



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

---

---

**SELECCIÓN, APLICACIÓN Y  
MANTENIMIENTO DE LOS MOTORES DE  
CORRIENTE DIRECTA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:  
HUGO ARTURO OSORIO GUZMÁN**

ASESOR: ING. VÍCTOR HUGO LANDA OROZCO

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉX.

2009



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicado principalmente a mi madre, la señora Mavelia Guzmán Escobar, por su amor, su esfuerzo y por el gran apoyo que siempre me ha brindado y porque sin ella nada de esto hubiese sido posible.

A Elizabeth Nasheli por ser la mujer y el amor de mi vida, por todo lo que hemos vivido, vivimos y viviremos juntos.

Y en especial a la memoria de mi padre el Ing. Hugo Miguel Osorio Vázquez, porque a pesar que ya no está, aún lo recuerdo y sé que esto le hubiera dado mucho orgullo.

Agradezco a mis hermanos Alejandra, Iván y Mónica, por los buenos momentos que hemos pasado. De los integrantes de las familias Osorio Vázquez y Guzmán Escobar, agradezco a los que nos han apoyado, a mí y a mis hermanos.

Un especial agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por darme la gran oportunidad de desarrollo y de superación profesional. Siempre estaré agradecido y orgulloso de haber sido parte de ellas.

# Í n d i c e

Página

<b>Objetivo.....</b>	<b>3</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 1. Descripción de los motores de corriente directa.</b>	
1.1 Antecedentes Históricos.....	5
1.2 Conceptos Básicos.....	7
1.3 Construcción física de las máquinas de corriente directa.....	19
1.4 Principio de Funcionamiento.....	23
1.5 Generadores de corriente directa.....	50
1.6 Motores de corriente directa.....	56
<b>Capítulo 2. Factores de selección del motor de corriente directa.</b>	
2.1 Introducción.....	64
2.2 Normas.....	65
2.3 Características par-velocidad.....	67
2.4 Control de los motores de corriente directa.....	84
2.5 Voltajes y corrientes nominales.....	97
2.6 Tamaños de carcasa.....	101
2.7 Tipos de cubiertas.....	107
2.8 Enfriamiento y límites de temperatura.....	111
2.9 Otros factores de selección.....	115
2.10 Procedimiento de ensayo.....	126

### **Capítulo 3. Aplicación del motor de corriente directa.**

3.1	Introducción.....	131
3.2	Aplicaciones del motor de corriente directa.....	132
3.3	Variantes del motor de corriente directa.....	134
3.4	Motores de corriente directa para usos especiales.....	138
3.5	Ejemplo de aplicación.....	155

### **Capítulo 4. Mantenimiento del motor de corriente directa.**

4.1	Introducción.....	161
4.2	Clasificaciones del mantenimiento y tipos de fallas.....	163
4.3	Mantenimiento preventivo del motor de corriente directa.....	165
4.4	Mantenimiento correctivo del motor de corriente directa.....	175

<b>Conclusiones.....</b>	<b>182</b>
--------------------------	------------

<b>Bibliografía.....</b>	<b>183</b>
--------------------------	------------

## **Objetivo.**

Analizar la importancia, la utilidad y la persistencia de los motores de corriente directa en la industria, así como obtener un texto especializado de los mismos, donde se resalten sus ventajas, junto con los factores que intervienen en la selección, la aplicación y el mantenimiento de un motor de corriente directa.

## **Introducción.**

El motor eléctrico sin importar el tipo, es el equipo más utilizado por el hombre, ya que la mayoría de las más máquinas y muchos inventos conocidos dependen de él, y sólo por mencionar uno de tantos beneficios, funcionan con electricidad, que es una fuente de energía eficiente y fácil de controlar.

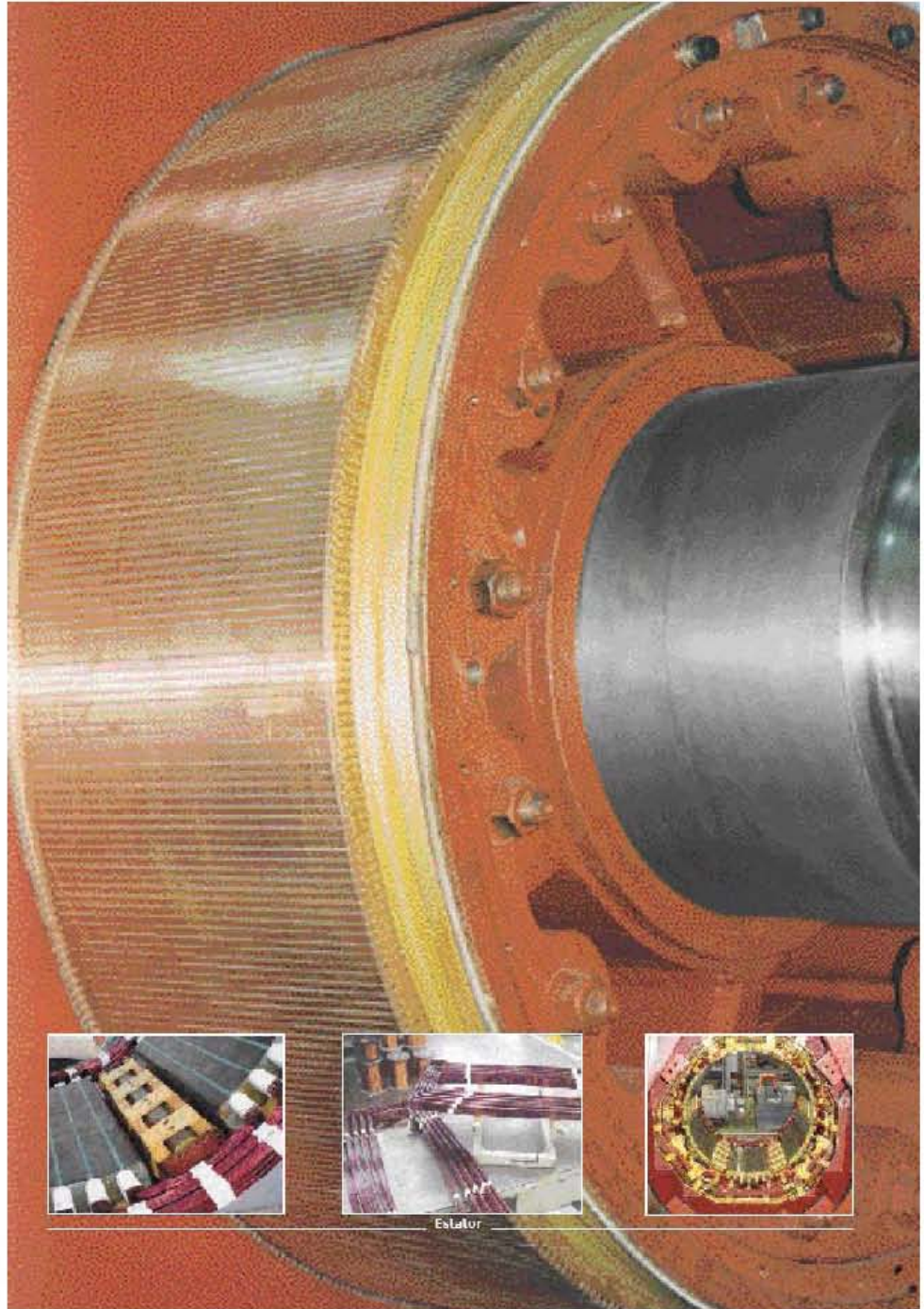
Desde la aparición de los motores eléctricos éstos han contribuido de forma importante al desarrollo de nuestra civilización industrial, ya que desempeñan un papel muy importante para el bienestar de la humanidad. En específico un motor de corriente directa, no sólo está presente en un proceso industrial, sino que también lo está en el hogar, en un juguete, en un aparato electrodoméstico, en la actividad cotidiana lo está en el automóvil, en un aparato electrónico o en una máquina-herramienta. El punto es que esa fuerza motriz se encuentra presente ya sea de forma directa o indirecta en la vida del ser humano.

Aun cuando prácticamente toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada y distribuida en la forma de corriente alterna, mucha de ella se utiliza en la forma de corriente directa. Los motores de corriente directa están mejor adaptados para muchos procesos industriales que demandan altos grados de flexibilidad en el control de velocidad y par de lo que lo están los motores de corriente alterna convencionales. La corriente directa logra, una velocidad ajustable del motor en rangos amplios, una salida de potencia mecánica constante, o par constante, una rápida aceleración y desaceleración, y respuestas a una señal de retroalimentación.

Si bien es cierto que la revolución en la electrónica de potencia ha llevado a cierta sustitución significativa de los motores de corriente directa por motores de inducción con velocidad variable, también es verdad que ha sido el propio avance de la electrónica de potencia la que ha contribuido a mantenerlos en ambos extremos del espectro de potencia, porque hay aplicaciones en las cuales no pueden ser sustituidos.

Por todo esto y más, es importante enfatizar, que a los motores de corriente directa, aún les quedan muchos años de vida de servicio.

# Capítulo 1. Descripción de los motores de corriente directa.



## 1.1 Antecedentes Históricos.

En todo estudio acerca de los motores de corriente directa es fundamental partir de los orígenes históricos ya que ésta es la base que le dio forma y sentido a este gran invento.

Todo comienza con los primeros conocimientos relativos a imanes de los Chinos y las primeras referencias elementales de electricidad y magnetismo de Tales de Mileto en el año 585 a.C., pero en esencia el gran inicio se da a partir de los estudios del Inglés William Gilbert en 1600 acerca de objetos cargados eléctricamente con lo que el físico Alemán Otto de Guericke inventa en 1633 la primera máquina eléctrica. Un avance notable se presenta en 1785 con el científico Francés Charles Coulomb que estudió las leyes de atracción y repulsión eléctrica, al medir la fuerza entre los cuerpos cargados eléctricamente.

La invención de la primera pila eléctrica del mundo hecha por el físico Italiano Alessandro Volta dio a los investigadores una fuente de corriente regular, directa y estable con lo cual se realizaron estudios más a conciencia y sistematizados del fenómeno eléctrico y de sus aplicaciones, en especial las corrientes directas.

En 1820 Hans Christian Oersted demostró que en toda corriente eléctrica se encuentra siempre asociado un campo magnético con ello se fundamenta el electromagnetismo, que hasta esta fecha se creía no había una relación entre estos dos fenómenos. Después de que se puso de manifiesto la relación entre electricidad y magnetismo en la dirección electromagnética, o sea, una acción magnética de la corriente, en 1831 el físico y químico Inglés Michael Faraday mostró que existía igualmente esa relación en sentido inverso, es decir, en dirección magnetoeléctrica, esto es, efectos eléctricos de los campos magnéticos, en pocas palabras inventa el generador eléctrico.

H. Pixii en 1833 construyó una máquina provista de un rudimentario conmutador mecánico para rectificar las corrientes alternas, con ello obtuvo en mejor forma el primer generador de corriente directa, las mejoras en el conmutador se darían en 1838 gracias a Poggendorf. Hubieron dos factores a considerar en la evolución de las máquinas de cd que dieron pie a perfeccionar las versiones anteriores, uno fue que los imanes de entonces eran demasiado débiles y perdían relativamente pronto su magnetismo, y el segundo era el peso excesivo de los imanes, la solución al primero sucedió en 1845, cuando Charles Wheatstone y Cookes propusieron emplear en vez de imanes permanentes, electroimanes alimentados de una fuente exterior. Para el segundo la solución se dio en 1865 con Henry Wilde, que colocó en la máquina principal una pequeña máquina auxiliar para alimentar los electroimanes.



Utilizando todos estos avances en 1867 Werner Siemens da a conocer su generador autoexcitado, en el que destacan los electroimanes inductores conectados en serie con el inducido y así utilizaba la propia corriente de éste para su magnetización. Ese mismo año Wheatstone hacía lo mismo pero con los electroimanes conectados en paralelo con el inducido.

Con el descubrimiento de Jacobi en 1850 acerca del efecto de la reversibilidad de funcionar en régimen motor o generador, la configuración estructural básica de las máquinas de corriente directa tal como corresponde a la actualidad quedó fijada en 1870 por el Belga Zenobio-Teófilo Gramme con su inducido en anillo, pero en 1872 Friedrich von Hefner-Altener desarrolla el inducido de tambor que dadas sus ventajas sobre el de anillo acabaría desplazándolo con el tiempo. Aunque en 1878 se empezó a utilizar el inducido dentado que dio mejor sujeción mecánica del devanado, la creación de los inducidos anillo y tambor señala el comienzo de la auténtica era industrial de las máquinas eléctricas. Inicialmente el desarrollo teórico y por lo tanto industrial se centro en las máquinas de corriente directa por el hecho de que era el tipo de electricidad al que desde siempre, y en particular, desde Volta, se le había dedicado toda la atención.

Aunque en un principio la evolución de las máquinas de corriente directa, quedo reducida a la construcción de un generador, aún así, se tiene que destacar que la primera transmisión de energía eléctrica a larga distancia y en sentido amplio fue la debida a Marcel Deprez en 1882. En ese mismo año 1882 Thomas Alva Edison pone en marcha las tres primeras centrales para el suministro de energía mismas que el diseño, esta transmisión de energía se realizaba en corriente directa.

Tiempo después se evidencio que una transmisión de energía a larga distancia sólo podía resultar económica e industrialmente viable mediante la alta tensión, en este sentido, la corriente directa tenía pocas posibilidades de éxito.

Otros investigadores que contribuyeron notablemente, al desarrollo no sólo de las máquinas de corriente directa, sino a las máquinas eléctricas en general, (porque es de reconocer que ninguna de las diferentes tipos de máquinas eléctricas evolucionaron sin la ayuda una de la otra), estos otros nombres son, entre otros el Francés André-Marie Ampere fundador del electromagnetismo, el Estadounidense Joseph Henry, quién construyó el primer electroimán, el físico Alemán Georg Ohm que descubrió la resistencia eléctrica de un conductor y enunció la ley que lleva su nombre, el Ruso Heinrich Lenz que enunció la ley relativa al sentido de la corriente inducida y el Escocés James Maxwell que propuso la Teoría Electromagnética de la luz y las ecuaciones generales del campo electromagnético.

Todos estos nombres que a lo largo de la evolución y desarrollo de las máquinas eléctricas con sus descubrimientos, experimentos, inventos y perfeccionamientos a modelos anteriores, actualmente nos permiten disfrutar de todos los beneficios que una máquina eléctrica nos da, de ahí la importancia de mencionarlos.

## 1.2 Conceptos Básicos.

Una *máquina eléctrica* es un dispositivo de conversión de energía electromecánica, cuando convierte energía mecánica en energía eléctrica se denomina *generador* y cuando convierte energía eléctrica en energía mecánica se denomina *motor*. Esta conversión de energía ya sea como generador o como motor se realiza mediante la acción de campos magnéticos, pero para entender mucho mejor el funcionamiento de una máquina eléctrica en general, es importante tener un conocimiento básico tanto del movimiento rotatorio enfocado a las máquinas rotatorias, como de las leyes fundamentales del electromagnetismo.

La rotación de una máquina eléctrica está restringida a una dimensión angular, ya que giran sobre un eje fijo llamado eje de la máquina y para identificar la dirección de rotación, ésta puede ser descrita ya sea en sentido de las manecillas del reloj o en sentido contrario a las manecillas del reloj esto es, *un ángulo de rotación en sentido contrario de las manecillas del reloj será positivo y en sentido de las manecillas del reloj será negativo*.

Por el hecho de la ya mencionada rotación sobre un eje, es importante señalar que los siguientes conceptos además de ser los más importantes, se reducen a magnitudes escalares y por consiguiente se relacionan con el movimiento rectilíneo.

### Posición Angular ( $\theta$ ).

La posición angular de un objeto es el ángulo en que se sitúa, medido desde algún punto arbitrario de referencia y se mide en radianes o grados. La posición angular es la correspondiente a la distancia en el movimiento rectilíneo.

### Velocidad Angular ( $\omega$ ).

La velocidad angular es la medida de cambio de la posición angular con respecto al tiempo y corresponde al concepto de velocidad lineal y se define por la ecuación

$$v = \frac{dr}{dt} \quad [\text{m/s}] \quad (1.1)$$

por lo tanto la velocidad angular se define por la ecuación

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad [\text{rad/s}] \quad (1.2)$$

y se mide en revoluciones por segundo o radianes por minuto.

## Aceleración Angular ( $\alpha$ ).

La aceleración angular es la medida de cambio de la velocidad angular con respecto al tiempo y corresponde a la aceleración del movimiento rectilíneo y ésta se define por la ecuación

$$a = \frac{dv}{dt} \quad [\text{m/s}^2] \quad (1.3)$$

la aceleración angular se define mediante la ecuación

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad [\text{rad/s}^2] \quad (1.4)$$

y se mide en radianes por segundo al cuadrado.

## Par ( $\tau$ ).

Para comprender este concepto es importante primero definir, que fuerza es la tendencia a causar movimiento e imaginemos un cilindro que rota libremente alrededor de su eje, ahora supongamos que la figura 1-1a es el cilindro al cual se le aplica una fuerza de manera que la línea de acción pase por el eje del cilindro, el cilindro no rotará, sin embargo si la misma fuerza se le aplica de modo que su línea de acción pase a la derecha del eje del cilindro, como se muestra en la figura 1-1b, el cilindro rotará en dirección contraria a las manecillas del reloj, cuanto mayor sea el par aplicado al objeto, más rápidamente cambiará su velocidad angular.

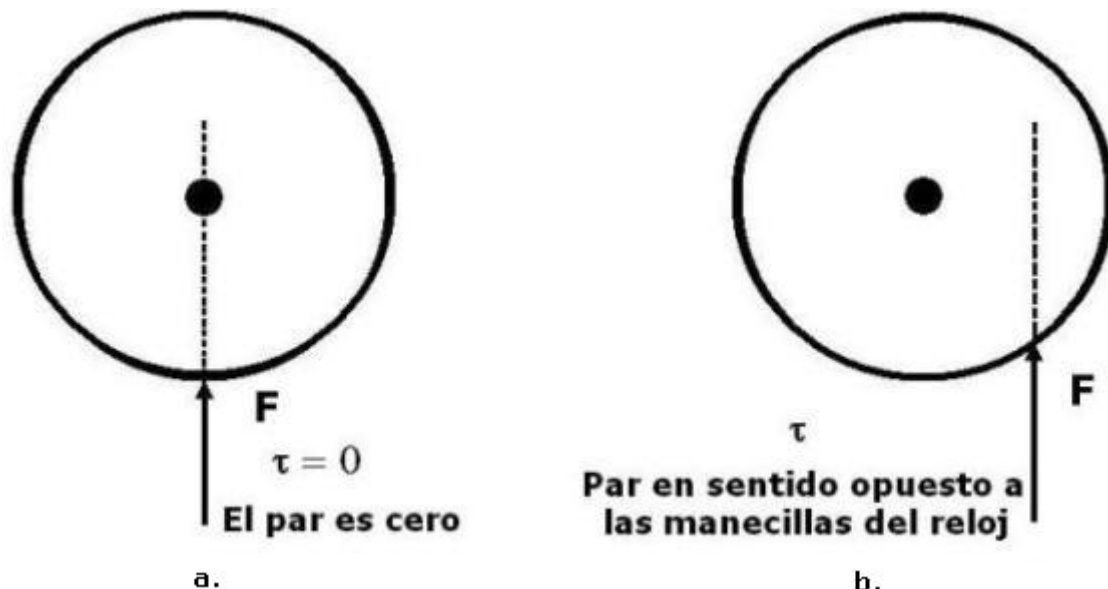


Figura 1-1a. Fuerza aplicada de modo que pase por su eje de rotación. 1-1b. Fuerza aplicada de manera que su línea de acción no pase por el eje de rotación.

Así se define que el par ó acción de torsión es el producto de la fuerza aplicada al objeto por la distancia mínima entre la línea de acción de la fuerza y el eje de rotación del objeto y que depende de dos factores:

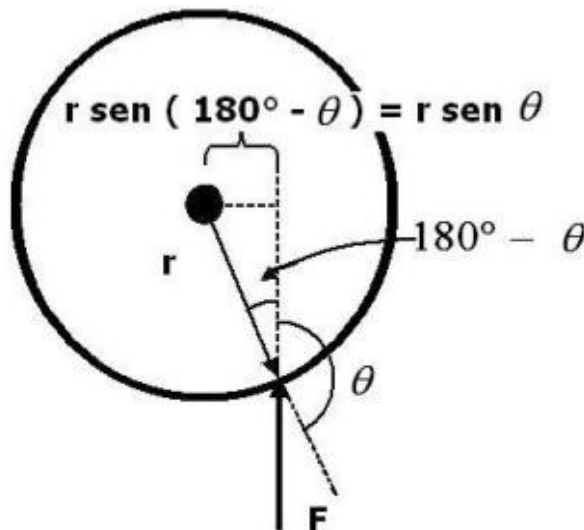
- a. La magnitud de la fuerza aplicada y de la distancia entre el eje de rotación.
- b. La línea de acción de la fuerza.

El par puede ser descrito como

$$\begin{aligned} \tau &= (\text{fuerza aplicada})(\text{distancia perpendicular}) \\ &= (F)(r \text{sen} \theta) \\ &= rF \text{sen} \theta \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \end{aligned} \quad (1.5)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre el vector  $r$  y el vector  $F$ , como lo muestra la figura 1-2.

Las unidades del par son newton/metro en el SI y libra/pies en el sistema inglés.



**$\tau = (\text{distancia perpendicular})(\text{fuerza})$**   
 **$\tau = (r \text{sen} \theta) F$ , en sentido opuesto a las manecillas del reloj**

Figura 1-2. Obtención de la ecuación del par en un objeto.

**Ley de rotación de Newton.**

De la segunda ley de movimiento de Newton que describe la relación entre la fuerza aplicada a un objeto y su aceleración resultante y está dada por la ecuación

$$F = ma \quad [\text{N}] \text{ ó } [\text{lb}] \quad (1.6)$$

donde  $F$ = fuerza neta aplicada al objeto (N ó lb).

$m$ = masa del objeto (Kg ó slug).

$a$ = aceleración resultante ( $\text{m/s}^2$  ó  $\text{ft/s}^2$ ).

Una ecuación semejante describe la relación entre el par aplicado a un objeto y su aceleración angular resultante, esta relación llamada ley de rotación de Newton, está dada por la ecuación

$$\tau = J\alpha \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.7)$$

donde  $\tau$  = par neto aplicado (N·m ó lb·ft).

$\alpha$  = aceleración angular resultante (rad/seg<sup>2</sup>).

$J$  = momento de inercia del objeto (kg/m<sup>2</sup> ó slug/ft<sup>2</sup>).

### Trabajo ( $W$ ).

El trabajo es una fuerza ejercida a lo largo de una distancia y se expresa mediante la ecuación

$$W = \int F dr \quad (1.8)$$

si la fuerza es colineal con la dirección del movimiento y si la fuerza es constante entonces

$$W = F r \quad [\text{J}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.9)$$

Para el movimiento rotatorio, trabajo es la aplicación de un par a través de un ángulo, por lo tanto

$$W = \int \tau d\theta \quad (1.10)$$

y si el par es constante

$$W = \tau \theta \quad [\text{J}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.11)$$

Sus unidades de medida son el joule en el SI y libra/pie en el sistema inglés.

### Potencia (hp).

La potencia es la razón de cambio o el incremento en el trabajo, por unidad de tiempo, en pocas palabras es la rapidez con la que se hace trabajo y su ecuación es

$$P = \frac{dW}{dt} \quad [\text{J/s}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft/s}] \quad (1.12)$$

Se mide generalmente en joules por segundo (watts), libra/pies por segundo o en caballos de fuerza (hp). Suponiendo que la fuerza es constante y colineal con la dirección del movimiento entonces

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(Fr) = F\left(\frac{dr}{dt}\right) = Fv \quad (1.13)$$

si el par es constante, en el movimiento rotatorio la potencia está dada por

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}(\tau\theta) = \left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \tau\omega$$

$$P = \tau\omega \quad [\text{W}] \text{ ó } [\text{hp}] \quad (1.14)$$

Esta ecuación describe la potencia mecánica aplicada al eje de un motor y es la relación correcta entre la potencia, par y velocidad, si la potencia está medida en watts, el par en N·m y la velocidad en rad/s. Si se utilizan otras unidades para medir cualquiera de las cantidades indicadas, debe introducirse una constante en la ecuación como factor de conversión. Si se emplean los factores de conversión adecuados en cada término la ecuación (1.14) se convierte en

$$P(\text{watts}) = \frac{\tau (\text{lb} \cdot \text{ft}) n(\text{r/min})}{7.04} \quad [\text{W}] \quad (1.15)$$

$$P(\text{caballos de fuerza}) = \frac{\tau (\text{lb} \cdot \text{ft}) n(\text{r/min})}{5252} \quad [\text{hp}] \quad (1.16)$$

donde el par se mide en libra/pie y la velocidad en revoluciones por minuto.

En cuanto a las principales leyes y conceptos que rigen la producción de un campo magnético, es preciso puntualizar que no se pretende realizar una descripción matemática exhaustiva sino plantear estas leyes y conceptos de forma breve y simplificada, pero con la suficiente claridad para entender estos fundamentos teóricos.

### Ley de Ampere.

La ley básica que rige la producción de un campo magnético por una corriente es la ley de Ampere.

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{net} \quad (1.17)$$

donde  $\mathbf{H}$  es la intensidad de campo magnético producida por la corriente  $I_{net}$ . En unidades del SI,  $I$  se mide en amperes y  $H$ , en amperes-vuelta por metro.

Si aplicamos esta ecuación a la figura 1-3, que muestra un núcleo rectangular con un devanado de  $N$  vueltas de alambre enrollado sobre una de las ramas del núcleo y si el núcleo es de material ferromagnético casi todo el campo magnético producido por la corriente permanecerá dentro del núcleo, de modo que el camino de integración en la ley de Ampere es la longitud media del núcleo  $\ell_c$ . La corriente que pasa por el camino de integración  $I_{net}$  es entonces  $Ni$ , puesto que la bobina de alambre corta dicho camino  $N$  veces mientras porta la corriente  $i$ . La ley de Ampere se expresa entonces

$$H\ell_c = Ni \quad (1.18)$$

donde  $H$  es la magnitud del vector de intensidad de campo magnético  $\mathbf{H}$ . De esta manera, la magnitud de intensidad de campo magnético en el núcleo debido a la corriente aplicada es

$$H = \frac{Ni}{\ell_c} \quad [\text{A - vuelta/m}] \quad (1.19)$$

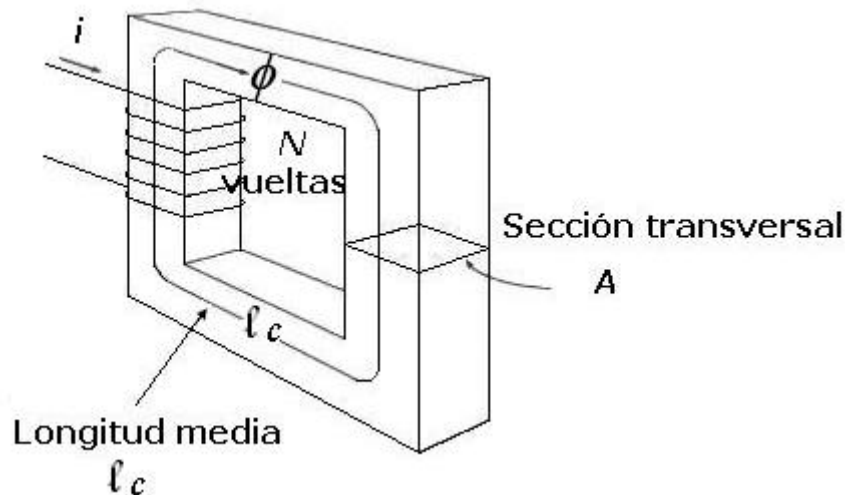


Figura 1-3. Un núcleo magnético sencillo.

### Inducción Magnética.

La inducción magnética  $\mathbf{B}$ , también conocida como *densidad de flujo* de un campo magnético de intensidad  $\mathbf{H}$  está dada por

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad [\text{Wb/m}^2 = \text{Tesla}] \quad (1.20)$$

donde  $\mathbf{H}$  es la intensidad de campo magnético, que de alguna manera representa el esfuerzo de la corriente por establecer un *campo magnético* y se mide en ampere-vuelta por metro;  $\mu$  es la *permeabilidad magnética* del material, que representa la facilidad relativa para establecer un campo magnético en un material dado y se mide en henrys por metro y la densidad de flujo magnético resultante en webers por metro cuadrado o teslas (T).

Esta facilidad relativa llamada *permeabilidad relativa* ( $\mu_r$ ), se toma con referencia al aire, esto es, si en una máquina eléctrica la permeabilidad relativa puede llegar a tomar valores próximos a 100.000, lo que indica que el flujo magnético que atraviesa una determinada sección de la máquina es 100.000 veces mayor que el que atravesaría una sección equivalente de aire para el mismo campo magnético.

La *permeabilidad del aire* o espacio libre se denomina  $\mu_0$ , y su valor es

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad [\text{H/m}] \quad (1.21)$$

Así pues, la permeabilidad relativa es una forma de comparar la capacidad de los distintos materiales para soportar el flujo magnético y ésta se denomina

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad [\text{Adimensional}] \quad (1.22)$$

En los materiales ferromagnéticos, la permeabilidad varía en función de la intensidad del campo magnético aplicado, apareciendo los conocidos fenómenos de saturación, que implican la relación no lineal entre la densidad de flujo y la intensidad del campo magnético.

Si se somete una pieza de material ferromagnético a la acción de un campo magnético de intensidad creciente partiendo desde cero y se representa en una gráfica la variación de la densidad de flujo en función de la intensidad del campo, se obtiene una curva conocida como *curva de inducción o característica magnética del material*. (Figura 1-4)

Se puede apreciar claramente dos zonas; una de comportamiento lineal en la que el crecimiento de la inducción magnética es proporcional a la intensidad del campo y otra zona de saturación, en la que la densidad de flujo mantiene un crecimiento no lineal con el campo magnético existente. En la segunda se puede observar que la pendiente de la curva de inducción coincide con la correspondiente a la característica magnética del aire, esto indica que el material magnético, una vez que alcanza la saturación, tiene un comportamiento idéntico al del aire no permitiendo que la densidad de flujo siga aumentando a pesar de que la intensidad del campo si lo haga.

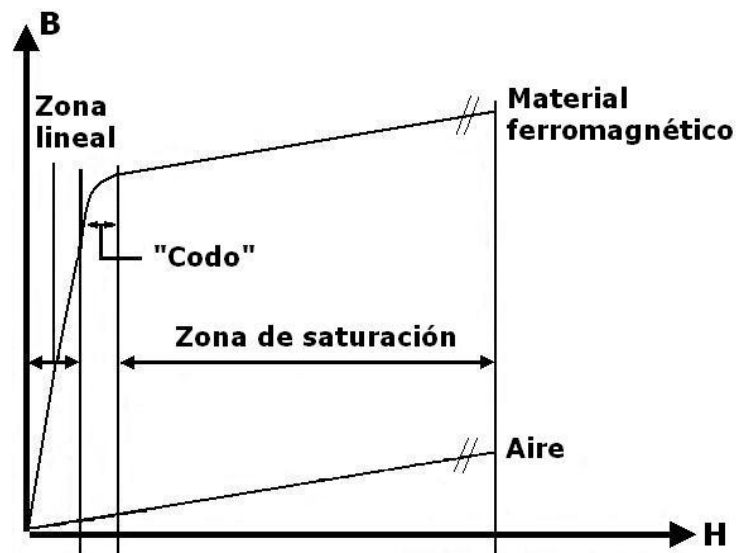


Figura 1-4. Curva de inducción magnética de un material ferromagnético.



## Flujo Magnético.

Se define como el número de líneas de campo magnético que atraviesan una determinada superficie y en este caso, en un núcleo como el mostrado en la figura 1-3, la magnitud de la densidad de flujo está dada por

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{\ell_c} \quad [\text{Wb/m}^2 = \text{Tesla}] \quad (1.23)$$

y el flujo total en cierta área está dado por

$$\phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1.24)$$

donde  $d\mathbf{A}$  es la diferencial del área. Si el vector de densidad de flujo es perpendicular a un plano de área  $\mathbf{A}$  y si la densidad de flujo es constante en toda el área, la ecuación se reduce a

$$\phi = BA \quad [\text{Wb}] \quad (1.25)$$

De esta forma el flujo total en el núcleo de la figura 1-3, producido por la corriente  $i$  en el devanado, es

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{\ell_c} \quad [\text{Wb}] \quad (1.26)$$

Donde  $A$  es el área de la sección transversal del núcleo.

## Fuerza Magnetomotriz.

Este concepto es fácil de entender si se toma como referencia un circuito eléctrico, donde la fuente de voltaje  $V$  genera una corriente  $I$  a lo largo de la resistencia  $R$  todo esto relacionado por la ley de Ohm

$$V = IR \quad [\text{Volts}] \quad (1.27)$$

El voltaje o fuerza electromotriz genera un flujo de corriente, de manera análoga en un circuito magnético se denomina *fuerza magnetomotriz* (f.m.m.). La fuerza magnetomotriz de un circuito magnético es igual al flujo efectivo de corriente aplicado al núcleo

$$\mathcal{F} = Ni \quad [\text{A} \cdot \text{vuelta}] \quad (1.28)$$

donde  $\mathcal{F}$  es la fuerza magnetomotriz medida en amperes-vuelta.

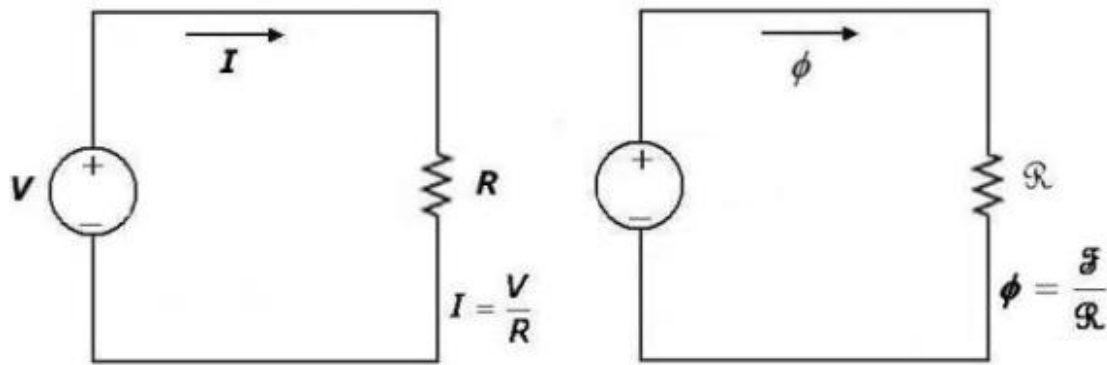


Figura 1-5. Circuito eléctrico sencillo y circuito magnético.

