

Capítulo 8

Servomotores**1 – INTRODUCCIÓN**

En esta unidad tratamos con los servomotores, sistemas automatizados que intentan liberar al hombre de las tareas de control. Existen dos tipos de servomotores que estudiamos aquí: los servomotores para corriente alterna y para corriente continua.

1.1 – Generalidades

En los sistemas, intentamos que una variable tome un determinado valor que consideramos correcto o deseable. Mediante la realimentación esta tarea se realiza de forma más rápida y precisa que con el control de un humano. La realimentación se realiza mediante la comparación, en todo instante, de la salida de la variable a ajustar, comparándola con un valor de referencia e introduciéndola en la entrada del sistema para así lograr el ajuste deseado a la salida. Dependiendo de si la realimentación está conectada o no, los sistemas serán de lazo cerrado o abierto respectivamente.

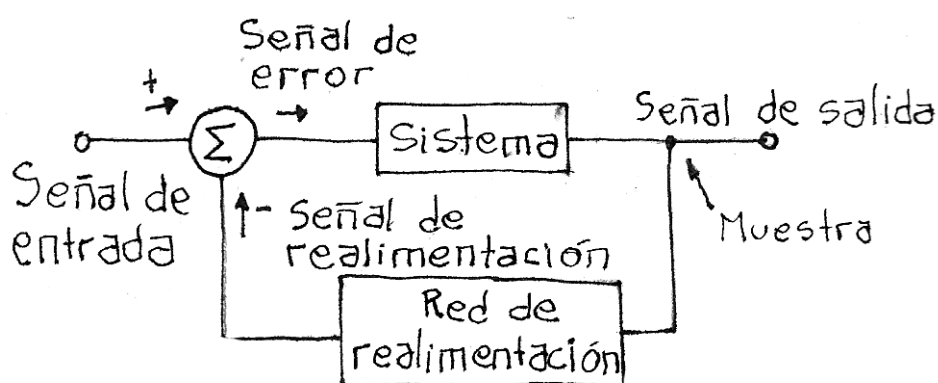
1.1 – 1: Sistemas de lazo abierto y lazo cerrado

Figura 1-1: Sistema de lazo cerrado.

Estas definiciones son iguales a las vistas en Electrónica aplicada 2. En los sistemas realimentados la señal de error es de baja potencia y no tiene la energía para realizar la corrección de la variable de salida. Este trabajo, en los sistemas de control vistos acá, corre a cargo de los servomotores. Estos deben ser capaces de mover la carga, tener rápida velocidad de respuesta y no producir un sobre valor que produciría una oscilación a la salida. El esquema de sistema a lazo cerrado es el de la [Figura 1-1](#).

1.2 – Condiciones que debe reunir un servomotor

Para que el sistema sea estable, el sistema debe cumplir con ciertas características, entre ellas:

- Relaciones lineales entre las magnitudes características: las variables involucradas (**U**: tensión aplicada, **C**: par motor y ω : velocidad de giro) del sistema deben guardar cierta relación, por ejemplo, para este caso, las siguientes:
 - $U = \text{cte} \rightarrow C \propto \omega$
 - $\omega = \text{cte} \rightarrow C \propto -U$
 - Inercia = cte

Las primeras dos no es necesario que se cumplan estrictamente, pero la tercera sí.

- Potencia y velocidad adaptadas a la carga: la potencia del servomotor debe ser la mínima posible (y estar adaptada a la carga) para que su tamaño también lo sea. La velocidad del servomotor debe estar también adaptada a la carga, debiendo ser la máxima posible, ya que entre la salida del sistema y la carga hay un sistema reductor, lo cual permite a su vez una variedad de adaptación.
- Buena velocidad de repuesta: el servomotor debe ser capaz de actuar con rapidez, acelerando, desacelerando y cambiando el sentido de giro.
- Mínima señal de error requerida para el accionamiento: aunque no dice nada al respecto el apunte de Ubal, mientras más chica sea la señal de error menos energía extra consumirá el sistema (en la red de realimentación, no así a la salida en donde la energía para efectuar el ajuste nada tiene que con la potencia de la señal de error sino con las características de la carga) cuando se produzca una variación en la salida del sistema.
- Máxima aceleración al comienzo.
- Máxima constante de tiempo.
- Optima seguridad de funcionamiento: el servomotor debe poseer una buena estabilidad, es decir, tener la capacidad de recuperar su posición de equilibrio en el menor tiempo posible y sin producir oscilaciones. Esto se logra mediante la «amortiguación viscosa».¹

1.3 – Características

Existen características de funcionamiento, aparte de las habituales en los motores ordinario, que son de particular interés en el uso de los servomotores. Estas son, a grosso modo, las siguientes:

Velocidad de vacío: es la velocidad del motor cuando no tiene carga, se la designa con n y se la mide en revoluciones por minuto [**r.p.m.**].

