

<b>Capítulo 1</b>	<b>Sensores para robots móviles</b>	<b>4</b>
<b>0</b>	<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Clasificación sensorial</b>	<b>5</b>
1.1	Sensores exteroceptivos	6
1.1.1	Sensores para medir distancias basados en el ultrasonido	6
1.1.2	Sensores para medir distancias que funcionan en el espectro infrarrojo	10
1.1.3	Visión artificial	12
1.1.4	Sensores de proximidad	13
1.1.4.1	Sensores inductivos	13
1.1.4.2	Sensores de efecto Hall	14
1.1.4.3	Sensores capacitivos	16
1.1.5	Sensores de iluminación: fotorresistencias, fotodiodos y fototransistores	17
1.1.6	Otros sensores exteroceptivos	18
1.2	Sensores propioceptivos	18
1.2.1	GPS	19
1.2.2	Sensores para medir de forma absoluta la orientación del robot	20
1.2.3	Giroscopio	21
1.2.4	Shaft Encoder incremental	21
1.2.5	Encoders absolutos	26
1.2.6	Sensores de velocidad	26
1.2.7	Otros sensores propioceptivos	26
<b>Capítulo 2</b>	<b>Actuadores</b>	<b>27</b>
<b>0</b>	<b>Introducción</b>	<b>27</b>
<b>1</b>	<b>Ecuación del movimiento</b>	<b>28</b>
<b>2</b>	<b>Motor de corriente continua</b>	<b>31</b>
2.1	Principio físico, modelo eléctrico y modos de funcionamiento	31
2.2	Control de velocidad	35
2.2.1	Efecto de la resistencia de inducido	39

3	Servomotor	40
	<i>Bibliografía</i>	43



# Capítulo 1 SENSORES PARA ROBOTS MÓVILES

## 0 Introducción

Un **transductor** es, en general, un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otro.

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor.

En robótica móvil un sensor utiliza un transductor que capta información del entorno para ser utilizada por el robot.

En general, la estructura de un sensor completo se compone de lo siguiente:

- Controlador del transductor. Si existe, es el elemento interfaz entre el usuario del sensor y el transductor. Por ejemplo, hay circuitos controladores que indican cuándo y cómo se debe hacer una medida, etc...
- Transductor. Convierte las variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica (señal).
- Acondicionamiento de la señal. Si existe, realiza la función de modificar la señal entregada por el transductor para obtener una señal adecuada (amplificación, linealización, etc.). Con el avance de la electrónica digital, cada vez los circuitos acondicionadores son más sencillos.

Por otro lado, un actuador utiliza un transductor que a partir de una señal eléctrica es capaz de modificar el entorno.

En general, la estructura de un sensor completo se compone de lo siguiente:

- Controlador del transductor. Se encarga de que se consiga la actuación que el usuario quiere. Por ejemplo, los servos llevan un circuito controlador que se encarga de posicionar de forma exacta el eje del servo.
- Transductor. Convierte las variaciones de una magnitud eléctrica (señal) en variaciones de una física.
- Acondicionamiento de la señal. Si existe, realiza la función de modificar la señal entregada al transductor para obtener una señal adecuada (amplificación, modulación, etc.). Con el avance de la electrónica digital, cada vez los circuitos acondicionadores son más sencillos.

## 1 Clasificación sensorial

Los sensores se pueden clasificar de muchas maneras, pero una de las más comunes es:

- Sensores propioceptivos y exteroceptivos: es la clasificación más utilizada en robótica móvil. La propiocepción se refiere a la percepción del estado interno del robot; por ejemplo, medidas de carga de baterías, posición del robot, etc. La exterocepción se refiere a la percepción de aspectos externos al robot; por ejemplo, temperatura, presión, localización de objetos.

Los sensores tienen unas propiedades que se deben tener en cuenta en cualquier desarrollo robótico, y son:

- La velocidad de operación. Se refiere a la velocidad a la que el sensor genera nuevas medidas. Esto hace que unos sensores sean apropiados para trabajar en tiempo real y en continuo, y otros sólo se usen en momentos muy específicos.
- El coste. Es una barrera a la hora de fabricar un robot, ya que el coste de los sensores repercute muy directamente en el coste del robot. Hay sensores que cuestan más de 3000 euros, como el escáner láser, mientras que otros pueden llegar

a costar 18 euros, como los sensores de ultrasonido. Generalmente cuanto mayor información de calidad se tenga en las medidas, más caro es el sensor. Hoy en día es un reto conseguir robots realmente inteligentes a bajo coste, menos de 600 euros. Generalmente los robots baratos se usan para labores puramente reactivas; es decir, sin basarse en el conocimiento.

- Tasa de error. Incluye el número de medidas espúreas que da un sensor, el error medio de medida y el número medio de medidas perdidas.
- Robustez. Se refiere a la tolerancia que tiene un sensor a cambios en el medio de funcionamiento.
- Requerimientos computacionales. Este aspecto es otra barrera a la hora de fabricar un robot, ya que los sensores que requieren gran capacidad computacional obligan a unas prestaciones mínimas en el robot, de las que puede no disponer. Este aspecto suele ir unido al coste y la velocidad de operación.
- Potencia, peso y tamaño. Son aspectos muy importantes a tener en cuenta, ya que influyen en la autonomía y el tamaño del robot.

A continuación se explican los sensores más utilizados en un robot móvil, atendiendo a la clasificación anteriormente mencionada.

## **1.1 Sensores exteroceptivos**

A continuación se detallan los sensores exteroceptivos más utilizados en robótica móvil.

### **1.1.1 Sensores para medir distancias basados en el ultrasonido**

Los sensores de ultrasonido son una tecnología de medida activa en donde se emite una señal ultrasónica en forma de pulso, para posteriormente recibir el reflejo de la misma o eco. Se pueden explotar diferentes aspectos de la señal reflejada: el tiempo de vuelo o la atenuación.

Los sensores de ultrasonido están formados por una cápsula emisora y otra receptora situada al lado de la emisora o bien por un transductor que actúa de emisor y receptor. En los robots móviles se suelen montar en la periferia [Sanchez02a,b,c], de forma que los sensores se encuentren separados a intervalos uniformes a lo largo del contorno del robot. Esto se hace así porque estos sensores son baratos. Una estrategia alternativa es colocar un sensor montado en una plataforma rotatoria, obteniendo así omnidireccionalidad [Semiathowska94].

La forma estándar de usar un sensor ultrasónico es dar un impulso corto, pero de gran voltaje y a alta frecuencia, a la cápsula emisora para producir una onda ultrasónica. Si la onda ultrasónica viaja directamente contra un obstáculo, rebota, y vuelve directamente hasta el receptor. La distancia que hay entre el sensor y el objeto es la mitad de la distancia que ha recorrido la señal y se calcula:

$$d = \frac{1}{2}ct$$

donde  $d$  es la distancia al objeto,  $c$  es la velocidad del sonido en el aire, y  $t$  es el tiempo que tarda la señal desde que se emite hasta que se recibe. La velocidad del sonido depende de la temperatura y se calcula aproximadamente:

$$E.1 \quad c = c_0 + 0.6 T \text{ m/s}$$

donde  $T$  viene dado en grados Celsius y  $c_0$  es 331 m/s.

Este tipo de sensores tiene unas limitaciones que son necesarias conocer a la hora de poderlos aplicarlos en un robot móvil:

- La velocidad del sonido es variable: la ecuación E.1 es una aproximación, ya que la velocidad del sonido también viene afectada por la densidad del aire, la humedad y la concentración de polvo en el aire. En entornos típicos la velocidad de la luz puede variar un 2% de un lugar a otro.

- El tiempo en blanco (*blanking time*): es necesario guardar un pequeño tiempo desde que se emite hasta que se prepara al receptor para recibir, con el objetivo de que no se vea influenciado por la onda que sale del emisor. Este tiempo se denomina tiempo en blanco, y generalmente limita la medida mínima de distancia de 3 a 15 cm dependiendo de la potencia de la señal emitida.
- La atenuación: la onda ultrasónica que sale del emisor se va dispersando y atenuando según avanza en el medio, de manera que cuanto más tarda el eco en llegar al receptor, más débil se espera que sea. Otro factor que influye en la amplitud del eco es la superficie del objeto. Si se calcula la distancia a un objeto por el tiempo de vuelo de la señal, esta limitación no influye más que en la distancia máxima que se quiere llegar a medir.
- El ángulo de medida (*field of view*). La señal emitida tiene un perfil de amplitudes complejo, como se muestra en la Figura 1-1.a. Por ello, un eco que vuelve no necesariamente permite calcular de forma precisa la localización del objeto usando simplemente el tiempo de vuelo de la señal, ya que el eco puede provenir de cualquier lugar del espacio que se encuentre en el frente de onda ultrasónico, ver Figura 1-1.b. La frecuencia de la onda que se emite suele ser de unos 40-50kHz. Cuanto mayor sea la frecuencia más direccional es la onda, pero se atenúa más.

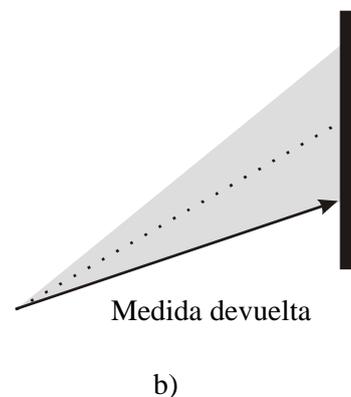
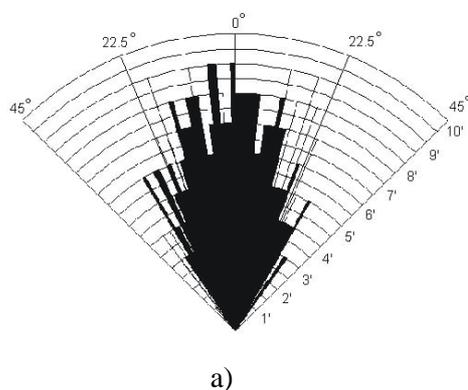


Figura 1-1: Efectos del ángulo de medida

- Las reflexiones: son el impedimento más serio para poder detectar la posición de un objeto a partir del eco que se recibe. A frecuencias ultrasónicas, la superficie de la mayoría de los objetos reflejan la onda, de manera que una onda acústica que incida de forma muy oblicua en un objeto, se refleja en una dirección diferente a la de retorno hacia el receptor, ver Figura 1-2. Si se recibe un eco, no se puede asegurar que el eco sea un resultado de una serie de complejas reflexiones por el entorno.

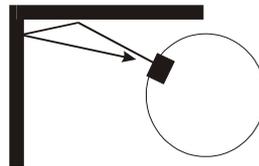


Figura 1-2: Efecto de la reflexión

- *Cross-Talk*: se produce si el eco generado por un sensor es recibido por otro que en ese momento está midiendo, como se muestra en la Figura 1-3. Este problema se evita dejando un tiempo entre las medidas de dos sensores de ultrasonido diferentes.