Esta analogía se puede reafirmar con la figura 1-5 que nos muestra un circuito eléctrico sencillo y un circuito magnético. En un circuito eléctrico el voltaje aplicado ocasiona un flujo de corriente  $I$ , en forma similar, en un circuito magnético, la fuerza magnetomotriz aplicada ocasiona un flujo  $\phi$ . Si en el circuito eléctrico la relación entre voltaje y corriente está dada por la ley de Ohm, en forma semejante en el circuito magnético la relación entre la fuerza magnetomotriz y el flujo es

$$\mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad [\text{A} \cdot \text{vuelta}] \quad (1.29)$$

donde  $\mathcal{F}$  = fuerza magnetomotriz del circuito (A · vuelta).

$\phi$  = flujo del circuito (Wb).

$\mathcal{R}$  = reluctancia del circuito (A·vuelta/Wb).

La *reluctancia* de un circuito magnético es el homólogo de la resistencia del circuito eléctrico y se mide en amperes-vuelta por weber. Así como la conductancia en el circuito eléctrico es el inverso de la resistencia, la *permeancia*  $\mathcal{P}$  de un circuito magnético es el inverso de su reluctancia, esto es

$$\mathcal{P} = \frac{1}{\mathcal{R}} \quad [\text{H}] \quad (1.30)$$

Con todo esto se puede establecer un paralelismo entre circuitos eléctricos y magnéticos:

$\mathcal{F} = \phi \cdot \mathcal{R}$	$V = I \cdot R$
Fuerza Magnetomotriz	Diferencia de Potencial
Flujo Magnético	Corriente Eléctrica
Reluctancia	Resistencia

## Ley de Faraday.

Cuando el flujo magnético concatenado por una espira varía, se genera en ella una fuerza llamada *fuerza electromotriz inducida* (f.e.m.). La variación del flujo abarcado por la espira puede deberse a tres causas diferentes: la variación temporal del campo magnético en el que está inmersa la espira, la posición relativa de la espira dentro de un campo constante, o una combinación de ambas, de cualquier forma la fuerza electromotriz inducida en la espira sólo depende de la variación del flujo abarcado por ella con independencia de su origen.

La ley de inducción electromagnética enunciada por Faraday dice *“el valor absoluto de la fuerza electromotriz inducida está determinado por la velocidad de variación del flujo que la genera”*

$$|e| = \left| \frac{d\phi}{dt} \right| \quad (1.31)$$

El sentido de la fuerza electromotriz se determina a partir de la ley de Lenz que especifica que *“la fuerza electromotriz inducida debe ser tal que tienda a establecer una corriente por el circuito magnético que se oponga a la variación del flujo que la produce”*

$$|e| = - \left| \frac{d\phi}{dt} \right| \quad (1.32)$$

de ahí el signo menos en la ecuación. En el caso de un bobinado con  $N$  espiras la ecuación anterior se expresa

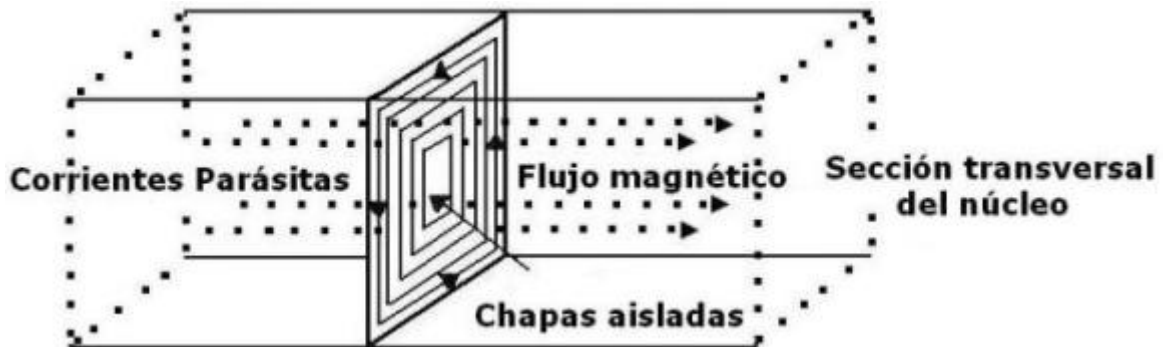
$$|e| = -N \cdot \left| \frac{d\phi}{dt} \right| \quad (1.33)$$

## Pérdidas en el núcleo.

El núcleo magnético de cualquier máquina rotativa está sometido a un campo magnético variable y puesto que el material ferromagnético es también conductor, por el circularán una corrientes denominadas *corrientes parásitas ó de Foucault* (llamadas así originalmente).

Estas corrientes, obedeciendo a la ley de Lenz reaccionan contra la variación del flujo que las crea y por lo tanto, reducen el valor efectivo de la inducción magnética originando pérdidas. Con el fin de reducir las pérdidas debidas a las corrientes parásitas, los núcleos de todas las máquinas eléctricas se construyen mediante chapas aisladas de muy poco espesor. De este modo, las corrientes parásitas ya no disponen de caminos de baja resistencia eléctrica como los que supondría un núcleo macizo, ya

que al estar las chapas aisladas y tener muy poco espesor, cada una de ellas presenta una resistencia eléctrica elevada y así entre más delgada sea la chapa mayor será la resistencia, en estas nuevas espiras de alta resistencia la capacidad del campo magnético para inducir corrientes parásitas es mucho más escasa (Figura 1-6).



**Figura 1-6. Circulación de corrientes parásitas a través de un núcleo de material ferromagnético formado por chapas aisladas.**

Las pérdidas ocasionadas por la circulación de corrientes parásitas son directamente proporcionales a los cuadrados de la frecuencia del campo magnético y del valor máximo de la densidad de flujo

$$P_{Foucault} = K \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad (1.34)$$

donde  $K$  es una constante que depende de la clase y espesor de la chapa,  $f$  es la frecuencia y  $B_m$  es el valor máximo de la densidad de flujo.

Otro tipo de pérdidas que se presentan en todos los materiales magnéticos son las pérdidas de energía debidas al *ciclo de histéresis*. Para detallar este fenómeno, se parte de dos condiciones la primera; en vez de aplicar corriente directa al material magnético se aplica un campo alternativo y la segunda es que el flujo inicial en el núcleo es cero, como se observa en la figura 1-7.

Cuando la intensidad del campo magnético va aumentando hasta llegar al punto  $H_m$ . Ésta es básicamente la curva de inducción mostrada en la figura 1-4, sin embargo a partir de aquí el campo comienza a decrecer hasta llegar de nuevo a cero. En este punto se puede apreciar que el valor de la inducción magnética es  $B_R$ , este valor se denomina *magnetismo remanente* (sobrante) y representa el estado del material en ausencia del campo magnetizante. De la misma figura 1-7 se observa que para anular este campo remanente es necesario disminuir la intensidad de campo hasta el valor  $H_c$  denominado *campo coercitivo*.

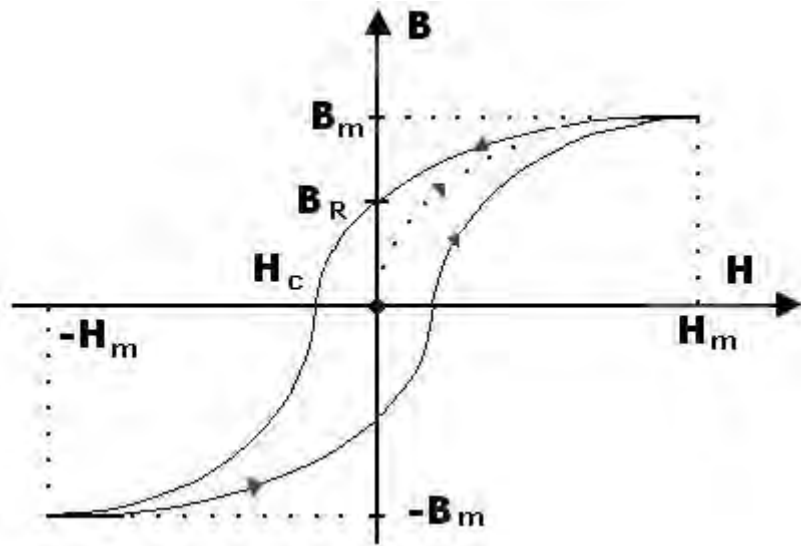


Figura 1-7. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético.

Si el campo siguiese disminuyendo se alcanzarían los valores  $-H_m$  y  $-B_m$  completando el ciclo al aumentar de nuevo la intensidad del campo y así las sucesivas repeticiones del ciclo antes descrito provocarán que éste aumente de área hasta alcanzar el correspondiente a la representación con línea continua. Las pérdidas debido al ciclo de histéresis responden a la siguiente expresión

$$P_{histéresis} = K \cdot f \cdot B_m^2 \quad (1.35)$$

Todo este proceso da origen a un calentamiento del material y por tanto pérdida de potencia y energía que dan como resultado un bajo rendimiento de la máquina.

### 1.3 Construcción física de las máquinas de corriente directa.

La estructura física de la máquina de cd principalmente está constituida por una parte fija llamada *estator*, dentro de la cual gira una parte móvil llamada *rotor o armadura*, existiendo entre las dos un espacio de aire llamado *entrehierro*. La figura 1-8 muestra los elementos esenciales de una máquina moderna de cd.

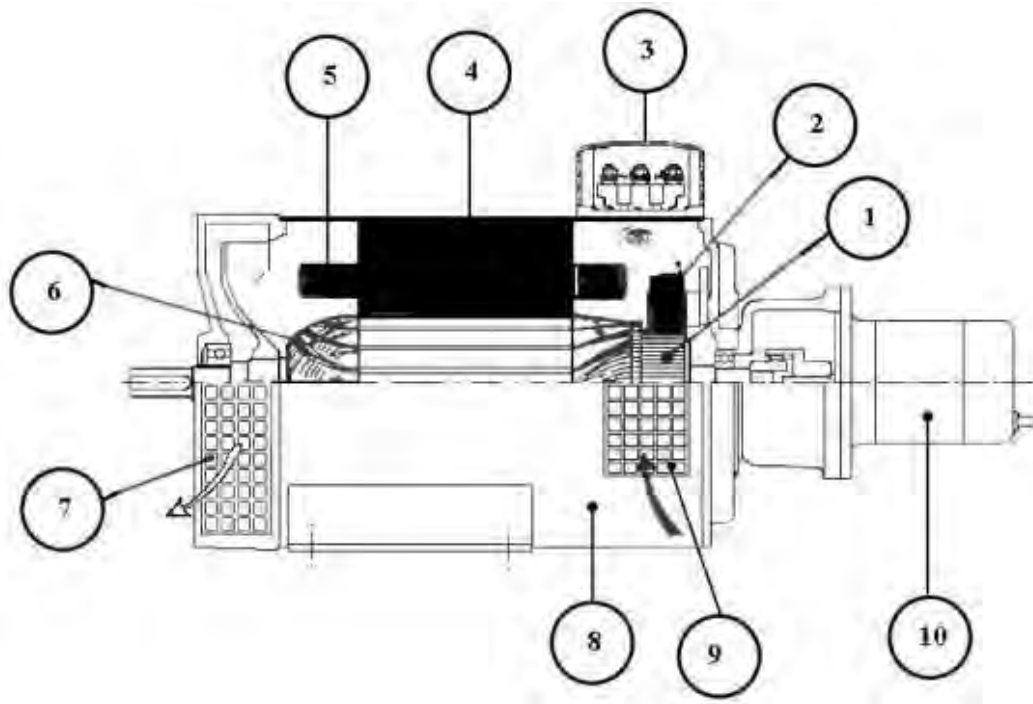


Figura 1-8. Elementos principales del motor de cd.

1. Colector.
2. Escobillas.
3. Caja de bornes.
4. Circuito magnético.
5. Devanado inductor.
6. Devanado de armadura (inducido).
7. Ventilación (salida de aire).
8. Carcasa (Fijación a patas).
9. Ventilación (entrada de aire).
10. Tacómetro.

## Estator.

El estator consta de una estructura de acero fundido que proporciona el soporte físico llamada *carcasa*, a su vez la carcasa contiene los *polos e interpolos o polos auxiliares* de chapa de acero, los cuales se proyectan hacia dentro y se construyen de forma *achaflanada o excéntrica*, lo cual significa que los extremos cercanos a la superficie de la armadura llamados caras polares se extienden hacia fuera y son ligeramente más espaciados lo cual permite distribuir el flujo uniformemente sobre la superficie de la armadura.

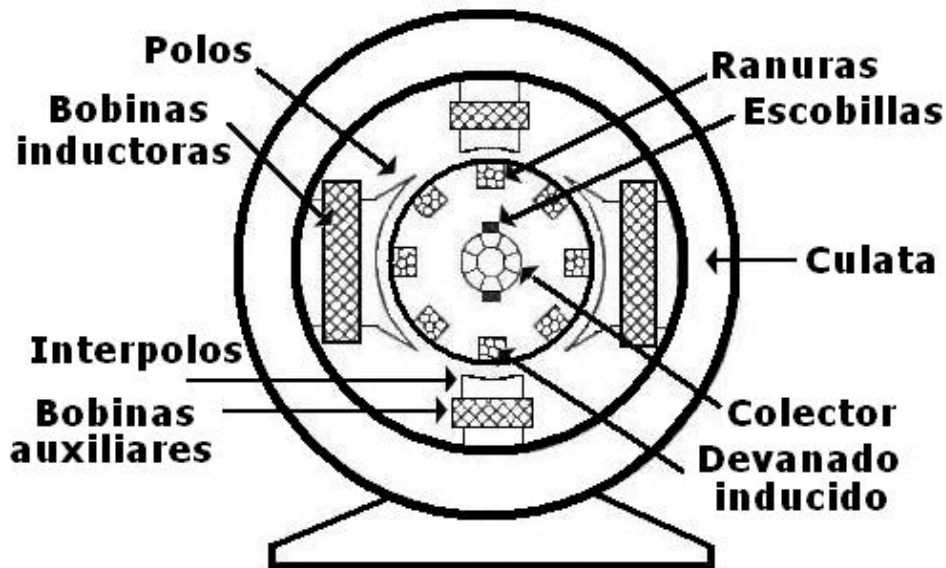


Figura 1-9. Constitución esencial.

En el estator también se encuentran los *soportes de las escobillas, los portaescobillas y las escobillas*, también conocidas como *carbones* que son elaboradas de carbón, grafito metalizado o electrografito, tienen una alta conductividad para reducir pérdidas eléctricas y tienen bajo coeficiente de rozamiento para reducir el desgaste excesivo, se fabrican de un material más blando que las delgas del colector para que la superficie de éste se desgaste menos.

Cabe mencionar que actualmente los polos principales, los interpolos y la porción de la estructura que une a los polos entre sí, que sirve de retorno al flujo magnético mejor conocida como *culata*, se fabrican completamente de *materias laminadas*, todo esto para reducir pérdidas. Otro punto importante a destacar es que una estructura bipolar se emplea para máquinas de baja potencia, pero en cuanto aumentan las necesidades de potencia se debe recurrir a estructuras multipolares, el funcionamiento sigue siendo análogo.

La *caja de bornes o terminales*, se emplea para la conexión a los circuitos de alimentación, normalmente se trata de un dispositivo sencillo, pero en motores de media tensión requiere de cuidados especiales. El *tacómetro* es un pequeño generador eléctrico y sirve para suministrar informaciones sobre la velocidad angular, a través de la tensión generada en sus terminales, esta información se utiliza tanto para la indicación, como para la retroalimentación en el sistema de control.

## Rotor.

El rotor o armadura consiste en un eje maquinado de una barra de acero y un núcleo cilíndrico, formado por chapas de acero al silicio, ranurado a lo largo de la periferia externa o lo que es muchas láminas troqueladas en forma de tambor y algunas veces se hallan provistos de huecos formando así conductos de ventilación. Del mismo eje de la armadura se desprende el *colector* que consiste en segmentos de cobre duro en forma de cuña llamados *delgas o láminas*, completamente aislados unos de otros, por medio de piezas de mica moldeadas, constituyendo, de esta forma, un arco circular, estas láminas de cobre se construyen lo suficientemente gruesas para permitir un desgaste normal durante la vida útil del motor (Figura 1-10).

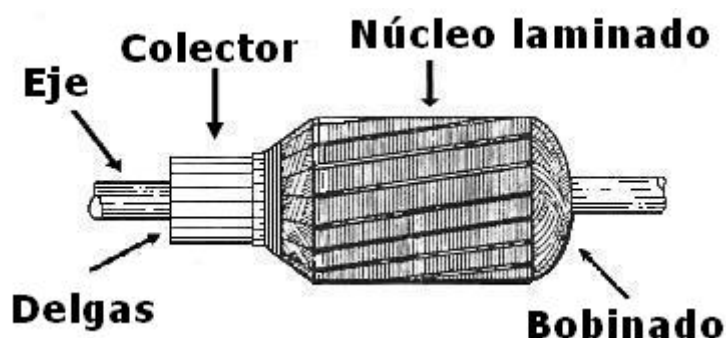


Figura 1-10. Armadura o rotor

Otros accesorios que forman parte de una máquina de cd son; *los cojinetes* (baleros o rodamientos), *portacojinetes*, *dispositivos de ventilación* (ventilador para disipar el calor), *sensores térmicos*, *conmutadores limitadores de velocidad*, *conmutador de flujo de aire*, *frenos*, *calentadores de máquina parada*, son algunos ejemplos de accesorios que se suelen encontrar en una máquina de cd.

Una máquina de cd tiene dos devanados principales los cuales están impregnados con *resinas sintéticas*, uno de ellos son los devanados de armadura sobre los cuales generalmente, se envuelven *fajas de hilos de fibra de vidrio* que hacen el conjunto del rotor más rígido y se conectan al colector sobre el que frotan las escobillas y así forman un circuito llamado inducido y es el encargado de inducir voltaje. Los otros devanados son los devanados de campo y se encuentran alojados en los polos e interpolos y forman un circuito llamado inductor que se encarga de crear el flujo magnético principal en la máquina y normalmente se usan dos tipos de devanados; uno se conoce como el *campo serie* y el segundo es el *campo paralelo, derivado o shunt*.



Tanto los devanados de armadura como los devanados de campo poseen características muy especiales y esenciales en el funcionamiento y configuración estructural de la máquina que no es posible describir su construcción y forma sin antes describir cómo funciona una máquina rotativa de cd es por eso, que se explicarán a detalle en posteriores apartados.

### Placa de características.

La placa de características o de fabricante constituye la principal fuente de información acerca de la máquina, en ella se tiene los datos más importantes que son necesarios para poner el motor en servicio o en su defecto para repararlo y de hecho es la antesala o se puede decir la base para la selección de motor de cd. La figura 1-11 muestra un ejemplo de una placa de características de un motor de cd.

El contenido y la forma en que se presenta la información de una placa de características depende del fabricante, pero en concreto este es un ejemplo el cual contiene los datos y características esenciales y que conforme se desarrolle el capítulo 2 se comprenderán.

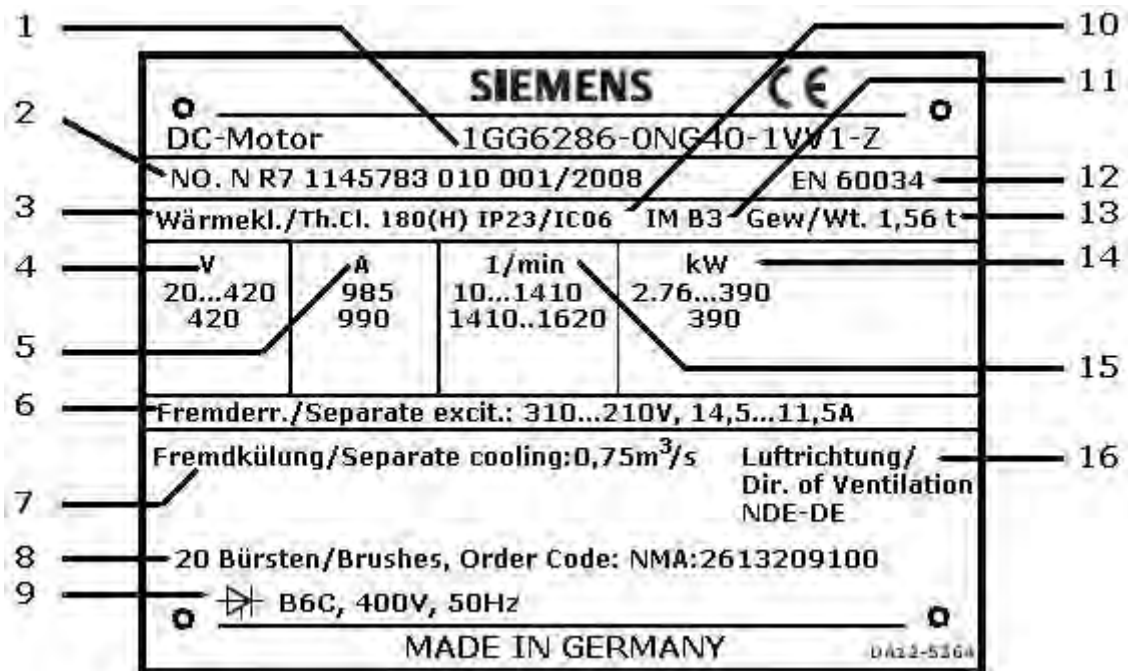


Figura 1-11. Placa de características.

Pos.	Descripción	Pos.	Descripción
1	Tipo	9	Datos de conexión a la red
2	Número de serie	10	Grado de protección
3	Clase Térmica	11	Forma constructiva
4	Tensión de inducido (V)	12	Normas y reglamentos
5	Corriente de inducido (A)	13	Peso del motor (tm)
6	Datos del excitador	14	Potencia (kW)
7	Forma de refrigeración	15	Velocidad (r/min)
8	Dotación de escobillas	16	Dirección del aire

Tabla 1-1. Datos de la placa característica.

## 1.4 Principio de funcionamiento.

La operación o el *funcionamiento de una máquina de cd* es simple, sin embargo, este tipo de máquina presenta el inconveniente de su complejidad constructiva y su mayor fragilidad ocasionadas ambas por el *colector y las escobillas*, pero así mismo es lo que la hace más interesante, esto se explica porque la máquina de cd suministra tensiones constantes cuando trabaja como generador y es alimentada con valores continuos de tensión cuando funciona como motor, pero *internamente tiene voltajes y corrientes de ca* sólo que existe un mecanismo que convierte los voltajes de ca internos en voltajes de cd en sus terminales.

Antes de explicar el funcionamiento de una máquina de cd, es importante saber diferenciar cuando se hace referencia al funcionamiento de la máquina como motor y cuando al funcionamiento como generador, realmente esto es sencillo y para ello ambos funcionamientos se basan en dos reglas.

La primera de ellas es la *regla de la mano derecha*, la cual se utiliza para saber el sentido de circulación de la f.e.m. inducida en un generador y se describe; "*si se pone la mano derecha de tal manera que las líneas de campo magnético del imán incidan verticalmente sobre la palma de la mano y el pulgar se orienta en el mismo sentido que el movimiento (causa), el resto de los dedos indicará el sentido de f.e.m. y por tanto, el de la corriente de inducción (efecto)*".

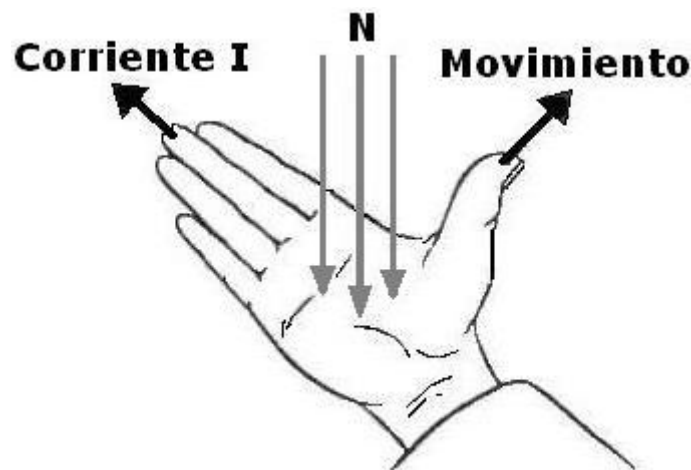


Figura 1-12. Regla de la mano derecha.

La segunda es la *regla de la mano izquierda* la cual se utiliza para determinar el sentido en el que actúa la fuerza de movimiento del rotor de un motor y ésta se describe; "*si se sitúa la mano izquierda de tal manera que las líneas del campo magnético exterior incidan verticalmente sobre la palma de la mano y los dedos indiquen hacia el sentido de paso de la corriente, el dedo pulgar estará orientado en el sentido del movimiento (efecto)*".

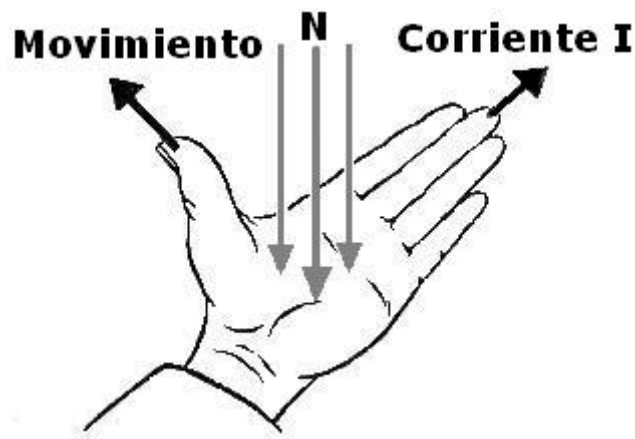


Figura 1-13. Regla de la mano izquierda.

La figura 1-14 ejemplifica una máquina rotatoria de cd muy sencilla que consiste en una sola espira de alambre que rota alrededor de un eje fijo y dentro de un campo magnético el cual es suministrado por los *polos norte y sur*.

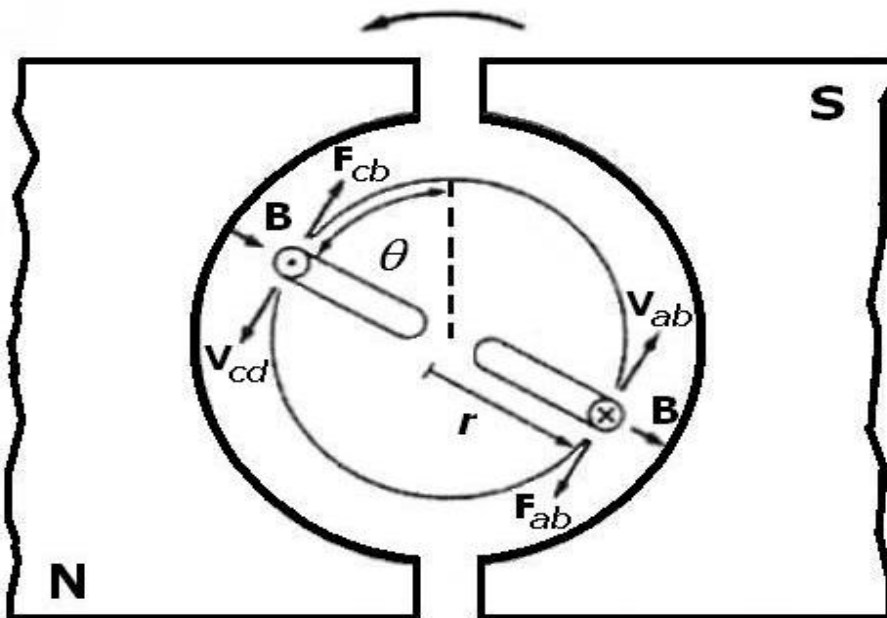
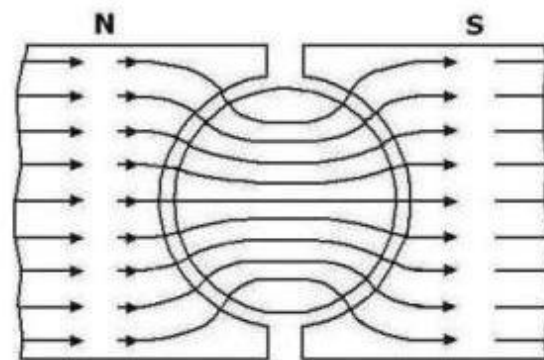


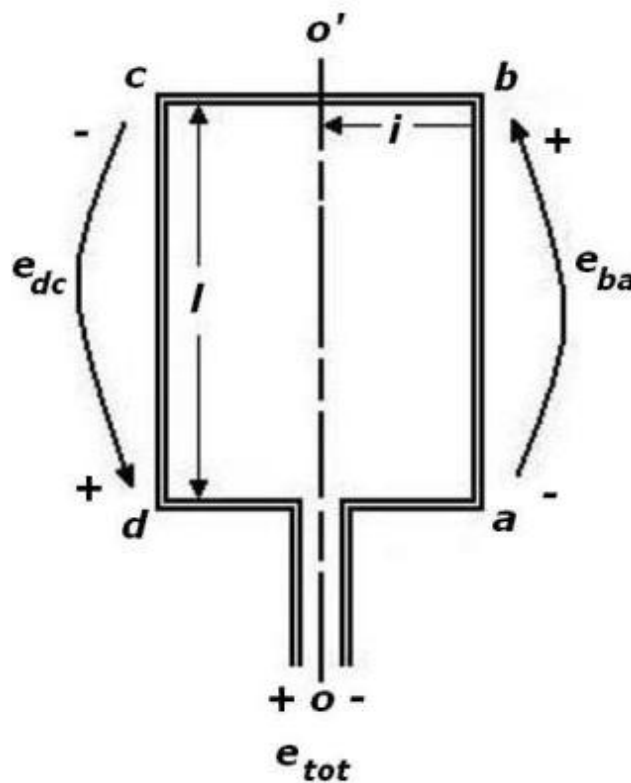
Figura 1-14. Lazo sencillo rotacional entre caras polares curvas.

Generalizando el funcionamiento, si la espira se acciona mediante un dispositivo mecánico desde el exterior en ella aparece una fuerza electromotriz que permite hacer circular corriente si se cierra el circuito, en este caso la máquina estaría funcionando como generador y así la *energía mecánica* aportada desde el exterior se transforma en *energía eléctrica*. Si por el contrario se inyecta corriente a la espira, sobre los conductores que la forman aparecerá una fuerza que tiende a hacerla girar, en este caso la máquina se estará comportando como motor entonces la *energía eléctrica* aportada desde el exterior se convierte en *energía mecánica*. Por lo tanto la misma máquina puede operar como generador o como motor.

Detallando el funcionamiento, de la figura 1-14 la espira del rotor yace en una ranura labrada en un núcleo ferromagnético. Recordando que la reluctancia del aire es mucho mayor que la reluctancia del hierro de la máquina, por lo tanto para minimizar la reluctancia del camino del flujo magnético a través de la máquina, éste debe tomar el camino más corto posible a través del aire entre la cara polar y la superficie del rotor, además que el flujo va de norte a sur por la naturaleza del campo magnético (Figura 1-15a), este camino es la perpendicular a la superficie del rotor en todos los puntos situados bajo las superficies polares. Puesto que la anchura del entrehierro es uniforme, la reluctancia es igual en cualquier punto situado bajo las caras polares y el hecho de que la reluctancia sea uniforme significa que la densidad de flujo magnético es constante en todo punto situado bajo las caras polares.



a.



b.

Figuras 1-15a y 1-15b. Líneas de campo y vista superior.

## Voltaje inducido en el lazo rotacional.

Analizando la figura 1-16 se puede obtener *la magnitud y forma del voltaje inducido en la espira si se gira el rotor de la máquina*. La espira de alambre mostrada es rectangular, los lados *ab* y *cd* son perpendiculares y los lados *bc* y *da* son paralelos, el campo magnético es constante y perpendicular a la superficie del rotor en todo punto situado bajo las caras polares y cae a cero cuando alguno de los lados está más allá de los extremos de los polos.

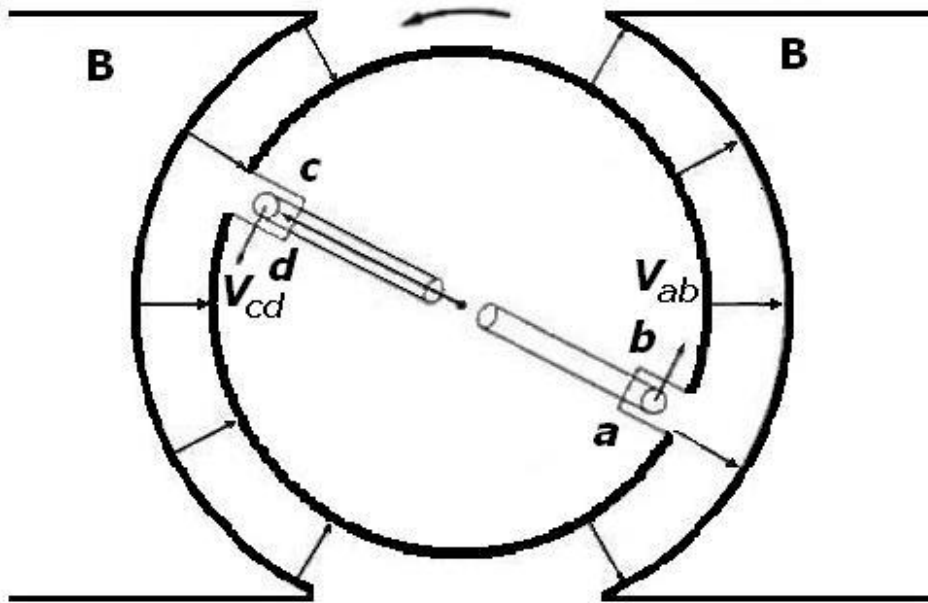


Figura 1-16. Deducción de la ecuación para los voltajes inducidos en la espira.

Para determinar el voltaje total  $e_{tot}$  en la espira, se examina cada segmento de ella por separado y se suman los voltajes resultantes. El voltaje de cada segmento está dado por la ecuación

$$e_{ind} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad [V] \quad (1.36)$$

que es la ecuación para el voltaje inducido en una espira conductora que se mueve en un campo magnético.

donde  $e_{ind}$  = voltaje inducido en el conductor (V).

$\mathbf{v}$  = velocidad del alambre (m/s).

$\mathbf{B}$  = vector de densidad de flujo magnético (T).

$\mathbf{l}$  = longitud del conductor en el campo magnético (m).