Par de arranque: es el par que se necesita para sacar al motor del estado de parado, se expresa este par en [**gr-cm**].

Momento de inercia del rotor: es el momento de inercia alrededor del motor, medido en [**gr-cm**].

Aceleración teórica: es la aceleración teniendo en cuenta desde que el motor está parado hasta que alcanza un cierto momento de inercia, medida en [**rad/seg²**]. La calculamos con la siguiente fórmula

¹ La amortiguación viscosa se explica más adelante.

$$\text{Aceleración} \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}^2} \right] = 0,981 \cdot \frac{\text{Par de arranque} [\text{gr} - \text{cm}]}{\text{Inercia del rotor} [\text{gr} - \text{cm}]}$$

Constante de tiempo mecánica: es el tiempo que tarda el rotor en alcanzar el **63,2%** de la velocidad de vacío cuando se le aplica un escalón de tensión a la fase de control sin carga exterior. La velocidad aumenta exponencialmente desde cero en estas condiciones. Se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Cte de tiempo mecánica} = \frac{\text{Momento de inercia total}}{\text{Coeficiente de amortiguamiento}}$$

Donde el coeficiente de amortiguamiento es

$$\text{Coef. de amortiguamiento} = \frac{\Delta C}{\Delta \omega}$$

Donde **C** es la cupla motora y **ω** es la velocidad angular del rotor.

2 – SERVOTOMORES PARA CORRIENTE ALTERNA

2.1 – Tipos de servomotores para corriente alterna

2.1 – 1: Servomotor de poca inercia (ordinario)

Puede ser definido como un **motor de inducción con dos devanados primarios desfasados 90° eléctricos y geométricos. Ambos devanados son idénticos en su construcción y el rotor, de baja inercia y alta resistencia eléctrica, permite obtener una curva par-velocidad lineal desde la velocidad de vacío a la de parada.** Uno de los devanados, llamado fase principal, se conecta a la red de manera tal que pueda entregar el máximo par por unidad de potencia del campo de comando. El otro devanado, llamado fase de control, es alimentado con una señal de error amplificada. El esquema es el de la [Figura 2-1a](#).

Aumento del par: el rotor del servomotor por lo general desarrolla mucha velocidad pero tiene un par reducido, por lo que es necesario acoplarlo a la carga mediante un sistema de reducción. Para aumentar el par podemos o aumentar el número de polos o disminuir el entrehierro.

Tipos constructivos: los principales tipos constructivos son los siguientes:

- Rotor tipo jaula con ranuras del estator abiertas: cuenta con diversas ventajas aunque cuenta con una considerable disminución del par respecto a la posición del rotor (efecto de dentadura).
- Rotor tipo jaula con ranuras del estator cerradas: para resolver este inconveniente se construyen estatores con ranuras cerradas, aunque con una mayor complicación constructiva ([Figura 2-1b](#)).
- Rotor tubular construido en material conductor: se ve más adelante.
- Rotor macizo y sin jaula.

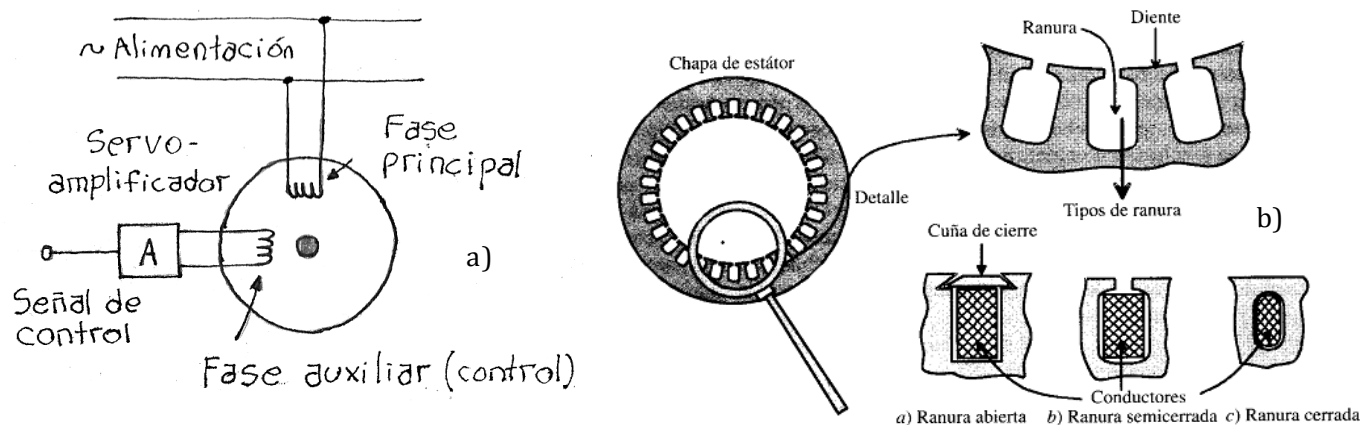


Figura 2-1: a) Esquema de un servomotor y b) ranuras semiabiertas y cerradas del estator.