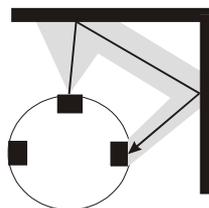


Figura 1-3: Efecto cross-talk

Si se analiza la potencia de la onda emitida, cuando mayor sea mayores distancias se pueden medir, más problemas existen con las reflexiones y la distancia mínima de medida

es mayor. Si la potencia de la onda emitida es pequeña, se reducen las reflexiones, la distancia máxima de medida y la distancia mínima de medida.

De todas las restricciones comentadas, las más importantes son la variación de la velocidad del sonido, las reflexiones y el ángulo de medida. Por ello a lo largo de los años los investigadores han intentado dar solución a estos problemas. Las reflexiones así como el ángulo de medida del sensor generalmente se pueden tratar como ruido; por tanto son propiedades de un sensor que se pueden modelar [Wilkes92] [Kuc87].

Cuando se trata de modelar el ángulo de medida del sensor, suponiendo que no hay reflexiones, se puede usar un filtro de Kalman o mínimos cuadrados [Lange89] [Leonard91]. El problema es que en un entorno convencional existen muchas reflexiones ya que está formado por varias superficies. Para modelar las reflexiones [Wilkes92] usa un algoritmo que hace una traza del camino que sigue la onda, examinando las interacciones entre la misma y las diferentes estructuras del entorno. La única pega es que se necesita tener cierta información del entorno a priori.

En la tesis [Sanchez02a,b,c] se propone un método para reducir estas limitaciones a un bajo coste computacional.

### **1.1.2 Sensores para medir distancias que funcionan en el espectro infrarrojo**

Se incluyen en esta sección los sensores de infrarrojo y láser. A través de estos sensores se pueden estimar las distancias a las que se encuentran los objetos en el entorno. Hay diferentes métodos para medir la distancia a un objeto:

- Triangulación: usa relaciones geométricas entre el rayo de salida, el de entrada y la posición del sensor. Como se muestra en la Figura 1-4, cuanto mayor sea el ángulo "a", mayor será la distancia al objeto.

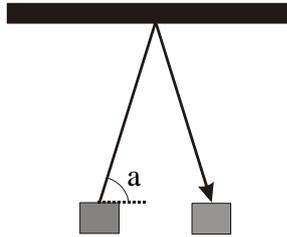


Figura 1-4: Medida de infrarrojos por triangulación

- Tiempo de vuelo: Mide el tiempo que transcurre desde que sale el rayo de luz hasta que se recibe, después de haber rebotado en un objeto.

La precisión que se obtiene con estos sensores es muy elevada, debido a que son muy direccionales al ser muy pequeña su longitud de onda. La distancia máxima de medida depende de la potencia que se aplica al rayo de salida.

Se suele montar un solo láser en una plataforma móvil (*pan-tilt*), o con un espejo móvil que permita direccionar la señal a diferentes zonas del entorno, debido a que son caros. Mientras que los sensores de infrarrojo se suelen montar de forma similar a los sensores ultrasónicos.

Las ventajas de este tipo de sensores se pueden resumir en:

- El láser puede generar un millón de medidas en un segundo [Everet95], con una precisión de milímetros en medidas de 30 metros.
- Son sensores ideales para medidas de profundidad, ya que el ángulo de medida es infinitesimal en un láser y muy pequeño en los sensores de infrarrojo.

Por otro lado existen un conjunto de desventajas muy importantes:

- En el caso del láser el precio es muy elevado (3000-10000 euros).
- El consumo del láser es elevado para llegar a obtener medidas de 30m.
- Al ser tan direccionales no detectan obstáculos ni por encima, ni por debajo del plano horizontal de medida, por tanto no son buenos para evitar obstáculos.

- En el caso de los sensores de infrarrojo las medidas de profundidad son muy limitadas (típicamente  $< 80\text{cm}$ ).

### 1.1.3 Visión artificial

Se refiere al procesamiento de datos de cualquier tipo que use el espectro electromagnético que produce la imagen. Una imagen implica múltiples lecturas dispuestas en una rejilla o matriz de dos dimensiones.

Se pueden distinguir al menos dos tipos de cámaras, las que trabajan en el espectro visible y las que trabajan en el espectro infrarrojo.

Cada vez se usan más ambos tipos de cámaras en robótica debido a que los precios bajan y el tamaño disminuye, y porque a veces es necesario conocer la textura y el color de algunos objetos.

Se puede considerar que la visión artificial es un campo de estudio separado de los demás en robótica. En este campo se han desarrollado algoritmos para filtrar ruido, compensar problemas de iluminación, encontrar líneas, emparejar líneas con modelos, extraer formas y construir representaciones tridimensionales. Los robots reactivos no suelen utilizar este tipo de algoritmos porque requieren de gran cantidad de cálculos.

Las cámaras de vídeo tienen como ventajas:

- Ofrecen mucha información en cada imagen.
- Son el sensor ideal para detectar colores, texturas y para reconocer de objetos.

Por otro lado existen desventajas como:

- Alto coste computacional. Debido a esto, los robots suelen tener varios procesadores, algunos de ellos asignados exclusivamente al procesamiento de imágenes.

- El precio es elevado. Un sistema de visión artificial, suele constar de una o dos cámaras de vídeo, un procesador dedicado a cálculos y una plataforma *pan-tilt*. Este conjunto tiene un coste elevado (mayor que 600 euros).
- Las imágenes dependen de la iluminación, aunque ya se están explorando técnicas que disminuyen este problema [Umbaugh98].
- No es el sensor adecuado para medir profundidad, aunque se pueden hacer mapas de profundidad a partir de dos cámaras de vídeo [Dean95] [Horn86].

#### **1.1.4 Sensores de proximidad**

Los sensores de proximidad suelen tener una salida binaria que indica la presencia de un objeto dentro de un intervalo de distancia especificado. En condiciones normales, los sensores de proximidad se utilizan en robótica para un trabajo en campo cercano para agarrar o evitar un objeto. Cualquier sensor para medir distancia se puede usar como sensor de proximidad.

##### **1.1.4.1 Sensores inductivos**

Los sensores basados en un cambio de inductancia debido a la presencia de un objeto metálico están entre los sensores de proximidad industriales de más uso frecuente. El principio de funcionamiento de estos sensores puede observarse en la Figura 1-5.

La figura muestra un diagrama esquemático de un sensor inductivo, que consiste fundamentalmente en una bobina arrollada, situada junto a un imán permanente empaquetado en un receptáculo simple y robusto. El efecto de llevar el sensor a la proximidad de un material ferromagnético produce un cambio en la posición de las líneas de flujo del imán permanente según se indica en la figura. En condiciones estáticas no hay ningún movimiento en las líneas de flujo y, por consiguiente, no se induce ninguna corriente en la bobina. Sin embargo, cuando un objeto ferromagnético penetra en el campo del imán o lo abandona, el cambio resultante en las líneas de flujo induce un impulso de corriente, cuya amplitud y forma son proporcionales a la velocidad de cambio de flujo.

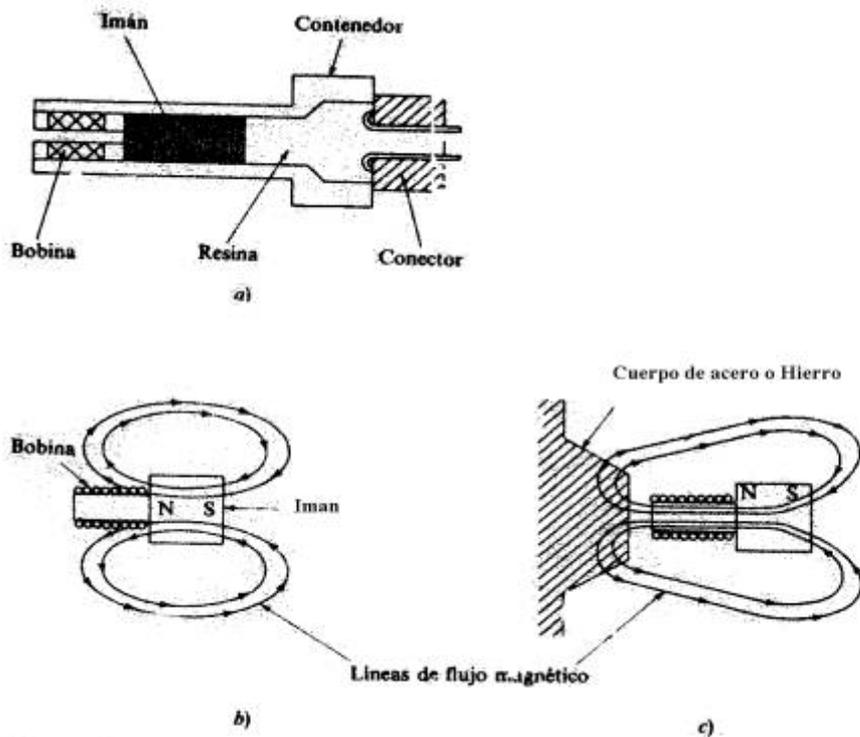


Figura 1-5: a) Un sensor inductivo. b) Forma de las líneas de flujo en la ausencia de un cuerpo ferromagnético. c) Formas de las líneas de flujo cuando un cuerpo ferromagnético se lleva a las proximidades del sensor

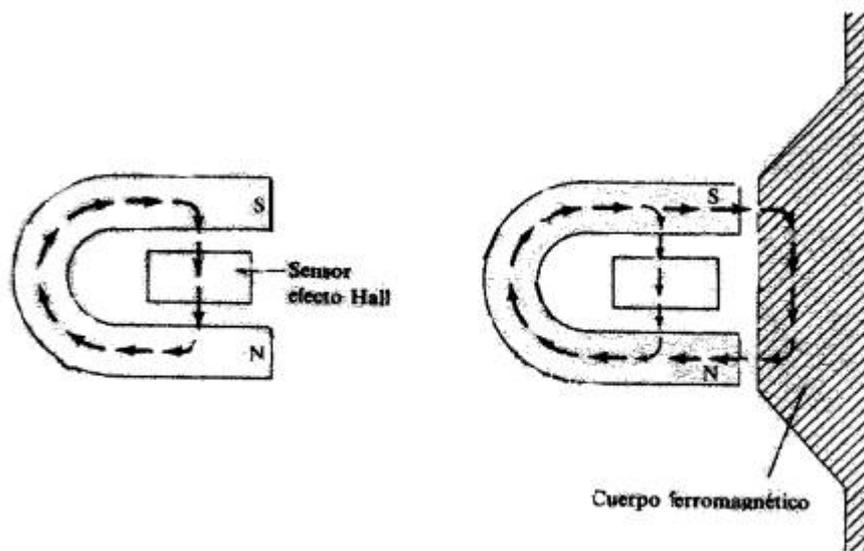
La forma de onda de la tensión, observada a la salida de la bobina, proporciona un medio efectivo para la detección de proximidad. La tensión medida a través de la bobina varía como una función de la velocidad a la que un material ferromagnético se introduce en el campo del imán. La polaridad de la tensión, fuera del sensor, depende de que el objeto este penetrando en el campo abandonándolo.