Analizando por separado tenemos que para el segmento  $ab$  la velocidad de la espira es tangencial a la trayectoria de rotación, el campo magnético  $\mathbf{B}$  apunta en dirección perpendicular hacia fuera de la superficie del rotor en todo punto situado debajo de la cara polar, y es cero más allá de los extremos de ésta. Se observa que bajo la cara

polar, la velocidad  $\mathbf{v}$  es perpendicular a  $\mathbf{B}$  y la cantidad  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  apunta hacia dentro de la página. Entonces, el voltaje inducido en este segmento es

$$e_{ba} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} = \begin{cases} vBl & \text{positivo hacia dentro de la página} & \text{bajo la cara polar} \\ 0 & \text{más allá de los extremos polares} \end{cases} \quad [\text{V}] \quad (1.37)$$

Para el segmento  $bc$  la cantidad  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  es opuesta en cada una de las dos mitades componentes del segmento, por lo cual los voltajes inducidos se anularán y es irrelevante hacia donde sea la dirección, de modo que  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  es perpendicular a  $\mathbf{l}$ , por lo tanto el voltaje en este segmento es cero

$$e_{cb} = 0 \quad [\text{V}] \quad (1.38)$$

En el segmento  $cd$  la velocidad de la espira es tangencial a la trayectoria de rotación, el campo magnético  $\mathbf{B}$  apunta en dirección perpendicular hacia dentro de la superficie del rotor en todo punto situado bajo la cara polar y es cero más allá de los extremos de ésta. Se observa que bajo la cara polar, la velocidad  $\mathbf{v}$  es perpendicular a  $\mathbf{B}$  y la cantidad  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  apunta hacia fuera de la página. Entonces, el voltaje inducido en este segmento es

$$e_{dc} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} = \begin{cases} vBl & \text{positivo hacia fuera de la página} & \text{bajo la cara polar} \\ 0 & \text{más allá de los extremos polares} \end{cases} \quad [\text{V}] \quad (1.39)$$

Finalmente el segmento  $da$   $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  es perpendicular a  $\mathbf{l}$ , como en el segmento  $bc$  el voltaje es cero

$$e_{ad} = 0 \quad [\text{V}] \quad (1.40)$$

Así el voltaje total inducido en la espira  $e_{\text{ind}}$  está dado por

$$e_{\text{ind}} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad} = \begin{cases} 2vBl & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{más allá de los extremos de los polos} \end{cases} \quad [\text{V}] \quad (1.41)$$

Cuando la espira rota  $180^\circ$ , el segmento  $ab$  está bajo la cara polar norte y no en la cara polar sur, en ese momento la dirección del voltaje del segmento se invierte, pero su magnitud permanece constante, la figura 1-17 muestra el voltaje resultante  $e_{\text{tot}}$  en función del tiempo. *He aquí una explicación a lo comentado acerca de que las máquinas de cd en realidad manejan corrientes y voltajes de ca internamente*, en pocas palabras mientras la espira esté bajo las caras polares habrá un voltaje y por el contrario mientras la espira está fuera de las caras polares no habrá voltaje.

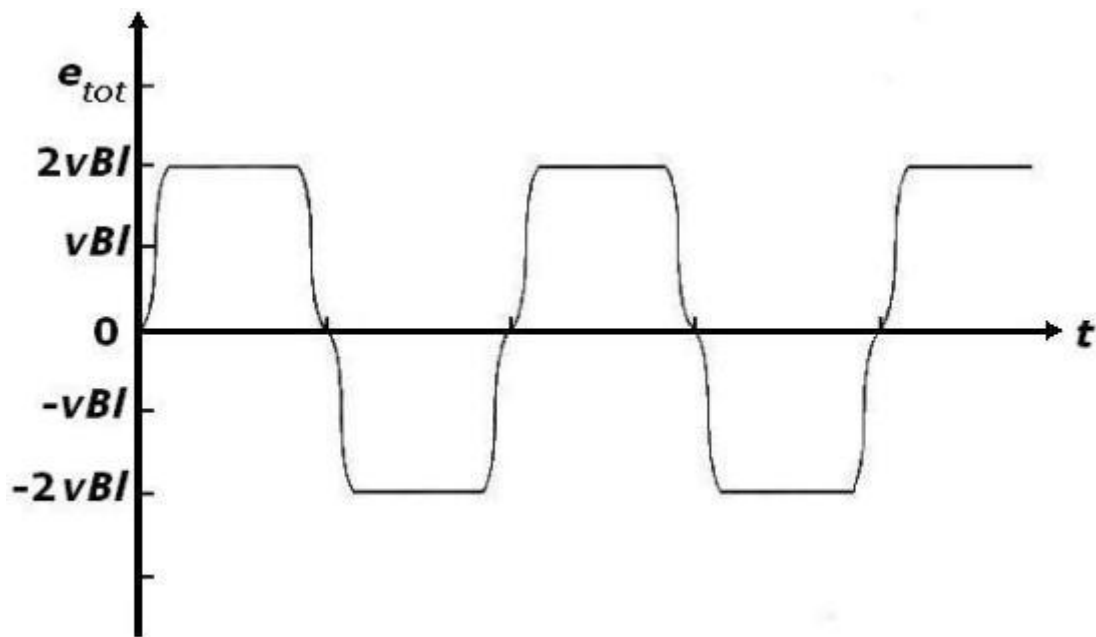


Figura 1-17. Voltaje de salida de la espira.

Para relacionar de forma más clara el comportamiento de la espira en una máquina de corriente directa real, existe una forma alternativa de expresar la ecuación 1.41; para lo cual se examina la figura 1-18. Donde la velocidad tangencial  $v$  de los extremos de la espira puede ser expresada como

$$v = r\omega$$

donde  $r$  es el radio, tomado desde el eje de rotación, hasta el borde de la espira, y  $\omega$  es la velocidad angular del lazo. Sustituyendo esta expresión en la ecuación 1.41 se obtiene

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} 2r\omega Bl & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{más allá de los extremos polares} \end{cases}$$

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} 2rB\omega & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{más allá de los extremos polares} \end{cases}$$

De la misma figura 1-18 se observa que la superficie del rotor es un cilindro, de modo que el área de la superficie del rotor  $A$  es igual a  $2\pi rl$ , puesto que hay dos polos, el área del rotor bajo cada polo (ignorando las pequeñas separaciones entre polos) es  $A_p = \pi rl$ , entonces

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} A_p B \omega & \text{las caras polares} \\ 0 & \text{más allá de los extremos de los polos} \end{cases}$$

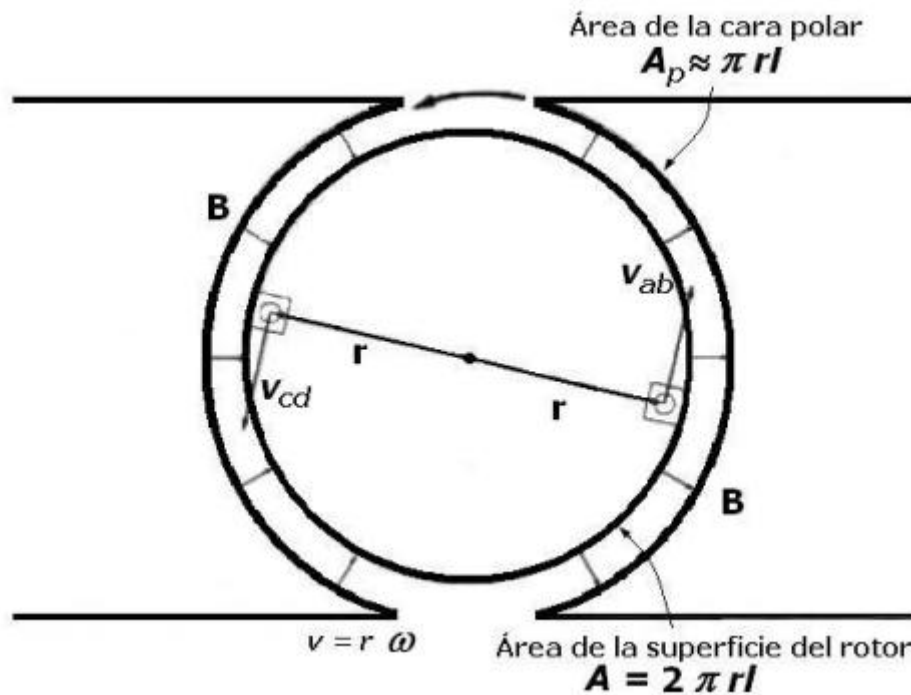


Figura 1-18. Dedución de una forma alternativa de la ecuación de voltaje inducido.

Puesto que la densidad de flujo  $B$  es constante en todo punto del entrehierro, el flujo total bajo cada polo es igual al área del polo multiplicada por su densidad de flujo

$$\phi = A_p B$$

la forma final de la ecuación de voltaje es

$$e_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi \omega & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{más allá de los extremos de los polos} \end{cases} \quad [\text{V}] \quad (1.42)$$

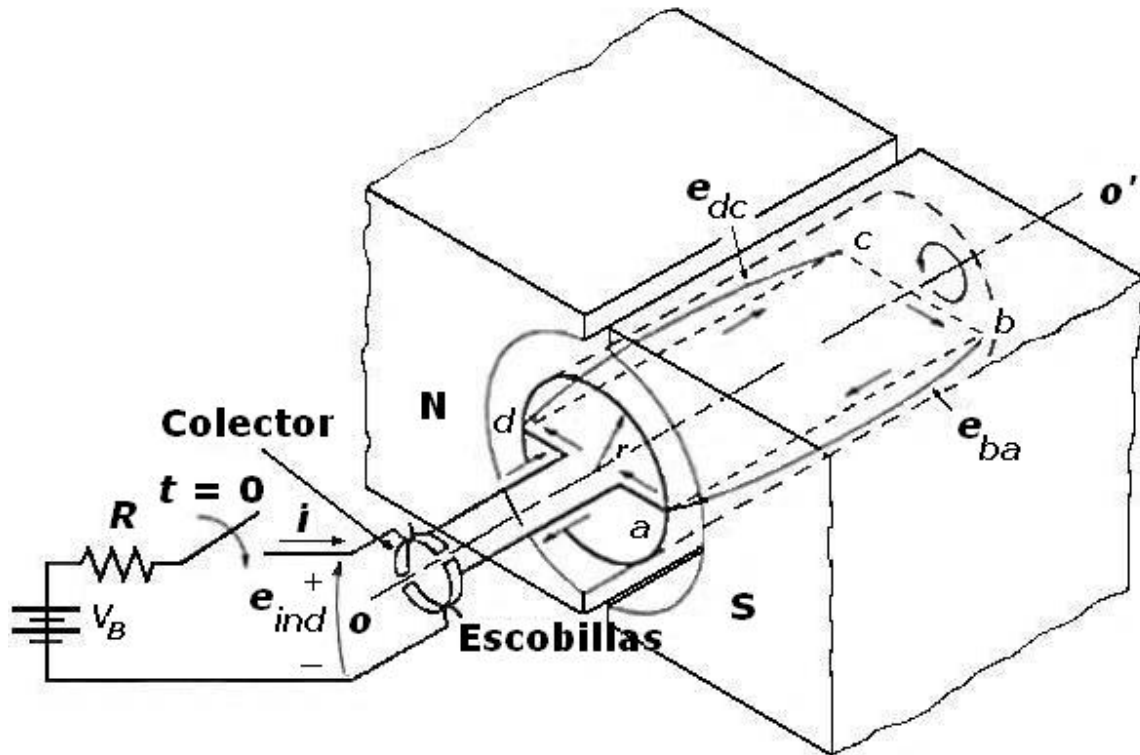
Entonces se puede concluir que *el voltaje generado en la máquina es igual al producto del flujo interno de la máquina y la velocidad de rotación de la máquina, multiplicados por una constante que representa la construcción mecánica de la máquina*, esto es el voltaje en toda máquina real depende de tres factores:

1. El flujo de la máquina.
2. La velocidad de rotación.
3. Una constante que representa la construcción de la máquina.

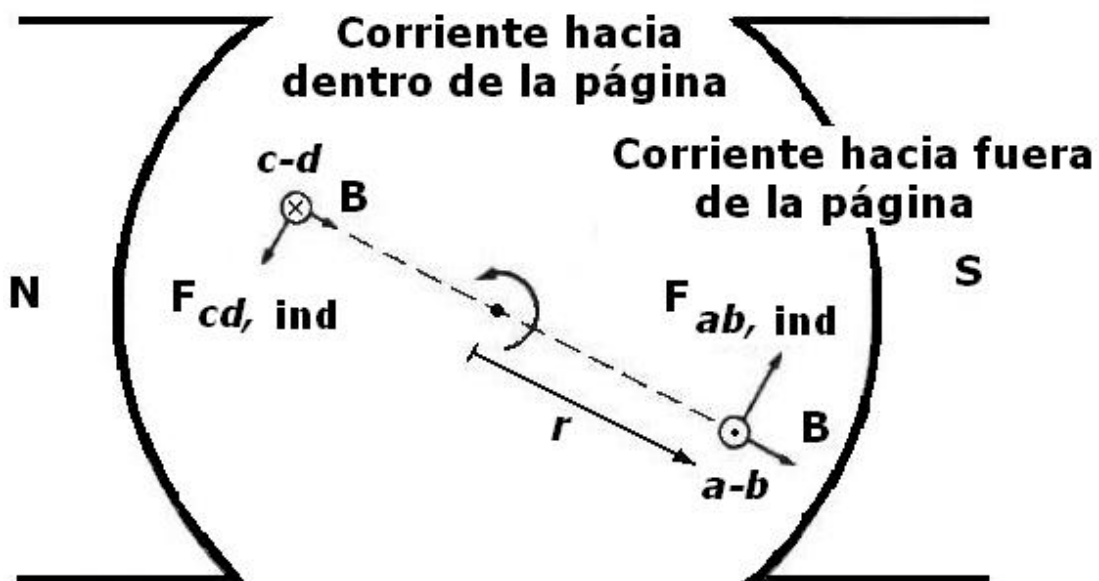


## Par inducido en la espira rotatoria

La figura 1-19a es la misma máquina rotatoria de cd sencilla sólo que ahora tiene conectada una batería. *Para determinar el par que se produce al cerrar el interruptor y permitir el flujo de corriente por la espira, es algo similar a lo explicado anteriormente, en donde se analiza por separado cada segmento de la espira y luego sumar los efectos de los segmentos individuales (Figura 1-19b).*



a.



b.

Figuras 1-19a y 1-19b. Deducción de una ecuación para el par inducido en la espira.

La fuerza inducida sobre un segmento de la espira está dado por la ecuación,

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}] \quad (1.43)$$

que es la ecuación de la fuerza sobre una espira conductora en presencia de un campo magnético.

donde  $\mathbf{F}$  = fuerza sobre la espira (N).

$i$  = magnitud de la corriente en la espira (A).

$\mathbf{l}$  = longitud de la espira; la dirección de  $\mathbf{l}$  está definida por el flujo de corriente (m).

$\mathbf{B}$  = vector de densidad de flujo magnético (T).

y el par sobre el segmento está dado por

$$\tau = r F \text{ sen}\theta \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \text{ y } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.5)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre  $\mathbf{r}$  y  $\mathbf{F}$ . Anticipando un poco el par, es cero en todos los puntos en los que la espira está situada fuera de las caras polares.

En el segmento  $ab$  la corriente de la batería está dirigida hacia fuera de la página, el campo magnético bajo la cara polar apunta radialmente hacia fuera del rotor; por lo tanto la fuerza inducida sobre la espira está dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{ab} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= i\mathbf{l}B \quad \text{tangente a la dirección del movimiento} \quad [\text{N}] \quad (1.44) \end{aligned}$$

El par sobre el rotor, causado por esta fuerza es

$$\begin{aligned} \tau_{ab} &= rF \text{ sen}\theta \\ &= r(i\mathbf{l}B)\text{sen}90^\circ \\ &= r\mathbf{l}B \quad \text{en sentido contrario a las manecillas del reloj} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.45) \end{aligned}$$

En el segmento  $bc$  la corriente de la batería fluye desde la parte superior izquierda hacia la inferior derecha, la fuerza inducida en la espira está dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{bc} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= 0 \quad \text{puesto que } \mathbf{l} \text{ es paralelo a } \mathbf{B} \quad [\text{N}] \quad (1.46) \end{aligned}$$

Entonces

$$\tau_{bc} = 0 \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \text{ ó } [\text{lb} \cdot \text{ft}] \quad (1.47)$$

Para el segmento  $cd$  la corriente de la batería está dirigida hacia dentro de la página, el campo magnético bajo la cara polar apunta radialmente hacia dentro del rotor; por lo tanto la fuerza sobre la espira está dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{cd} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= i l B \quad \text{tangente a la dirección del movimiento} \quad [\mathbf{N}] \end{aligned} \quad (1.48)$$

El par sobre el rotor, causado por esta fuerza es

$$\begin{aligned} \tau_{cd} &= r F \sin\theta \\ &= r(i l B) \sin 90^\circ \\ &= r i l B \quad \text{en sentido contrario a las manecillas del reloj} \quad [\mathbf{N} \cdot \mathbf{m}] \text{ ó } [\mathbf{lb} \cdot \mathbf{ft}] \end{aligned} \quad (1.49)$$

Y el último segmento  $da$  la corriente de la batería fluye desde la parte superior izquierda hacia la inferior derecha, la fuerza inducida en la espira está dada por

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{da} &= i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \\ &= 0 \quad \text{puesto que } \mathbf{l} \text{ es paralelo a } \mathbf{B} \quad [\mathbf{N}] \end{aligned} \quad (1.50)$$

Entonces

$$\tau_{da} = 0 \quad [\mathbf{N} \cdot \mathbf{m}] \text{ ó } [\mathbf{lb} \cdot \mathbf{ft}] \quad (1.51)$$

El par inducido resultante total en la espira está dado por

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ind}} &= \tau_{ab} + \tau_{bc} + \tau_{cd} + \tau_{da} \\ \tau_{\text{ind}} &= \begin{cases} \frac{2}{\pi} r i l B & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{por fuera de las caras polares} \end{cases} \quad [\mathbf{N} \cdot \mathbf{m}] \text{ ó } [\mathbf{lb} \cdot \mathbf{ft}] \end{aligned} \quad (1.52)$$

Dado que  $A_p = \pi r l$  y  $\phi = A_p B$ , la expresión del par se reduce a

$$\tau_{\text{ind}} = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \phi i & \text{bajo las caras polares} \\ 0 & \text{por fuera de las caras polares} \end{cases} \quad [\mathbf{N} \cdot \mathbf{m}] \text{ ó } [\mathbf{lb} \cdot \mathbf{ft}] \quad (1.53)$$

Para el par se concluye que, *el par producido en la máquina es el producto del flujo y la corriente en ella multiplicada por una cantidad que representa la construcción mecánica de la máquina* (el porcentaje del rotor cubierto por las caras polares), esto es el par en cualquier máquina real, depende de tres factores:

- a. El flujo de la máquina.
- b. La corriente de la máquina.
- c. Una constante que representa la construcción de la máquina.

Retomando el tema del voltaje ca en una máquina de cd, en específico la obtención del voltaje cd de salida de la espira rotatoria, la explicación se da a partir de la figura 1-17, que corresponde a una gráfica del voltaje  $e_{ot}$  generado por la espira rotatoria, como se observa el voltaje de salida de la espira toma alternadamente valores positivos y negativos de forma constante.

La forma en que una máquina de cd produce un voltaje de cd en lugar de un voltaje ca como lo muestra la gráfica; se adicionan al extremo de la espira dos segmentos conductores semicirculares y se sitúan dos contactos fijos en un ángulo tal que en el instante cuando el voltaje en la espira es cero, los contactos cortocircuitan los dos segmentos como lo muestra la figura 1-20.

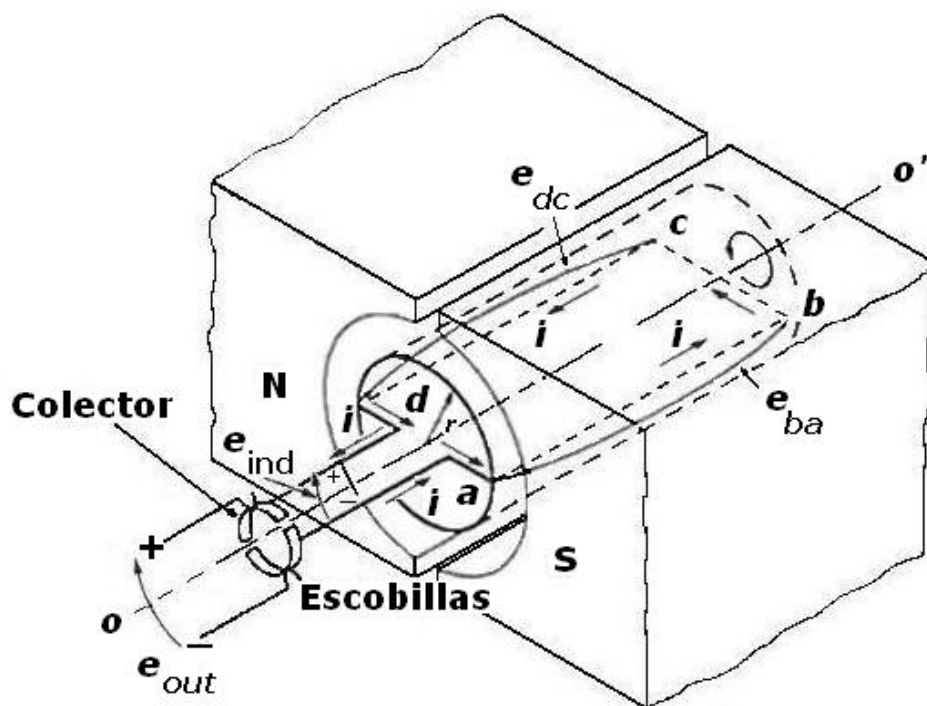


Figura 1-20. Producción de una salida de cd de la máquina con colector y escobillas.

De este modo, cada vez que el voltaje de la espira cambia de dirección, los contactos también cambian las conexiones, y la salida de los contactos está siempre construida de la misma manera (Figura 1-21).

Este proceso de cambio de conexión se conoce como conmutación y específicamente se da en la parte del colector y las escobillas por lo que conjuntamente se le llama conmutador. Y así para el modo de funcionamiento como generador, el voltaje alterno pasará a corriente de cd en las terminales y el colector funcionará como rectificador y para el funcionamiento como motor, el voltaje de cd de alimentación pasará a ser alterno en el interior de la máquina y el colector funcionará en este caso como inversor u ondulator. Finalmente obtendremos la gráfica de la figura 1-22.

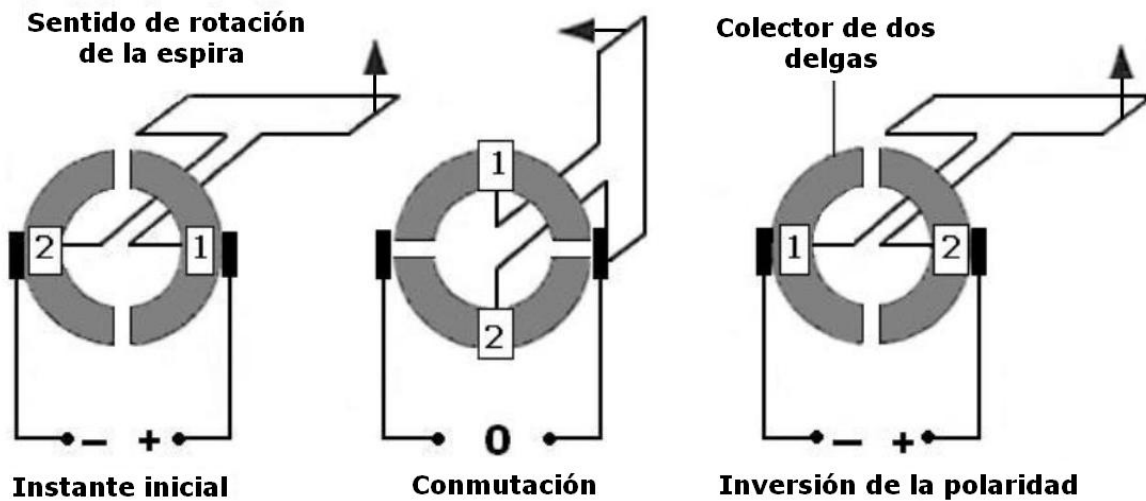


Figura 1-21. Funcionamiento de un colector elemental.

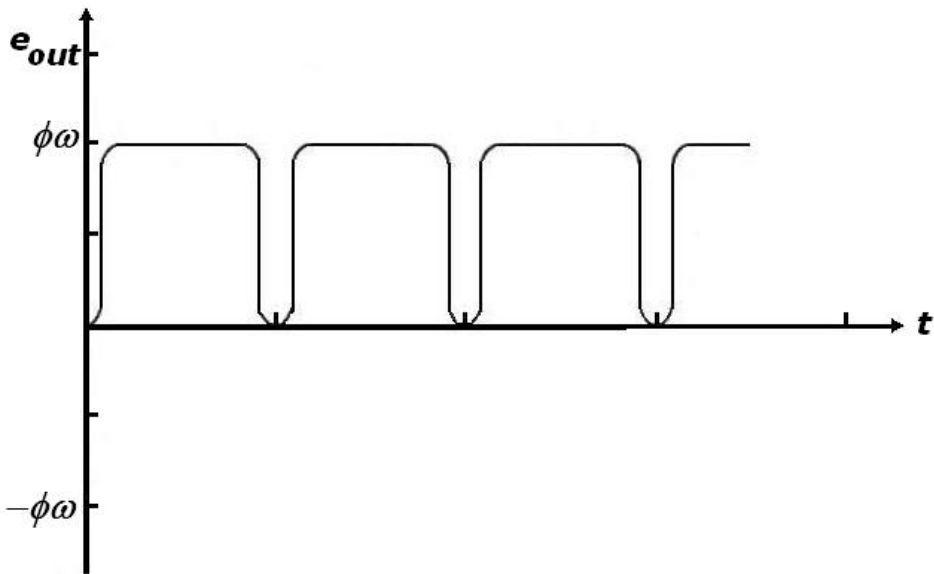


Figura 1-22. Voltaje de salida con conmutador.

### Conmutación.

Como ya se mencionó la *conmutación* es el proceso de convertir los voltajes y corrientes ca en el rotor de una máquina de cd en voltajes y corrientes de cd en sus terminales y por lo mismo esta parte es la más crítica y a la vez la más interesante de una máquina de cd. Por lo que se requiere un análisis más profundo para determinar como ocurre esta conversión.

Ya se explicó a grandes rasgos cómo se desarrolla el proceso de la conmutación, pero internamente este proceso se explica mediante la figura 1-23, que muestra una máquina sencilla de cuatro espiras y dos polos, que es un poco más compleja que la espira sencilla rotante de la sección anterior.

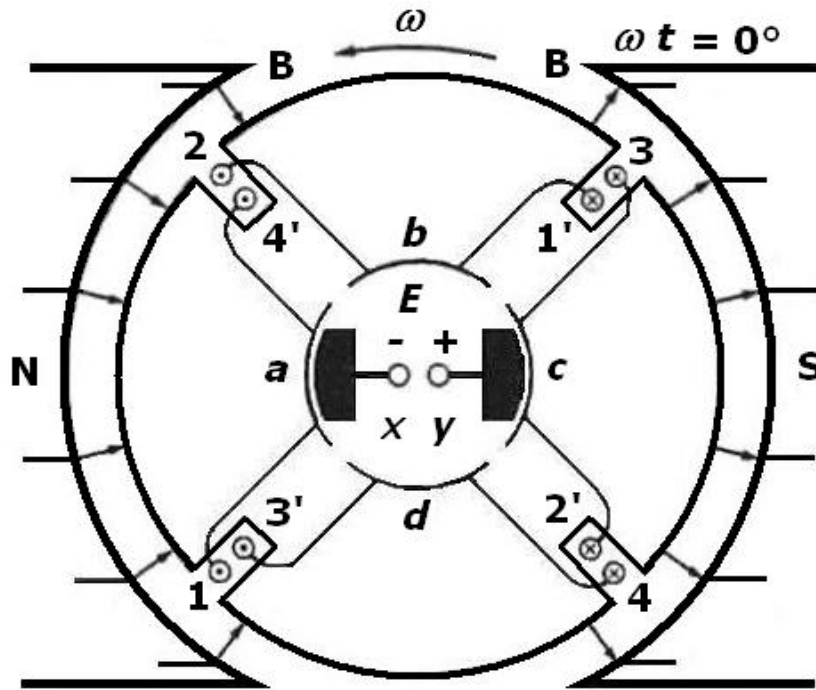


Figura 1-23. Máquina de cd de cuatro espiras y dos polos cuando  $\omega t = 0^\circ$ .

Esta máquina tiene cuatro espiras completas incrustadas en ranuras o muescas labradas en el acero laminado de este rotor y están dispuestas en las ranuras de manera especial, el lado de cada espira que no tiene comilla corresponde al alambre que está más afuera de la ranura, mientras que el lado de cada espira que tiene comilla corresponde al alambre que está en la parte más interna de la ranura directamente opuesta.

Las conexiones de los devanados al colector de la máquina se muestran en la figura 1-24, donde la espira 1 se tiende entre los segmentos  $a$  y  $b$ , la espira 2 se tiende entre los segmentos  $b$  y  $c$ , y así sucesivamente alrededor del rotor.

En el instante mostrado en la figura 1-23, los lados 1, 2, 3' y 4' de las espiras están bajo la cara polar norte, mientras que los lados 1', 2', 3 y 4 de las espiras, están bajo la cara polar sur.

El voltaje en cada uno de los lados 1, 2, 3' y 4' de las espiras está dado por

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad [\text{V}] \quad (1.36)$$

$$e_{\text{ind}} = vBl \quad \text{positivo hacia fuera de la página} \quad [\text{V}] \quad (1.54)$$

El voltaje en cada uno de los lados 1', 2', 3 y 4 de las espiras está dado por

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l} \quad [\text{V}] \quad (1.36)$$

$$e_{\text{ind}} = vBl \quad \text{positivo hacia dentro de la página} \quad [\text{V}] \quad (1.55)$$

Cada bobina representa cada lado de una espira, si el voltaje inducido en cada lado de una espira es  $e = vBl$ ,

$$E = 4e \quad \omega t = 0^\circ \quad (1.56)$$

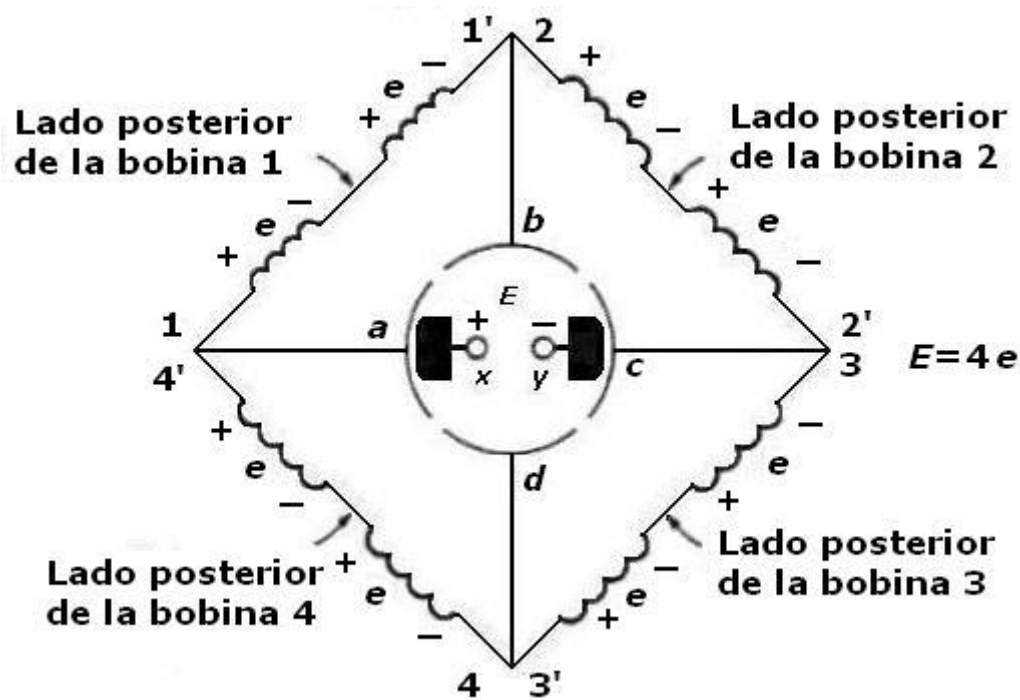


Figura 1-24. Voltajes en los conductores del rotor en  $\omega t = 0^\circ$ .

También hay que notar que tenemos dos caminos paralelos para las corrientes que circulan en la máquina, esta existencia de dos ó más caminos paralelos para la corriente del rotor es un rasgo común de todos los esquemas de conmutación.

Ahora si el rotor continúa girando el voltaje no será el mismo en  $0^\circ$  que a  $45^\circ$ , esto es, observando la figura 1-25 tenemos que  $\omega t = 45^\circ$ ; en este momento las espiras 1 y 3 han rotado en el espacio situado entre los polos de modo que el voltaje que circula en cada uno de ellos es cero y que las escobillas están cortocircuitando los segmentos de conmutación  $ab$  y  $cd$  (Figura 1-26). Esto ocurre en el momento justo en que las espiras situadas entre los segmentos tienen 0V en su interior, por lo cual el cortocircuitado de los segmentos no crea ningún problema.

Las espiras 2 y 4 se encuentran bajo las caras polares, de modo que el voltaje  $E$  en las terminales está dado por

$$E = 2e \quad \omega t = 45^\circ \quad (1.57)$$

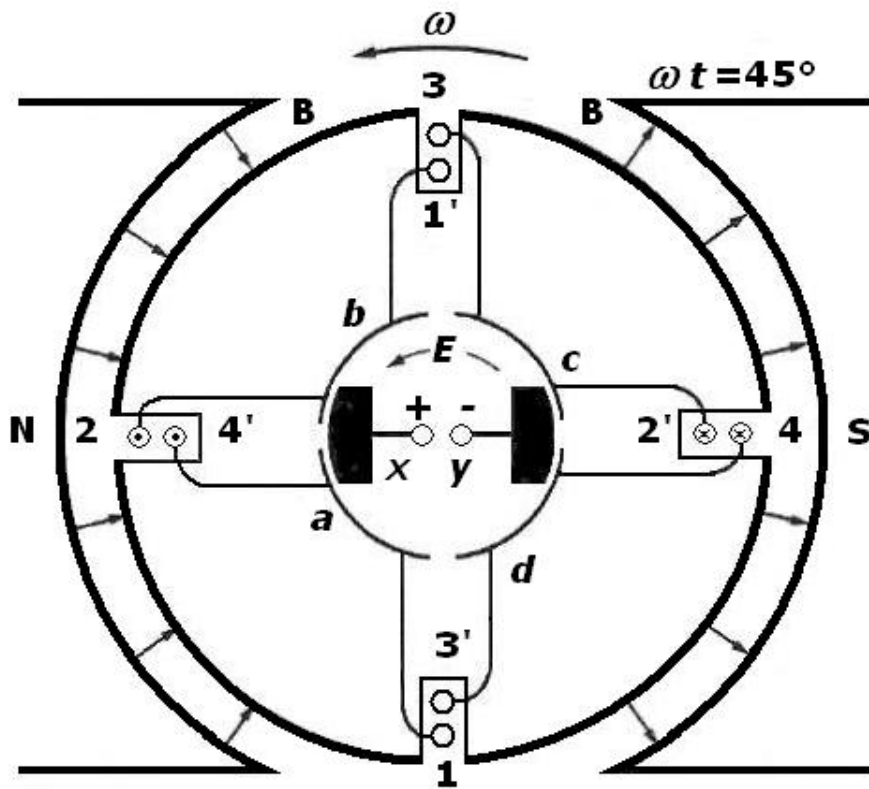


Figura 1-25. Misma máquina, en el instante  $\omega t = 45^\circ$ .