La fase fija es de ordinario (un arrollamiento con dos hilos terminales) y la fase de control puede ser ordinaria, con toma central o con cuatro terminales. El rotor es de diámetro pequeño y alta resistencia eléctrica para tener una respuesta lo más lineal posible. El deslizamiento S del par motor máximo es por lo general menor que 1 (curva 1 de la Figura 2-2a), a medida que aumenta la resistencia del rotor la curva se parece a la curva 2 de la Figura 2-2a, cumpliendo con los requisitos del servomotor. En un servomotor ideal el par de cualquier velocidad es directamente proporcional a la tensión de la fase de control, en la práctica esta relación solo se cumple a velocidad cero debido a la falta de capacidad propia del motor de inducción para seguir los cambios de tensión de entrada bajo condiciones de carga.

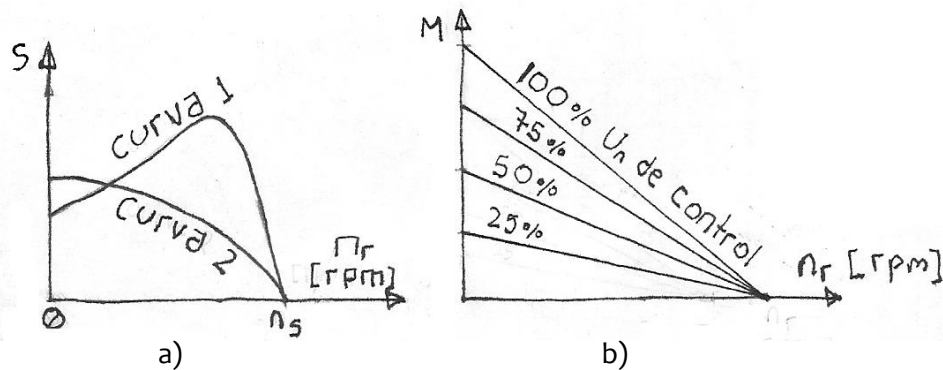


Figura 2-2: a) Deslizamiento S vs velocidad del rotor n_r y b) par motor M vs n_r para distintas U .

Operación monofásica

Esta operación es muy parecida a la de los motores asíncronos monofásicos, donde la fase principal es el devanado principal y la fase de control el devanado auxiliar. Para esta operación debemos conectar un condensador C_s en serie con la fase de control (Figura 2-3a), para producir el campo rotante.

A la hora de elegir el condensador, debemos tener en cuenta la tensión en el devanado para evitar el calentamiento. Si la temperatura aumenta, se puede tolerar tensiones mayores –dentro de ciertos límites– aumentando el par de arranque y mejorando el rendimiento del sistema. Cuando en una aplicación necesitamos que $E_a = E_L$ en un cambio de fase de 90° , podemos agregar un condensador C_p en paralelo tal como lo muestra la figura. Esto es válido sólo cuando $X_L \gg R$.

La operación ideal se realiza cuando el desfase es de 90° eléctricos entre las corrientes de los devanados (principal y de control), tal como sucedía en el caso de los motores asíncronos monofásicos. El devanado de control puede estar conectado a un amplificador, es decir, este amplificador tendrá una carga inductiva (la fase de control). Para mejorar el factor de potencia y el rendimiento de este amplificador podemos conectarle a la carga (fase de control) un condensador en paralelo².

Para acoplarlo a la línea de red, usamos el esquema de la Figura 2-3b. En la práctica debemos disponer de medios externos para regular la tensión al devanado de control. Por ejemplo, cuando esta tensión es nula, la fase debe estar en cortocircuito, para producir el funcionamiento monofásico. Para ambas cosas está el autotransformador de la Figura 2-3b.