Existe una relación entre la amplitud de la tensión y la distancia sensor-objeto. La sensibilidad cae rápidamente al aumentar la distancia, y el sensor sólo es eficaz para fracciones de un milímetro.

Puesto que el sensor requiere movimiento para generar una forma de onda de salida, un método para producir una señal binaria es integrar esta forma de onda. La salida binaria se mantiene a nivel bajo en tanto que el valor integral permanezca por debajo de un umbral especificado, y luego se conmuta a nivel alto (indicando la proximidad de un objeto) cuando se supera el umbral.

### 1.1.4.2 Sensores de efecto Hall

El efecto Hall relaciona la tensión entre dos puntos de un material conductor o semiconductor con un campo magnético a través del material. Cuando se utilizan por sí mismos, los sensores de efecto Hall sólo pueden detectar objetos magnetizados. Sin embargo, cuando se emplean en conjunción con un imán permanente en la configuración tal como la indicada en la figura, son capaces de detectar todos los materiales ferromagnéticos. Cuando se utilizan de dicha manera, un dispositivo de efecto Hall detecta un campo magnético intenso en ausencia de un material ferromagnético en el campo cercano.



*Figura 1-6: Funcionamiento de un sensor de efecto Hall en conjunción con un imán permanente*

Cuando dicho material se lleva a la proximidad del dispositivo, el campo magnético se debilita en el sensor debido a la curvatura de las líneas del campo a través del material.

Los sensores de efecto Hall están basados en el principio de una fuerza de Lorentz que actúa sobre una partícula cargada que se desplaza a través de un campo magnético. Esta fuerza actúa sobre un eje perpendicular al plano establecido por la dirección de movimiento de la partícula cargada y la dirección del campo. Es decir, la fuerza de Lorentz viene dada por  $\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ , en donde  $q$  es la carga,  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidad,  $\mathbf{B}$  es el vector del campo magnético. Al llevar un material ferromagnético cerca del dispositivo de imán semiconductor disminuirá la intensidad del campo magnético, con la consiguiente reducción de la fuerza de Lorentz y, finalmente, la tensión a través del semiconductor. Esta caída en la tensión es la clave para detectar

la proximidad con sensores de efecto Hall. Las decisiones binarias con respecto a la presencia de un objeto se realizan estableciendo un umbral de la tensión fuera del sensor.

Además, la utilización de materiales semiconductores permite la construcción de circuitos electrónicos para amplificación y detección directamente en el propio sensor, con lo que se reduce el tamaño y el coste del mismo.

### 1.1.4.3 Sensores capacitivos

A diferencia con los sensores inductivos y de efecto Hall que detectan solamente materiales ferromagnéticos, los sensores capacitivos son potencialmente capaces (con diversos grados de sensibilidad) de detectar todos los materiales sólidos y líquidos. Como su nombre indica, estos sensores están basados en la detección de un cambio en la capacidad inducido por una superficie que se lleva cerca del elemento sensor.

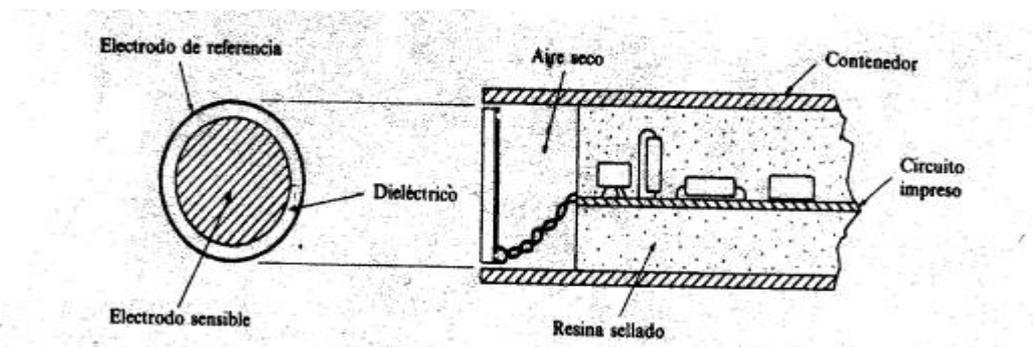


Figura 1-7

El elemento sensor es un condensador constituido por un electrodo sensible y un electrodo de referencia. Estos electrodos pueden ser, por ejemplo, un disco y un anillo metálicos separados por un material dieléctrico. Una cavidad de aire seco se suele colocar detrás del elemento capacitivo para proporcionar aislamiento. El resto del sensor está constituido por circuitos electrónicos.

Hay varios métodos electrónicos para detectar la proximidad basados en cambios de la capacidad. Uno de los más simples incluye el condensador como parte de un circuito oscilador diseñado de modo que la oscilación se inicie solamente cuando la capacidad del sensor sea superior a un valor umbral preestablecido. La iniciación de la oscilación se traduce luego en una tensión de salida, que

indica la presencia de un objeto. Este método proporciona una salida binaria, cuya sensibilidad de disparo dependerá del valor umbral.

La capacidad varía como una función de la distancia para un sensor de proximidad basado en los conceptos anteriores. Es de interés destacar que la sensibilidad disminuye mucho cuando la distancia es superior a unos pocos milímetros y que la forma de la curva de respuesta depende del material objeto de detección. En condiciones normales, estos sensores son accionados en un modo binario, de modo que un cambio en la capacidad mayor que en un umbral preestablecido  $T$  indica la presencia de un objeto, mientras que los cambios por debajo del umbral indican la ausencia de un objeto con respecto a los límites de detección establecidos por el valor de  $T$ .

#### **1.1.5 Sensores de iluminación: fotorresistencias, fotodiodos y fototransistores**

Los sensores de luz visible y de infrarrojos cubren un amplio espectro de complejidad. Las fotocélulas se encuentran entre los más sencillos de todos los sensores para hacer su interfaz con el microprocesador, y la interpretación de la salida de una fotocélula es directa. Las cámaras de vídeo, por el contrario, requieren una buena cantidad de circuitería especializada para hacer que sus salidas sean compatibles con un microprocesador, además las complejas imágenes que las cámaras graban son todo menos fáciles de interpretar.

Los sensores de luz posibilitan comportamientos de un robot tales como esconderse en la oscuridad, jugar con un flash, y moverse hacia una señal luminosa. Los sensores de luz simples son fotorresistencias, fotodiodos o fototransistores. Las fotorresistencias son simplemente resistencias variables con la luz en muchos aspectos parecidos a los potenciómetros, excepto en que estos últimos varían girando un botón.

Los fototransistores dan mayor sensibilidad a la luz que las fotorresistencias. El fototransistor es básicamente un transistor con la corriente de base generada por la iluminación de la unión base-colector (ver Figura 1-8). La operación normal del transistor amplifica la pequeña corriente de base. Un fototransistor tiene una interfaz con un microprocesador casi tan fácil como el de una fotorresistencia.

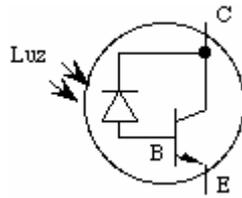


Figura 1-8: Fototransistor

Los fotodiodos tienen una gran sensibilidad, producen una salida lineal en un amplio rango de niveles de luz, y responden con rapidez a los cambios de iluminación. Esto les hace útiles en los sistemas de comunicación para detectar luces moduladas; el mando a distancia de casi todos los TV, equipos estéreo y reproductores de CD los emplean. La salida de un fotodiodo requiere, no obstante, amplificación antes de poder ser empleada por un microprocesador.

### 1.1.6 Otros sensores exteroceptivos

Además de los sensores exteroceptivos expuestos, existen otros como los sensores de contacto, táctiles, radar basados en microondas, termopares, etc.

## 1.2 Sensores propioceptivos

Dentro de este tipo de sensores se encuentran los sensores que dan información de la posición y orientación del robot. Este tipo de sensores, en este documento, se llamarán también sensores de posicionamiento.

Los sensores de posicionamiento se pueden clasificar en dos grupos:

- Sensores de medida absoluta; es decir, dan una medida de la pose con respecto a un sistema de referencia fijo al entorno. Los sensores de medida absoluta cometen errores en la medida pero no se acumulan con el paso del tiempo. Entre estos sensores se encuentra el GPS, la brújula y todos aquellos sensores que se encargan de detectar marcas que se han hecho en el entorno, cuya localización se conoce de forma precisa.
- Sensores de medida incremental; es decir, son sensores que dan como medida incrementos de movimiento con respecto a un punto. Los sensores de medida

incremental tienen el inconveniente de que los errores de medida son acumulativos y con el paso del tiempo la estimación de la posición, que se calcula teniendo en cuenta sus medidas, es totalmente imprecisa [Cox91]. Por otro lado estos sensores son los más comunes, como el odómetro (shaft encoder) y los sistemas de navegación inercial (giroscopios, acelerómetros).

### 1.2.1 GPS

El GPS aunque no es un sensor propioceptivo ya que necesita recibir la señal de satélites externos, tampoco es un sensor exteroceptivo. Pero como es un sistema estima la posición del robot se trata en esta sección.

Este sistema proporciona una medida de la posición del robot, y por lo tanto se considera un sensor de medida absoluta. Da información de la situación geográfica en la que se encuentra el robot móvil, gracias a un conjunto de más de 20 satélites que tiene el departamento de defensa de los EEUU.

El GPS tiene la siguiente ventaja:

- Es el único sensor que da una medida de la posición absoluta del robot que funciona en cualquier entorno exterior.

Por otro lado tiene varios inconvenientes:

- En el mejor de los casos se consiguen precisiones que rondan los 100 m. Para poder conseguir mejor precisión se puede usar el DGPS, reduciendo así el error a centímetros, pero es mucho más caro (9000 euros) y necesita de una estación base en un lugar conocido. El próximo sistema Galileo europeo será mejor.
- No se puede usar en edificios, ya que bloquean la señal de los satélites.
- Es caro, aunque los precios están bajando de forma espectacular.

### 1.2.2 Sensores para medir de forma absoluta la orientación del robot

En esta sección se trata de la brújula y del inclinómetro, ya que ambos suelen funcionar de forma conjunta para poder estimar la orientación del robot y son sensores de posicionamiento de medida absoluta.