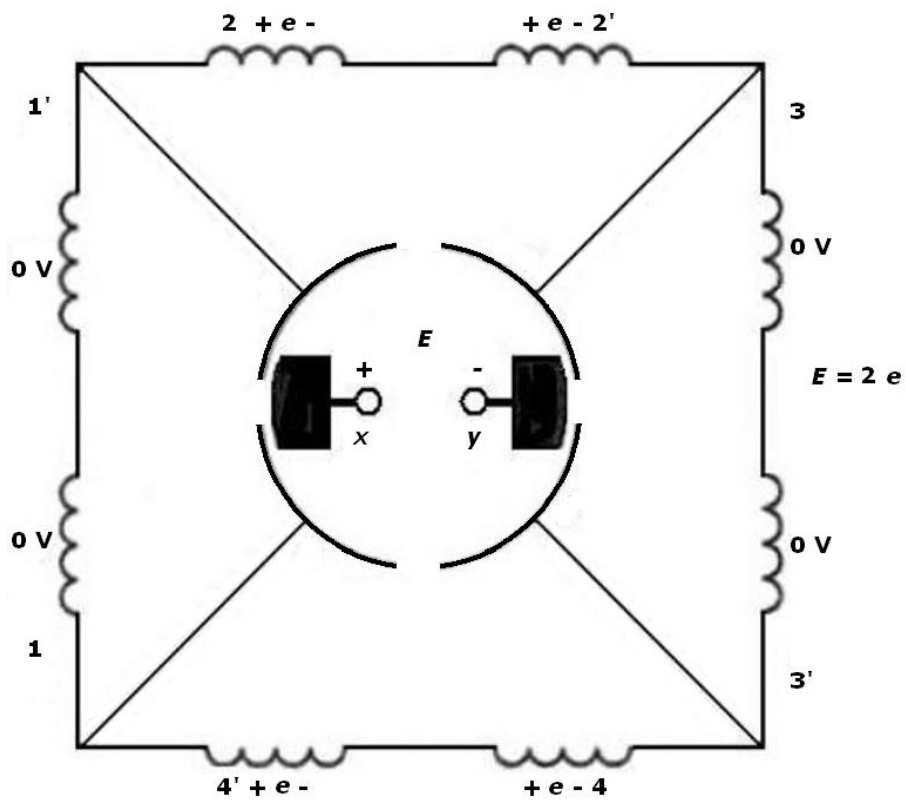


Figura 1-26. Voltajes en los conductores del rotor en  $\omega t = 45^\circ$ .



Ahora si se gira el rotor otros  $45^\circ$  resulta que los lados  $1'$ ,  $2$ ,  $3$  y  $4'$  de las espiras están bajo la cara polar norte y los lados  $1$ ,  $2'$ ,  $3'$  y  $4$  bajo la cara polar sur (Figura 1-27).

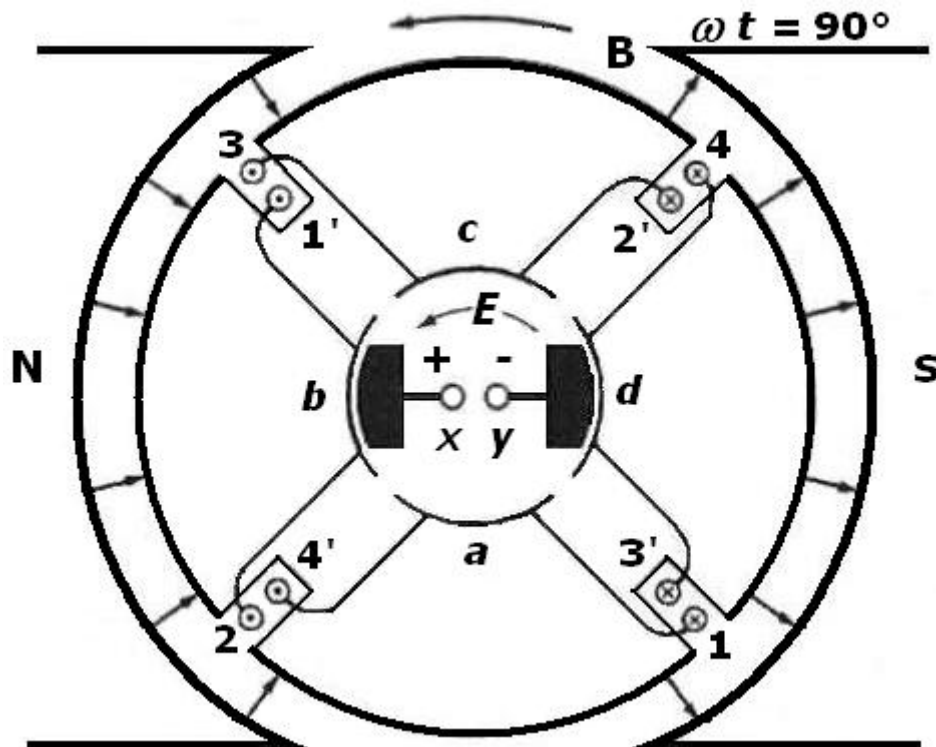


Figura 1-27. Misma máquina, en el instante  $\omega t = 90^\circ$ .

Los voltajes aún se forman hacia fuera de la página en los lados situados bajo la cara polar norte y hacia dentro de la página en los lados situados bajo la cara polar sur. El diagrama del voltaje resultante se muestra en la figura 1-28, en la que hay cuatro lados que llevan voltaje en cada camino en paralelo a través de la máquina, de modo que el voltaje en los terminales  $E$  está dado por

$$E = 4e \quad \omega t = 90^\circ \quad (1.58)$$

Si se hace una comparación de las figuras de la 1-23 a la 1-28, se observa que los voltajes en las espiras  $1$  y  $3$  se han invertido con respecto a los dos dibujos pero, puesto que también se han invertido sus conexiones, el voltaje total está formándose aún en la misma dirección que antes, esto lo demuestra el corazón de los esquemas de conmutación. Cuando el voltaje se invierte en una espira, las conexiones de la espira también son conmutadas y el voltaje total permanece formándose en la dirección original.

La figura 1-29 muestra el voltaje en los terminales de esta máquina en función del tiempo, ésta es una mejor aproximación a un nivel de  $cd$  constante que el producido por la espira rotacional sencilla que se utilizó como primer ejemplo. Cabe mencionar que cuando aumenta el número de espiras en el rotor, se obtiene una mejor aproximación a un voltaje de  $cd$  perfecto.

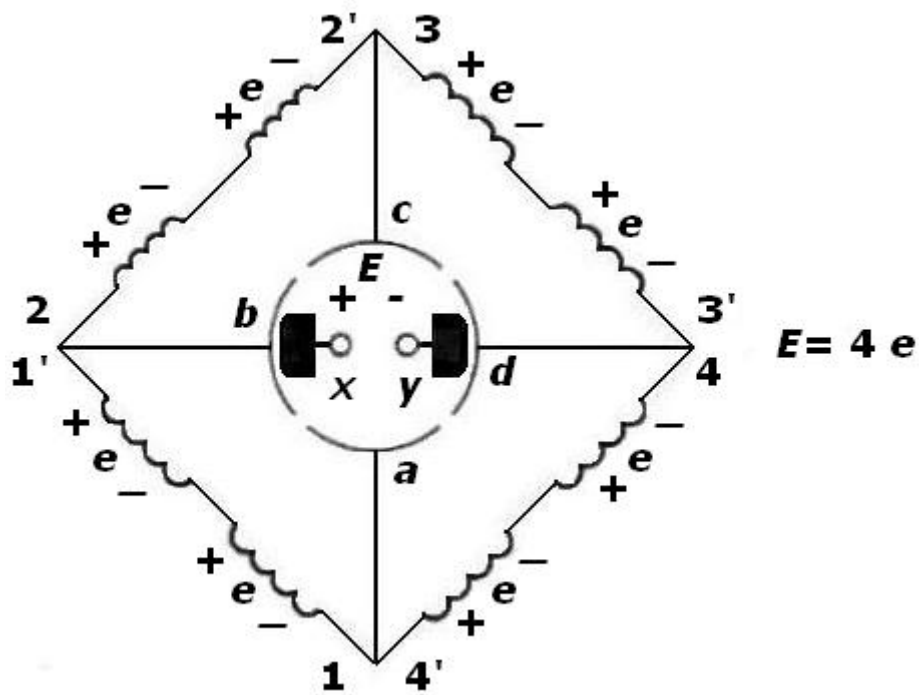


Figura 1-28. Voltajes en los conductores del rotor en  $\omega t = 90^\circ$ .

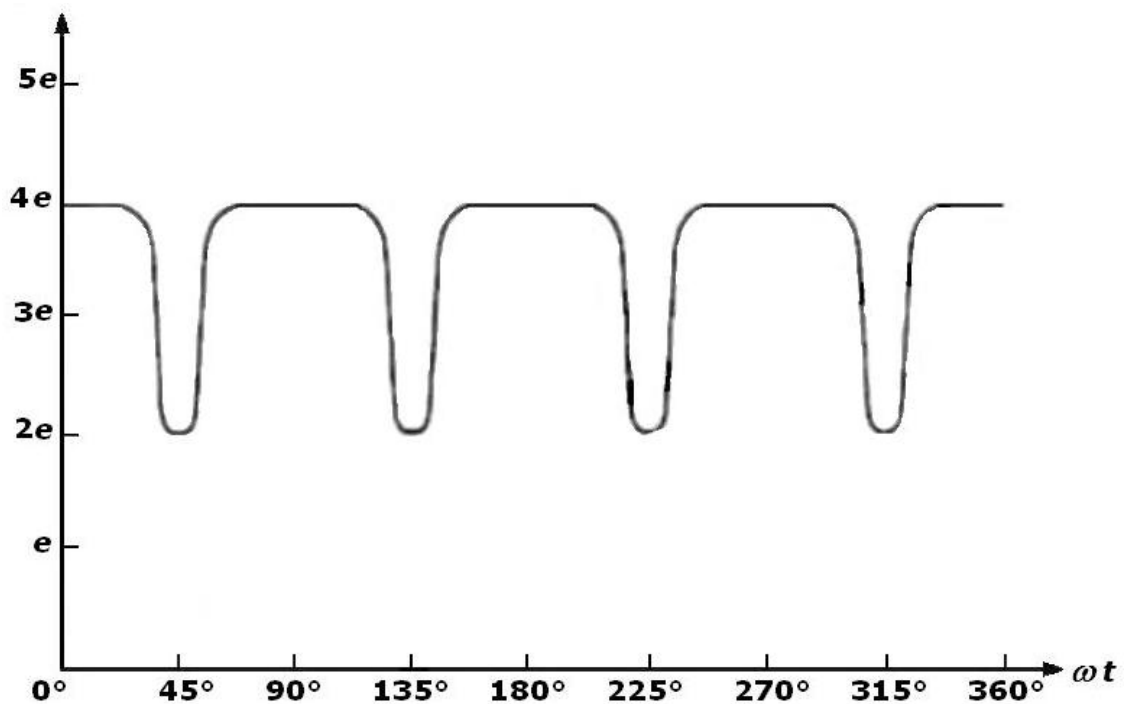


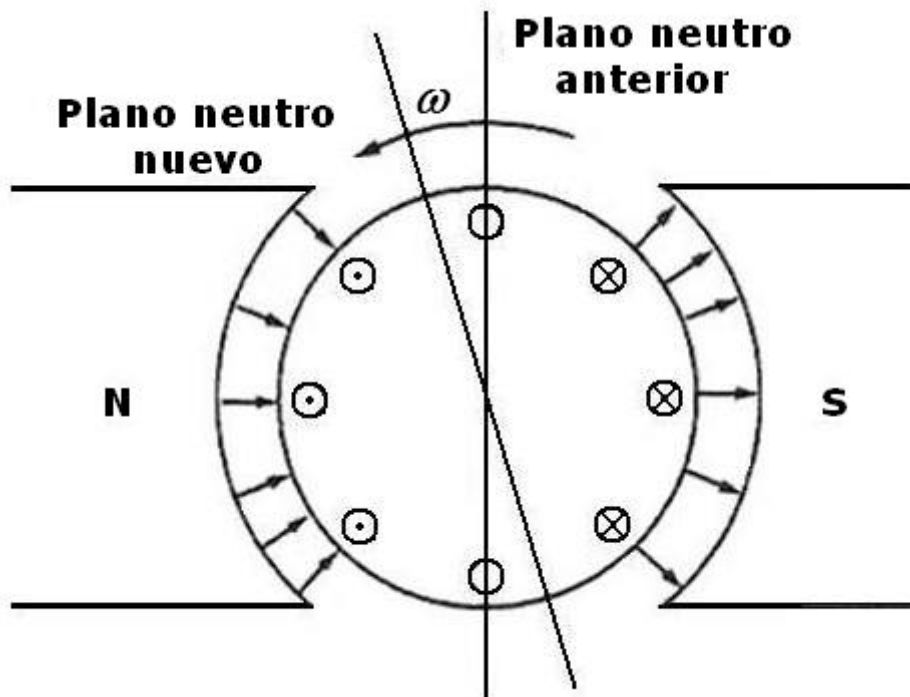
Figura 1-29. Voltaje de salida de la máquina de la figura 1-23.

Con todo lo expuesto anteriormente se deduce que *la conmutación es el proceso de cambiar las conexiones de la espira en el rotor de una máquina de cd justamente cuando el voltaje en la espira cambia de polaridad para mantener un voltaje de cd de salida constante en esencia.*

## Reacción del inducido.

El proceso de conmutación no es tan simple en la práctica debido a que existe un efecto que lo perturba. Este efecto se le nombra *reacción del inducido* y consiste en la *deformación que sufre el campo inductor o polar por efecto del campo magnético originado en la armadura cuando es recorrida por una corriente y por consiguiente causa dos problemas severos en las máquinas de cd reales.*

El primero de ellos es el *desplazamiento del plano neutro*, que es el plano interno de la máquina en que la velocidad de los alambres de la armadura está exactamente en paralelo con las líneas de flujo magnético, de modo que  $e_{ind}$  es cero en los conductores del plano. De la figura 1-30 se observa que los devanados de la armadura tienen voltajes que se forman hacia fuera de la página en los alambres que están bajo la cara polar norte y hacia dentro de la página en los alambres que están bajo la cara polar sur por lo tanto el plano neutro es por completo vertical.



**Figura 1-30. Flujo resultante bajo los polos. El plano neutro se ha desplazado en dirección del movimiento.**

La deformación del campo polar ocurre cuando este flujo de corriente produce un campo magnético en los devanados de la armadura, como se muestra en la figura 1-31, el cual afecta el campo magnético original lo que provoca que se distorsione el flujo magnético en el entrehierro de la máquina.

De la misma figura 1-30, el plano magnético neutro está desplazado en la dirección de rotación de un generador, para el caso de un motor, el plano neutro magnético se desplazaría al contrario. La cantidad que se desplazaría depende de la cantidad de corriente rotórica y de la carga de la máquina. Este desplazamiento provoca la formación de un arco y chispeo en las escobillas y en un caso extremo puede llevar a un flameo y el arco resultante puede hasta fundir la superficie del colector.

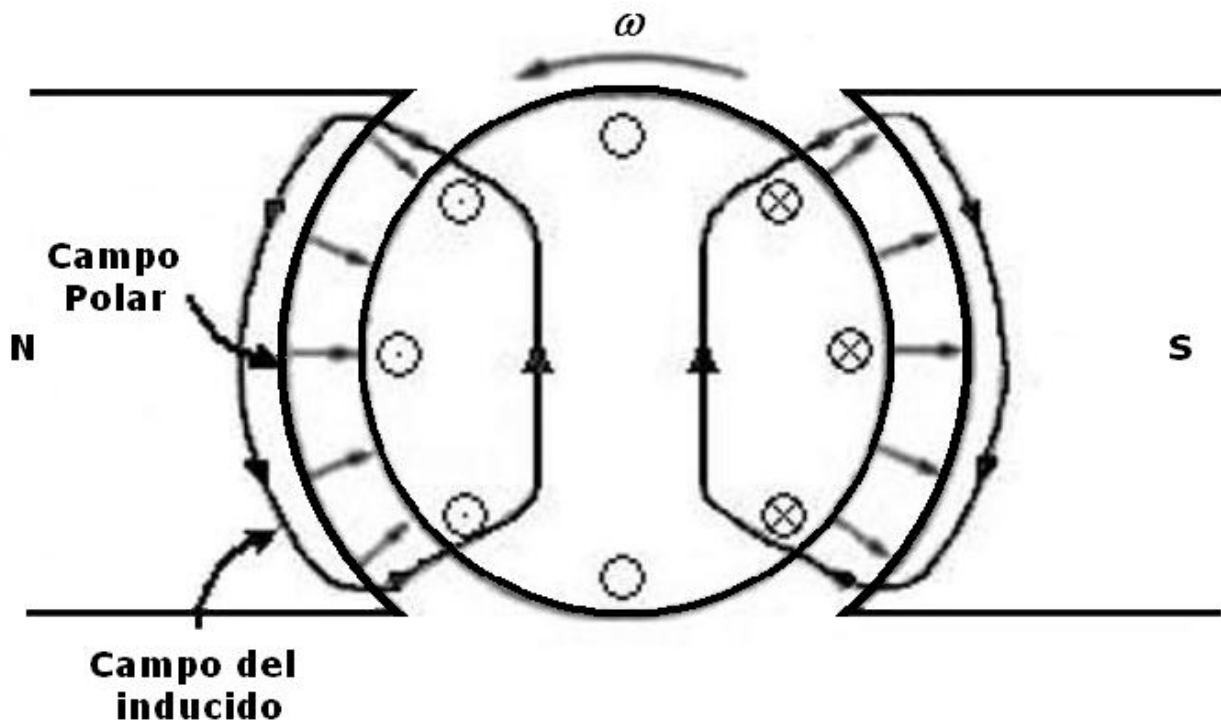


Figura 1-31. Flujos del rotor y polar, indicando puntos donde se suman y donde se restan.

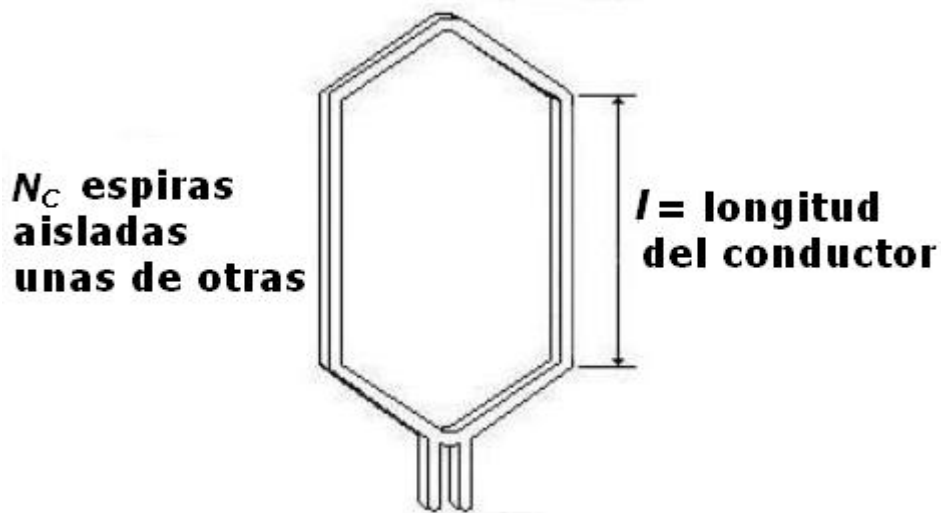
El segundo problema causado por la reacción del inducido es el *debilitamiento de campo*. En los generadores reduce el voltaje suministrado por el generador a cualquier carga, en los motores cuando disminuye el flujo aumenta la velocidad y a su vez la carga, esto causa, más debilitamiento del flujo y como resultado en algunos tipos de motores alcanzan la condición de giro desbocado en el cual la velocidad del motor se mantiene aumentando y si no se desconecta de la línea de potencia se llega a la destrucción.

Existen tres técnicas que ayudan a contrarrestar estos problemas que se presentan en la conmutación las cuales son; *el desplazamiento de las escobillas, la colocación de polos de conmutación o interpolos y los devanados de compensación*.

### **Devanados de la armadura.**

Se entiende por devanado, hilo de cobre aislado. Los devanados en anillo, se utilizaron durante las primeras etapas del desarrollo de motores y generadores de cd, actualmente ya no se usan, a causa de la lenta y costosa operación manual de pasar el hilo a través de la abertura central del núcleo, así como por la dificultad de sus reparaciones.

En las máquinas de cd reales existen varias formas de conectar los devanados del rotor a sus *segmentos de conmutación*, pero independientemente de la forma de conexión la mayoría de los devanados del rotor constan de bobinas preformadas en forma de diamante (Figura 1-32), las cuales están insertas dentro de las ranuras del inducido como una sola unidad.



**Figura 1-32. Forma de una bobina preformada típica del rotor.**

Cada bobina tiene un número de vueltas (espiras) de alambre y cada vuelta es encintada y aislada de las otras vueltas y de la ranura de la armadura, cada lado de una vuelta se denomina conductor. El número de conductores en el inducido de la máquina está dado por

$$Z = 2CN_C \quad (1.59)$$

donde  $Z =$  número de conductores en la armadura.

$C =$  número de bobinas en la armadura.

$N_C =$  número de vueltas por bobina.

Normalmente, una bobina abarca  $180^\circ$  eléctricos, esto significa que cuando un lado está en el centro de un polo magnético dado, el otro lado está bajo el centro de un polo de polaridad opuesta. Los polos quizá no estén distanciados  $180^\circ$  mecánicos, pero el campo magnético invierte por completo su polaridad al trasladarse de un polo al siguiente. La relación

$$\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m \quad (1.60)$$

donde  $\theta_e =$  ángulo eléctrico, en grados.

$\theta_m =$  ángulo mecánico en grados.

$P =$  número de polos magnéticos de la máquina.

Si una bobina abarca  $180^\circ$  eléctricos, los voltajes de los conductores en cada lado de la bobina serán exactamente iguales en magnitud y tendrán direcciones opuestas todo el tiempo, tal bobina se llama *bobina de paso diametral*.

Si se construye una bobina que abarca menos de 180° eléctricos es llamada *bobina de paso fraccionario*, un devanado de armadura embobinado con bobinas de paso fraccionario se llama *devanado de cuerdas*. La cantidad de encordado en un devanado está descrita por el *factor de paso p* definido por la ecuación

$$p = \frac{\text{Ángulo eléctrico de la bobina}}{180^\circ} \times 100\% \quad (1.61)$$

La mayoría de los devanados rotóricos son devanados de doble capa lo cual significa que los lados de dos bobinas diferentes están insertos en cada ranura. Uno de los lados de cada bobina estará en la parte inferior de la ranura, el otro lado estará en la parte superior de la misma.

El montaje de estos devanados requiere que las bobinas individuales sean colocadas en las ranuras de la armadura mediante un proceso muy elaborado. Uno de los lados de cada una de las bobinas se coloca en la parte inferior de su ranura, y después que todos los lados inferiores están colocados en su lugar, el otro lado de cada bobina se pone en la parte superior de su ranura, de este modo, todos los devanados se entretejen conjuntamente para aumentar la resistencia mecánica y dar uniformidad a la estructura final.

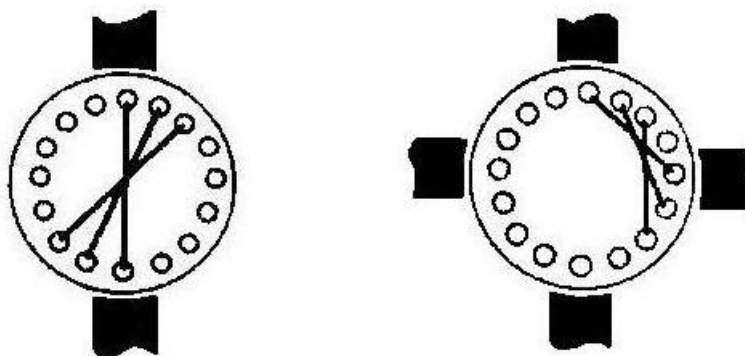


Figura 1-33. Paso de dos polos y paso de cuatro polos.

Una vez instalados los devanados en las ranuras de la armadura, deben conectarse a los segmentos de conmutación. Existen varias formas de hacer estas conexiones.

La distancia entre los segmentos de conmutación o de colector a los cuales se conectan los dos extremos de una bobina, se llama *paso de colector y<sub>C</sub>*. Si el final de una bobina está conectado a un segmento de colector situado delante de aquel en el cual está conectado su comienzo, el devanado se llama *devanado progresivo*, pero si el final de una bobina está conectado a un segmento de colector situado detrás de aquel al cual está conectado su comienzo, el *devanado* se llama *regresivo*. Si todo lo demás es idéntico, la dirección de una armadura con devanado progresivo será opuesta a la dirección de rotación de una armadura con devanado regresivo.

Los devanados de la armadura se clasifican de acuerdo con los grupos completos de ellos dispuestos en el rotor. Un devanado simple de armadura es un devanado único, completo, cerrado sobre el rotor. Un devanado doble de armadura es aquel que consta de dos grupos completos e independientes de devanados en el rotor, por ejemplo, si una armadura tiene un devanado doble, entonces cada uno de los devanados será asociado a cada dos segmentos de conmutación esto es, uno de los devanados estará conectado a los segmentos 1, 3, 5, etc., y el otro devanado estará conectado a los segmentos 2, 4, 6, etc.

Otro ejemplo es, un devanado triple que tendrá tres grupos completos e independientes de devanados, cada uno de los cuales estará conectado a cada tercer segmento de conmutación. En conjunto toda armadura con más de un grupo de devanados tienen devanados múltiples.

Los devanados de la armadura se clasifican de acuerdo con la secuencia de sus conexiones a los segmentos de conmutación y las dos secuencias básicas de conexión son los devanados imbricados y devanados ondulado. Existe un tercer tipo de devanado llamado devanado anca de rana, el cual combina los devanados imbricado y ondulado en la misma armadura.

### **Devanado Imbricado.**

El devanado sencillo en paralelo o imbricado es el tipo más sencillo y consiste en la conexión de una o más vueltas de alambre con los dos extremos de cada bobina a segmentos de conmutación adyacentes. Si es devanado imbricado progresivo tenemos que  $y_C=1$ ; pero si es devanado imbricado regresivo tenemos que  $y_C=-1$  (Figura 1-34).

Una característica de los devanados imbricados simples es que hay tantas trayectorias de corriente en paralelo a través de la máquina como polos en ella. Si  $C$  es el número de bobinas y segmentos de conmutación presentes en la armadura y  $P$  es el número de polos de la máquina, habrá  $C/P$  bobinas en cada una de las  $P$  trayectorias de corriente paralelas a través de la máquina. El hecho de que haya  $P$  trayectorias de corriente requiere también que haya tantas escobillas como polos en las máquinas para conectar todas esas trayectorias de corriente.

Por consiguiente si hay tantas trayectorias de corriente en paralelo en una máquina multipolar como la mostrada en la figura 1-35a, permite que el devanado imbricado sea el indicado para máquinas de bajo voltaje y altas corrientes, ya que éstas pueden ser repartidas entre las diferentes trayectorias. Esta división de corrientes permite que el tamaño de los conductores individuales de la armadura permanezca razonablemente pequeño, aunque la corriente total llegue a ser muy grande.

En general, en un devanado imbricado múltiple, el paso de conmutación  $y_C$  es

$$y_C = \pm m \quad \text{devanado imbricado} \quad (1.62)$$

Y el número de trayectorias de corriente en una máquina es

$$a = mP \quad \text{devanado imbricado} \quad (1.63)$$

donde  $a$  = número de trayectorias de corriente en la armadura.

$m$  = número de devanados completos independientes (1, 2, 3, etc.)

$P$  = número de polos de la máquina.

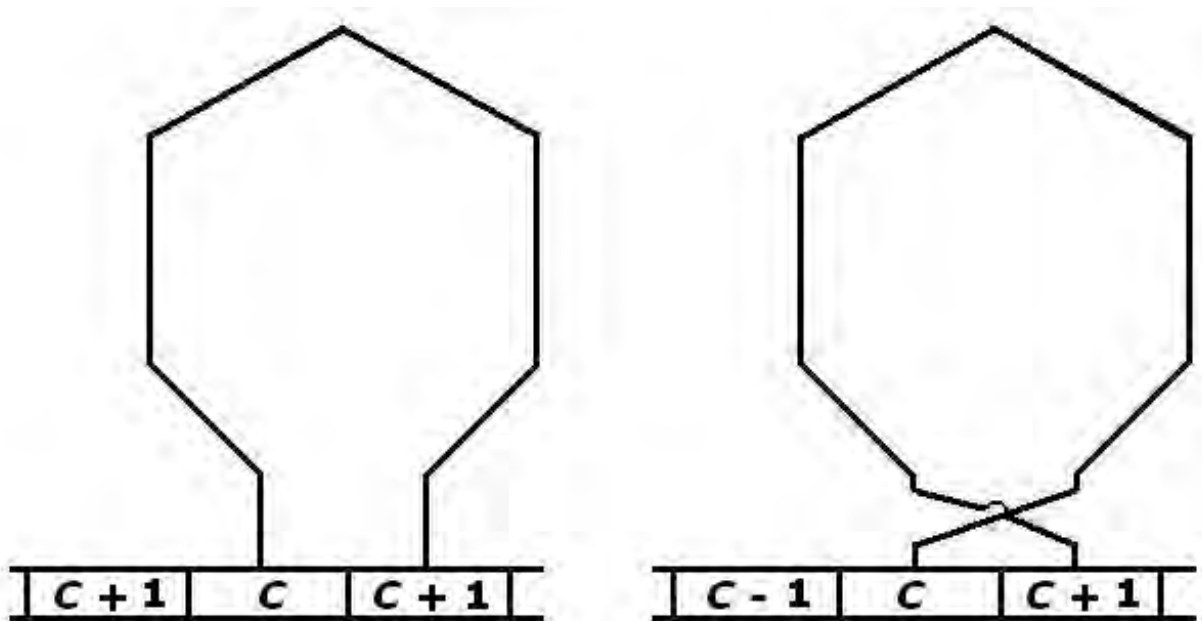
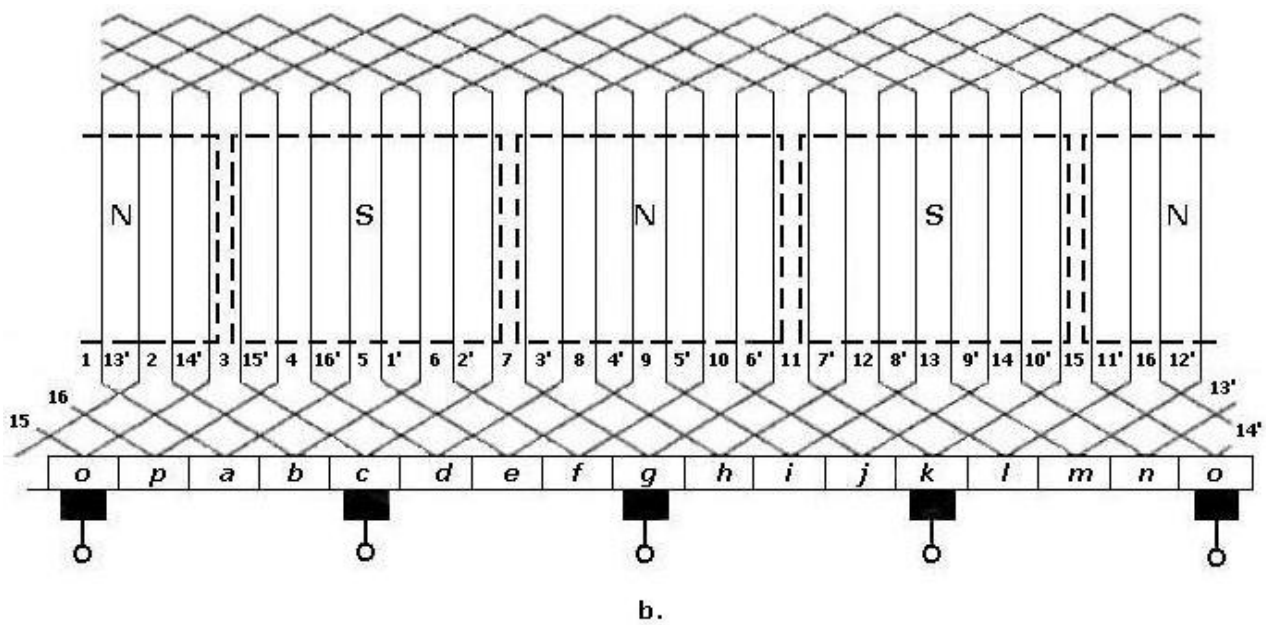
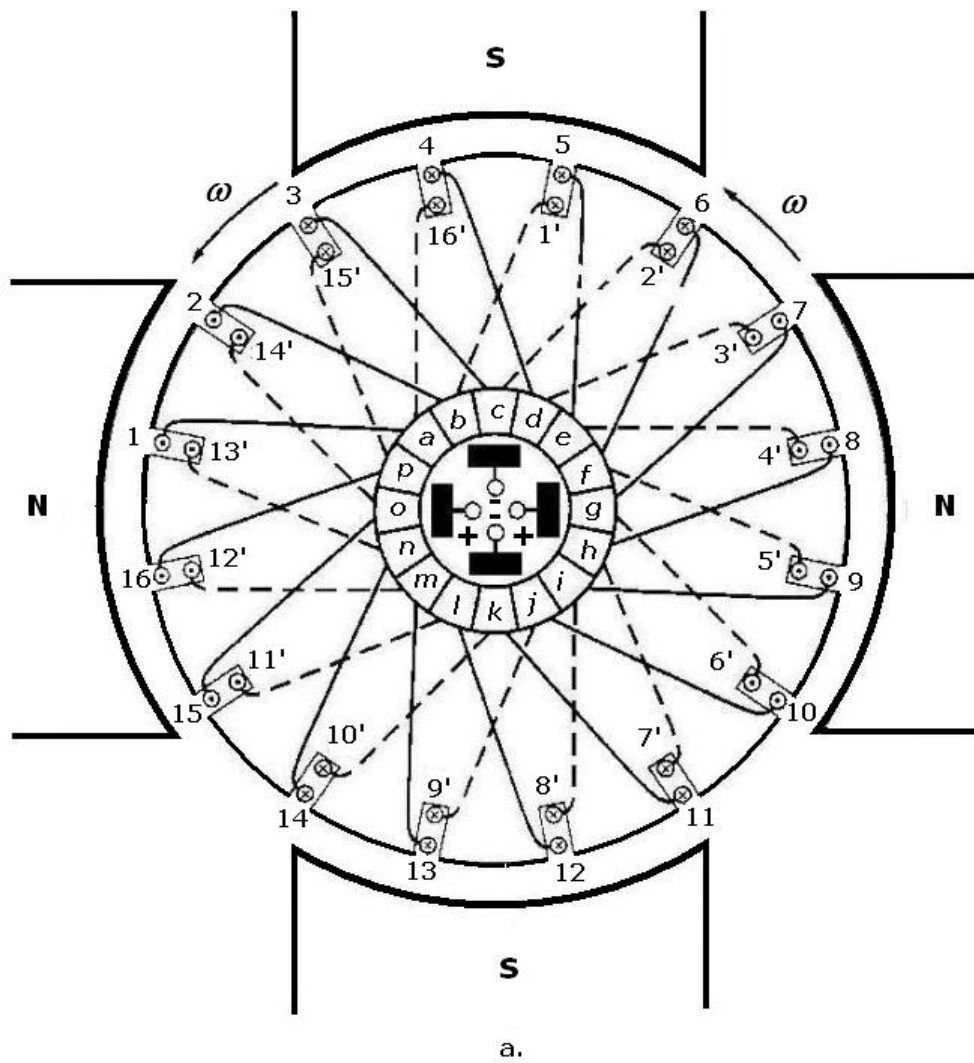


Figura 1-34. Bobina de un devanado progresivo y devanado regresivo de rotor.