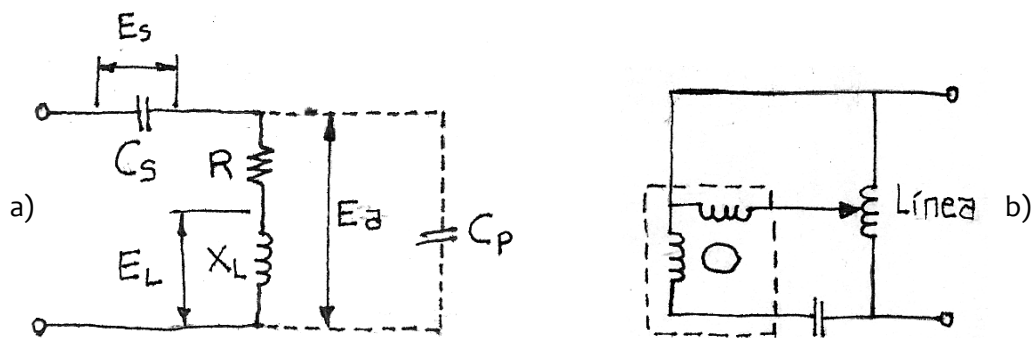


Figura 2-3: a) Operación monofásica de un servomotor y b) acoplamiento y conexión a la línea.

² Este procedimiento para mejorar el factor de potencia lo vemos en detalle en el capítulo 10.

2.1 – 2: Servomotor con rotor tubular o acopado

Usa un rotor tubular en forma de copa (acopado) de un material conductor no magnético (p. ej. cobre o aluminio). Presenta el efecto de dentadura y tiene una buena relación par motor/inercia.

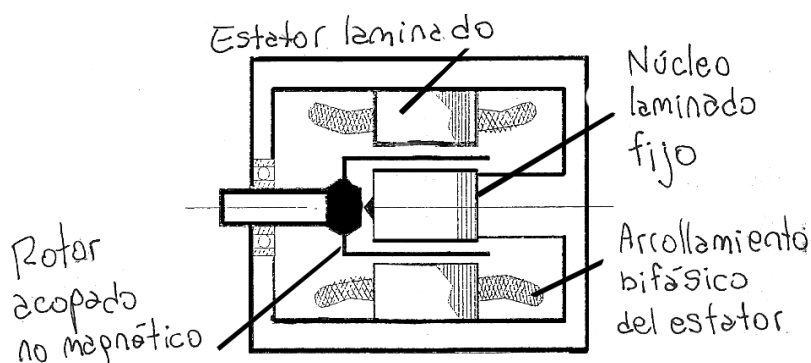


Figura 2-4: Servomotor para corriente alterna con rotor tubular o acopado.

Las características constructivas se ven en la [Figura 2-4](#), consta de un estator ordinario con sus dos arrollamientos desfasados 90° . Cuando la tensión aplicada a la fase de control es nula, el rotor no se mueve puesto que es de material no magnético, no puede interactuar con el campo rotante del estator; es necesaria entonces una pequeña señal para crear el campo rotante, el cual produce corrientes parásitas que al actuar con el campo rotante del estator produce el giro del rotor. Estos motores se usan para aplicaciones en donde se necesite señalizar una posición y/o que no requieran grandes potencias.

2.1 – 3: Servomotor con rotor macizo (sin jaula de ardilla)

Este motor está a medio camino entre el motor con rotor a jaula de ardilla y con rotor tubular. El rotor no tiene ranuras y la fuerza de tracción es provista por las corrientes parásitas generadas por el desplazamiento del rotor en un campo magnético rotante. No hay efecto de dentadura y el par entregado es relativamente alto, aunque menor que el dado por el motor con rotor tipo jaula.

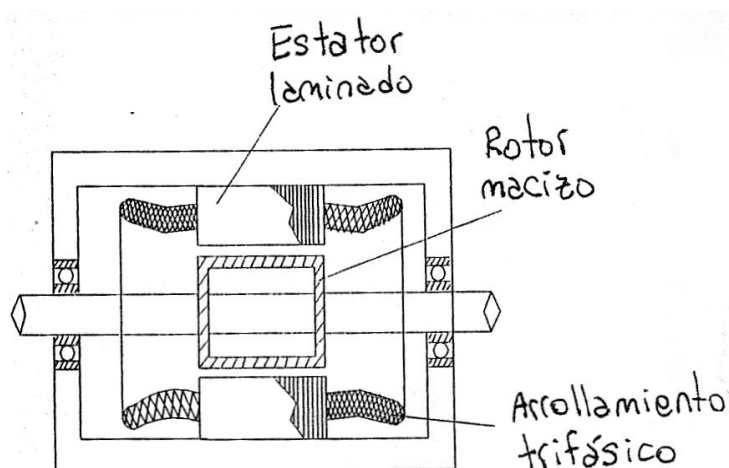


Figura 2-5: servomotor para corriente alterna con rotor macizo (sin jaula de ardilla).