Un inclinómetro es un dispositivo muy simple y barato (unos pocos euros) que mide la orientación del vector gravitacional. Los más comunes usan mercurio. Para poder medir la inclinación necesita estar en una plataforma que no esté sometida a aceleración, ya que sino la medida es errónea. Es muy sensible a las vibraciones. Pero es fundamental si el robot va a trabajar en un entorno que no sea llano, ya que puede evitar que el robot vuelque o que se dañe la carga que lleva.

La brújula usa el campo magnético de la tierra para conocer la orientación del robot. La ventaja fundamental es que:

- Es el único sensor de medida absoluta, que mide la orientación del robot en prácticamente cualquier lugar del mundo. Un pequeño error en la orientación supone cometer constantemente errores en la posición según avanza el robot, por eso tener un sensor que ayude a corregir estos pequeños errores de forma inmediata, permite al robot moverse de forma más precisa.

Tiene varias limitaciones muy importantes:

- Es sensible a los campos magnéticos externos. Si provienen del robot y son constantes se pueden corregir. Esto se denomina *Hard Iron Distortion*. Para evitarlos basta con separarse de la fuente magnética una pequeña distancia, ya que el campo se atenúa con la distancia al cuadrado.
- Es sensible a los elementos metálicos que estén muy cerca del robot, ya que distorsionan el campo magnético de la tierra. Para que suceda esto el elemento metálico tiene que estar muy cerca del robot. Si la distorsión viene causada por el propio robot se puede corregir. Esto es lo que denomina *Soft Iron Distortion*.

Las precisiones que se pueden obtener oscilan desde cinco grados los más baratos (15 euros), hasta décimas de grado los más caros (900 euros). Existen brújulas de dos dimensiones, ya que miden el campo magnético en dos direcciones ortogonales, que solamente se pueden usar en entornos llanos. Si el entorno no es llano, es necesario usar una brújula de tres dimensiones y dos inclinómetros, para poder saber la orientación del robot. La brújula medirá el campo en tres ejes ortogonales y los inclinómetros medirán la inclinación del robot en los dos ejes horizontales [Caruso00].

Las brújulas más caras son capaces de corregir los errores que provienen del robot y además detectan posibles medidas espúreas cuando existe un campo magnético externo o un elemento metálico que pueda influir en la medida.

### **1.2.3 Giroscopio**

Son brújulas de medida incremental; es decir, miden cambios en la orientación del robot. Se basan en medir la aceleración usando las leyes de Newton.

Tienen varias limitaciones:

- Acumulan el error con el paso del tiempo
- Si se quieren tener precisiones aceptables (de décima de grado por segundo) son muy caros (6000-60000 euros).
- Los giroscopios baratos (80-300 euros) tienen errores mayores de un grado por minuto.

Existen unos giroscopios ópticos basados en láser [Chow85], [Komorilla94], que permiten medir con mucha precisión la orientación del robot (errores que van desde varios grados por hora, hasta 0.0001 grado por hora, según el precio)

### **1.2.4 Shaft Encoder incremental**

Los codificadores ópticos o encoders incrementales constan, en su forma más simple, de un disco transparente con una serie de marcas opacas colocadas radialmente y equidistantes entre sí, de un

sistema de iluminación en el que la luz es colimada de forma adecuada, y de un elemento fotorreceptor. El eje cuya posición se quiere medir va acoplado al disco transparente. Con esta disposición, a medida que el eje gire se irán generando pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviese cada marca, y llevando una cuenta de estos pulsos es posible conocer la posición del eje y la velocidad de rotación.

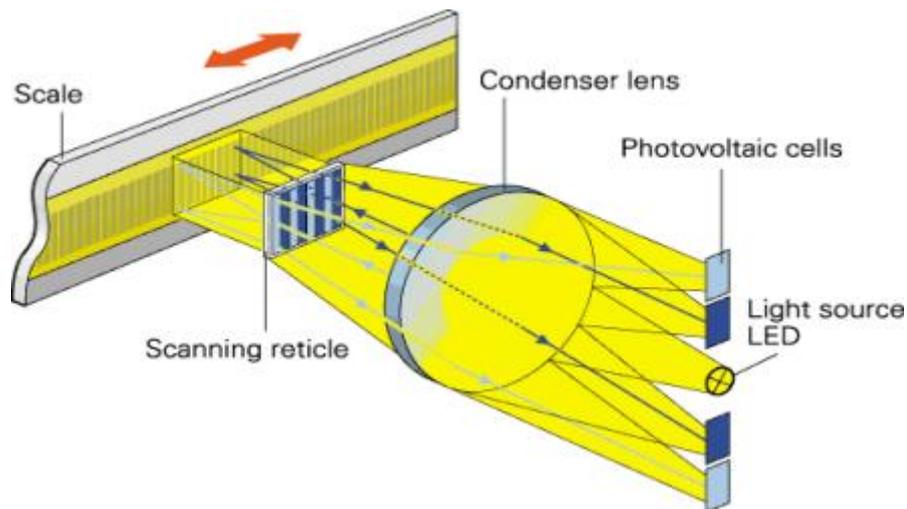


Figura 1-9: Esquema de funcionamiento del codificador angular de posición encoder

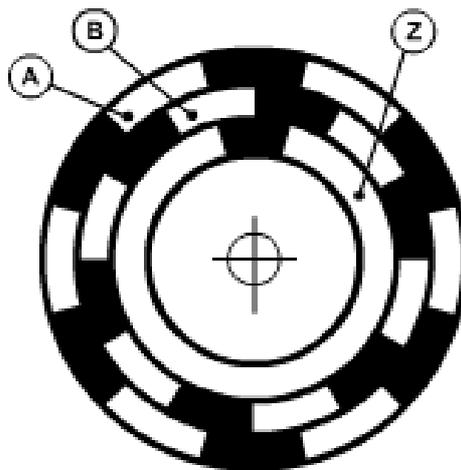
Este tipo de encoders se emplean en un gran número de aplicaciones dada su simplicidad y "economía". Por otro lado las principales limitaciones con las que cuenta son:

- La información acerca de la posición se pierde cuando la alimentación al sistema falla ó cuando es desconectado y cuando hay fuertes perturbaciones.
- Siempre es necesario un circuito contador para obtener una salida digital compatible con el puerto de entrada/salida de un microcontrolador. Otra posible forma de hacerlo se basaría en software especial según sea la aplicación específica, como por ejemplo, alguna interrupción o programación de alta velocidad, tiempo real, para obtener el tiempo de cambio entre un sector y otro.
- Los encoders pueden presentar problemas mecánicos debido a la gran precisión que se debe tener en su fabricación. La contaminación ambiental puede ser una fuente de interferencias en la transmisión óptica. Son dispositivos particularmente sensibles a golpes y vibraciones,

estando su margen de temperatura de trabajo limitado por la presencia de componentes electrónicos.

- Existe desconocimiento en un momento dado de si se está realizando un giro en un sentido o en el opuesto, con el peligro que supone no estar contando adecuadamente.

Una solución a este último problema consiste en disponer de otra franja de marcas, desplazada de la anterior de manera que el tren de pulsos B que con ella se genere esté desplazado  $90^\circ$  eléctricos con respecto al generado por la primera franja, A. De esta manera, con un circuito relativamente sencillo, es posible obtener una señal adicional que indique cuál es el sentido de giro y que actúe sobre el contador correspondiente indicándole que incremente o reduzca la cuenta que se está realizando. Es necesario además disponer de una marca de referencia Z sobre el disco que indique que se ha dado una vuelta completa y que, por tanto, se ha de empezar la cuenta de nuevo. Esta marca sirve también para poder comenzar a contar tras recuperarse de una caída de tensión.



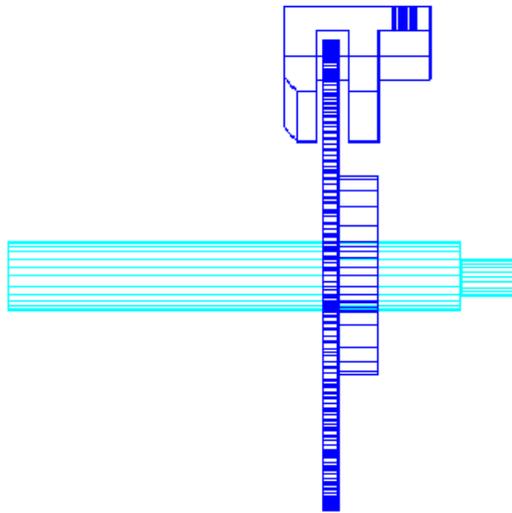
*Figura 1-10: Representación de las señales incrementales A,B y Z en disco óptico*

La resolución de este tipo de sensores depende directamente del número de marcas que se pueden poner físicamente en el disco. Un método relativamente sencillo para aumentar esta resolución es, no solamente contabilizar los flancos de subida de los trenes de pulsos, sino contabilizar también los de bajada, incrementando así la resolución del captador, pudiéndose llegar, con ayuda de circuitos adicionales, hasta 100.000 pulsos por vuelta.

El modelo de encoders más utilizado son los ópticos. Estos constan de diferentes sectores que pueden ser opacos y transparentes, reflejantes y no reflejantes. Otro tipo también muy usados son los magnéticos. Están equipados con un sistema de detección magnética sin contacto. La variación de campo magnético provocada por los dientes de una rueda de medida produce una onda senoidal de tensión. La electrónica del encoder transforma esta señal senoidal en una señal de onda cuadrada, triangular, etc. A pesar de no ser los más usados presentan ventajas sobre los ópticos:

- Altamente resistentes al polvo, los golpes o las vibraciones.
- Funcionamiento en un amplio rango de temperaturas:  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ .

El funcionamiento para cualquiera de estos casos es el mismo. Se implementa mediante un disco delgado metálico con una serie de ranuras equidistantes y homogéneas que se acopla directamente al eje del motor. Éste gira dentro de un switch óptico, que deja pasar e interrumpe un haz de luz infrarroja. Este haz de luz está suministrado por el led infrarrojo de la cabeza lectora fija. El sistema se completa con un fotodetector (LDR, celda fotoeléctrica o fototransistor). El switch optoelectrónico está formado, pues, por un par de dispositivos, un emisor y un receptor de luz infrarroja, colocados en un paquete plástico uno frente a otro con una ranura entre ellos por donde gira libremente el disco dentado montado en el eje de la rueda, como se muestra en la Figura 1-11.



*Figura 1-11: El disco dentado acoplado al eje gira libremente entre las ranuras del switch optoelectrónico*

La precisión de un encoder incremental depende de factores mecánicos y eléctricos entre los cuales se encuentran el error de división del retículo, la excentricidad del disco, la de los rodamientos, el error introducido por la electrónica de lectura, imprecisiones de tipo óptico, etc. La unidad de medida para definir la precisión de un encoder es el grado eléctrico. Éste determina la división de un impulso generado por el encoder: en efecto, los 360° eléctricos corresponden a la rotación mecánica del eje, necesaria para hacer que se realice un ciclo o impulso completo de la señal de salida. Para saber a cuántos grados mecánicos corresponden 360° eléctricos es suficiente aplicar la fórmula siguiente:

$$360^{\circ} \text{ eléctricos} = \frac{360^{\circ} \text{ mecánicos}}{n^{\circ} \text{ impulsos / giro}}$$

El error de división en un encoder está dado por el máximo desplazamiento expresado en grados eléctricos, de dos frentes de onda consecutivos. Este error existe en cualquier encoder y se debe a los factores antes citados.