Figuras 1-35a y 1-35b. Motor de cd de cuatro polos con devanado imbricado progresivo y diagrama de cableado.

## Devanado Ondulado.

El devanado serie u ondulado, llamado así por la forma en que progresan las bobinas sucesivas simulando un oleaje alrededor de la periferia de la armadura, es una forma alternativa para conectar las bobinas de la armadura a los segmentos de conmutación. La figura 1-36 muestra una máquina sencilla de cuatro polos con devanado ondulado simple, en que cada segunda bobina del rotor se conecta al segmento de colector posterior adyacente a aquel segmento en el cual se conectó el comienzo de la primera por lo cual tenemos dos bobinas en serie entre segmentos de conmutación adyacentes.

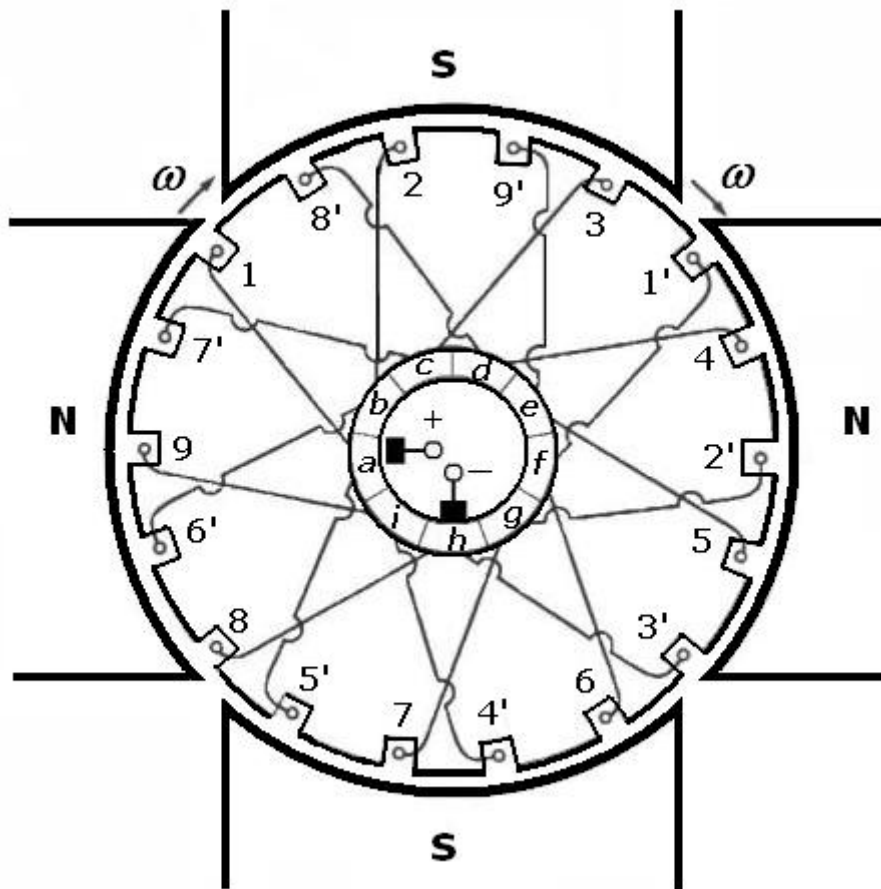


Figura 1-36. Máquina de cd sencilla de cuatro polos con devanado ondulado.

Puesto que cada par de bobinas situadas entre segmentos adyacentes tiene un lado bajo cada cara polar, todos los voltajes de salida son la suma de los efectos de cada polo y no puede haber desequilibrios de voltaje.

Para el caso de este tipo de devanado, la terminal de la segunda bobina puede ser conectada adelante o atrás del segmento al cual se ha conectado el comienzo de la primera bobina. Si la segunda bobina está conectada al segmento anterior de la primera bobina, el devanado es progresivo pero si está conectada al segmento posterior a la primera bobina es regresivo. En general, si hay  $P$  polos en la máquina, entonces hay  $P/2$  bobinas en serie entre segmentos adyacentes del colector.

En un devanado ondulado simple, hay dos trayectorias de corriente y  $C/2$  o la mitad del devanado en cada trayectoria de corriente, en tal máquina las escobillas estarán separadas una de otra a un paso polar completo.

La figura 1-36 muestra un devanado progresivo de nueve bobinas, el final de una bobina ocurre cinco segmentos delante de su punto de arranque. En un devanado ondulado regresivo, el final de la bobina ocurre cuatro segmentos delante de su punto de arranque. Por lo tanto el final de una bobina en un devanado ondulado de cuatro polos debe ser conectado justamente antes o justamente después del punto intermedio alrededor del círculo desde su arranque. La figura 1-37 muestra un diagrama de devanado de armadura ondulado simple.

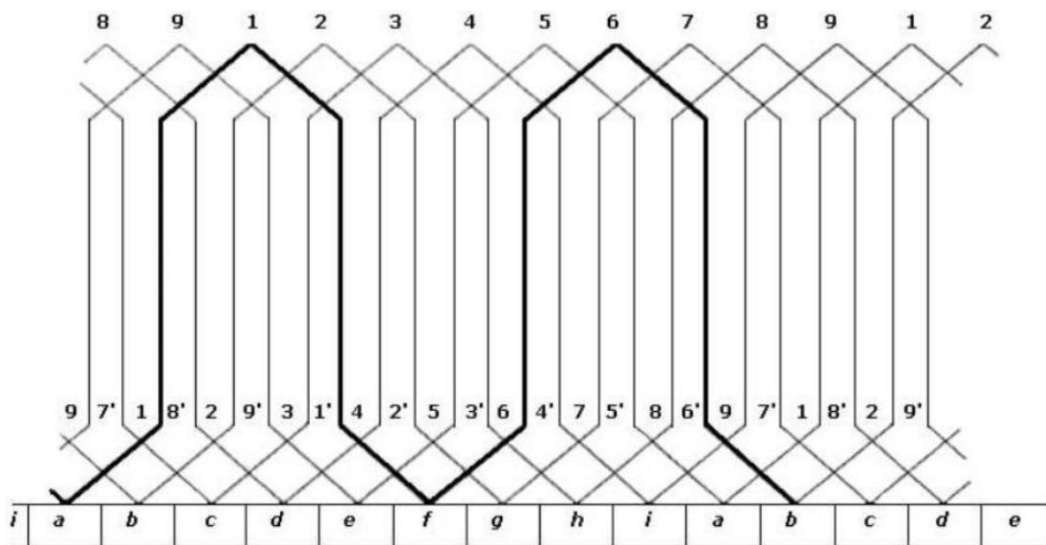


Figura 1-37. Diagrama de devanado ondulado progresivo del rotor, de la figura 1-36.

La expresión general para el paso de conmutación en cualquier devanado ondulado simple es

$$y_C = \frac{2(C \pm 1)}{P} \quad \text{ondulado simple} \quad (1.64)$$

donde  $C$  = número de bobinas de la armadura.

$P$  = número de polos de la máquina.

+ = signo asociado a los devanados progresivos.

- = signo asociado a los devanados regresivos.

Puesto que sólo hay dos trayectorias de corriente a través de una armadura de devanado ondulado simple, se requieren dos escobillas para manejar la corriente, esto se debe a que los segmentos en proceso de conmutación conectan los puntos de igual voltaje situados bajo todas las caras polares. Por esta razón los devanados ondulosos son los adecuados en la construcción de máquinas de cd de bajo voltaje puesto que el número de bobinas en serie entre segmentos de conmutación permite formar un alto voltaje con más facilidad que en los devanados imbricados.

Un devanado ondulado múltiple es aquel que tiene múltiples grupos independientes de devanados ondulados en la armadura, cada uno de estos grupos extras de devanados tiene dos trayectorias de corriente, por lo cual el número de trayectorias de corriente en un devanado ondulado múltiple es

$$a = 2m \quad \text{ondulado múltiple} \quad (1.65)$$

### Devanado anca de rana.

El devanado anca de rana o devanado autocompensador recibe su nombre por la forma de sus bobinas y consiste en una combinación de un devanado imbricado y un devanado ondulado (Figura 1-38).



Figura 1-38. Bobina de un devanado pata de rana o autocompensador.

Este devanado autocompensador se usa ya que la resistencia del devanado en el circuito de la armadura es tan pequeña y el más leve desequilibrio entre los voltajes de trayectorias en paralelo ocasionará grandes corrientes circulantes a través de las escobillas y serios problemas potenciales de calentamiento.

Así en un devanado imbricado normal, los compensadores están conectados en puntos de igual voltaje de los devanados, los devanados ondulados se extienden entre puntos de igual voltaje bajo caras polares sucesivas de la misma polaridad, las cuales son los mismos que unen los compensadores. Un devanado anca de rana hace la combinación de modo que los devanados ondulados pueden funcionar como compensadores para el devanado imbricado.

El número de trayectorias de corriente presente en un devanado anca de rana es

$$a = 2Pm_{lap} \quad \text{devanado anca de rana} \quad (1.66)$$

donde  $P$  = número de polos de la máquina.

$m_{lap}$  = múltiplo del devanado imbricado.

## 1.5 Generadores de corriente directa.

Los generadores de corriente directa funcionan a través de la formación de un campo electromagnético generado por una corriente directa procedente de una fuente externa o del propio generador. El abastecimiento de la corriente directa para alimentar los campos del estator se llama *excitación*, función que puede ser ejercida por una batería o por otro generador de pequeña capacidad denominado *excitador*.

Cuando los campos del estator tienen que excitarse por separado, el generador se denomina *excitación independiente* y cuando parte de la tensión generada por el generador se aprovecha para realizar la excitación de los campos, el generador se denomina *autoexcitado*.

En un generador de cd ya sea excitado de forma separada o autoexcitado, las cantidades de salida son su voltaje en terminales y su corriente de línea, por lo tanto la característica en terminales de un generador de cd es una gráfica de  $V$  contra  $I$  a una velocidad constante ( $\omega$ ).

### Generador de excitación independiente.

La figura 1-39 representa el circuito de un generador de excitación independiente del cual se observa que está formado por dos circuitos distintos, el de campo, constituido por los devanados del estator, y el circuito constituido por la armadura. Este tipo de generador tiene sus ventajas y sus inconvenientes, siendo el principal de éstos su tamaño grande en relación con los demás tipos. En contraparte, tiene la ventaja de permitir el ajuste de la tensión de salida por medios muchos más sensibles, tales como mandos electromecánicos, servomecanismos, amplificadores y otros sistemas que actúan en el circuito de campo.

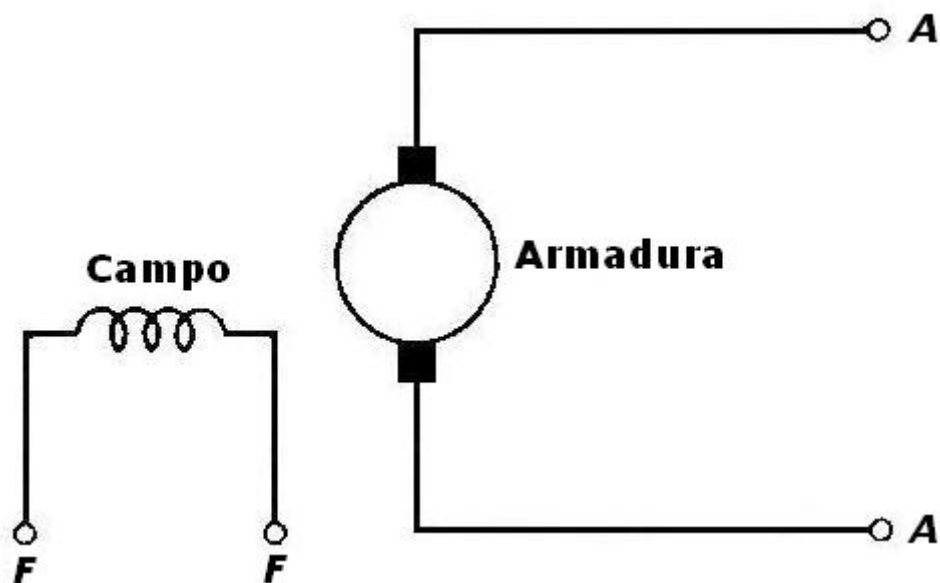


Figura 1-39. Circuito de un generador de excitación independiente.

Puesto que el voltaje generado es independiente de la armadura, la característica en los terminales de un generador de excitación independiente es una línea recta (Figura 1-40). Cuando aumenta la carga se incrementa la corriente en la armadura por lo tanto también se incrementa la caída  $IR$  (de la armadura) y cae el voltaje en los terminales del generador, aunque si se tienen devanados de compensación la situación cambia, (estos devanados compensadores son necesarios en todos los tipos de generadores). Por lo anterior y porque también la polaridad de la tensión de salida puede invertirse con facilidad, en este tipo de generadores se emplean cuando el control de las características de la tensión de salida es indispensable para la realización de un determinado servicio.

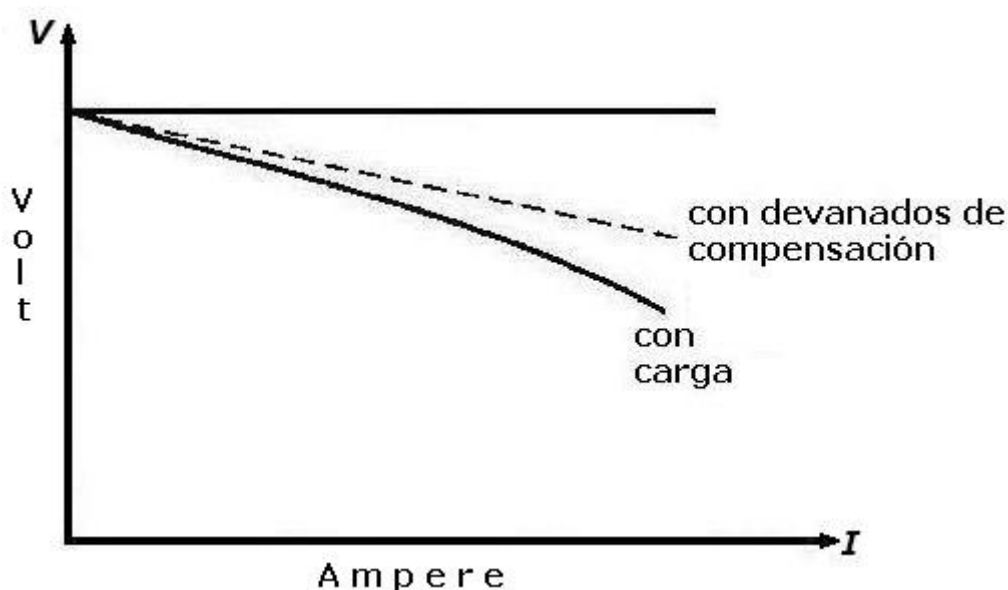


Figura 1-40. Característica de los terminales de un generador de cd excitación independiente.

### Generadores autoexcitados.

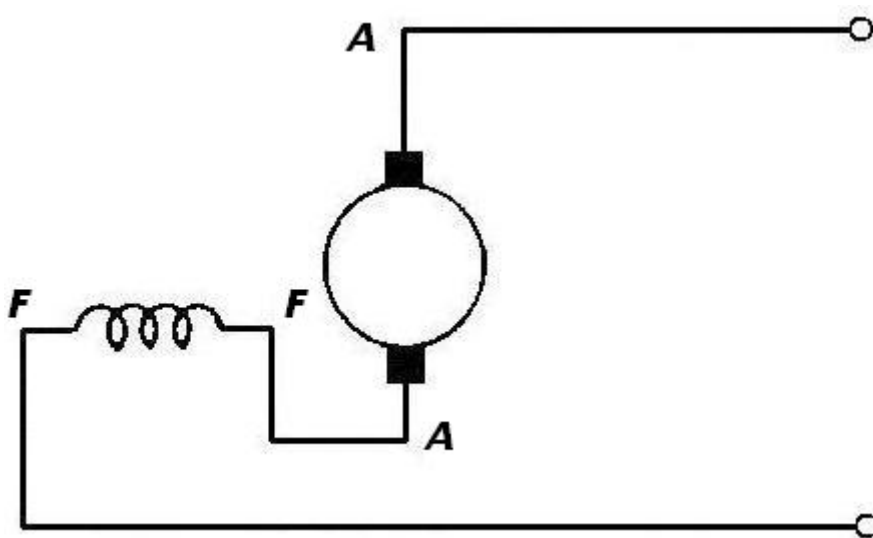
En los generadores autoexcitados parte de la tensión generada se aprovecha para alimentar los campos del propio generador, pero si aparentemente la máquina está parada, no hay ningún campo magnético presente, la forma en que se genera el primer impulso de tensión es que se aprovecha una propiedad del núcleo de las bobinas de campo del generador. Este núcleo a pesar de ser hierro dulce y teóricamente incapaz de retener sus propiedades magnéticas, cuando deja de circular corriente por las bobinas del campo, en realidad queda un *magnetismo remanente* cuando la corriente de campo deja de circular, y a pesar de ser muy débil es suficiente para que al arrancar el generador aparezca una tensión en los terminales del generador.

Debido a las conexiones internas del generador, una parte de la tensión generada en el arranque se aplica a las bobinas de campo, creando un campo electromagnético que se suma al remanente, provocando el aumento de tensión de salida. El proceso continúa hasta que la f.e.m. generada y el campo alcanzan valores nominales.

Ésta es la forma como funcionan todos los generadores de cd autoexcitados, lo que los hace diferentes son las conexiones internas y la característica en terminales (voltaje-corriente) y por lo tanto en las aplicaciones para las cuales son adecuados.

Una forma de calcular esta característica en terminales es la regulación de voltaje que es la forma más aproximada de medir la característica voltaje-corriente; *una regulación de voltaje positiva significa una característica descendente y una regulación de voltaje negativa significa una característica en ascenso.*

La figura 1-41 muestra esquemáticamente un *generador serie*, el devanado de campo está conectado en serie con la armadura. En este tipo de generador el devanado de campo está constituido por un pequeño número de espiras de hilo grueso, ya que la corriente que circula por ellas es elevada.



**Figura 1-41. Generador autoexcitado de tipo serie.**

La corriente sólo pasa por el circuito cuando está conectada una carga externa, por eso la corriente que circula por los devanados de campo depende hasta cierto límite del valor de la carga.

La *curva de variación* de la tensión de salida de un generador de cd serie representada en la figura 1-42 es en función de la corriente requerida por la carga. Se observa que a medida que la carga consume más corriente, aumentando en consecuencia el campo magnético del estator, el voltaje en terminales del generador también aumenta.

En estas condiciones, a partir del punto de saturación (*a*) un aumento de la corriente de carga provoca una reducción de la tensión en los terminales, pues al efecto de la saturación hay que sumar el provocado por la caída de la tensión  $IR$  en el devanado de campo, sin que haya un aumento en la tensión en los terminales que lo compense. Después del punto de saturación la tensión en los terminales disminuye rápidamente (*b*), incluso sin que exista un aumento sustancial de la corriente de carga, ya que el tramo *bc* es prácticamente vertical al eje de corriente.

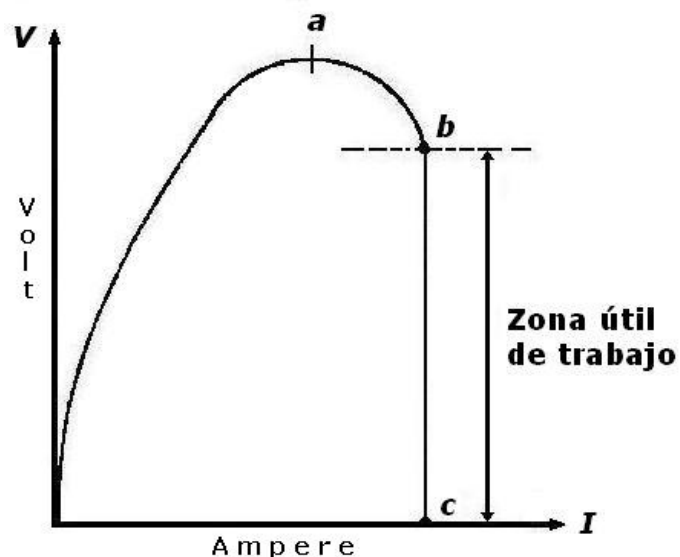


Figura 1-42. Curva característica de generación de tipo serie.

Por lo anterior la regulación de voltaje de un generador de cd serie es mala, por ello la única aplicación posible de este tipo de generador es donde puede explotarse la característica empinada del voltaje del equipo.

Un *generador de cd en paralelo, en derivación o shunt*, es aquel en el que el devanado de campo está conectado en paralelo con la armadura como el mostrado en la figura 1-43. De esta forma la corriente de la armadura alimenta la carga y el campo, y aunque no haya carga en la salida del generador habrá siempre una fuerza electromotriz inducida, pues el campo está permanentemente alimentado.

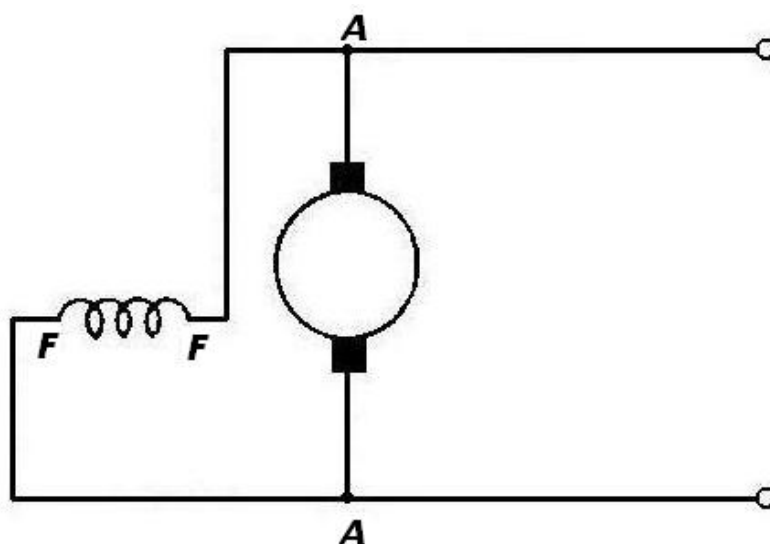


Figura 1-43. Generador autoexcitado de tipo paralelo.

En este caso, el devanado de campo está constituido por un número de espiras de hilo de pequeño diámetro, para evitar que el estator absorba una gran parte de la corriente generada, esto es, que la potencia consumida en la excitación sea únicamente una pequeña parte de la generada, siendo la mayor parte de esta potencia entregada a la carga.



Como el campo queda permanentemente conectado en paralelo con la armadura, la corriente de excitación del campo depende únicamente de la fuerza electromotriz inducida y de la resistencia del devanado de campo.

Para que se pueda aprovechar al máximo la corriente generada es preciso que se reduzca la corriente de excitación, lo que se consigue aumentando el número de espiras del devanado de campo, que en este caso puede devanarse con hilo de pequeño diámetro. Teniendo en cuenta que incluso con la carga desconectada hay siempre una corriente circulando por el campo, y con ello se deduce que existe tensión en los terminales del generador, aún con la carga desconectada, lo que no ocurre con el generador de cd tipo serie.

En la figura 1-44 se representa la curva característica de un generador de cd en paralelo de la cual se observa que a medida que la carga absorbe más corriente, decrece la tensión en los terminales paulatinamente, debido al aumento de la caída de tensión en los devanados de la armadura. Aún así este tipo de generador tiene una tensión en los terminales aproximadamente constante cuando alimenta cargas que no exceden de la máxima especificada por el fabricante, por lo cual este generador es el indicado para alimentar sistemas en los que sea necesario mantener la tensión dentro ciertos límites, a pesar de las posibles variaciones de carga.

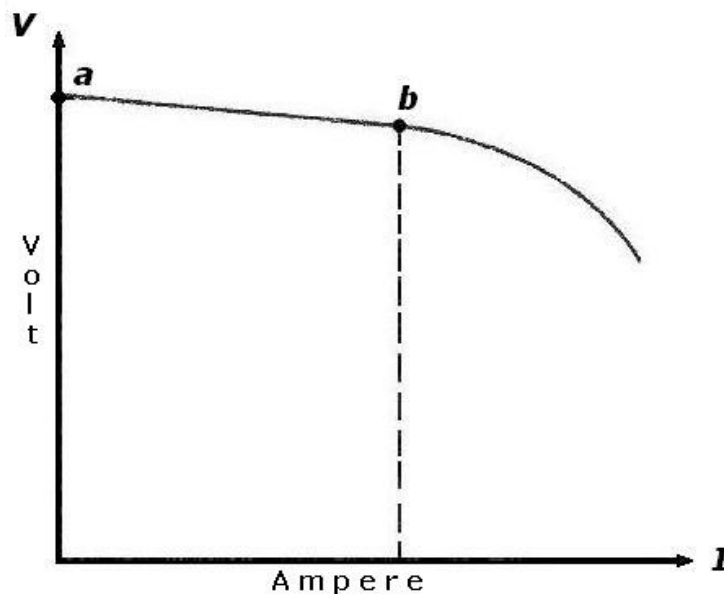


Figura 1-44. Curva característica del generador tipo paralelo.

A la combinación de un generador de cd serie y paralelo se le llama *generador compuesto* o *compound*. En este tipo de generador de cd uno de los campos está conectado permanentemente en paralelo con la armadura y el otro en serie con la armadura y la carga, de tal forma que el devanado en paralelo se alimenta por la tensión existente entre las escobillas y el devanado en serie está recorrido por la corriente recogida por la carga, por lo tanto cuanto mayor sea esta corriente, mayor será también la intensidad del campo magnético.

El campo serie, normalmente formado con pocas espiras de hilo de grueso calibre, está conectado de tal forma que refuerza el campo conectado en paralelo (compound acumulativa), a pesar de haber una conexión denominada compound diferencial, en la cual se da exactamente el caso opuesto, esto es, el campo serie se opone al campo paralelo.

En la figura 1-45 se representa el campo en paralelo, está conectado en paralelo únicamente con la armadura denominándose la conexión *paralela corta*. En la figura 1-46 el campo paralelo está conectado a los terminales de salida del generador, esto es, en paralelo con la armadura y el campo serie, denominándose *paralela larga*.

En el generador compuesto, la tensión en los terminales es aproximadamente constante, aumentando ligeramente al hacerlo con carga, esto se debe a la existencia de un campo serie con la carga, lo que confiere a este generador parte de las características del generador de cd serie. Por lo tanto las características de funcionamiento del generador compuesto dependen de la relación existente entre los campos en paralelo y serie.

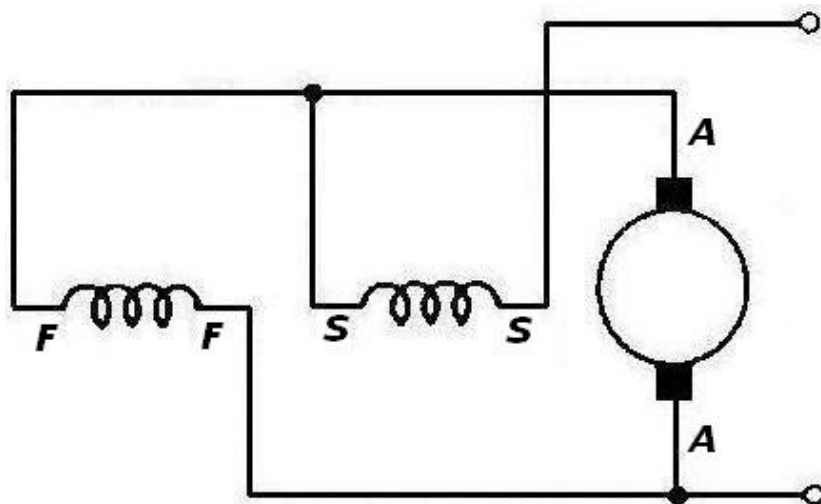


Figura 1-45. Circuito de un generador compuesto paralelo corto.

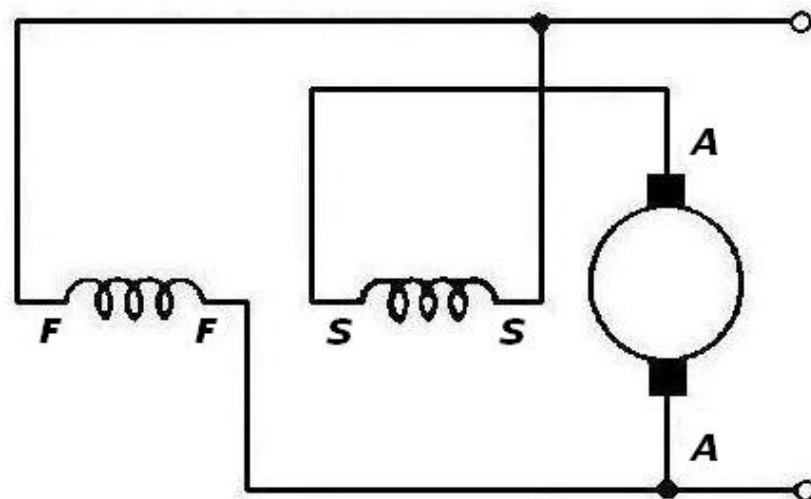


Figura 1-46. Circuito de un generador compuesto paralelo largo.

## 1.6 Motores de corriente directa.

Realmente no hay diferencia entre un generador y un motor excepto por la dirección del flujo de potencia y por la *característica en terminales par-velocidad* bajo la regulación de velocidad como parámetro de comparación entre los diferentes tipos de motores, por lo cual al igual que los generadores de cd, los motores de cd también se clasifican como de *excitación en derivación (paralelo o shunt), en serie y compuesto*.

### Motor en Derivación.

En este tipo de motor, representado en la figura 1-47, el campo está conectado directamente a la red de alimentación, en paralelo con la armadura. En estas condiciones, la intensidad del campo es independiente de la corriente que circula por la armadura y también de las características de la carga.

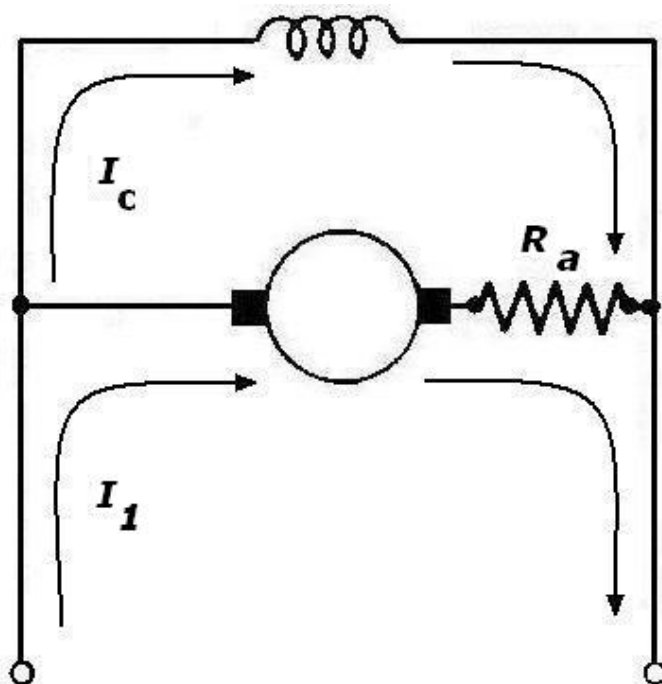


Figura 1-47. Motor de excitación en paralelo o en derivación.

En serie con la armadura está conectada la llamada resistencia de arranque o resistencia de aceleración,  $R_a$  cuya función es limitar la corriente de la armadura al arrancar el motor, como se sabe, la corriente requerida por la armadura en el arranque del motor es alta, considerando que la fuerza contraelectromotriz, que limita la corriente de la armadura durante el funcionamiento de la máquina, no existe cuando ésta se encuentra parada. Por eso la resistencia  $R_a$  se mantiene en el circuito hasta que el motor alcanza una velocidad próxima a la nominal.

La inclusión de la resistencia  $R_a$  en serie con la armadura, a pesar de contribuir a que no se quemen los devanados, reduce el par del motor durante el arranque, consumiendo parte de la potencia suministrada por la red, por eso, en cuanto el motor acelera hasta su velocidad de régimen, la resistencia  $R_a$  se debe poner en cortocircuito.

En los motores con excitación en derivación, si el potencial aplicado es constante, se desarrollará un par motor variable, con velocidad constante, de acuerdo con la variación de la carga, por ello, estos motores se emplean con mayor frecuencia para accionar cargas constantemente variables.

Es importante señalar que un motor de cd con excitación independiente es un motor cuyo circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada de voltaje constante, mientras que un motor de cd en derivación es aquel cuyo circuito de campo obtiene su potencia directamente de los terminales de la armadura del motor. Si se supone que el voltaje de alimentación al motor es constante, no hay casi diferencia de comportamiento entre estos dos motores por ello, *siempre que se describe el comportamiento de un motor en derivación, también se incluye el motor de excitación independiente.*

Cuando este tipo de motor funciona en vacío, la única fuerza que ha de vencer es la fricción en los cojinetes y en las escobillas. La velocidad de la máquina, en tales condiciones, es evidentemente mayor que la existente después de la aplicación de una carga, si bien en los motores de cd en derivación este descenso de velocidad es pequeño, una reducción en la carga, por el contrario, produce un pequeño aumento de velocidad.