Los pequeños desequilibrios producto de la falta de homogeneidad del rotor, se pueden atenuar aplicando un conveniente tratamiento térmico antes de la terminación de la fuerza. A veces, para disminuir la inercia propia del rotor, se hacen ranuras en el rotor o con el interior del mismo hueco. En cuanto a características térmicas se refiere, cuando el motor está provisto de aislantes especiales (p. ej. el teflón) es capaz de aguantar temperaturas de hasta $160 [^\circ\text{C}]$. Son ideales en los casos en que se requieren buenas características por unidad de peso³ y en los que los recintos de trabajo son cerrados.

³ Por «características por unidad de peso» supongo que Ubal se refiere a valores como costo por kilo, pérdidas por kilo, conductividad por kilo, etc.

2.1 – 4: Motor de histéresis

La construcción de estos motores se parece a los motores anteriores con la diferencia de que el rotor está hecho de acero de alta coercitividad⁴. Se comporta como un motor asíncrono con un par aproximadamente constante. Por este motivo, el motor no contribuye a la estabilidad del servomecanismo del cual forma parte y por ello no se lo usa mucho en los circuitos de comando, *quedando su uso limitado al campo de mediciones de tiempo, a la sincronización de apertura de circuitos y, debido a la posibilidad de actuar como motor sincrónico, al accionamiento de giroscopios.*⁵

Al tener un par constante respecto a la velocidad, notamos una ausencia de oscilaciones pendulares del rotor, ocasionadas (las oscilaciones) por variaciones bruscas e imprevistas de la carga. La velocidad la variamos mediante variadores de frecuencia o cambiando del número de polos del estator.

Por último diremos que existe un motor de **tipo mixto**, el cual –tratamiento especial de las características magnéticas del rotor de por medio– se comporta como un motor síncrono y puede ser usado en el comando de servomotores.

2.2 – Amortiguación en servomotores

La amortiguación que posee el motor antes descripto (amortiguación interna) resulta insuficiente por lo que es necesario añadir un amortiguamiento adicional (viscoso, por inercia o por tacómetro).

Básicamente para que el sistema, del cual forma parte el servomotor, funcione satisfactoriamente son necesarias dos condiciones. La primera es que el motor responda rápidamente a las variaciones de tensión en la fase de control, obtenemos esto con una elevada relación entre el par y el valor de inercia a fin de tener una alta aceleración inicial; la segunda es que el motor sea estable, y esto lo conseguimos mediante la instalación de un sistema adicional de amortiguación.

2.2 – 1: Amortiguamiento interno

Teóricamente, el motor desarrolla el mismo par para todas las velocidades (curva **a** de la [Figura 2-6](#)). En este caso, cuando actúa la señal de arranque, el motor se pone en marcha y se acelera rápidamente; si esto persiste, el motor o la carga podrían dañarse por trabajar con muy altas velocidades. Para evitar esto, se acondiciona el sistema para que reduzca a cero la tensión aplicada a la fase de control. Este acondicionamiento es lo que se llama **amortiguamiento interno o propio**.

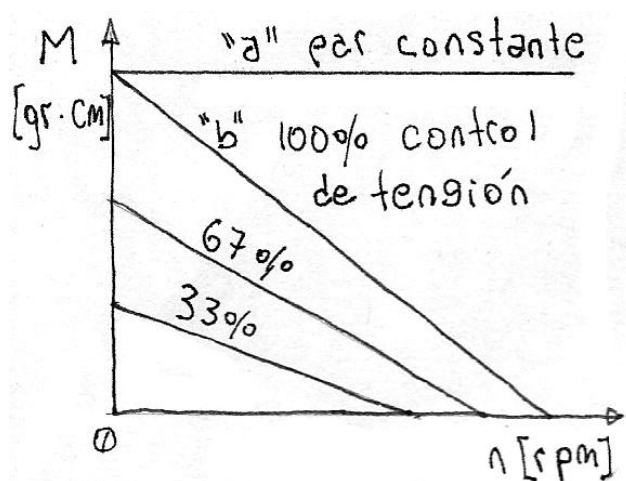


Figura 2-6: Curva par motor vs velocidad.

⁴ La **coercitividad magnética** es la resistencia de un material a la desimancación o lo que es lo mismo, el material posee una alta retención magnética.

⁵ Lo que está en cursiva no sé si está bien, lo que sucede es que en el libro de Ubal no están bien utilizadas las comas y algunas palabras, y esto hace que la frase carezca de sentido.