### 1.2.5 Encoders absolutos

El funcionamiento básico de los codificadores o encoders absolutos es similar al de los incrementales. Se tiene una fuente de luz con las lentes de adaptación correspondientes, un disco graduado y unos fotorreceptores. En este caso, el disco transparente se divide en un número determinado de sectores (potencia de 2), codificándose cada uno de ellos según un código binario cíclico (normalmente código de Gray) que queda representado por zonas transparentes y opacas dispuestas radialmente. No es necesario ahora ningún contador o electrónica adicional para detectar el sentido del giro, pues cada posición (sector) es codificado de forma absoluta. Su resolución es fija, y vendrá dada por el número de anillos que posea el disco graduado. Las resoluciones habituales van desde  $2^8$  a  $2^{19}$  bits (desde 256 a 524288 posiciones distintas).

### 1.2.6 Sensores de velocidad

La captación de la velocidad se hace necesaria para mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. La información de la velocidad de movimiento de cada actuador se realimenta normalmente a un bucle de control analógico implementado en el propio accionador del elemento motor. No obstante, en las ocasiones en las que el sistema de control del robot lo exija, la velocidad de giro de cada actuador es llevada hasta la unidad de control del robot.

Normalmente, y puesto que el bucle de control de velocidad es analógico, el sensor usado es una **taco generatriz** que proporciona una tensión proporcional a la velocidad de giro de su eje (10 mV por rpm).

Otra posibilidad, usada para el caso de que la unidad de control del robot precise conocer la velocidad de giro de las articulaciones, consiste en derivar la información de posición que ésta posee.

### 1.2.7 Otros sensores propioceptivos

Además de los sensores propioceptivos expuestos, existen otros como los acelerómetros, detectores de marcas activas, etc [Everet95].

## Capítulo 2 ACTUADORES

### 0 Introducción

Básicamente se definirán dos tipos de actuadores en este capítulo: el motor de continua y el servomotor.

Un motor es un tipo de transductor que convierte la energía eléctrica en mecánica. En sistemas robóticos se suelen usar motores de corriente continua por su facilidad de control y su facilidad de fabricación (prácticamente todos los motores del orden del vatio o menores son motores de corriente continua con imanes permanentes).

Los motores de continua en su aplicación al mundo de la robótica se suelen utilizar de dos formas:

- Controlados en velocidad. En ese caso el motor de continua se puede usar sin más que mediante una fuente de alimentación variable, aunque se pueden incluir encoders para la medida de la velocidad y su realimentación mediante un sistema de control
- Controlados en posición. En este último caso, el motor tiene que venir acompañado de un encoder para la medida de la posición, un sistema de control y diversos acondicionadores de señal que sirvan de interface. Al sistema compuesto por el motor y resto de subsistemas se denomina servo.

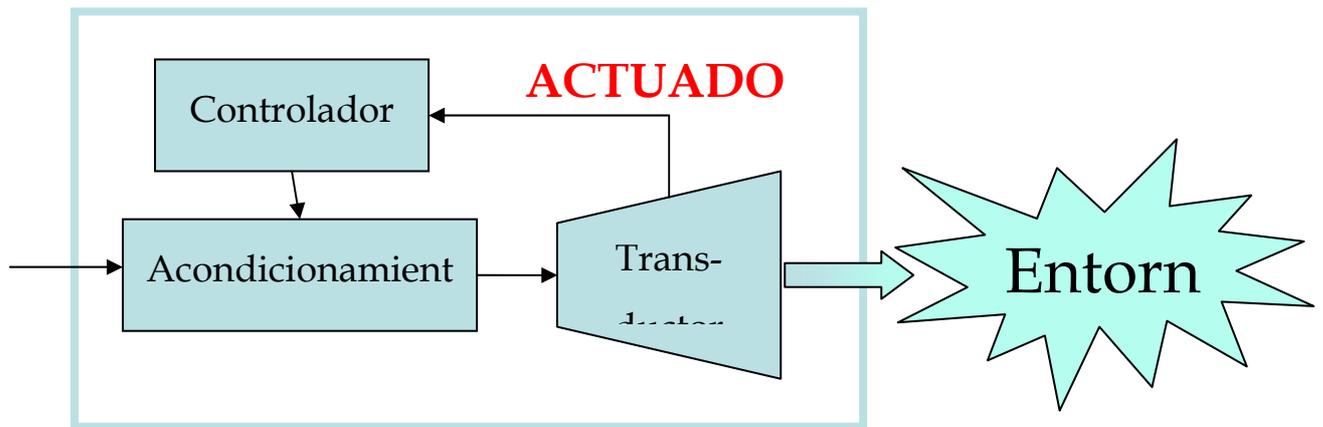


Figura 2-1: Esquema de funcionamiento de un Servo.

Además del propio motor, la dinámica del movimiento viene determinada por la carga. La ecuación básica del movimiento es un componente fundamental a la hora de dimensionar el motor necesario y diseñar el sistema mecánico que conecte el motor y la carga (i.e., ruedas, plataformas, etc.).

En este capítulo se estudiará en primer lugar la ecuación del movimiento y el uso de engranajes para la reducción de velocidad y aumento del par. A continuación se analizará el funcionamiento del motor de corriente continua y se prestará una especial atención al modelo cuando los motores son de pequeña potencia como ocurre en el ámbito de la micro-robótica. Finalmente se presentará el funcionamiento de los servos.

## 1 Ecuación del movimiento

En sistemas con movimiento lineal, dos de las ecuaciones básicas de la dinámica más conocidas son las basadas directamente en las leyes de Newton: las de la fuerza y la potencia.

$$\begin{aligned} F &= m \cdot a \\ P &= F \cdot v \end{aligned} \quad (1)$$

en donde  $m$  es la masa,  $a$  la aceleración,  $v$  la velocidad,  $F$  la fuerza y  $P$  la potencia.

Aplicando los mismos principios a los sistemas rotativos sencillos (del tipo cilindro girando entorno a su eje generador) se plantean las dos ecuaciones fundamentales en la dinámica motor-carga.

$$M = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

$$P = M \cdot \omega$$

en donde  $J$  es el momento de inercia,  $\omega$  es la velocidad angular,  $M$  es el par y  $P$  es la potencia.

En los sistemas motor-carga se tiene en general una  $J_{MOT}$  y una  $J_{CARGA}$  unidas por un eje. Si el eje es corto y de la suficiente rigidez se puede suponer ambas masas unidas y por tanto un único momento de inercia.

$$J_{TOT} = J_{MOT} + J_{CARGA} \quad (3)$$

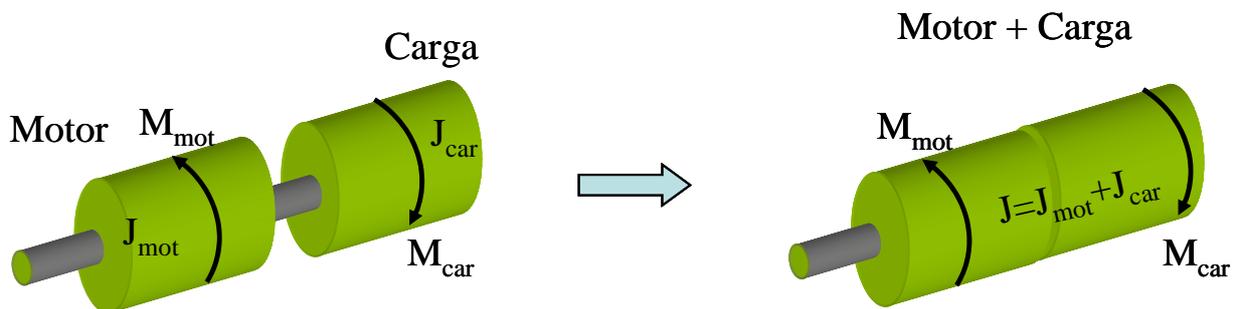


Figura 2-2: Suma de momentos de inercia en sistemas motor-carga.

En ese caso, la ecuación (2) pasa a ser:

$$M_{mot} - M_{car} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + M_{PER} \quad (4)$$

En donde se ha incluido un término de par de pérdidas  $M_{PER}$ .

En régimen permanente,  $d\omega/dt = 0$ . Si se desprecia el par de pérdidas el par motor y el par de carga han de ser iguales.

$$\frac{d\omega}{dt} = 0: \quad M_{mot} = M_{car} \quad (5)$$

A la diferencia entre el par motor y el de carga se la denomina par acelerador:  $M_{acc} = M_{mot} - M_{car}$ . Cuando se pretende variar la velocidad del sistema, es necesario que  $M_{mot}$  sea distinto de  $M_{car}$ , i.e., el par acelerador ha de ser distinto de cero.

Es claro que para obtener respuestas rápidas es necesario que el par acelerador sea lo suficientemente elevado en comparación con la inercia,  $J$ . Sin embargo, los motores que se utilizan normalmente en micro-robótica, son de pequeña potencia y par. La forma de obtener pares suficientes para obtener una dinámica de movimiento apropiada consiste en el uso de ruedas dentadas.

Es bien sabido que si se hacen rodar, unas sobre otra, dos ruedas de distinto radio,  $r$  y  $R$ , la relación de velocidades viene dada por (véase Figura 2-3):

$$\omega_R = \omega_r \cdot \frac{R}{r} \quad (6)$$

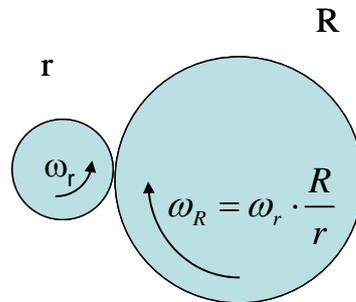


Figura 2-3: Efecto sobre la velocidad angular del uso de ruedas de distinto diámetro.

Si el sistema de ruedas es ideal, la potencia de entrada ha de ser igual a la de salida, por lo que se produce un efecto inverso a las velocidades con los pares.

$$p_R = p_r \Rightarrow M_R \cdot \omega_R = M_r \cdot \omega_r \Rightarrow \frac{M_R}{M_r} = \frac{\omega_r}{\omega_R} = \frac{R}{r} \quad (7)$$

Por ejemplo, si  $r = 10$  y  $R = 40$ , por cada vuelta de la rueda grande, la pequeña habrá dado 4 en el mismo tiempo. Por tanto, la velocidad de rotación de R es cuatro veces menor pero el par será 4 veces mayor.