La figura 1-48 muestra la gráfica de variación de velocidad en función de la potencia requerida para accionar la carga y se observa que los motores de cd en derivación tienen una buena regulación de velocidad que, además, es mejor que la regulación de tensión de la misma máquina funcionando como generador.

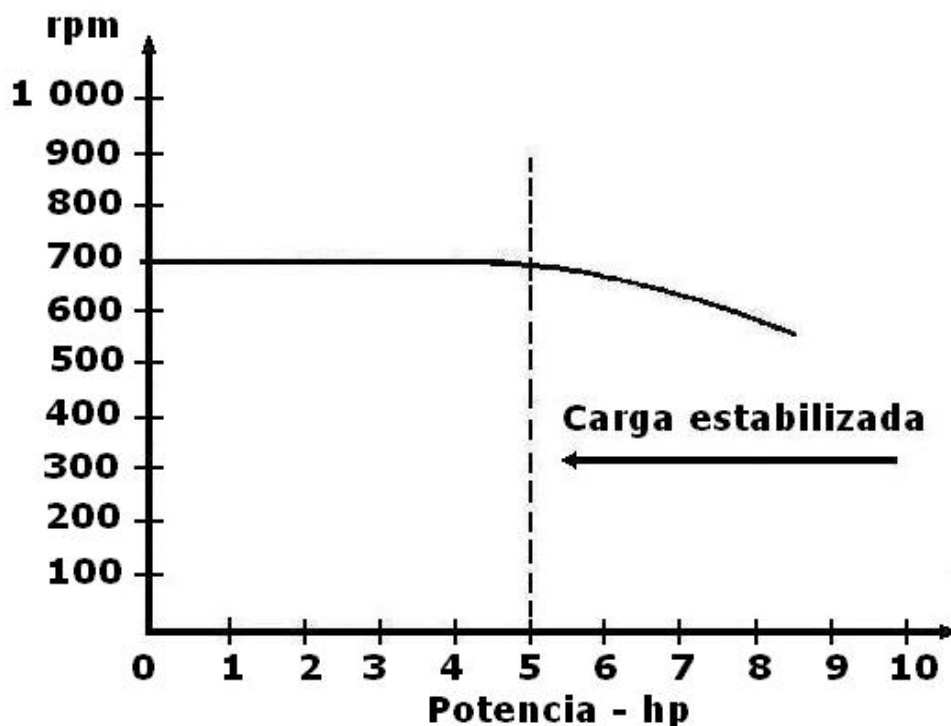


Figura 1-48. Variación de la velocidad en función de la carga impuesta a un motor de cd de excitación en paralelo.

## Motor Serie.

En los motores de cd del tipo serie, como su nombre lo dice, el devanado está conectado en serie con la armadura, como lo muestra de forma esquemática la figura 1-49.

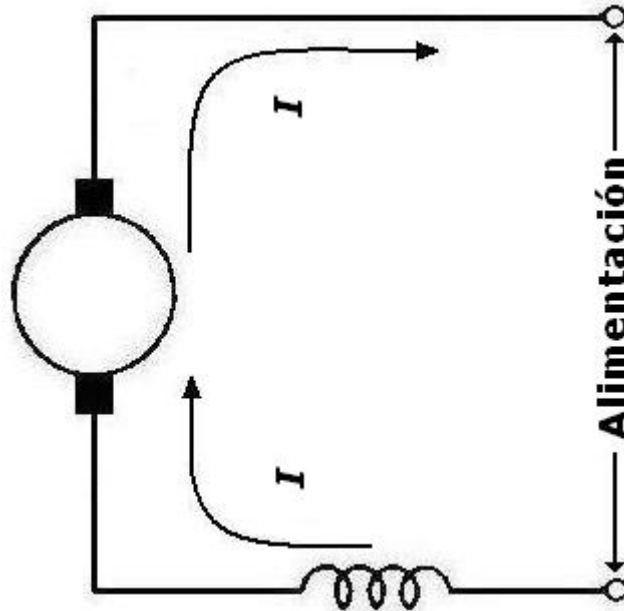


Figura 1-49. Motor de tipo en serie.

Si este tipo de motor trabaja en vacío, la armadura tendrá que aumentar su velocidad creciendo proporcionalmente el valor de la fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.) inducida. Como la tensión de alimentación es la suma de la f.c.e.m. con la caída de tensión en la armadura  $IR$ , si la f.c.e.m. aumenta, habrá obligatoriamente una disminución del valor de la corriente en la armadura.

Pero aquí la corriente de la armadura no circula sólo por ella, sino también se reduce el campo magnético del estator, provocando un nuevo aumento de la velocidad de la armadura. Con todo esto el proceso de aumento de velocidad del motor en serie en vacío es acumulativo, culminando en la destrucción del motor, pues ni los devanados de la armadura arrollados en el interior de las ranuras del motor, ni las delgas del conmutador soportan las fuerzas centrífugas derivadas del disparo del motor.

Por esta razón un motor de cd en serie nunca debe conectarse sin carga, la cual debe aplicarse directamente al eje de la máquina, a través de engranajes y nunca a través de poleas y correas, ya que la hipótesis de que la correa de transmisión se rompiera, no habría tiempo para desconectar el motor y éste se destruiría.

La figura 1-50 es una gráfica que muestra, que la velocidad de este tipo de motor está muy sujeta a valores intermitentes acompañado a las variaciones de la carga, es por eso que este tipo de motor no se emplea normalmente cuando se desea una velocidad de accionamiento constante, no siendo en lo absoluto aconsejable que se utilice con cargas intermitentes, esto es, las que se aplican y retiran con el motor en funcionamiento.

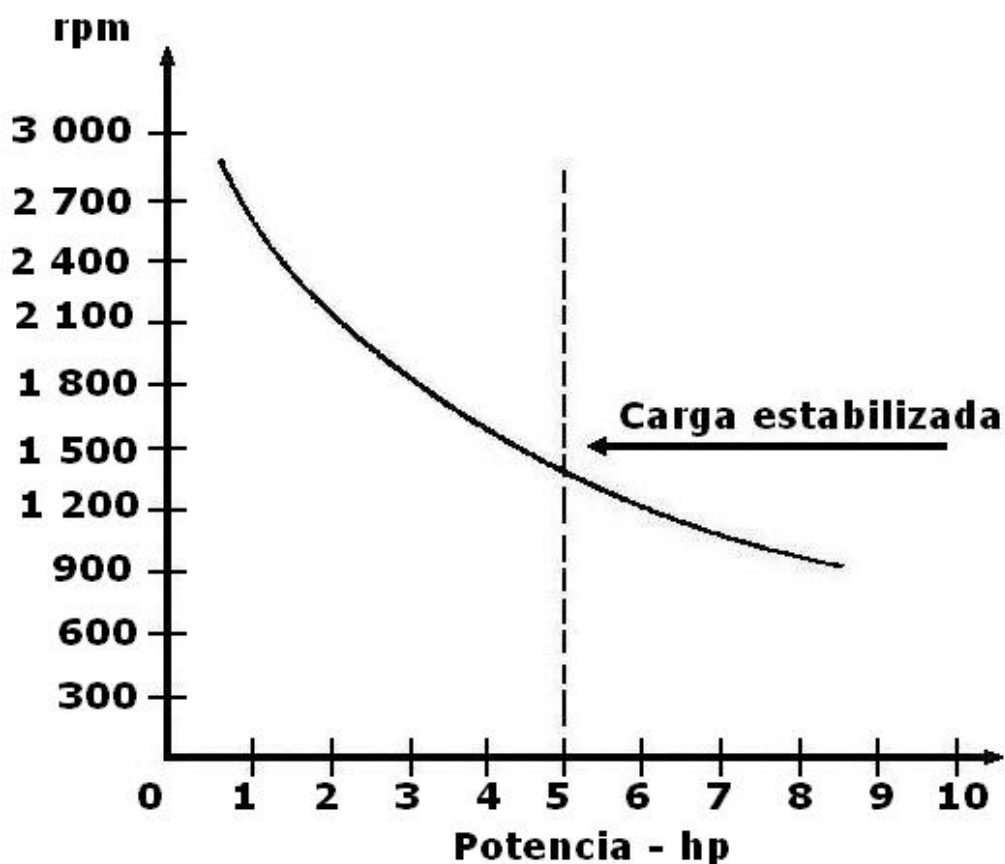


Figura 1-50. Variación de la velocidad en función de la carga impuesta a un motor de cd de tipo en serie.

El par que puede obtenerse en el eje de cualquier motor depende ante todo de las corrientes que circulan por la armadura y el campo, para el caso de un motor de cd tipo serie, la corriente de la armadura también pasa por el campo, de forma que cuando la velocidad del motor es baja, reduciéndose también el valor de la f.c.e.m., circula una corriente de valor elevado por los devanados por lo que el par de arranque de un motor en serie es muy elevado.

Hay aplicaciones en las que es necesario un alto par de arranque para accionar la carga, como en grúas, trenes y trolebuses, etc. En estos casos y en otros de la misma naturaleza, el empleo del motor de cd del tipo serie está bastante difundido.

## Motor Compuesto.

De la misma forma que los generadores de este tipo, los motores compuestos poseen dos conjuntos de devanados de campo, uno de ellos conectado en serie con la armadura y el otro en paralelo con la armadura. Por eso reúne las características de los motores en derivación y las del tipo serie, esto es, un alto par de arranque y una velocidad razonablemente constante al accionar cargas variables.

Los motores compuestos se dividen en dos tipos principales, el primero es el que tiene el devanado serie conectado de modo que refuerza el campo en derivación y por eso se llama compuesto acumulativo. El segundo el que tiene el devanado serie invertido, de modo que produce un flujo contrario al del campo en derivación, que se llama compuesto diferencial.

En los motores compuestos acumulativos, cuyo esquema de conexión se muestra en la figura 1-51, la velocidad disminuye al aumentar la carga, pero con menos rapidez que en los motores con excitación en serie. En cuanto al par de arranque, es mucho más elevado que el de un motor con excitación en derivación, teniendo en cuenta la existencia de un campo serie con la armadura.

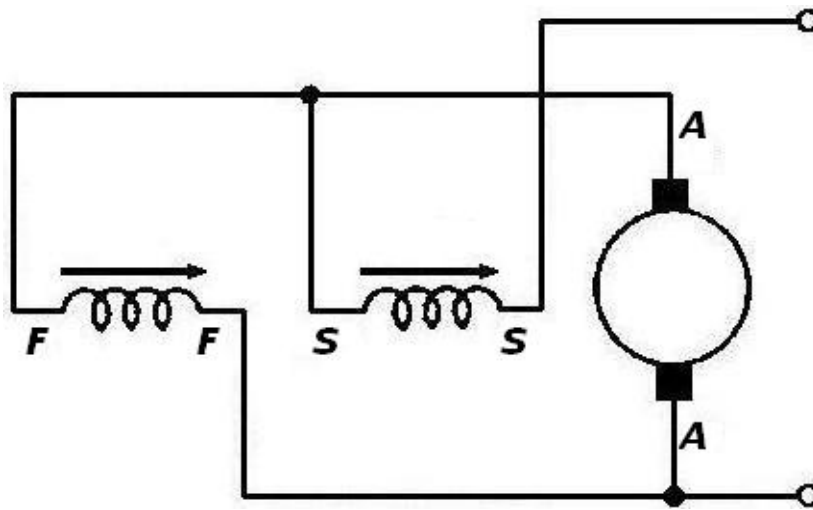


Figura 1-51. Motor compuesto acumulativo.

Cuando este tipo de motor actúa en vacío, la velocidad del motor se comporta de manera diferente descrita en el motor serie, teniendo presente que cuando el motor tiende a acelerar, aumentando el valor de la f.c.e.m., la corriente de la armadura disminuye, haciendo que la mayor parte del flujo de excitación se deba al campo en paralelo, así en este aspecto, el motor compuesto acumulativo se comporta como motor de excitación en derivación.

En el motor compuesto diferencial, cuyo esquema de conexión se muestra en la figura 1-52, la intensidad de campo y la corriente de la armadura disminuyen al crecer la carga. Esto, evidentemente, tiende a provocar un aumento de velocidad que no obstante es limitado, por lo cual este tipo de motor posee una velocidad prácticamente constante con la carga, lamentablemente, tomando en cuenta, la oposición de los flujos de los dos campos, el par de arranque de este motor es bajo, lo que limita su campo de aplicación.

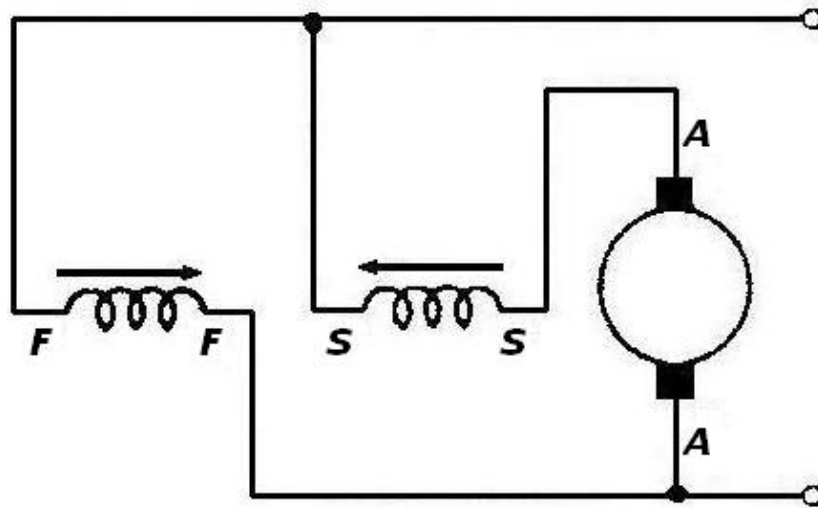


Figura 1-52. Motor compuesto diferencial.

### Rendimiento.

El rendimiento de cualquier máquina eléctrica se define como la relación entre la potencia de salida  $P_s$  y la de entrada  $P_e$ . En el caso de los motores de cd, la potencia de entrada se expresa en Watts (W), y la de salida, en caballos de fuerza (hp), y para efectos de conversión de unidades, la relación entre ambas potencias es

$$1\text{hp}=746\text{W}$$

La forma más común de representar el rendimiento de un motor es en porcentaje (%), y tomando en cuenta que toda máquina tiene pérdidas ( $P$ ), su rendimiento nunca alcanza el 100%. Considerando que

$$P_s = P_e - P$$

El rendimiento ( $\eta$ ) de un motor se da como

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} = \frac{P_e - P}{P_e} \quad (1.67)$$



O en porcentaje

$$\eta = \frac{P_e - P}{P_e} \times 100\% \quad (1.68)$$

si se conoce el rendimiento y la potencia de entrada, se puede calcular las pérdidas,

$$(P_e - P) \times 100 = \eta \times P_e$$

ó

$$100p = 100P_e - \eta \times P_e$$

de donde

$$p = \frac{P_e(100 - \eta)}{100} \quad (1.69)$$

Las pérdidas que existen en un motor se pueden clasificar en cuatro tipos: *en el cobre, por fricción, adicionales y en el núcleo*, éstas últimas ya explicadas, en secciones anteriores, de las cuales se dijo que son producidas por la histéresis y las corrientes parásitas del núcleo.

Las *pérdidas en el cobre* se deben a la resistencia impuesta por los devanados de campo y del inducido, siendo proporcional a la resistencia y al cuadrado de la corriente que circula por cada uno de los devanados ( $I^2R$ ), las *pérdidas por fricción* debidas al roce en los cojinetes, que pueden reducirse al mínimo mediante el empleo de rodamientos o de cojinetes especiales, además de una buena lubricación periódica. Otro factor al que se deben, es a la resistencia impuesta por el aire, al movimiento del rotor y el roce de las escobillas contra el colector, razón por la cual las delgas deben estar siempre limpias y pulidas.

Finalmente las *pérdidas adicionales* que no se pueden englobar con ninguna de las anteriores, pero de una forma aproximada se pueden considerar que son el 1% de la potencia del motor a plena carga.

## Capítulo 2. Factores de selección del motor de corriente directa.



## **2.1 Introducción.**

El proceso de la selección del mejor y más adecuado motor de cd implica una serie de factores, los cuales es necesario analizar uno por uno y de forma ordenada con el objeto de ampliar el panorama y de formar un criterio acerca de lo que se puede obtener de un motor de cd, así mismo el análisis de los factores que intervienen en este proceso, son básicamente la antesala de lo que es la aplicación de los motores de cd.

De forma general estos factores van desde lo que realmente importa obtener de un motor, la potencia de salida, hasta las normas y especificaciones que debe cumplir un motor de cd, y desde luego que con el desarrollo de este proceso de selección se van a desglosar muchos otros factores de gran importancia como las condiciones de operación del motor, que incluyen el entorno ambiental, el montaje, cómo se mueve la carga etc., que en conjunto son claves para tener en claro qué tipo de motor de cd se está buscando.

El inicio del proceso de selección es en esencia en función de la máquina que se va a accionar y de la prestación que se espera por parte del motor. Por eso es importante tener en cuenta, que el objetivo básico en cualquier problema de aplicación es poder llegar a la combinación más adecuada de motor y carga impulsada que permita satisfacer todas las condiciones de funcionamiento planteadas, al menor costo posible, tanto inicial como de operación.

## 2.2 Normas.

Muchas de las características que rigen la construcción y la utilización de un motor eléctrico están basadas en organismos, que controlan y establecen estándares ó normas de calidad. Realmente no hay un organismo que rijan de forma universal, lo que si se puede decir con seguridad es que existe una similitud entre ellas. En el caso de este trabajo se toman en cuenta los organismos más reconocidos de Estados Unidos de América, Alemania y España, ya que es en estos países donde se encuentran la mayoría, tanto de los fabricantes, como de las fuentes de información acerca de los motores eléctricos.

En Estados Unidos, el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) redacta normas para pruebas de motor y métodos de prueba y la *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA MG1) redacta las normas para rendimiento del motor. En Alemania se tienen las normas alemanas para la industria, *Deutsche Industrie Normen* (DIN), en España las UNE, *Una Norma Española*, son un conjunto de normas tecnológicas creadas por los Comités Técnicos de Normalización (CTN), de los que forman parte todas las entidades y agentes implicados e interesados en los trabajos del comité, por regla general estos comités suelen estar formados por fabricantes, consumidores y usuarios, laboratorios y centros de investigación.

En el campo internacional, la *International Electrotechnical Commission* (IEC), la cual es la asociación voluntaria de varios países, se encarga de todas las normas aplicables a los motores eléctricos. Otros organismos y normas son, la *Organización Internacional para la Estandarización* (ISO).

En general, estas normas van enfocadas a motores de potencia fraccionaria hasta un motor de potencia integral. Debido a que estos motores son de dimensiones razonables o mejor dicho conocidos, tienen sus tamaños y dimensiones de montaje normalizado y sus rendimientos se definen con más precisión. Los motores de mayor tamaño y potencia no tienen dimensiones normalizadas y el rendimiento es más generalizado ya que estos motores no se producen en masa y por lo regular se diseñan para ajustarse a las necesidades de aplicaciones específicas. En lo posible, en este trabajo se abarcarán la mayor variedad de tipos y dimensiones de motores de cd.

Los principios usados en el establecimiento de la señalización de las clases de devanados y otros accesorios que pueden llevar un motor de cd, pueden servir de ayuda en la comprensión y empleo de los esquemas.

La NEMA tiene la siguiente señalización:

**A1, A2:** Inducido.

**C:** Hilo de control unido al devanado de conmutación.

**S1, S2:** Inductor serie

**F1, F2:** Inductor derivación o shunt.

Otra clasificación normalizada es:

**A-B:** Bobinado inducido.

**C-D:** Bobinado inductor derivación o shunt.

**E-F:** Bobinado inductor serie.

**G-H:** Bobinado inductor auxiliar o de conmutación.

**A-BH:** Conjunto de los bobinados inducidos y de conmutación.

**J-K:** Bobinado inductor independiente.

## 2.3 Características par-velocidad.

Los aspectos fundamentales que se deben de tener en cuenta al momento de seleccionar un motor de cd, son todos los que se engloban dentro de las características par-velocidad.

### **Potencia requerida.**

Seleccionar un motor con la potencia nominal correcta es el primer paso hacia un costo total mínimo, ya que si se elige un motor con menor capacidad de la que se necesita, éste funcionará en condiciones de sobrecarga y su vida útil se verá reducida. Al contrario si el motor elegido está sobrado en capacidad y por consiguiente es demasiado grande de manera sustancial, operará con baja eficiencia, esto lógicamente, es un desperdicio y también significa que se elige innecesariamente una máquina más grande y por tanto más costosa.

Cuando la máquina por impulsar es de un tipo conocido, o cuando se puede obtener la información completa acerca de ella, la potencia que se requiere es un punto en el proceso de selección que queda resuelto, pero si por el contrario no se tiene información suficiente, se puede optar por algunos de los métodos que a continuación se describen.

La potencia requerida puede ser determinada mediante la aplicación de una prueba. El motor a ensayar estará montado sobre la máquina o aparato que debe arrastrar y conectado a una fuente de alimentación de potencia a través de los aparatos de medida, tal como se muestra en la figura 2-1. La carga sobre el motor será variada, de acuerdo con todas las condiciones posibles a que puede encontrarse sometido en servicio; para cada valor diferente de la carga, la tensión del motor será regulado a su valor nominal y serán tomadas las lecturas de los watts (W), de los amperes (corriente absorbida) y de las rpm. Si se dispone de un ensayo de funcionamiento con carga del motor, las anteriores lecturas pueden convertirse en hp o par suministrado, pero si no se dispone de dicho ensayo, éste debe realizarse forzosamente, o medir la potencia suministrada con las mismas potencias absorbidas durante el ensayo de la máquina.

Debe tenerse en cuenta que los vatios absorbidos es una indicación mucho más segura de la potencia de salida que la corriente absorbida. *En ningún caso será una prueba el estimar la potencia útil mediante la comparación de la corriente observada bajo carga con la corriente que figura en la placa de fabricante.*

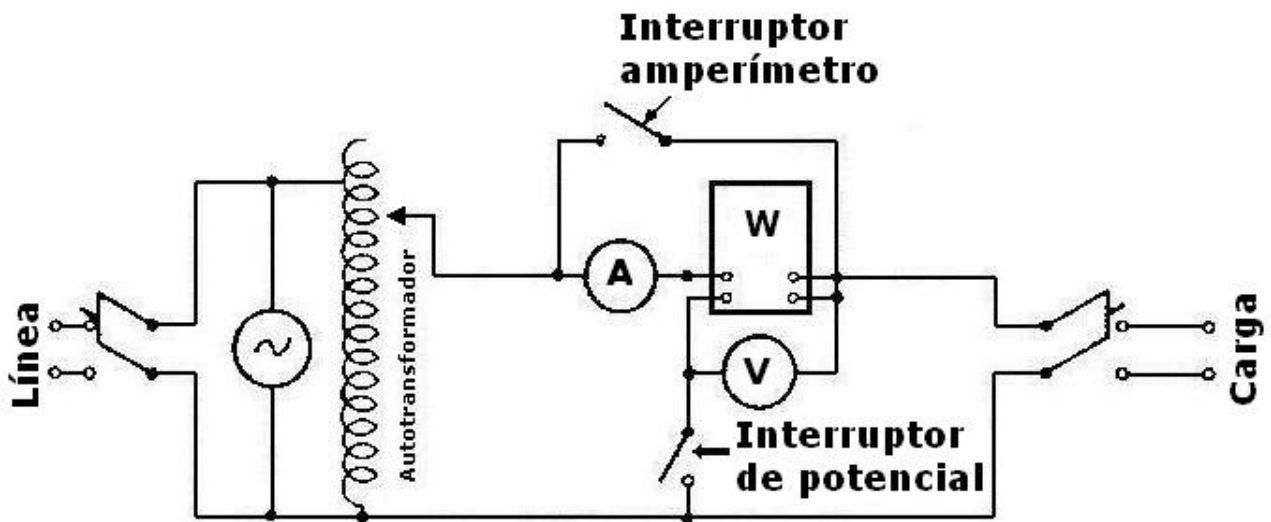


Figura 2-1. Conexión de los aparatos para la medida de potencia.

Si se dispone de una mesa de momento (*torque-table*), que es una estructura para medida del par por reacción en que no se requiere soporte, el par requerido para una aplicación dada puede ser medido directamente sin necesidad de llevar a cabo medidas eléctricas sobre el propio motor. Otros aparatos de medida en especial motores de potencia fraccionaria pueden ser *el dinamómetro, Freno de Prony, el método de cuerda y polea*, que si bien sirven para determinar la potencia directa del motor dan una idea de la potencia necesaria para la carga.

Otra opción, es probar la máquina con un motor del cual se tengan datos completos sobre sus características, de modo que las lecturas de potencia o corriente de entrada a un voltaje dado puedan convertirse en una potencia mecánica real. Cuando se dispone de un motor así, que puede considerarse un *motor calibrado*, es posible saber con bastante precisión la potencia que entrega al ser acoplado a diversas cargas, incluso es posible trazar curvas par-corriente o par-potencia de entrada si se calcula el par para cada condición.

Si no se dispone de un motor de características conocidas, puede obtenerse cierta información aplicando un par a la máquina hasta lograr que se ponga en movimiento, esto dará una idea del par de despegue o de arranque que se requiere, y si no se conoce el tipo de curva par-velocidad de la máquina, podrá trazarse ésta en forma aproximada.

Finalmente la determinación de la potencia requerida por diversos tipos de máquinas, puede ser obtenida de los catálogos de los fabricantes de motores eléctricos. Si bien este método no puede considerarse tan eficaz como una prueba real, puede dar una idea aproximada de los requerimientos de la máquina en cuestión, especialmente cuando se trata de un equipo común.

Una vez determinada la potencia real exigida por la carga, bajo diferentes condiciones de empleo, lo mejor es determinar en cuánto puede ser aumentada la carga en condiciones de servicio y esto tiene que ver con el tipo de acoplamiento. Después de que la verdadera potencia requerida por la carga ha sido determinada, es generalmente preferible seleccionar un motor cuya potencia normalizada sea lo más cercana posible a la potencia que se requiere en servicio.

Si bien los motores eléctricos son por lo general aptos para soportar sobrecargas en servicio continuo, si se desea una larga duración, es preferible seleccionar un motor lo suficiente grande para suministrar el trabajo pedido bajo las condiciones normales, así como en las más duras.

### **Par necesario.**

Las demandas del par real de la carga pueden determinarse mediante un ensayo de aplicación. Para determinar las exigencias de la máquina, se utiliza un motor ensayado, previamente seleccionado y se realizan las pruebas de funcionamiento para determinar:

- a. La tensión mínima necesaria para arrancar la carga, en cualquier posición.
- b. La tensión mínima necesaria para llevar la máquina por encima de la velocidad mitad.
- c. La tensión mínima necesaria al motor para pasar de la conexión de arranque a la de marcha.
- d. La tensión mínima a la cual el motor arrastrará la carga requerida sin una caída brusca de la velocidad.

La máquina o dispositivos accionados, estarán, por supuesto, ajustados para unas severas condiciones, y deben ser conocidos los pares de *arranque*, *par mínimo de aceleración* y *el par máximo resistente* del motor que se prueba. Ahora, sabiendo que los pares varían como el cuadrado de la tensión aplicada, los resultados de las pruebas a, b, c y d dan respectivamente, los pares de arranque, par mínimo de aceleración y el par máximo resistente realmente requeridos para la aplicación o dispositivo interesado.

Si la potencia nominal ha sido elegida por tanteo, las características de par deben ser comparadas con las necesidades de la aplicación. Algunas veces es preferible seleccionar un motor de mayor potencia nominal a fin de obtener más par, mejor que pretender adquirir un motor especialmente previsto para satisfacer la mayor necesidad de par. Otras veces, puede ser alterado por sí mismo el dispositivo de manera que se reduzca ligeramente el par necesitado por el mismo.



Tipo de motor de cd	Par de arranque (% de plena carga)	Par máximo (% de plena carga)
derivación	150	El par máximo está limitado por la conmutación. En condiciones normales un motor cd desarrolla momentáneamente un par máximo de 200 a 400 %
compuesto	175-200	
serie	300-400	

Tabla 2-1. Porcentaje de pares.

La definición de las características de par son las siguientes:

- a. **Par de arranque.** Es el par resistente que la carga presentará al motor en el instante del arranque. El margen mínimo que se recomienda es del 25% en las condiciones más desfavorables en las que deba efectuarse la puesta en marcha.
- b. **Par mínimo de aceleración.** Es el par que actúa una vez que el motor ha vencido la resistencia inicial de la carga y su funcionamiento comienza a ascender por la curva par-velocidad hacia el punto de operación final. Según las normas, el par mínimo no debe ser menor que un 70% del par de arranque. El par de aceleración es la diferencia entre el par que desarrolla el motor y el par que la carga opone a éste; es decir, es el excedente de par del cual dispone el motor para acelerar la carga.
- c. **Par máximo resistente.** Este par actúa una vez rebasada la región donde se tiene el par mínimo, el momento de rotación empieza a incrementarse hasta llegar al punto en que tiene su valor más alto, y desde ahí empieza nuevamente a decrecer hasta el valor nominal, o al valor correspondiente a la intersección con la curva par-velocidad de la carga.

Cuando se aplica mayor carga al motor, una vez que ya está funcionando su velocidad desciende hasta el punto en que puede proporcionar el par que demanda la carga, y este proceso podría continuar hasta llegar precisamente al valor del par máximo, donde el motor ya no podría proporcionar más carga extra, pues su velocidad descendería bruscamente hasta quedar frenado, ya que el par de arranque suele ser menor que el máximo, por este motivo, al par máximo también se le denomina par de desenganche.

Al aplicar un motor es necesario cerciorarse que el par que pueda demandar la carga en las condiciones más desfavorables de operación sea inferior en un 25% al par máximo.

Tipo de motor	Carcasa IEC	Potencia nominal de salida (kW)	Velocidad nominal (1/min)	Par nominal (Nm)	Velocidad máxima de operación (rpm)
1GG6 162	160	47.8	1 500	<b>305</b>	4 500
1GG6 164		60.8	1 500	<b>385</b>	4 500
1GG6 166		76.2	1 500	<b>485</b>	4 500
1GG6 186	180	83	1 500	<b>530</b>	3 800
1GG6 188		100	1 500	<b>640</b>	3 800
1GG6 206	200	125	1 500	<b>800</b>	3 500
1GG6 208		150	1 500	<b>960</b>	3 500
1GG6 226	225	190	1 500	<b>1 200</b>	3 000
1GG6 228		230	1 500	<b>1 500</b>	3 000
1GG6 256	250	280	1 500	<b>1 800</b>	2 600
1GG6 258		340	1 500	<b>2 200</b>	2 600
1GG6 286	280	420	1 500	<b>2 700</b>	2 500
1GG6 288		500	1 500	<b>3 200</b>	2 500
1GG7 351	355	550	1 500	<b>3 500</b>	2 200
1GG7 352		675	1 500	<b>4 300</b>	2 200
1GG7 353		730	1 400	<b>5 000</b>	2 200
1GG7 354		750	1 150	<b>6 200</b>	2 200
1GG7 355		770	900	<b>8 200</b>	2 200
1GG7 401	400	750	1 500	<b>4 800</b>	2 000
1GG7 402		765	1 250	<b>5 800</b>	2 000
1GG7 403		800	1 000	<b>7 600</b>	2 000
1GG7 404		860	850	<b>9 700</b>	2 000
1GG7 405		880	660	<b>12 700</b>	2 000
1GG7 451	450	880	1 200	<b>7 000</b>	1 800
1GG7 452		915	1 000	<b>8 700</b>	1 800
1GG7 453		950	850	<b>10 700</b>	1 800
1GG7 454		1 000	700	<b>13 600</b>	1 800
1GG7 455		1 000	550	<b>17 400</b>	1 800
1GG5 500	500	900	1 400	<b>6 100</b>	1 800
1GG5 501		1 050	1 000	<b>10 000</b>	1 800
1GG5 502		1 100	850	<b>12 400</b>	1 800
1GG5 503		1 100	700	<b>15 000</b>	1 700
1GG5 504		1 130	600	<b>18 000</b>	1 700
1GG5 631	630	1 340	800	<b>16 000</b>	1 500
1GG5 632		1 500	650	<b>22 000</b>	1 500
1GG5 633		1 470	500	<b>28 000</b>	1 300
1GG5 634		1 550	450	<b>33 000</b>	1 300
1GG5 635		1 550	370	<b>40 000</b>	1 300

Siemens AG DC Motors Catálogo DA 12 - 2008.

**Tabla 2-2. Valores generales de operación de los motores de cd Siemens según modelo, destacando el par nominal.**

## Efecto de inercia o de volante.

Esta cantidad corresponde al *momento de inercia*  $J$  de un cuerpo respecto a un eje de rotación que atraviesa a dicho cuerpo. Se evalúa  $J$  como el producto de la masa total  $M$  y el cuadrado del radio de inercia  $k$  del cuerpo en cuestión.  $k$  es el radio de un círculo ideal en cuya circunferencia puede considerarse distribuida toda la masa del cuerpo, de manera que  $J$  tiene el mismo valor. Por consiguiente,

$$J = Mk^2 \quad (2.1)$$

El efecto de inercia  $EI$  se expresa como el producto del peso (masa) de un cuerpo rotatorio y el cuadrado de un radio representativo  $R$ . El efecto de inercia es proporcional a  $J$ , tiene la ventaja de que es más fácil de evaluar, ya que muchas veces no es posible disponer del radio de inercia verdadero. Por tanto,

$$EI = MR^2 \quad [Wk^2] \quad (2.2)$$

El radio de inercia se denomina también en la práctica *radio de giro*, y el efecto de inercia también como *momento volante* o *efecto volante*.

Entonces si la inercia de una carga se expresa generalmente como  $Wk^2$  en lb-ft<sup>2</sup>, donde  $W$  es el peso de las partes rotatorias en libras y  $k$  es el radio de rotación del centro de gravedad de las partes giratorias (llamado también radio de giro). En general  $k$  se expresa en ft. La diferencia entre el par (incluyendo la fricción) requerido por la carga para desarrollar su función y el par proporcionado por el motor, se aplica para acelerar la carga. Entre mayor sea el par de aceleración, será menor el tiempo requerido para la aceleración. La relación se expresa por medio de

$$t = \frac{Wk^2(n_2 - n_1)}{308\tau_a} \quad [s] \quad (2.3)$$

donde  $t$  = tiempo de aceleración en segundos.

$n_2$  = velocidad final en r/min.

$n_1$  = velocidad inicial en r/min.

$\tau_a$  = par de aceleración disponible del motor en lb-ft.