2.2 – 2: Amortiguamiento viscoso

Se trata de un generador de arrastre acopado o tubular. Un generador de arrastre es un generador que genera un par (retropar) que se contrapone al par desarrollado por el motor, acopado quiere decir en forma de copa. El apunte no dice dónde se encuentra ni cómo actúa sobre el par del motor.

La tensión inducida en el inducido del generador –y por lo tanto la corriente en el mismo– es directamente proporcional a la velocidad del motor y la energía que absorbe es proporcional al cuadrado de la velocidad. Recibe el nombre de amortiguación viscosa porque el efecto que tiene el retropar sobre el motor es similar al efecto que tiene un líquido viscoso cuando un objeto se mueve a través del mismo.

2.2 – 3: Amortiguamiento por inercia

Este amortiguamiento se realiza por medio de un volante de inercia. Este volante no es más que un disco formado por un imán permanente montado sobre el árbol del motor mediante cojinetes (para que el movimiento del mismo no se traslade al volante). Dicho disco está acoplado a un arrastre acopado, el cual está rígidamente sujeto al árbol del motor.

Cuando el motor empieza a girar, el volante permanece inmóvil por la inercia y por medio del arrastre, retrasa el movimiento del árbol. Después de que el motor alcanza una velocidad constante, el volante deja de retrasarlo y no se produce amortiguamiento.

El fin del volante es oponerse a todo cambio brusco de velocidad del motor, sin importar la dirección. En el apunte no dice nada más acerca del «arrastre», sobre cómo está sujeto al volante para permitir al árbol girar un cierto ángulo antes de que el primero (volante) comience a girar. En los videos de youtube encontré que el volante está conectado a otro disco que se encuentra fijo al árbol, dicha conexión se realiza con una especie de resorte; al empezar a girar el disco que está unido al árbol, el resorte se estira un poco antes de jalar el volante. Esto sí explicaría el ángulo que tiene permitido girar el árbol antes de que lo haga el volante.

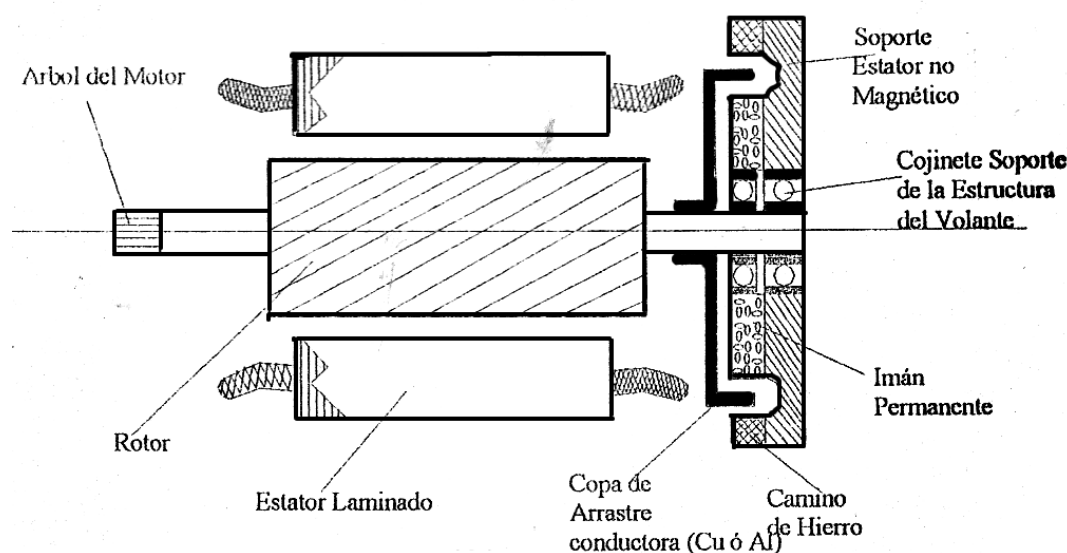


Figura 2-7: Amortiguación por inercia (volante).

2.2 – 4: Amortiguamiento por tacómetro

Un tacómetro es un dispositivo que mide la velocidad angular de un elemento giratorio (normalmente en revoluciones por minuto). Consta de un visor (que puede ser electrónico o analógico) que recibe una señal eléctrica de un generador de pulsos. Este generador de pulsos es un transductor (energía mecánica a eléctrica) y necesita estar acoplado al elemento giratorio, el árbol del motor en nuestro caso. El generador de pulsos, así, hace las veces, en cierto grado, de un amortiguador viscoso.

