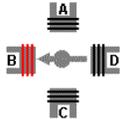
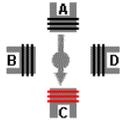
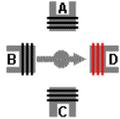
Tabla 4.3 Secuencia normal de control para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFFECTO
1	ON	ON	OFF	OFF	
2	OFF	ON	ON	OFF	
3	OFF	OFF	ON	ON	
4	ON	OFF	OFF	ON	

### 4.6.3.2 Secuencia *wave drive*:

En esta secuencia se activa solo una bobina a la vez. En algunos motores esto brinda un funcionamiento más suave. La desventaja es que al estar solo una bobina activada, el torque de paso y retención es menor [25].

Tabla 4.4 Secuencia *wave drive* para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFFECTO
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	OFF	ON	OFF	OFF	
3	OFF	OFF	ON	OFF	
4	OFF	OFF	OFF	ON	

### 4.6.3.3 Secuencia de medio paso

En esta secuencia se activan las bobinas de tal forma de brindar un movimiento igual a la mitad del paso estándar. Para ello se activan primero 2 bobinas y luego solo 1 y así sucesivamente. Como vemos en la tabla la secuencia completa consta de 8 movimientos en lugar de 4.

Esto permite tener un mejor control sobre la posición del eje del motor, se utiliza donde es necesario mayor resolución en la posición angular como en equipos instrumentales.

Tabla 4.5 Secuencia de medio paso para motores unipolares

PASO	Bobina A	Bobina B	Bobina C	Bobina D	EFEECTO
1	ON	OFF	OFF	OFF	
2	ON	ON	OFF	OFF	
3	OFF	ON	OFF	OFF	
4	OFF	ON	ON	OFF	
5	OFF	OFF	ON	OFF	
6	OFF	OFF	ON	ON	
7	OFF	OFF	OFF	ON	
8	ON	OFF	OFF	ON	

Cabe destacar que debido a que los motores paso a paso son dispositivos electromecánicos y debe vencer la inercia estática y en movimiento, el tiempo de duración y la frecuencia de los pulsos aplicados es un punto muy importante a tener en cuenta, esto implica que el motor debe alcanzar el paso antes que la próxima secuencia de pulsos comience. Si la frecuencia de pulsos es muy elevada, el motor puede reaccionar en alguna de las siguientes formas:

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

Para obtener un arranque suave y preciso, es recomendable comenzar con una frecuencia de pulso baja y gradualmente ir aumentándola hasta la velocidad deseada sin superar la máxima tolerada. El giro en reversa debería también ser realizado previamente bajando la velocidad de giro y luego cambiar el sentido de rotación.