Cuando el par de aceleración del motor no es constante a través de la escala de velocidades, se debe determinar el par promedio y usarse como  $\tau_a$ . Para manejar la  $Wk^2$  de una carga que gira a una velocidad inferior a la de un motor que gira a una velocidad superior, debe multiplicarse el  $Wk^2$  de la carga por el cuadrado de la velocidad inferior dividido entre el cuadrado de la velocidad del motor. Los motores que transmiten con banda o con engranes requerirían este cálculo. En forma semejante, en el caso de un motor primario de baja velocidad, la  $Wk^2$  de la carga se multiplicaría por el cuadrado de la velocidad de la carga dividido entre el cuadrado de la velocidad del motor primario. En general, un motor y su control estándar deben acelerar su carga desde reposo hasta plena velocidad en 30 segundos.

Si puede determinarse un valor representativo para el par promedio de aceleración y medir el tiempo en segundos, en que el conjunto motor-carga debe alcanzar la velocidad de operación, el efecto volante podrá calcularse con la fórmula

$$Wk^2 = \frac{308 * \text{par promedio de aceleración} * \text{tiempo}}{\text{velocidad de operación en rpm}} \quad \left[ \text{lb} \cdot \text{ft}^2 \right] \quad (2.4)$$

hp	Velocidad base (rpm)	Velocidad máxima nominal (rpm)	Tamaño carcasa	Corriente armadura (A)	Inercia $Wk^2$ (lb-ft <sup>2</sup> )
1	1 750	2 300	L182AT	3.9	<b>0.28</b>
	850	1 700	186AT	3.7	<b>0.45</b>
1 1/2	3 500	3 500	L182AT	6.1	<b>0.28</b>
	850	1 700	L186AT	6.2	<b>0.45</b>
2	2 500	3 000	L182AT	7.4	<b>0.28</b>
	850	1 700	L186AT	7.7	<b>0.67</b>
3	650	1 700	2110AT	11.5	<b>1.71</b>
	500	1 600	259AT	11.1	<b>3.31</b>
5	1 150	2 000	218AT	18.9	<b>1.35</b>
	500	1 600	288AT	19.2	<b>5.36</b>
7 1/2	1 750	2 300	1810AT	28.1	<b>1</b>
	500	1 500	328AT	29.9	<b>9.67</b>
10	1 750	2 300	219AT	36.6	<b>1.49</b>
	1 150	2 000	258AT	37.4	<b>2.91</b>
15	650	1 600	365AT	54.7	<b>5.36</b>
	500	1 500	368AT	52	<b>22.2</b>
20	650	1 500	366AT	71	<b>18.27</b>
	400	1 200	407AT	71	<b>35</b>
25	3 500	3 500	258AT	86.5	<b>2.91</b>
	850	1 700	365AT	88.8	<b>15.6</b>
30	2 500	3 000	288AT	104	<b>5.36</b>
	850	1 700	366AT	104	<b>18.27</b>
40	650	1 600	409AT	138	<b>44</b>
	500	1 500	504AT	139	<b>79</b>
50	1 750	2 100	388AT	172	<b>9.67</b>
	500	1 500	506AT	171	<b>99</b>
60	1 750	2 100	366AT	205	<b>18.27</b>
	1 150	2 000	407AT	204	<b>35</b>
75	850	1 700	504AT	254	<b>79</b>
	500	1 500	508AT	253	<b>122</b>
100	1 750	2 000	368AT	340	<b>22.2</b>
	1 150	2 000	409AT	338	<b>44</b>
125	1 750	2 000	L407AT	426	<b>35</b>
	850	1 700	506AT	423	<b>99</b>
150	1 750	2 000	L409AT	503	<b>44</b>
	850	1 700	508AT	504	<b>122</b>
200	1750	1 900	504AT	679	<b>79</b>
250	1 750	1 900	506AT	804	<b>99</b>

Manual de datos de aplicación CA608D 2006 de Baldor Electric Company.

Los datos mostrados son calculados y no están garantizados.

Motores carcasa 180AT a 500AT, 240V, a prueba de goteo, totalmente protegidos, servicio continuo.

**Tabla 2-3. Ejemplo de una tabla de datos de aplicación de motores de cd destacando la inercia.**

## Velocidad de operación.

Es una característica mucho más fácil de determinar, ya que en la mayoría de los casos se tiene un sólo valor de velocidad a la que se requiere que funcione la máquina impulsada. En otros casos se tiene que considerar dos o más valores concretos de velocidad, y en algunos otros es necesario abarcar una gama de velocidades que puede ajustarse en forma continua, para obtener en caso de necesitar velocidad constante, velocidad doble, velocidad múltiple, variable, regulable o absolutamente constante. Esta variabilidad de la velocidad puede obtenerse mediante un sistema regulador de la misma o por el uso de una transmisión mecánica, sólo que del control de velocidad se hablará en secciones posteriores.

La clasificación que se indica en la placa de fabricante en cuanto a rpm, es sólo un punto en diseño de estado estable. Además el punto de operación del motor y el hecho de que si se requieren velocidades superiores o inferiores a él habrán de determinar la velocidad básica y el tipo fundamental de motor.

Las velocidades nominales de los motores de cd de tamaños normalizados se expresan por lo general en niveles como las siguientes rpm: 3500, 2500, 1750, 1150, 850, 650, 500, 400 y 300. (Tablas 2-4 y 2-5)

hp	Velocidad aproximada a plena carga (rpm)			
<b>1/20</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/12</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/8</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/6</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/4</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/3</b>	3 450	1 725	1 140	850
<b>1/2</b>	3 450	1 725	1 140	
<b>3/4</b>	3 450	1 725		
<b>1</b>	3 450			

Motores del tipo 0.75hp por rpm, abiertos y pequeños.

**Tabla 2-4. Capacidades nominales de velocidad de motores de cd de potencia fraccionaria.**

	hp velocidad base	hp 300% de la velocidad base y velocidades mayores (sólo motores a prueba de goteo)	Velocidad base (rpm)									
			3 500	2 500	1 750	1 150	850	650	500	400	300	
			Velocidad por control de campo (rpm)									
120 y 240V	1/2	0.65						3 000	2 600	2 000	1 600	
	3/4	4					3 200	3 000	2 600	2 000	1 600	
	1	1.3			3 500	3 200	2 800	2 600	2 000	1 600		
	1 1/2	2	4 000	4 000	3 500	3 000	2 800	2 600	2 000	1 600		
	2	2.6	4 000	4 000	3 300	3 000	2 600	2 600	2 000	1 600	1 200	
	3	4	4 000	3 700	3 300	2 800	2 600	2 600	2 000	1 600	1 200	
	5	6.5	3 700	3 700	3 000	2 800	2 600	2 400	2 000	1 600	1 200	
	7 1/2	10	3 500	3 500	3 000	2 800	2 600	2 400	2 000	1 600	1 200	
	10	13	3 500	3 500	3 000	2 800	2 500	2 200	2 000	1 600	1 200	
	240 V	15	20	3 500	3 300	3 000	2 600	2 500	2 200	2 000	1 600	1 200
		20	26	3 500	3 300	3 000	2 600	2 400	2 200	1 800	1 600	1 200
		25	33		3 100	3 000	2 600	2 400	2 000	1 800	1 600	1 200
		30	40		3 100	3 000	2 600	2 400	2 000	1 800	1 600	1 200
		40	52		3 100	2 700	2 400	2 200	2 000	1 800	1 600	1 200
		50	65			2 700	2 400	2 200	1 800	1 800	1 600	1 200
		60	80			2 400	2 200	2 000	1 800	1 600	1 600	1 200
		75	100			2 400	2 200	2 000	1 800	1 600	1 600	1 200
		100	130			2 200	2 000	1 800	1 600	1 600	1 600	1 200
125		165			2 000	2 000	1 800	1 600	1 600	1 600	1 200	
150	200			2 000	2 000	1 800	1 600	1 600	1 600	1 200		
200	260			1 900	1 800	1 700	1 600	1 600	1 200	1 200		
250 y 500V	250						1 700	1 600	1 600	1 400	1 200	
	300						1 600	1 500	1 500	1 300	1 200	
	400						1 500	1 500	1 400			
	500						1 500	1 400				
500 y 700V	600						1 500	1 300				
	700						1 300					
	800						1 250					

Tabla 2-5. Motores industriales de cd de potencia integral con atenuación de campo.

La figura 2-2 muestra de manera conjunta las curvas correspondientes a los distintos tipos de motores de cd, con la particularidad que todos se refieren a un punto común de *par nominal y velocidad base*, de esta forma se puede apreciar mucho mejor las diferencias entre sí.

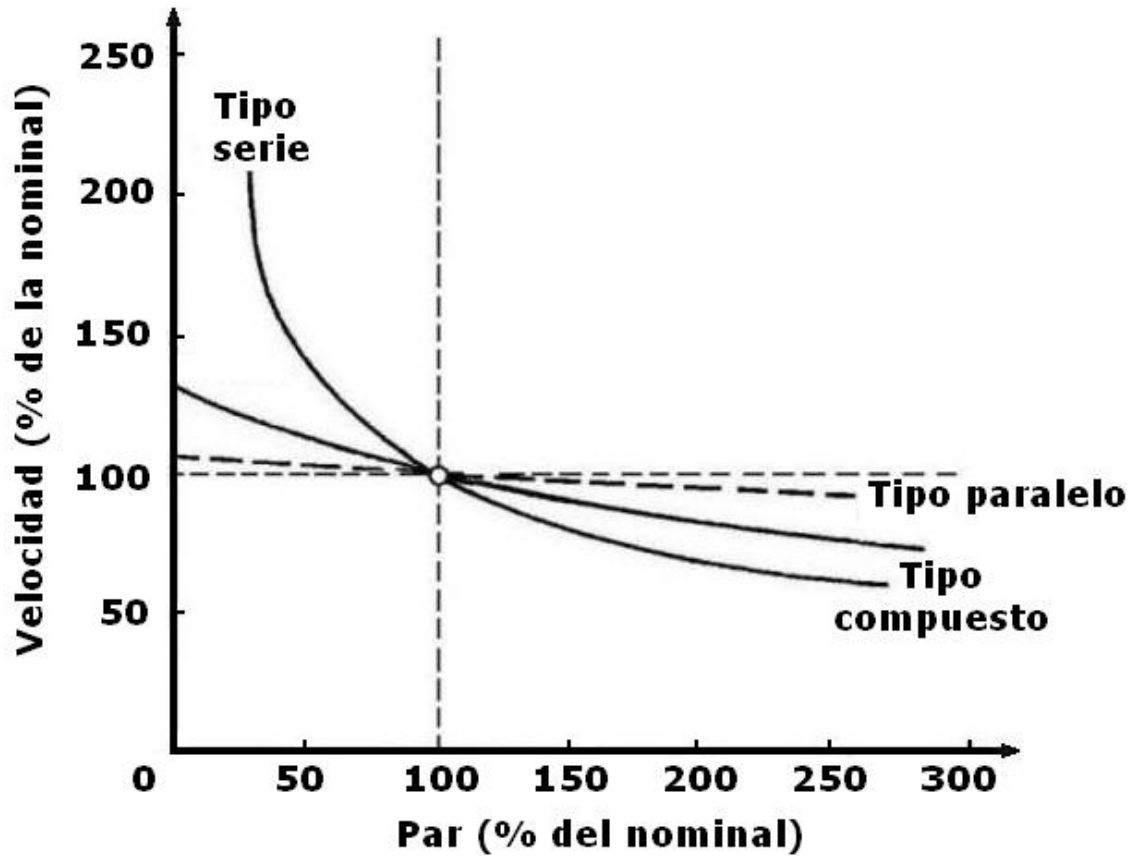


Figura 2-2. Curvas par-velocidad en motores de cd.

Se puede apreciar de inmediato que la velocidad de un motor tipo derivación es prácticamente constante en toda la gama de pares de operación de uso común. Teóricamente no existe un límite para el par que puede desarrollar un motor de cd, ya que dicho par es proporcional al producto del flujo (densidad de flujo), por la corriente de la armadura, por lo que el límite real queda determinado por la conmutación, esto es, por la máxima corriente que las escobillas puedan manejar sin dañarse.

Para el motor tipo derivación, este límite puede establecerse en un 200% de la corriente nominal, pero sólo en teoría, ya que en la práctica es difícil de alcanzar por las limitaciones impuestas por el control. (Recordando que cuando se habla de un motor en derivación también se hace referencia al motor de excitación independiente).

La parte de la gráfica que corresponde al motor serie se observa claramente que con carga menor que la nominal la velocidad aumentará rápidamente y se ratifica el dañar la máquina si no se protege de manera adecuada.

En cuanto a la curva correspondiente al motor tipo compuesto, puede verse que su comportamiento es intermedio entre los dos anteriores. Este motor posee algo de la capacidad de desarrollar un alto par de arranque como el motor serie, y algo de las características de velocidad constante del motor tipo derivación.

La potencia en la flecha del motor debe ser por supuesto, suficiente para soportar la carga que está destinada a manejar, esto se complica por el hecho de que un motor sólo puede soportar por un tiempo breve una sobrecarga considerable. La otra condición es que la carga puede ser mucho menor durante parte del tiempo, en pocas palabras, se deben conocer las características par-velocidad de la máquina impulsada y el *ciclo de trabajo* preciso que el motor debe desarrollar (el cual se explicara más adelante) ya que un motor es muy ineficiente a cargas bajas, por lo que el motor se debe seleccionar de manera que trabaje entre 70 y 100% de potencia nominal la mayor parte del tiempo.

De los puntos antes expuestos se puede resumir y resaltar la importancia que tiene el saber la curva par-velocidad de la máquina impulsada ya que ésta definirá si es una carga de potencia constante, par constante o tendrá una combinación de ambas características. Es por eso que se tiene que considerar en concreto acerca del par dos tipos de cargas:

- a. Aquellas en las que interviene un cambio en el tamaño o la forma física de la pieza que se trabaja, como ocurre en una máquina – herramienta.
- b. Aquellas en las que hay desplazamiento, como sucede en el caso de grúas y transportadores.

Existen por supuesto, procesos en los que se combinan los dos tipos de cargas mencionados.

Una vez definido el ciclo de trabajo, debe verificarse que el motor posea suficiente par para arrancar la carga y acelerarla hasta la velocidad de operación, una vez alcanzada ésta, el motor debe vencer el par resistente de la carga, y esta combinación de valores de par y velocidad define generalmente la potencia nominal del motor. Es importante, sin embargo, no perder de vista las posibles sobrecargas a que puede estar sujeto el motor, que pueden en algunos casos llevarlo a una región reoperación inestable.

En cuanto a la velocidad se tiene que considerar en concreto que las cargas comúnmente encontradas en el ámbito industrial pueden clasificarse:

- a. Cargas de operación continua y estable, como sería el caso de un transportador, un compresor, etc.
- b. Cargas que operan en forma uniforme pero con intermitencia, por ejemplo un molino de laminado unidireccional.



- c. Máquinas que desarrollan ciclos de trabajo en los que hay frenado o inversión del sentido de rotación, como elevadores, malacates, grúas, etc.
- d. Máquinas que requieren ajustes en su velocidad de operación, como algunas máquinas-herramientas, prensas de offset, etc.

Existen otros tipos de carga en el que la velocidad no tiene efecto sobre el par, el cual depende por completo de la posición de la carga, un ejemplo son los equipos de volteo para vagones-tolva de ferrocarril. Hay también cargas que varían en el tiempo, como ocurre en algunos equipos para mezclado. Si se tiene una combinación de motor y control que permita operar a potencia constante, puede utilizarse con cualquier tipo de carga, pero si por el contrario, el equipo es capaz de proporcionar par constante, no podrá ser usado con cargas de potencia constante. Lo importante es verificar el modo cómo cambia el par cuando ocurre un ajuste de velocidad en el proceso de operación.

### Relaciones entre la potencia, el par y la velocidad.

En el capítulo 1 se definieron los términos de par y de potencia, en el caso del par la ecuación resultante (1.5) está dada en forma analítica y las de potencia (1.15 y 1.16) en forma general, pero ahora que se han extendido estos términos es necesario expresarlos en base al proceso de selección.

$$1\text{hp (o 1CV)}=0.746\text{kW}$$

La fórmula básica para el cálculo del par a partir de la potencia y de la velocidad es,

$$M = \frac{K * P}{\text{rpm}} \quad (2.5)$$

Para el cálculo de la potencia a partir del par y de la velocidad, la fórmula puede simplemente tomar la forma,

$$P = \frac{M * \text{rpm}}{K} \quad (2.6)$$

El valor K en las anteriores fórmulas depende de las unidades en que vengan expresados el par y la potencia, los adecuados valores de K están en la tabla 2-6.

Unidades en las que viene expresado el par	Unidades en las cuales viene expresada la potencia			
	Watts	hp(746 W)	CV(735.5 W)	hp/100 (0.746 W)
libras-pie	7.043	5 154	5 180	5.254
libras-pulgadas	84.52	63 050	62 160	63.05
onzas-pie	112.69	84 070	82 890	84.07
onzas-pulgadas	1 352	1 008 800	994 600	1 008.8
cm-g	97 376	72 643 000	71 620 000	72 643
cm-kg	97.376	72 643	71 620	72.643
m-kg	0.97376	726.43	716.2	0.72643
newton-m	9.549	7 124	7 024	7.124

Tabla 2-6. Valores K para los cálculos del par, potencia y velocidad.

## Ciclo de trabajo.

Un factor muy importante para la selección de motores es la del alcance de sus cargas de operación o su ciclo de trabajo. Los ciclos de trabajo sobre la potencia RMS o eficaz, están clasificados por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) en cuatro tipos:

- a. **Trabajo continuo.** Uso de la máquina en el que se necesita trabajo a carga bastante constante durante periodos razonablemente largos.
- b. **Trabajo periódico.** Necesidades de carga que vuelven a presentarse con regularidad a intervalos periódicos durante periodos razonablemente largos.
- c. **Trabajo intermitente.** Se presentan necesidades irregulares de carga, incluyendo periodos bastantes largos de reposo sin carga.
- d. **Trabajo variable.** Tanto las cargas como los intervalos de tiempo a los que se necesitan pueden estar sujetos a una amplia variación, sin reposo, a través de un periodo razonablemente largo, sin ninguna regularidad.

Ya se mencionó la importancia que tiene la selección de la potencia nominal correcta, y sus dos lados, el de estar sobrado ocasiona baja eficiencia y el de trabajar sobrecargado y por consiguiente a una temperatura superior a la nominal.

Puesto que cada 10°C de aumento en la temperatura de los devanados de una máquina acortan la vida útil del aislamiento a la mitad, se debe vigilar cuidadosamente este factor. Un motor debe trabajar a la temperatura máxima de devanados o debajo de ella si se espera que tenga durabilidad razonable.

Cuando la situación es de carga constante, relativamente es fácil determinar y seleccionar sin problemas el motor apropiado, pero cuando es la situación donde la carga varía en forma cíclica y donde los periodos de descanso son intermitentes la selección se complica por el hecho de que en este caso son más amplias las opciones. El calentamiento de un motor no está limitado necesariamente por una carga máxima breve pero fuerte, es necesario tomar en cuenta los valores medios cuadráticos de todas las porciones cíclicas de la carga.

Si las diversas potencias y tiempos se agrupan en una forma ordinaria de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, se obtiene la potencia eficaz. Los periodos de descanso o los momentos con el motor apagado se cuentan como un tercio de la duración que en realidad tienen. Esto es porque el motor no se enfría tan bien cuando no está girando.

$$\text{Potencia eficaz} = \sqrt{\frac{(p_1^2 t_1) + (p_2^2 t_2) + (p_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + t_3 + (t_r/3)}} \quad (2.7)$$

donde  $p_1$  a  $p_n$  son las capacidades de potencia de salida, en hp o en kW,  $t_r$  es el periodo de descanso, en minutos y horas congruente con los demás tiempos variables de  $t_1$  a  $t_n$ .

La ecuación 2.7 se puede usar para unidades tanto inglesas como para los del SI siempre y cuando sean congruentes dentro de la fórmula. Para comprobar se analiza el siguiente ejemplo:

Un motor de prueba se conectó a una carga de máquina de ciclo variable por un periodo de 1h. El motor trabajó a 11.0hp (8.21kW) durante 4min., a 1.25hp (0.933kW) por 6min., a 6.1hp (4.55kW) por 11 min. y estuvo apagado por un periodo de 9min. El ciclo se repetía sobre esta base. Calcule la potencia nominal requerida en caballos de fuerza (o kilowatts).

*Solución:* Una inspección muestra que los periodos hacen un total de 30min y luego se repiten, por lo cual se elige un periodo de cálculo de 30min. Usando la ecuación 2.7, los datos se aplican como se muestra. Obsérvese que, si en el periodo de descanso el motor hubiera estado trabajando en vacío, se usaría el tiempo total de funcionamiento en vez del periodo de descanso de 9 min dividido entre un factor de 3.

$$\begin{aligned} \text{hp eficaces} &= \sqrt{\frac{[(11.0)^2 * 4] + [(1.25)^2 * 6] + [(6.1)^2 * 11]}{4 + 6 + 11 + (9/3)}} \\ &= \sqrt{\frac{(121.00 * 4) + (1.5625 * 6) + (37.21 * 11)}{24}} \\ &= \sqrt{\frac{484.00 + 9.375 + 409.31}{24}} = \sqrt{\frac{902.68}{24}} = \sqrt{37.612} \\ &= 6.133 \end{aligned}$$

Con base en la tabla 2-5, se elegiría un motor de 7.5hp como la potencia nominal mayor siguiente NEMA. Se trabajaría al  $(11/7.5) \times 100 = 146.7\%$  de la carga nominal durante 4min., 16.6% de la carga nominal por 6min., y 81.3% de la carga nominal por 11min. Un motor de 5hp tendría una sobrecarga media de más de 20% y estaría condenado a una durabilidad corta aunque pudiera soportar el máximo de 11hp por un tiempo breve.

En unidades SI el problema queda así:

$$\begin{aligned} \text{kW} &= \sqrt{\frac{[(8.21)^2 * 4] + [(0.933)^2 * 6] + [(4.55)^2 * 11]}{4 + 6 + 11 + (9/3)}} \\ &= \sqrt{\frac{(67.404 * 4) + (0.87049 * 6) + (20.703 * 11)}{24}} \\ &= \sqrt{\frac{296.62 + 5.2229 + 227.73}{24}} = \sqrt{\frac{502.57}{24}} = \sqrt{20.940} \\ &= 4.576 \end{aligned}$$

Como comprobación, 4.576/0746kW por hp=6.134hp.

En este caso, un nuevo motor normal de 4.0kW ya estaría sobrecargado. Se necesitarían aquí detalles de diseño y pruebas específicas. Un motor de 5.6kW sería la selección adecuada.

En este ejemplo la máxima potencia se mantiene durante un intervalo de sólo 4min. Puesto que este tiempo no sería suficiente para llevar el motor hasta una temperatura de equilibrio, los devanados no alcanzarían su máxima temperatura. El cálculo de la media cuadrática saca provecho de esta situación. Si cada tiempo fuera 10 veces más largo en la misma proporción, el método *no sería válido*. Cuarenta minutos a una sobrecarga alta llevaría los devanados hasta una temperatura peligrosa, por consiguiente, el motor tendría que ser suficientemente grande para soportar la carga máxima sin que la demanda sobre el mismo fuera demasiado fuerte. Se requeriría un motor de al menos 10hp (o uno nuevo de normal de 8.0kW) para soportar el intervalo supuesto de 40min a 11hp (u 8.21kW).

Por el contrario, si los periodos de operación fueran mucho más cortos (0.1, 0.01), el problema realmente se complica y este análisis queda fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, se puede entender que el arranque y paro constantes, así como el cambio frecuente de velocidad, si se requiere, se transforman en factores de calentamiento debido a la mayor corriente en el circuito de la armadura.

### **Clases de servicio.**

De acuerdo con la norma UNE 20-113-73 se denomina *régimen* de una máquina eléctrica rotativa al conjunto de valores numéricos de aquellas magnitudes eléctricas y mecánicas que caracterizan sus diferentes estados de funcionamiento.

El concepto de *servicio*, según la norma UNE, está definido por el conjunto de los regímenes, incluyendo los períodos de funcionamiento en vacío y reposo, a los que está sometida la máquina teniendo en cuenta su duración y secuencia en el tiempo. En función con esta definición se entiende que una máquina está en reposo cuando en ella se da la ausencia completa de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica o de accionamiento mecánico. El funcionamiento en vacío hace referencia al estado de funcionamiento de una máquina girando a su velocidad normal en régimen nominal sin que se exija suministrar potencia.

En contra posición al régimen de vacío, el régimen de carga se caracteriza porque se impulsa mecánicamente a la máquina (generador) o se alimenta eléctricamente (motor) pero a la vez se extrae de sus terminales o de su eje una cierta potencia eléctrica o mecánica, respectivamente.

Como se deduce de la definición, hay en teoría infinidad de regímenes de cargas posibles. Dado que las máquinas eléctricas son utilizadas prácticamente en la totalidad de campos de la industria, cada uno con sus peculiaridades propias, los tipos de servicio que puedan presentarse son ilimitados, pues incluso dentro de cada campo se tienen ciclos y modos de funcionamiento muy diferentes.

Por ello, con el fin de abordar el problema en forma sistemática, las normas han estandarizado *ocho clases de servicio*. Si en teoría hay infinitos tipos de servicio posibles en la práctica puede asignarse, con una precisión industrial suficiente, a alguno de los ocho normalizados. Esta asignación o sustitución por un tipo de servicio normalizado equivalente de hacerse de tal modo que, si la máquina satisface las exigencias térmicas correspondientes al servicio normalizado consignado en su placa de características (esto es lo único que garantiza el fabricante), quede asegurado que también las satisface para el servicio real al que va destinada (esto es lo que, en definitiva, desea el usuario).

Estas ocho clases de servicio pueden agruparse en cuatro categorías básicas.

- a. **Servicio continuo S1.** La máquina funciona con un régimen de carga constante durante un tiempo suficientemente largo como para que se alcance el equilibrio térmico.
- b. **Servicio temporal o de corta duración S2.** Funcionamiento con un régimen de carga constante, pero durante un tiempo tan breve que no alcanza el equilibrio térmico. El régimen de reposo que sigue al régimen de carga es tal que la temperatura de la máquina se reduce prácticamente hasta la temperatura del medio ambiente. En la placa de características nominales de la máquina deberá indicarse el correspondiente tiempo de funcionamiento en carga que, de preferencia, se ajustará a uno de los siguientes valores estándar: 10, 30, 30 y 90 minutos.
- c. **Servicio intermitente S3, S4, S5.** Se trata de una serie continua de ciclos iguales. Cada ciclo se compone de un período de carga constante seguido de un período de reposo, siendo la duración de cada ciclo tal que ninguno de ellos se alcanza el estado de equilibrio térmico. En la clase de servicio S3 se admite que las puntas de corriente durante los sucesivos arranques no afectan prácticamente al calentamiento de la máquina, cosa que no ocurre durante los servicios S4 y S5. Durante el S5, además y antes del período de reposo, tiene lugar el frenado eléctrico que influye en el calentamiento de la máquina. Por el contrario, en las clases de servicio S3 y S4 se llega al reposo tras la desconexión de la alimentación, bien abandonando la máquina a sí misma, bien aplicándole un freno mecánico.

Los servicios intermitentes S4 y S5 constituyen casos especiales del S3. Las exigencias térmicas a los devanados están determinadas, sobre todo, por los procesos de arranque, frenado o conmutación. Para estas clases de servicio resulta pues esencial la frecuencia de las conexiones o número de conexiones por hora. El calificativo intermitente, común a todos estos servicios, hace referencia a que el ciclo de trabajo comprende siempre un período de reposo.

**d. Servicio ininterrumpido S6, S7, S8.** Se trata igualmente de una serie de ciclos iguales, pero sin período de reposo y en los que tampoco se alcanza el equilibrio térmico.

El S6 es análogo al S3 sustituyendo el período de reposo por uno de marcha en régimen de vacío.

El ciclo S7 está formado por un período de arranque, otro de marcha con carga constante y un tercero de frenado eléctrico, reiniciándose a continuación el ciclo sin solución de continuidad.

La clase servicio S8, algo más complicada, se refiere a máquinas cuyo ciclo de trabajo incluye varios períodos de carga constante (pero distinta en cada período) a velocidades diferentes.

Es importante observar que en estos tres últimos servicios se producen pérdidas en la máquina durante todo el ciclo de trabajo. Ello no quiere decir que durante el intervalo de marcha en vacío correspondiente a la clase de servicio S6 las condiciones térmicas sean más desfavorables que en el intervalo homólogo de reposo propio del servicio intermitente S3, ya que en este último caso, aunque no existen pérdidas a máquina parada, la refrigeración o ventilación suele ser entonces mucho menos eficaz.

Cuando procede, el llamado *factor de marcha relativo* (clase de servicio S3 a S8) que es la relación entre el tiempo de funcionamiento en carga, incluyendo el tiempo de arranque y frenado eléctrico así como la duración de un ciclo de trabajo, expresado en tanto por ciento *ED* (ecuación 2.8). Su valor es siempre inferior a la unidad, salvo en la clase de servicio S7. En todos los casos, la duración del ciclo que se toma como base para todos los datos que figuran en la placa de características es de 10 minutos. Los factores de marcha, también normalizados, deben tener uno de los siguientes valores: 15, 25, 40 y 60%. Para la designación completa de los regímenes de servicio S4, S5, S7 y S8 es necesario indicar otros datos adicionales como el factor de inercia, constante de energía cinética, etc.

$$ED = \frac{\text{Suma de los tiempos de trabajo}}{\text{tiempos de trabajo + pausas sin corriente}} \times 100\% \quad (2.8)$$

Duración del ciclo= Suma de los tiempos de conexión y de los de pausa sin corriente.

Duración máxima del ciclo= 10 minutos.

## 2.4 Control de los motores de corriente directa.

Una vez definidos los aspectos de potencia, par y velocidad, el siguiente paso es analizar, aunque sea brevemente y de forma general, los factores que tienen que ver con el control del motor. Destacando que el control de un motor eléctrico, independientemente del tipo cd o ca, va más allá del arranque y la variación de velocidad, ya que otros aspectos de control a considerar es el frenado, el sentido de giro y la protección, que bien cada uno de ellos pueden ser tema completo de otro trabajo, es por eso que sólo se analizan de forma generalizada.

En la mayoría de las aplicaciones, los motores están conectados directamente a una línea de alimentación, funcionando de acuerdo a sus características conjugadas de velocidad, y funcionando también de acuerdo al punto de trabajo que establece la carga mecánica. A su vez, en otras aplicaciones, los motores están provistos de equipos de control, mediante los cuales se pueden modificar sus características, pudiendo alterarse las condiciones de funcionamiento para poderse adoptar a las exigencias particulares de carga mecánica.

Cuando se habló de la fuerza contra electromotriz, se dijo que la limitaba la corriente del inducido a valores razonables. No obstante, cuando un motor entra en funcionamiento la f.c.e.m. es muy baja, de hecho se considera cero, concediendo un margen para que la corriente sea más bien elevada, en consecuencia, esto no es bueno, sobre todo tomando en cuenta que normalmente las bobinas de un inducido no están preparadas para soportar corrientes elevadas. Por esto, es imprescindible que la corriente de arranque esté limitada, evitando con ello que se quemé el inducido.

*El objetivo del control en el arranque y la velocidad de un motor de cd es la de proteger el motor contra daños debidos a cortocircuitos en el equipo, sobrecargas prolongadas, corrientes de arranque excesivas y proporcionar la forma más adecuada para controlar la velocidad de operación del motor.*

Actualmente se cuenta con modernos dispositivos basados en la electrónica de potencia que se utilizan para el arranque, aceleración y control de velocidad de los motores de cd, ya que difícilmente en las instalaciones industriales se cuenta con una fuente de alimentación de cd con la capacidad necesaria para hacer funcionar un motor de cd, sólo en aplicaciones en las que la alimentación es mediante baterías, se puede obtener esta alimentación de cd de forma directa, punto importante para la utilización de estos sistemas modernos de control. Y sólo por mencionar los que pueden ser los sistemas de control básicos de un motor de cd se tiene para el arranque:

- a. Dispositivos de arranque normal.** A fin de limitar la corriente a un valor admisible se conecta suficiente resistencia en serie con la armadura, estas resistencias limitadoras son de tipo variable (reóstatos, potenciómetros, etc.) o de valor fijo, siendo eliminados del circuito paulatinamente a medida que el motor acelera.

**b. Dispositivos de arranque automáticos.** En caso de que los motores se encuentren a una cierta distancia de los paneles de mando o cuando se utilizan unidades de potencia grandes, es conveniente usar siempre dispositivos automáticos, siendo los más utilizados los motores de pequeña potencia. Se basa en el uso de un relé temporizado además de la resistencia en serie con la armadura, resistencia que se reduce progresivamente hasta cero en un tiempo predeterminado, sin tener en cuenta la carga del motor.

Para el control de velocidad se tiene:

- a. Con resistencia en serie con la armadura.** Aplica para un motor excitación en paralelo con una resistencia variable conectada en serie a la armadura y se varía la corriente que crea el campo.
- b. Con resistencia en serie con el campo.** Aplica para un motor excitación en paralelo con una resistencia variable conectada en serie al campo. Si el voltaje de armadura permanece constante, la velocidad del motor aumenta en relación inversa con la corriente de campo. Este tipo de control, no permite una reducción de velocidad del motor por debajo de su valor nominal, pero si un aumento, ya que cualquier reducción del valor de la corriente de campo provocada por la inducción del reóstato, acarrea una reducción del flujo.
- c. Control cambiando el voltaje de armadura.** Consiste en el famoso *sistema Ward-Leonard*, versátil en extremo. El cual consiste en un motor de ca sirve como motor primario, para un generador de cd, el cual su vez se utiliza para suministrar un voltaje de cd a un motor de cd. El voltaje de armadura del motor puede ser controlado variando la corriente de campo del generador de cd, este voltaje de armadura permite que la velocidad del motor varíe de manera moderada entre un valor muy pequeño y la velocidad nominal. En cuanto a la velocidad del motor ésta puede ajustarse por encima de la velocidad nominal, reduciendo la corriente de campo del motor, logrando así controlar por completo la velocidad del motor además de tener la propiedad de regenerar. Las desventajas del sistema Ward-Leonard son obvias, una de ellas es que es necesario comprar tres máquinas completas de capacidad esencialmente igual, lo cual da directo en el costo. Otra es que las tres máquinas son relativamente mucho más ineficientes que una sola.

*Prácticamente estos sistemas de control han sido remplazados en las nuevas aplicaciones por los circuitos controladores basados en diodos y tiristores. Y sólo se han presentado como referencia teórica para entender mucho mejor la diferencia del avance tecnológico.*

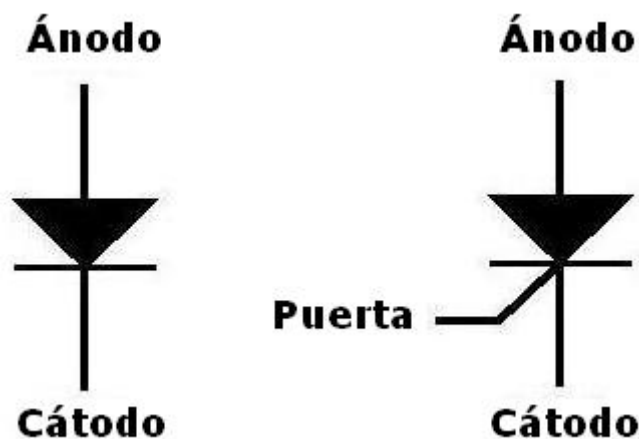


Es claro que la electrónica de control evoluciona constantemente por lo que no se pretende entrar en el detalle técnico de los elementos electrónicos de control, sólo presentar en forma general el funcionamiento y porque son ya la opción de control.