En la práctica, las relaciones de velocidad y par se calculan con el nº de dientes,  $z$ , de cada rueda ya que estos son proporcionales al diámetro de las ruedas.

## **2 Motor de corriente continua**

Son muchos los motores que podrían usarse para micro-robótica pero dadas las pequeñas potencias que son usadas normalmente (inferiores a 10 W y muy típicamente inferiores a 1 W), el motor preferido por precio y prestaciones suele ser el motor de corriente continua con imanes permanentes.

Este será el motor que se analizará en esta sección.

### **2.1 Principio físico, modelo eléctrico y modos de funcionamiento**

Como todo motor, el motor de corriente continua tiene un estator y un rotor. Habitualmente, el estator genera un campo, denominado de excitación, que bien se produce mediante la circulación de corriente continua por un electroimán, o bien se produce directamente por un imán en el caso de baja potencia. Dicho campo es constante y fijo en el espacio.

Por otro lado, el rotor suele estar bobinado y el acceso a él (la inyección de corriente) se realiza mediante unas escobillas que tocan en los terminales de la bobina, denominados delgas. La alimentación del bobinado del rotor se realiza así mismo en corriente continua.

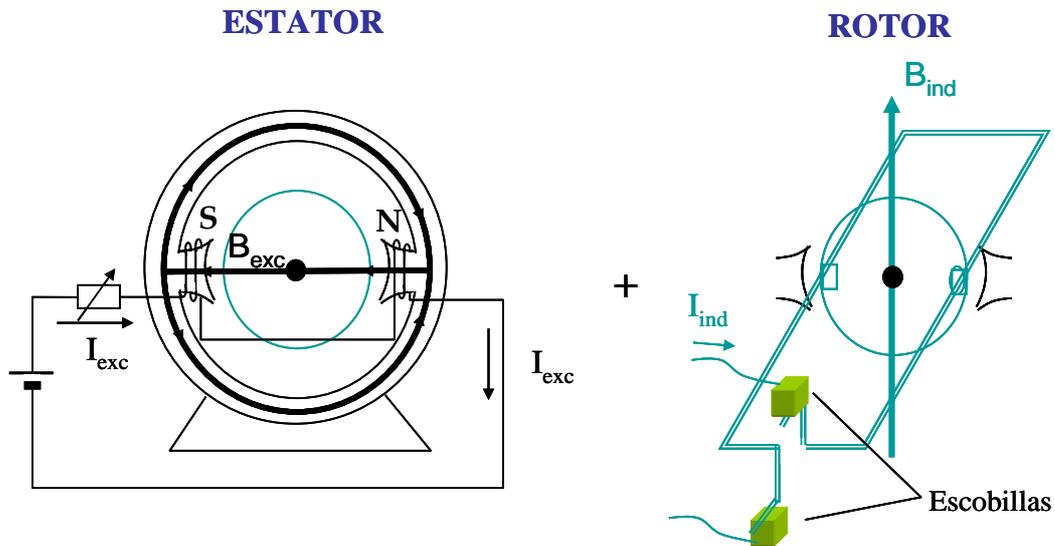


Figura 2-4: Construcción básica de un motor de corriente continua.

Cuando el rotor se alimenta, se produce un campo magnético que interacciona con el de estator por el efecto que denominaremos aquí como *efecto brújula*. Este efecto consiste en que dos campos magnéticos no alineados tienden a alinearse ejerciendo un par de rotación proporcional a la amplitud de dichos campos y función del ángulo que los separa. Lo idóneo es que dicho ángulo sea  $90^\circ$ .

Si no se hace nada, el rotor giraría hasta que ambos campos se alineasen. Para evitarlo, lo que se hace es volver a situar el B del rotor a  $90^\circ$  según el rotor gira. Para ello, se disponen varias bobinas alrededor del rotor y se deja sin alimentar la bobina en la dirección de eje magnético del campo. Según el rotor gira las escobillas dejan de alimentar la bobina a  $90^\circ$  del campo del estator.

Para ilustrarlo se muestra la Figura 2-5. En la figura izquierda el campo del rotor ( $B_{ind}$ ) y el campo del estator ( $B_{exc}$ ), se encuentra a  $90^\circ$  con lo que se produce un par que tiende a alinear ambos campos haciendo girar el rotor. Según se ilustra en la figura central, según el rotor gira, el campo magnético del rotor,  $B_{ind}$ , gira con él reduciéndose el ángulo (y el par). Sin embargo, llegado a un cierto punto, figura derecha, las escobillas dejan de tocar

en una de las bobinas y tocan en la siguiente, de modo que se vuelve a dejar sin corriente a la bobina que queda en la parte superior del rotor.

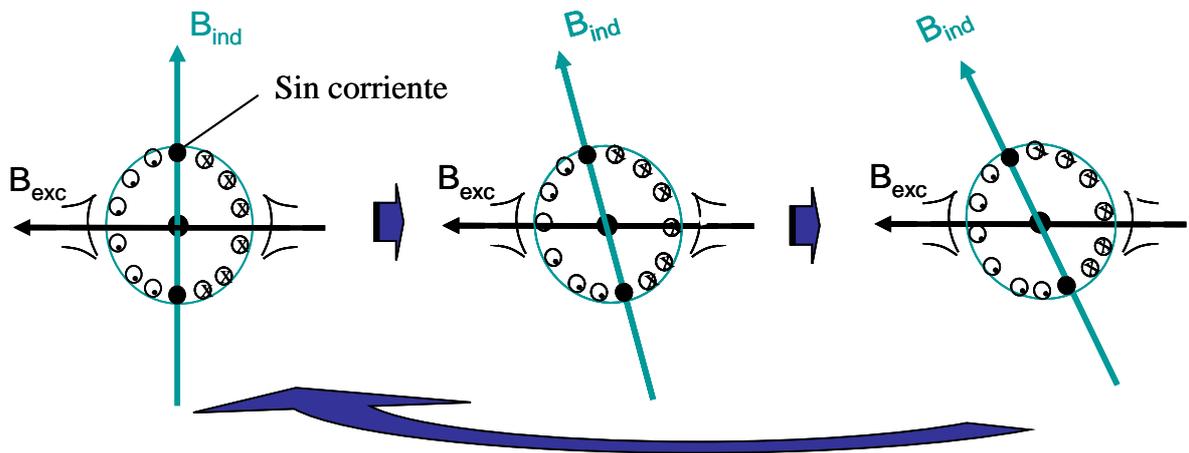


Figura 2-5: Funcionamiento básico de un motor de corriente continua.

Aunque el modelo físico anterior permite entender el funcionamiento del motor de continua, para poder realizar cálculos eléctricos es necesario un modelo eléctrico del mismo.

El modelo eléctrico se presenta en la Figura 2-6.

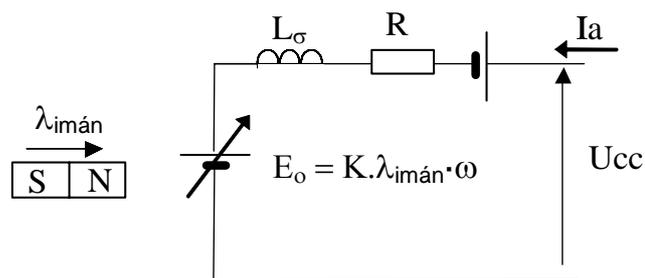


Figura 2-6: Modelo eléctrico de un motor de corriente continua.

En el bobinado del rotor, al girar en el seno del campo magnético del imán, y según la ley de Faraday, se induce una tensión proporcional a la velocidad de giro del mismo y a la magnitud del campo magnético del imán.

$$E_O = K \cdot \omega \cdot \lambda_{iman} \quad (8)$$

en donde  $E_O$  es la tensión inducida en el rotor por efecto del campo del imán,  $\omega$  es la velocidad de rotación del motor, y  $\lambda_{iman}$  es el flujo de imán que concatena el devanado del rotor. Dicha tensión es rectificadora mecánicamente por el conjunto delgas-escobillas para obtener una tensión continua según (8).

Además, el bobinado del rotor puede presentar una resistencia apreciable (especialmente en motores de pequeña potencia), el efecto autoinductivo del propio bobinado del rotor, y una pequeña caída de tensión en las escobillas del rotor (que aparece modelada por una batería en el circuito de la Figura 2-6).

Mediante este modelo se realizará el análisis de control de velocidad en el siguiente apartado.

En cuanto al cálculo del par producido por la máquina en el eje, este se puede calcular mediante un sencillo balance de potencias, del que se obtiene por simple inspección de la Figura 2-6,

$$\begin{aligned} P_{MEC} &= E_O \cdot I_a \\ M &= K^* \cdot I_a \end{aligned} \quad (9)$$

Por tanto, según (9) el par motor es proporcional al consumo de corriente.

Por otro lado, como toda máquina eléctrica rotativa, el motor de corriente continua es susceptible de trabajar en modo motor o modo generador. Así mismo es capaz de girar en un sentido o en otro.

El control del sentido de giro se realiza con el control de la polaridad de alimentación de la máquina. Si se invierte la polaridad de la tensión de alimentación, se invierte el sentido de giro.

En cuanto al funcionamiento como generador o motor, este viene determinado por el sentido de la corriente de entrada al motor. Si la corriente entra por el terminal positivo, se está en modo motor. Si la corriente sale por el terminal positivo, se está en modo generador (esto es, el motor está frenando).

Un resumen de lo anterior se muestra en la Figura 2-7.

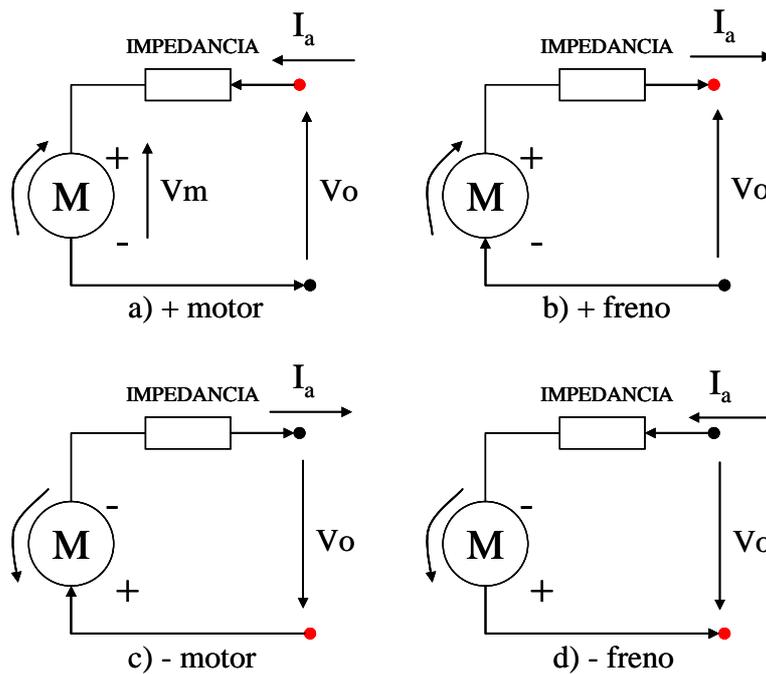


Figura 2-7: Modos de funcionamiento de un motor de corriente continua.