3 – SERVOMOTORES PARA CORRIENTE CONTINUA

3.1 – Generalidades

En los servomecanismos también se usan motores de corriente continua. La potencia generada en relación al peso es elevada y la potencia en el comando es relativamente limitada. A pesar de tener buen rendimiento y buenas características presentan ciertos inconvenientes en algunas aplicaciones. Para subsanar esto se recurre a complejos dispositivos a fin de eliminar los efectos de arrastre. La Figura 3-1 muestra un gráfico completo de las características de un motor de corriente continua usado en un servomecanismo.

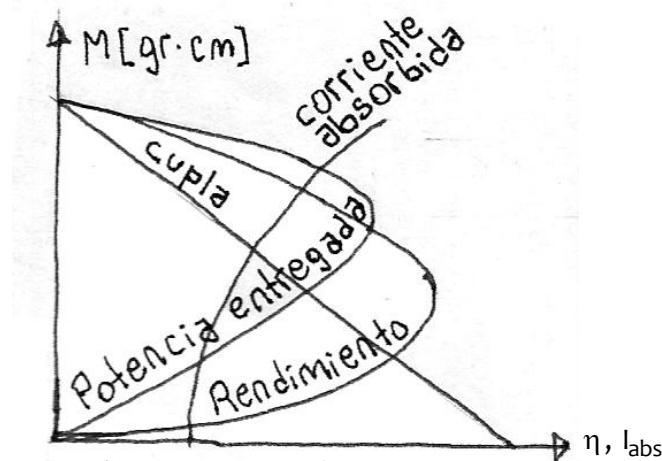


Figura 3-1: Características de motor de corriente continua usado en un servomecanismo.

3.2 – Tipos de servomotores para corriente continua

3.2 – 1: Motores de corriente continua de circuito impreso

Los conductores de estos motores no están rodeados de hierro, por lo que su constante de tiempo mecánica es baja, lo cual es responsable también de su baja inercia. Los conductores del inducido se encuentran al descubierto, esto le da al motor una excelente disipación. Estos motores se utilizan en todas las aplicaciones en donde se requiera un movimiento intermitente o cuando se desea un rango de velocidad efectiva de cero a varios miles de **rpm**.

La rueda conformada por un imán permanente de 8 polos de la figura c es el inductor; el disco de la figura b es un aislante que tiene en ambas caras conductores –que están impresos sobre el disco– conectados entre sí por medio de orificios metalizados, dichos conductores son los «inducidos» por el imán permanente, por lo que podemos decir que esta rueda es el inducido; por último, la rueda de la figura a sirve como retorno de flujo del circuito magnético y como soporte para las escobillas, las cuales se apoyan directamente sobre los conductores que hacen las veces de colectores.

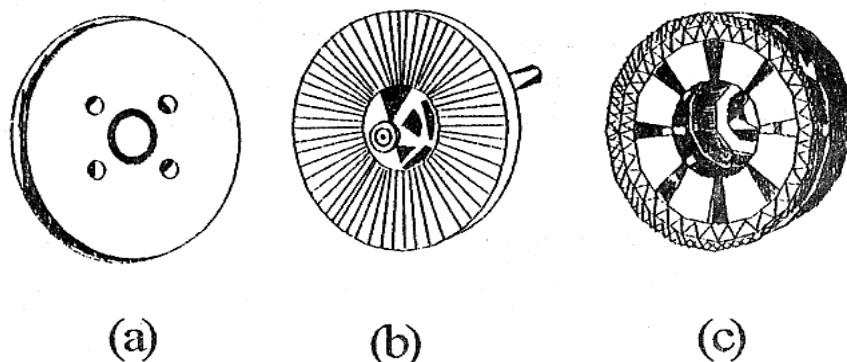


Figura 3-2: Motor de corriente continua de circuito impreso.

3.2 – 2: Motores con inducido de superficie devanada

Estos motores tienen inducidos con superficies devanadas sin ranuras, las bobinas se fijan en el exterior del inducido laminado, con resinas epoxi y un vendaje de cintas de vidrio. El inducido así fabricado es de poca inercia y con una buena disipación térmica. El rotor es largo y de poco diámetro para reducir la inercia mecánica.

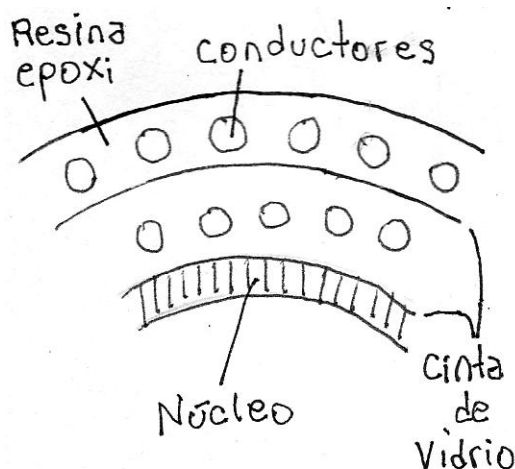


Figura 3-3: Motor con inducido de superficie devanada.