## 2.2 Control de velocidad

La velocidad de un motor de continua se controla variando la tensión media de entrada del motor.

Esto resulta evidente si en modelo de la Figura 2-6 se desprecia la inductancia, la resistencia y la pila que modela la caída de tensión en las escobillas. El modelo simplificado se muestra en la Figura 2-8.

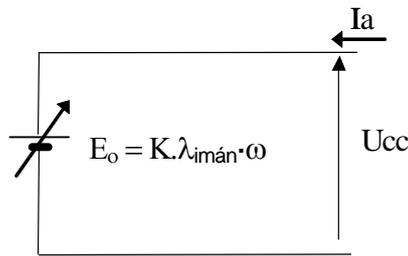


Figura 2-8: Modelo eléctrico simplificado de un motor de corriente continua.

Según la Figura 2-8,

$$E_o = U_{cc} \Rightarrow K^* \cdot \omega_{MEC} = U_{cc} \quad (10)$$

y por tanto, la  $\omega$  es proporcional al valor de la tensión de alimentación del motor.

$$\omega_{MEC} = \frac{1}{K^*} \cdot U_{cc} = K' \cdot U_{cc} \quad (11)$$

Nótese, que según (11), si se invierte la polaridad de  $U_{cc}$  se invierte también el sentido de giro de la velocidad (signo negativo en  $\omega$ ), como ya se indicó más arriba.

Dada la electrónica existente, la forma más sencilla de variar la tensión media de una señal es usando PWM (Modulación de ancho de pulso). Consiste en generar una onda cuadrada de frecuencia constante, cuyos pulsos sean de ancho variable; es decir, que el *duty cycle* (proporción de onda en valor positivo en un periodo, respecto del periodo de la misma) de la onda sea variable. Aunque las señales de PWM se pueden generar fácilmente con electrónica digital —por ejemplo un microcontrolador—, estas señales son de baja potencia y por lo tanto no se pueden conectar directamente a un motor. Es necesario una especie de amplificador que de potencia a estas señales: es lo que se denomina *driver*. Para motores de corriente continua los drivers más habituales son los llamados *inversores de cuatro cuadrantes* o *puentes en H* o los *choppers*.

El *chopper* es un circuito más sencillo que el puente en H (el *chopper* sólo usa dos elementos de conmutación frente a los cuatro que usa el puente en H), pero el puente en H presenta

la ventaja de poder conseguir tanto tensiones positivas como negativas. Hoy en día, un puente en H integrado en una única pastilla es barato y fácil de adquirir.

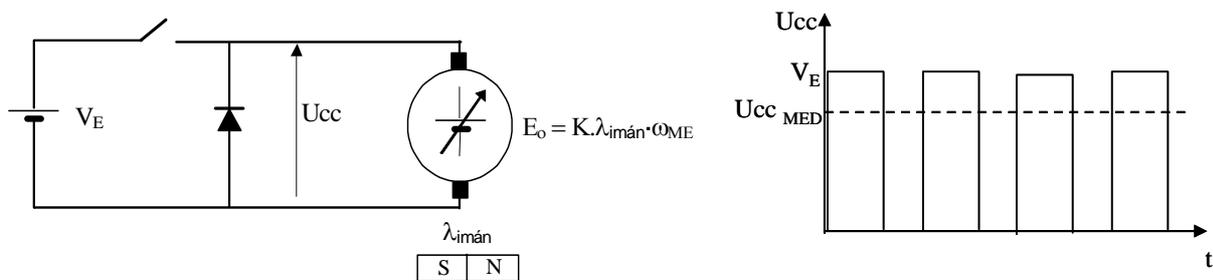


Figura 2-9: Esquema y funcionamiento básicos de un chopper.

Si se utiliza un puente en H (véase Figura 2-11), el valor medio nula se consigue con un factor de servicio del 50%, ver Figura 2-10 (a). Si el ancho del pulso supera la mitad del periodo de la onda, el valor medio de la misma es mayor que 0 y por lo tanto el motor girará en sentido positivo, ver Figura 2-10 (c) (*duty cycle* > 0.5). Cuanto mayor sea el ancho del pulso, mayor será el valor medio de la señal. En el caso extremo el valor medio de la señal será el máximo de tensión del pulso. En este caso la señal en vez de ser periódica es continua perfecta. Por el contrario, si el ancho del pulso es menor que el periodo de la onda, el valor medio de la misma es menor que 0 y por lo tanto el motor girará en sentido negativo, ver Figura 2-10 (b) (*duty cycle* < 0.5).

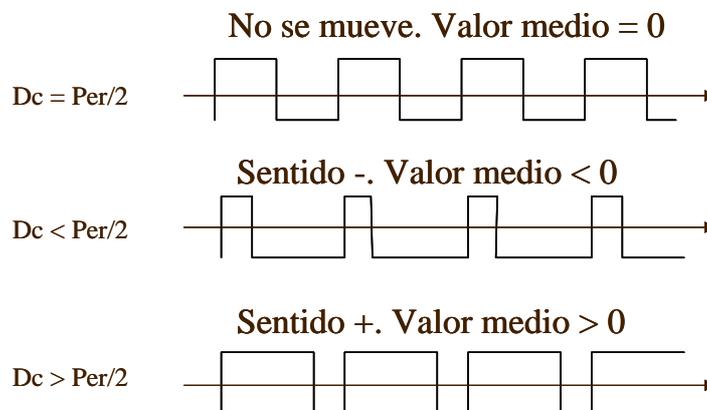


Figura 2-10: Modulación de ancho de pulso.  $D_c$  representa el ancho del pulso de la onda.  $T$  es el periodo de la onda.

En la Figura 2-11, se muestran cuatro casos de funcionamiento de un puente en H (es necesario hacer notar la similitud del dibujo del circuito electrónico con una H, de ahí su nombre), cuando el motor gira en sentido positivo como motor, cuando gira en sentido positivo y frena (generador), cuando gira en sentido negativo como motor y cuando gira en sentido negativo y frena (generador). Cada *puente en H* consta de cuatro transistores (una especie de interruptor controlado) y cuatro diodos (si los puentes no tuvieran diodos el motor no podría frenar). Los cuatro transistores del puente se controlan con señales PWM de baja potencia de forma que: el transistor izquierdo superior y el transistor derecho inferior son alimentados con la señal de PWM, y el transistor izquierdo inferior y el transistor derecho superior son alimentados con una señal de PWM invertida.

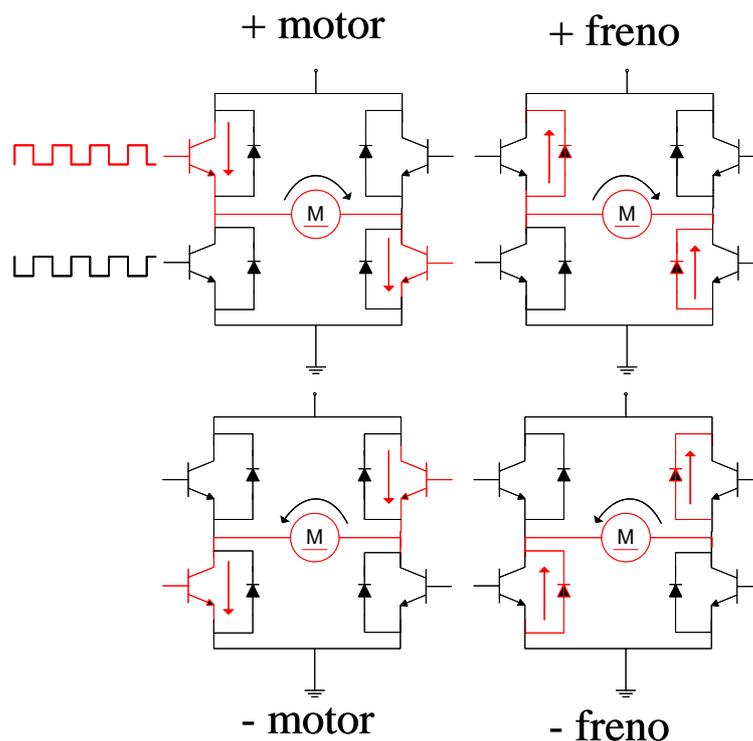


Figura 2-11: Funcionamiento de un puente en H.

### 2.2.1 Efecto de la resistencia de inducido

Como se ha visto en el modelo de la Figura 2-6, el motor de corriente continua presenta una determinada resistencia  $R$  en el devanado del rotor. Así como el modelo simplificado de la Figura 2-8 es válido para motores de gran potencia, en motores de pequeña potencia como los usado en micro-robótica, el valor de la  $R$  es apreciable y no puede despreciarse. En este último caso, el modelo simplificado que es necesario usar es el mostrado en la Figura 2-12

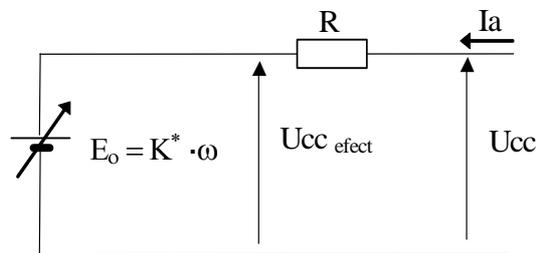


Figura 2-12: Modelo eléctrico simplificado de un motor de corriente continua de pequeña potencia.

En ese caso, la tensión que realmente controla la velocidad es  $U_{CC\ efect}$  y no  $U_{CC}$  que es la de alimentación.

$$\omega = \frac{U_{cc}}{K^*} - \frac{I_a \cdot R}{K^*} = K' \cdot (U_{cc} - I_a \cdot R) \quad (12)$$

Como se aprecia en (12), la velocidad del motor se reducirá a medida que aumente el consumo de corriente ya que la caída de tensión en  $R$  aumentaría, reduciéndose  $U_{CC\ efect}$ . Como el consumo de corriente es directamente proporcional al par de carga, véase (9), según se va cargando el eje del motor la velocidad del mismo se reducirá linealmente.

Como ejemplo se muestra en la Figura 2-13 el efecto de la corriente de entrada (par en el eje) sobre la velocidad de uno de los motores usados en los montajes de LEGO.

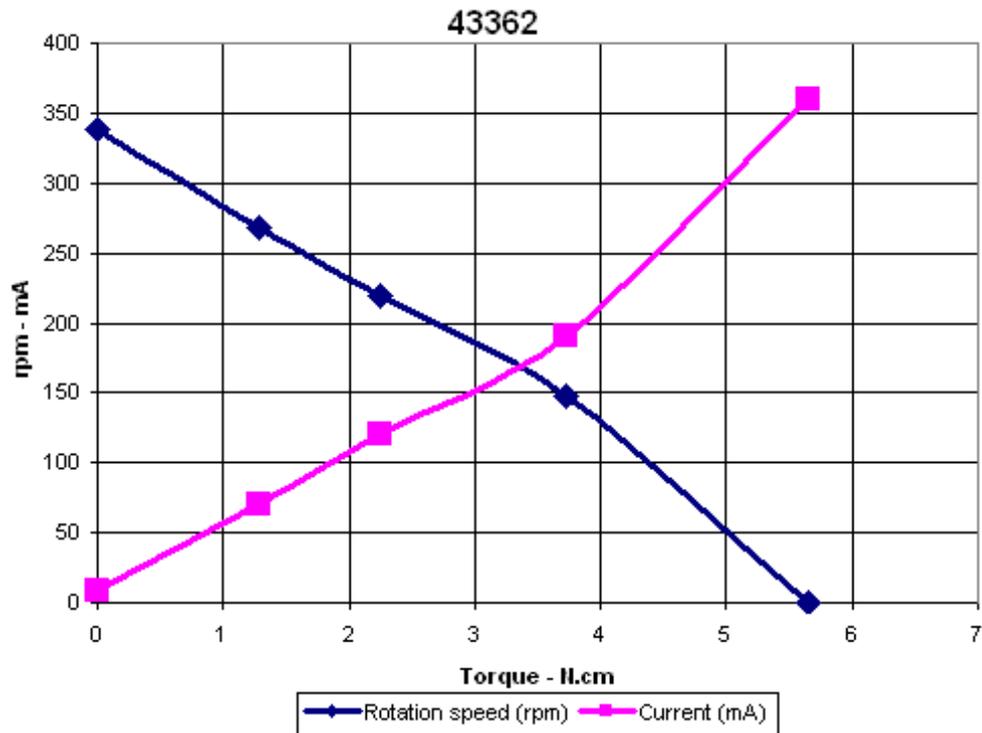


Figura 2-13: Efecto de la carga en el eje (=corriente de entrada) sobre la velocidad de un pequeño motor de continua.

### 3 Servomotor

Un servo es un dispositivo que, mediante un motor eléctrico con reductor y un circuito electrónico, consigue girar su eje de salida un cierto ángulo en base a una señal que se puede generar mediante un circuito de control.

Típicamente, la señal de control que se utiliza para posicionar el servo es un pulso de longitud entre 0.5 ms y 2.5 ms, que se repite cada 20 ms aproximadamente, de tal manera que sobre un ángulo efectivo de trabajo de 180°, 0.5 ms indica -90° 1,5 ms indica 0° y 2.5 ms indica +90°, véase Figura 2-14. Si se intentan sobrepasar los márgenes del ancho del pulso el servo bloquea y aumenta mucho el consumo (incluso se puede quemar). Todos estos valores tienen una cierta tolerancia, por lo que para tener los valores exactos, es necesario realizar experimentos, aunque sean del mismo fabricante y tipo.

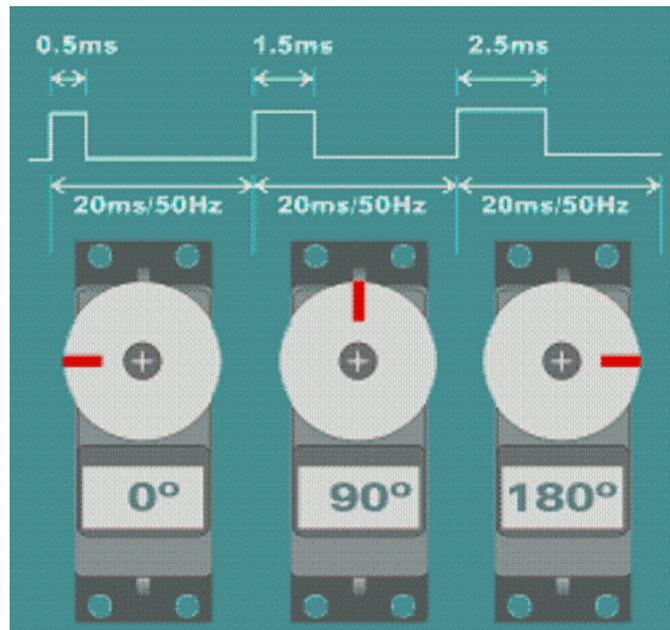


Figura 2-14: Funcionamiento de un servo

El funcionamiento interno aproximado del servo es el siguiente, véase la Figura 2-15. La señal de control que introducimos en el servo es transformada en una señal continua, esta es comparada con la señal continua que llega desde el potenciómetro conectado al eje de salida, si a la diferencia entre las dos tensiones le llamamos error, tendremos que si este error es 0 la amplificación será 0 y el motor no se moverá, si es positiva el amplificador hará que se mueva en una dirección a una velocidad proporcional a esta diferencia (cuanta más diferencia más rápido gira), hasta que el error sea 0, momento en el que se detendrá el motor. Si el error es negativo, hará lo mismo en la otra dirección. En la Figura 2-15 además se muestra una manera de generar un PWM (para variar la velocidad del motor en función del error), a partir de una señal continua, equivalente al error cometido en la posición del motor.

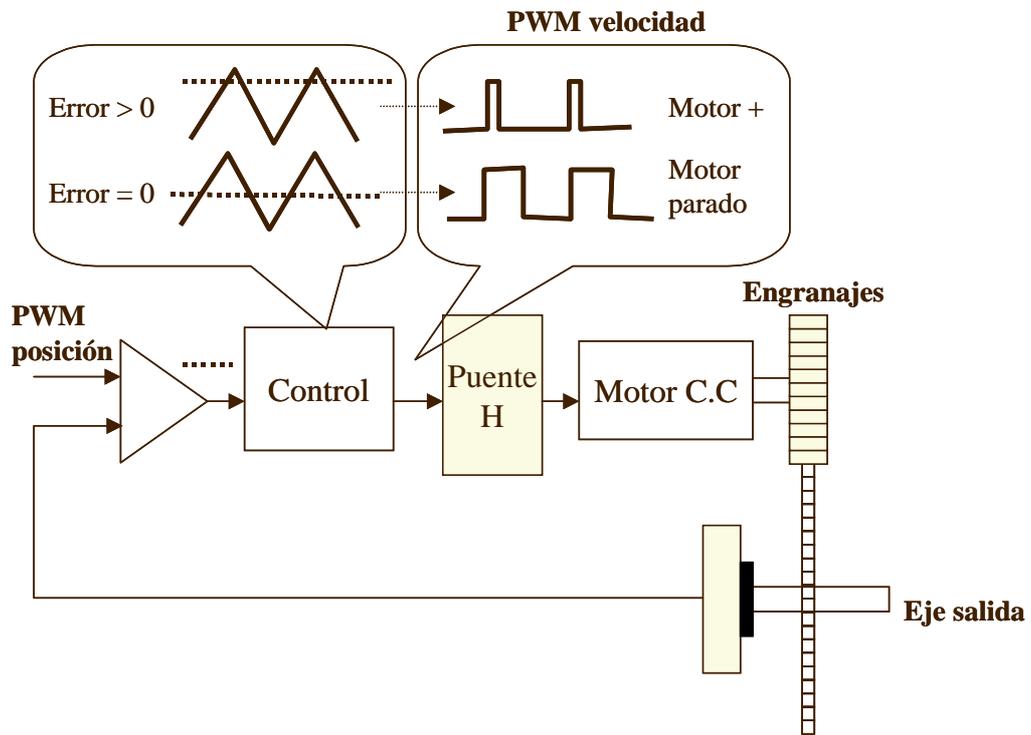


Figura 2-15: Esquema interno de un servo

## BIBLIOGRAFÍA

- [Caruso00] Caruso J. M., *"Application of magnetic sensor for low cost compass systems"*. Honeywell, SSEC. 2000.
- [Chow85] Chow W. W., Geo-Banacloche J., Pedrotti L. M., Sanders V. E., Schleich W., Scully M. O., *"The Ring Laser Gyro"*. *Reviews of Modern Physics*, 57(1):61-104, 1985.
- [Cox91] Cox, I. J., *"Blanche- An experiment in Guidance and navigation of and Autonomous Mobile Robot"*. *IEEE Transactions Robotics and Automation*, 7(3), pp. 193-204.1991
- [Dean95] Dean, T., Allen, J., Aloimonis Y., *"Artificial intelligence: Theory and Practice"*. Benjamin/Cummings Publishing, 1995.
- [Everet95] Everet H. R., *"Sensors for Mobile Robots: Theory and Application"*. A K Peters Ltd. 1995.
- [Horn86] Horn B. K. P., *"Robot Vision"*. MIT Press, 1986
- [Komoriya94] Komoriya, K. Oyama, E., *"Position Estimation of a Mobile Robot Using Optical Fiber Gyroscope (OFG)"*. *Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)* Sept 1994. pp. 143-149.
- [Kuc87] Kuc R. Siegel M. W., *"Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation"*. *EEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9(6):766-768, 1987.
- [Lange89] Lange S., Corba L., Wong A., *"Characterizing and modelling a sonar ring"*. In *Proc. SPIE Mobile Robotics IV*, pp. 291-304, Philadelphia. 1989.
- [Leonard91] Leonard J. J. Durrant-Whyte H. F., *"Mobile robot localization by tracking geometric beacons"*. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 7(3):376-382, 1991.

- [Sanchez02a] Sánchez A., Sanz Bobi M. A, "*Fusing and modelling sensors using neural networks for low cost multi-sensor robotics systems*". KES2002 (International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems). Sept 2002.
- [Sanchez02b] Sánchez A., Sanz Bobi M. A, "*Integrating and Modelling Sensors: An Approach to Low-Cost Robotics Systems using Multilayer Perceptrons*". Int. Conf. on signal processing, robotics and automation (ISPRA). Jun-2002.
- [Sanchez02c] Sánchez A. "*Modelado del entorno para el guiado de un AGV usando técnicas de inteligencia artificial*". Tesis doctoral. Universidad Pontificia Comillas. 2002.
- [Semiathowska94] Semiathowska B., "*A Highly Parallel Method for Mapping and Navigation of An Autonomous Mobile Robot*". IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. pp 2796-2891.
- [Umbaugh98] Umbaugh F., Scoot E. C., "*Computer Vision and image Processing*". Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1998.
- [Wilkes92] Wilkes D., Dudek G., Jenkin M., Milios E., "*Modelling sonar range sensors*". Advance in Machine Vision: Strategies and Applications, pp. 361-370, World Scientific Press, Singapore, 1992.