3.2 – 3: Motores sin carcasa de acondicionamiento directo del par

Estos motores carecen de carcasa y se fijan directamente a la carga que accionan. El inducido tiene un diámetro grande y una longitud axial corta; el colector, de igual diámetro, va acoplado al inducido y el estator, que es el inductor, es un imán permanente.

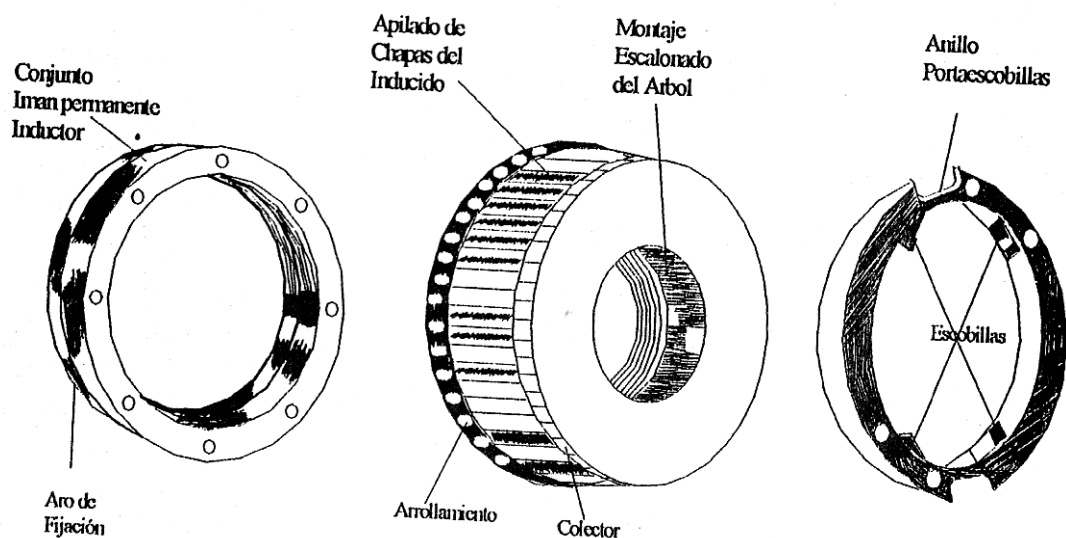


Figura 3-4: Motor sin carcasa de accionamiento directo del par.

3.2 – 4: Motores de bobina móvil

En este tipo de motores, la parte móvil del inducido está conformado por bobinas solamente. Se hace esto para reducir la inercia mecánica y mejorar la velocidad de respuesta.

Estas bobinas son de devanado reticulado y forman un inducido libre de hierro en forma de copa, o también pueden estar encapsuladas en un casco cilíndrico. Tienen baja inductancia del inducido, alta aceleración nominal y un par motor libre de efectos de laminado.

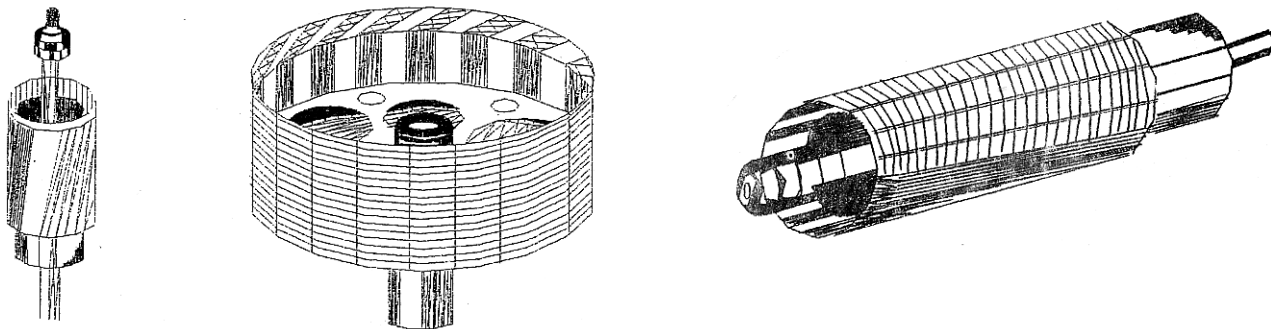


Figura 3-5: Diferentes rotores de un motor de bobina móvil.