### **Convertidores electrónicos de potencia.**

Un convertidor electrónico de potencia es un circuito que transforma la energía eléctrica entrante a otra forma distinta de energía eléctrica a su salida, es decir, una señal de alterna convertirla a una señal de directa (rectificador) y viceversa (inversor), o bien una señal directa o alterna convertirla a su mismo tipo de señal pero con diferentes parámetros.

El tiristor de potencia, (también llamado SCR) al igual que el diodo de potencia, es un elemento muy utilizado en conmutación, especialmente en rectificadores. Así mismo los rectificadores con tiristores utilizan los mismos esquemas que los rectificadores con diodos, sólo que a diferencia del diodo el tiristor permite un control sobre el inicio de conducción, por lo que está provisto de un electrodo auxiliar de control denominado *puerta*. (Figura 2-3)



**Figura 2-3. Diodo y Tiristor.**

La particularidad de un tiristor, en comparación con el diodo, es que en funcionamiento normal, sin señal de mando aplicada a la puerta, no deja pasar la corriente. Cuando es aplicada una señal a la puerta, el tiristor se excita y conduce como un diodo de silicio ordinario, es decir deja pasar una corriente directa bajo una pequeña caída de tensión. Por lo tanto el tiristor se hace conductor no sólo cuando la tensión ánodo-cátodo se hace positiva, sino cuando, además siendo esta tensión positiva, se envía un impulso de corriente de excitación a la puerta.

Estando excitado el tiristor, puede anularse la señal de mando, pues ya no influye sobre sus características, dejando de ser conductor cuando la intensidad que lo atraviesa desciende por debajo de un valor mínimo, llamado "intensidad mínima de conducción o de mantenimiento".

En alterna, el tiristor se corta o desexcita al final de cada alternancia (con circuito puramente resistivo) y en la alternancia siguiente se vuelve a excitar si existe a la señal de mando. El desfase en el tiempo entre la aplicación de esta señal y el comienzo de la alternancia de conducción define el ángulo de disparo.

También se puede cortar el tiristor si se aplica una tensión inversa ánodo-cátodo, durante el tiempo necesario (tiempo de corte). En sentido inverso, las características son idénticas a las de un diodo ordinario con o sin señal de mando.

### Convertidor ca-cd.

Los convertidores ca-cd se clasifican en dos tipos principalmente según su tipología; *rectificadores de media onda y de onda completa.*

Un circuito rectificador de media onda esta constituido básicamente por un diodo en serie con la carga, en este caso puramente resistiva. Es el más simple de los convertidores ya que consta de un sólo elemento conductor y no requiere de control.

El diodo es un elemento semiconductor que únicamente conduce corriente si está polarizado directamente y por lo tanto si la diferencia de potencial entre ánodo y cátodo respectivamente es mayor que cero.

La entrada de este circuito es un voltaje senoidal a 60Hz. Este voltaje es transferido a la carga a través del diodo con la restricción de que sólo conducida en semiciclos positivos y el voltaje a la salida será cero, mientras a la entrada del circuito serán semiciclos negativos.

El diagrama esquemático del rectificador de media onda se presenta en la figura 2-4 y su forma de onda en la figura 2-5.

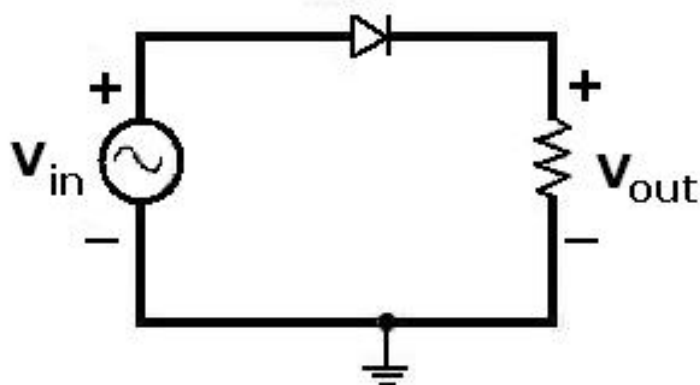


Figura 2-4. Rectificador de media onda.

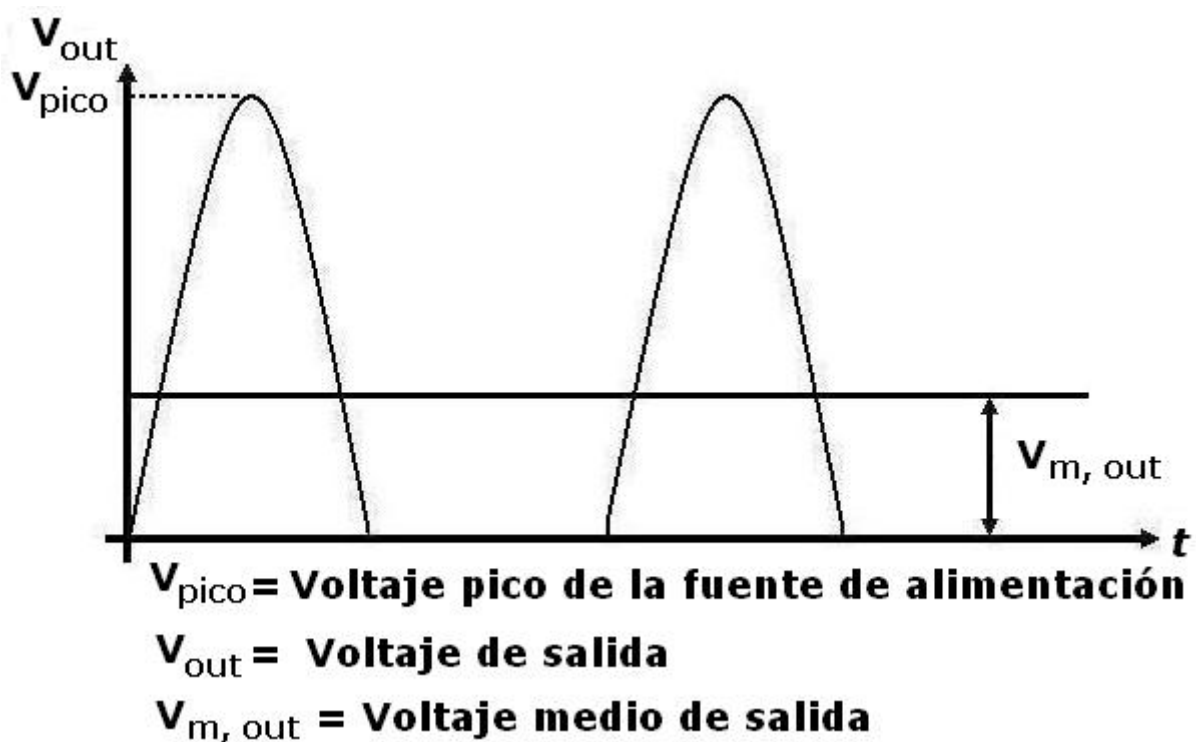


Figura 2-5. Forma de onda del rectificador de media onda.

El diagrama esquemático del rectificador de onda completa se muestra en la figura 2-6.

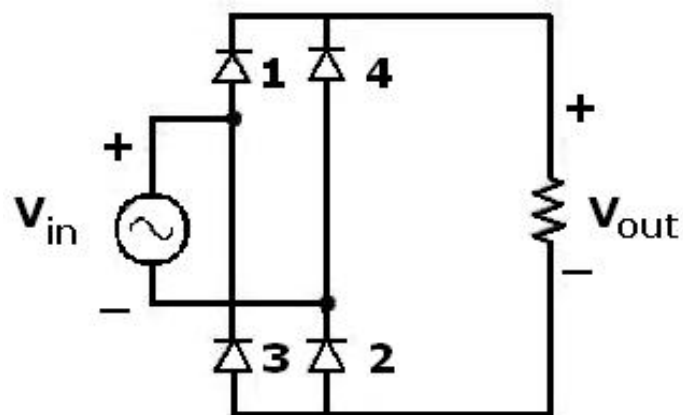


Figura 2-6. Rectificador de onda completa.

El rectificador de onda completa transfiere el voltaje de entrada en dos etapas:

- Quando el voltaje de entrada proporciona un semiciclo positivo los diodos 1 y 2 están polarizados directamente, mientras los diodos 3 y 4 están inversamente polarizados y no conducen.
- Quando el voltaje de entrada proporciona un semiciclo negativo los diodos 3 y 4 están polarizados directamente y transfieren el voltaje de la fuente a la carga, mientras que los diodos 1 y 2 están polarizados inversamente por lo cual provoca que no conduzcan corriente en ese periodo de tiempo. La forma de onda se muestra en la figura 2-7.

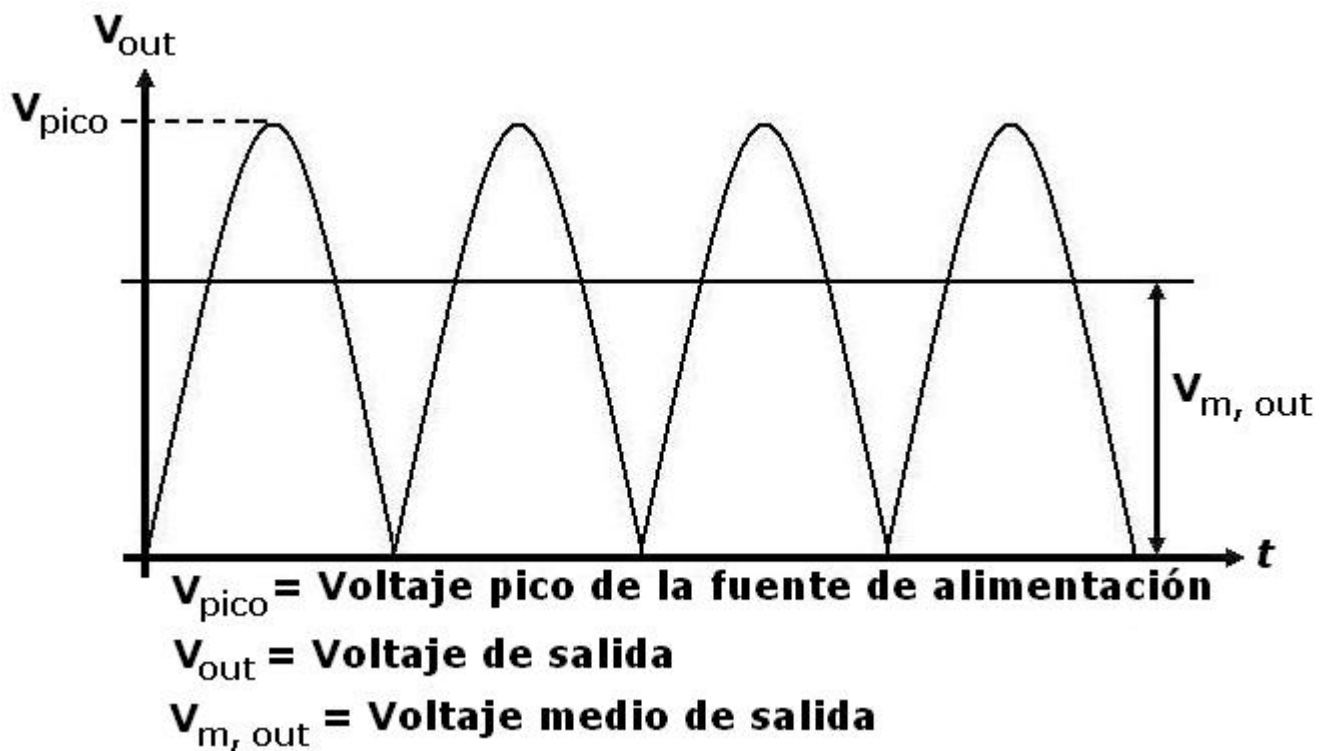


Figura 2-7. Forma de onda del rectificador de onda completa.

Obviamente entre más completo y complejo sea el arreglo del circuito del convertidor mejor será la rectificación.

### Convertidor cd-cd.

Este tipo de convertidores suelen estar conectados a una red que ofrece una tensión continua no regulada obtenida de la rectificación, esta tensión, que se convertirá en la tensión de entrada al convertidor, puede oscilar debido a la naturaleza senoidal de la tensión rectificadas.

Por consiguiente los convertidores cd-cd son utilizados para convertir una tensión de entrada no regulada en una salida controlada de corriente directa donde se controlará el valor medio de tensión a la salida del convertidor. A modo de resumen, el diagrama de bloques del conjunto rectificador-convertidor es:

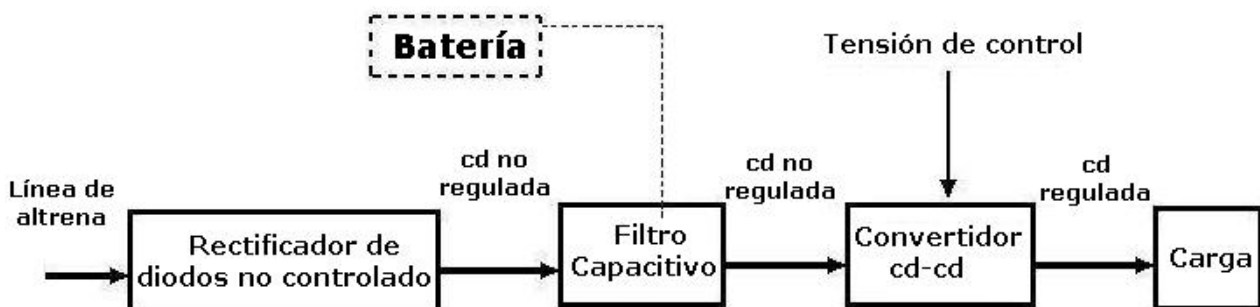


Figura 2-8. Diagrama de bloques del sistema rectificador-convertidor.

La principal característica de los convertidores de corriente directa es el control del valor medio de la tensión a la salida del convertidor hasta llegar al nivel de tensión deseado, aunque la tensión a la entrada suele ondular.

Los convertidores cd-cd utilizan uno o más semiconductores, a modo de interruptor, para transformar, de un nivel a otro, una tensión de directa dada, con lo que se logra un valor medio de tensión regulado a la salida del convertidor. Esto se consigue mediante el control de los estados ON-OFF de los semiconductores y la duración de cada uno de estos periodos ( $T_{ON}$ - $T_{OFF}$ ).

Para ilustrar la idea del modo de interrupción de corriente por semiconductor (switch-mode) y el concepto de variación de valor medio, se considerará el siguiente montaje básico de convertidor de corriente directa:

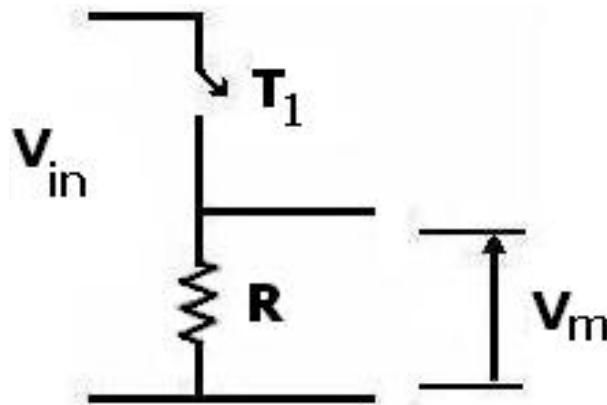


Figura 2-9. Topología básica de un convertidor cd-cd.

En la figura 2-10, se observa como el valor medio ( $V_d$ ) de la tensión de salida ( $V_{in}(t)$ ) depende de las variables  $T_{ON}$  y  $T_{OFF}$ , es decir de los estados ON-OFF de  $T_1$ .

La figura 2-11 es un diagrama de cómo puede quedar constituido un sistema de control de velocidad. El motor es alimentado por un conversor cuyo control de tensión se realiza mediante el circuito de disparo. Este circuito controla el ángulo de dos impulsos de puerta, obedeciendo a la señal el regulador de corriente y el de velocidad. La realimentación de velocidad se realiza mediante un tacómetro, el cual suministra una corriente dependiente de la señal que proviene de un derivador del motor.

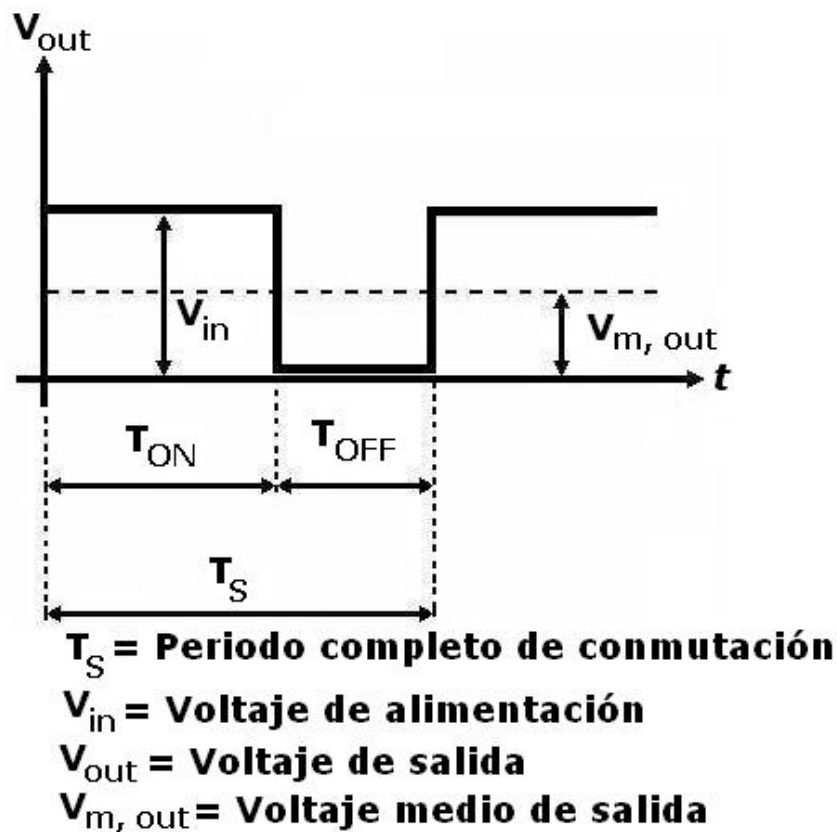


Figura 2-10. Evolución de su tensión y valor medio.

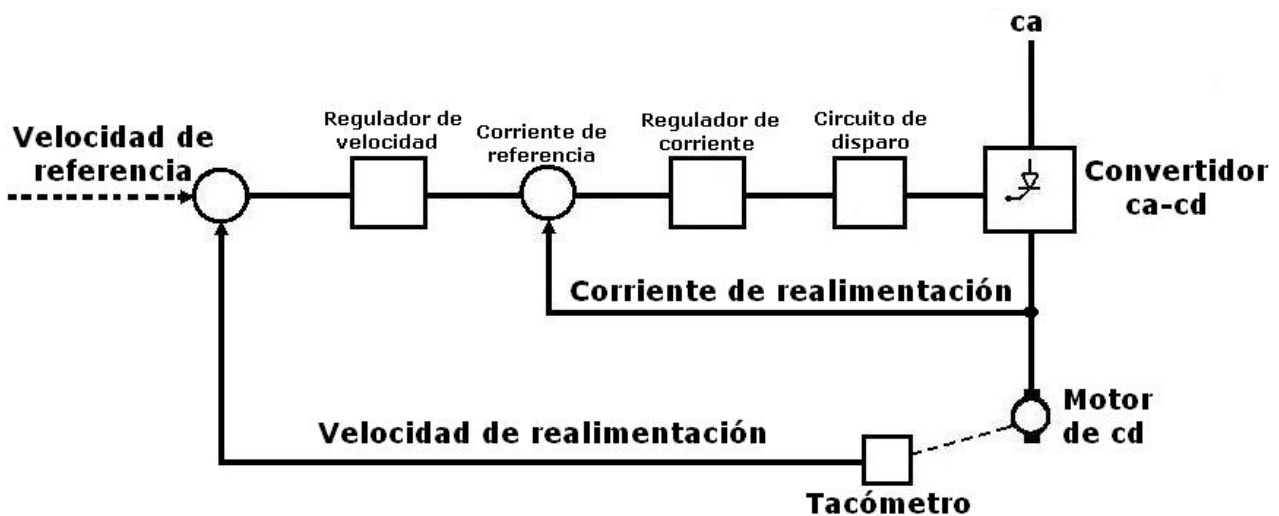


Figura 2-11. Controlador de velocidad con dispositivos SCR.

El funcionamiento se realiza de la siguiente manera:

- a. Mediante la referencia de velocidad (puede ser un potenciómetro), el operador escoge la velocidad de trabajo deseada para el motor.
- b. Si el motor está parado, el regulador de velocidad emite una señal para el regulador de corriente, solicitando que sea aumentada la corriente del motor.

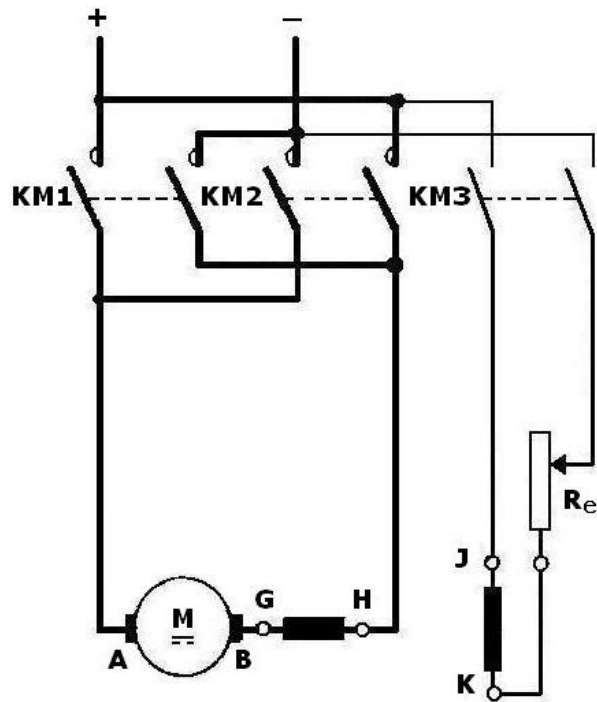
- c. Entonces, el regulador del motor alimenta el circuito de disparo, haciendo que los tiristores del convertidor ca-cd conduzcan, comenzando a su vez a ser aplicada corriente al motor.
- d. Esta corriente aumenta hasta un valor preestablecido para una referencia de corriente, permaneciendo en este valor, el cuál puede ser el de la corriente nominal (o de 1.5 a 2 veces la nominal).
- e. Cuando la velocidad, el regulador de velocidad retira la señal de salida, obligando al regulador de corriente a suprimir los impulsos y a disminuir la corriente del motor, el cuál deja de acelerar manteniendo a su vez la velocidad constante, viniendo la corriente definida por la carga del motor.
- f. El sistema queda asimismo estabilizado, con los reguladores corrigiendo constantemente la velocidad y la corriente a fin de mantener la velocidad constante, independientemente de las variaciones de carga en el eje del motor o en la tensión de red.

Es importante hacer notar, que con los convertidores electrónicos no sólo se consigue realizar un control de velocidad con bastante precisión, sino lograr también arrancadas extremadamente suaves y controladas. El rendimiento eléctrico es elevado, ya que no existen circuitos con reóstatos que causan pérdidas eléctricas ni sistemas que originarían costos de instalación y mantenimiento.

### **Inversión del sentido de giro.**

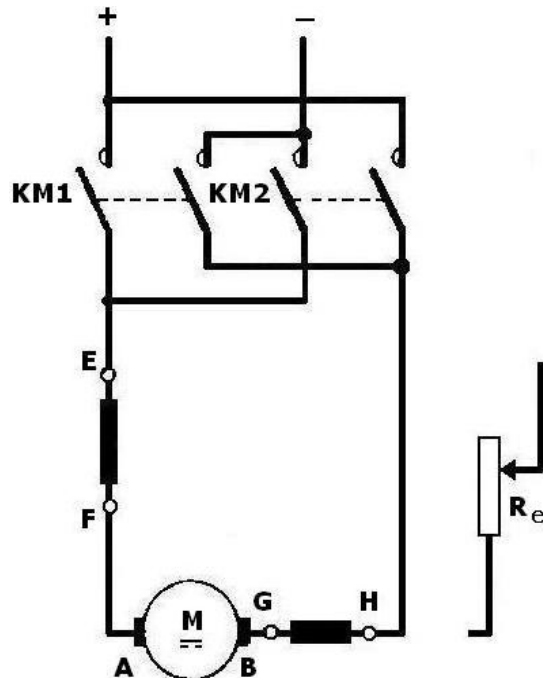
Para invertir el sentido de giro del motor, debe invertirse el sentido de circulación de la corriente que recorre uno de los dos devanados (inducido o inductor). No es conveniente actuar sobre el devanado inductor, debido a su elevado coeficiente de autoinducción, por lo que de forma general, es el devanado inducido el elegido para invertir el sentido de giro.

- a. **Motor con excitación independiente.** Inversión de giro cambiando el sentido de la corriente sobre el bobinado inducido. (Figura 2-12)
- b. **Motor con excitación en serie.** En un motor serie en el que el bobinado inductor e inducido están en serie, la inversión consiste en hacer que la corriente entre por G ó por H para lograr que el motor gire a la derecha o a la izquierda. (Figura 2-13)
- c. **Motor con excitación en paralelo.** La inversión de corriente y por tanto el sentido de giro se logra en este tipo de motor actuando sobre el bobinado inductor derivación CD y regulando la velocidad con el reóstato  $R_e$ . (Figura 2-14)
- d. **Motor con excitación compuesta.** En este tipo de motor, la inversión del sentido de giro se da igual que en motor en derivación. (Figura 2-15)



- KM: Contactor de potencia.
- A-B: Bobinado inducido.
- G-H: Bobinado inductor auxiliar o de conmutación.
- J-K: Bobinado inductor independiente.
- Re: Reóstato.
- KM1+KM3: Giro a izquierda.
- KM2+KM3: Giro a derecha.

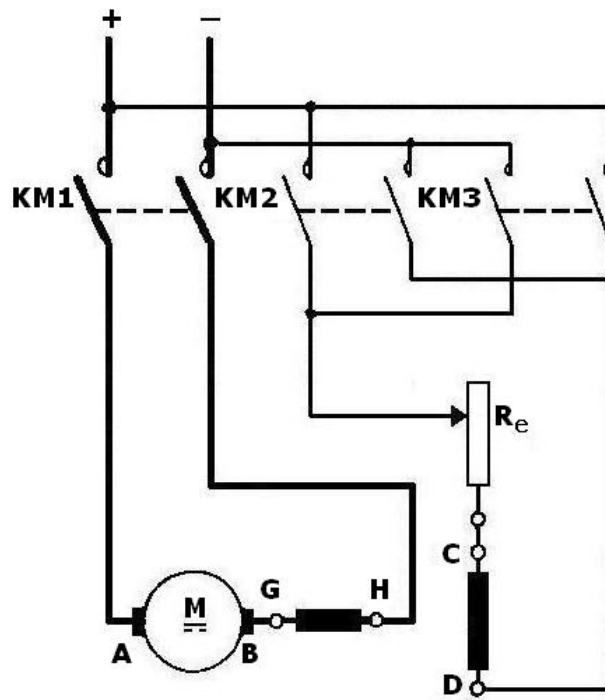
Figura 2-12. Motor con excitación independiente.



- KM: Contactor de potencia.
- A-B: Bobinado inducido.
- G-H: Bobinado inductor auxiliar o de conmutación.
- E-F: Bobinado inductor serie.
- Re: Reóstato.
- KM1: Giro a izquierda.
- KM2: Giro a derecha.

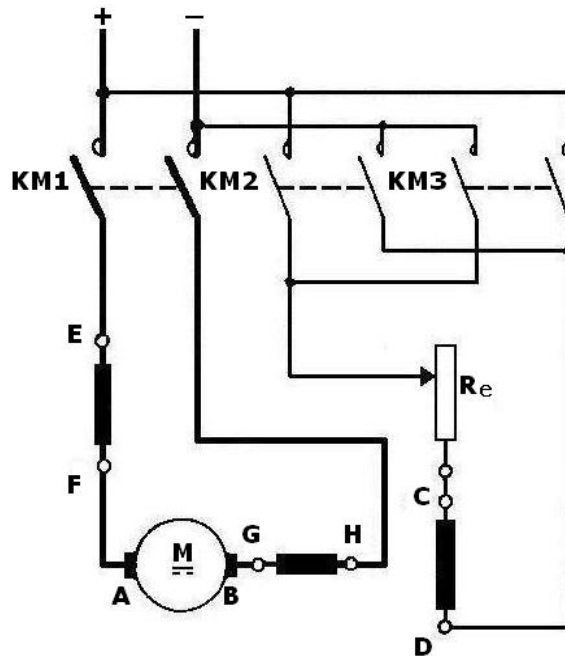
Figura 2-13. Motor excitación serie.





KM: Contactor de potencia.  
 A-B: Bobinado inducido.  
 G-H: Bobinado inductor auxiliar o de conmutación.  
 C-D: Bobinado inductor derivación o shunt.  
 Re: Reóstato.  
 KM1+KM2: Giro a izquierda.  
 KM1+KM3: Giro a derecha.

**Figura 2-14. Motor con excitación derivación.**



KM: Contactor de potencia.  
 A-B: Bobinado inducido.  
 G-H: Bobinado inductor auxiliar o de conmutación.  
 C-D: Bobinado inductor derivación o shunt.  
 E-F: Bobinado inductor serie.  
 Re: Reóstato.  
 KM1+KM2: Giro a izquierda.  
 KM1+KM3: Giro a derecha.

**Figura 2-15. Motor con excitación compuesta.**

## Frenado.

En el frenado de un motor de cd, su importancia radica en la cantidad de maniobras a realizar en una máquina. La acción de frenar conlleva que el motor tenga que hacer esfuerzos adicionales en el arranque, por desfase de maniobras de marcha motor y desfreno del mismo, ya que el iniciar el arranque del motor estando todavía frenado, es causa de una elevación adicional de temperatura del motor. En la parada, se da un tiempo entre la desconexión del motor y el bloqueo del freno, dicho tiempo será mayor o menor, según el tipo de freno y sistema de accionamiento de que se trate.

Dentro de la gran variedad de sistemas de frenado para motores de cd, se puede resumir que un motor de cd se puede frenar de forma eléctrica, el cual se da mediante el control del mismo motor, pero para motores de media y gran potencia se requiere de un sistema de frenado más potente como el mecánico y el electromagnético el cual está separado del motor, teniendo una parte móvil que va unida al eje del motor o de la máquina y la parte fija de bloqueo, a la bancada.

Se pueden considerar tres formas de frenado eléctrico de motores de cd:

- a. Frenado reostático.** Para realizar el frenado reostático debe desconectarse el motor de la red y conectarse al inducido, haciendo funcionar al motor como si de un generador se tratara y que haga descarga sobre la resistencia frenando el motor. A este procedimiento que permite controlar la deceleración o paro de accionamiento haciendo que el motor disipe la energía cinética acumulada sobre la resistencia, se denomina frenado dinámico.
- b. Frenado con recuperación.** Consiste en desconectar la alimentación al motor y en ceder a la línea, la energía que tiene el motor por efecto de su velocidad. Para poder efectuar esta maniobra eléctrica es necesario que la f.c.e.m. generada en el bobinado inducido del motor, sea mayor que la tensión de línea. Este método de frenado es muy interesante, en motores que se aplican a tracción.
- c. Frenado por inversión de corriente.** Consiste en invertir la corriente del motor, por lo tanto el sentido de giro en el momento de hacer el paro. La desconexión final del motor se hará en el momento en que el rotor del motor adquiera cero revoluciones o esté próximo a llegar al valor cero de revoluciones.

El frenado mecánico y electromagnético se da de la siguiente forma:

- a. Freno de banda.** Se da colocando un contrapeso, una parte de la banda está de forma firme y el otro extremo con un contrapeso.
- b. Freno de zapata.** Este sistema es para grandes potencias, consiste en dos zapatas unidas a una articulación mecánica que es movida por un sistema de pistón con fluido neumático o hidráulico o por medio de un electroimán. Normalmente en la posición de reposo el sistema está bloqueado, es decir, frenado.

- c. **Freno de disco.** En este caso, el sistema de frenado por disco corresponde a un motor que lleva incorporado este sistema de frenado, con su correspondiente electroimán y sus resortes de bloqueo. En situación de reposo, no hay tensión eléctrica sobre el motor ni el electroimán y el motor está frenado. Al dar tensión al motor, también se da al freno, con lo se desbloquea el eje.

En algunas máquinas debe tenerse en cuenta, la diferencia en tiempo, entre el momento que se da corriente al motor y el momento que el eje queda desbloqueado.

### **Circuito de protección.**

Otro accesorio que entra dentro de todo el esquema de control de un motor de cd es la sección de protección, la cual combina varios elementos diferentes que, en conjunto garantizan la operación segura del motor. Algunos de los elementos de seguridad típicos son:

- a. **Fusibles limitadores de corriente.** Sirven para desconectar el motor, con seguridad y rapidez, de la línea de potencia, si se presenta un cortocircuito dentro del motor. Los fusibles limitadores de corriente pueden interrumpir corrientes de hasta varios cientos de miles de amperios.
- b. **Disparador estático instantáneo.** Desconecta el motor, si la corriente del inducido excede el 300% de su valor nominal. Si la corriente del inducido excede el máximo permisible, el circuito de disparo activa el relé de falla, el cual desenergiza el relé de marcha abriendo los contactores principales y desconectando el motor de la línea.
- c. **Disparador de tiempo inverso, por sobrecarga.** Protege contra condiciones de sobrecorriente sostenida no tan grande para operar el disparador estático instantáneo, pero suficientemente grande para dañar al motor si se permite que continúe durante tiempo indefinido. El término inverso implica que cuanto mayor sea la corriente nominal que fluye en el motor, más rápidamente actúa la protección de sobrecarga. Por ejemplo, un disparador de tiempo inverso podría tardar un minuto completo para disparar si el flujo de corriente fuera 150% de la corriente nominal del motor y 10 segundos para disparar, si el flujo de corriente fuera 200% de la corriente nominal del motor.
- d. **Disparador de bajo voltaje.** Desenergiza el motor, si el voltaje de alimentación de éste cae más de 20%.
- e. **Disparador por pérdida de campo.** Desenergiza el motor, si pierde el circuito de campo.
- f. **Disparador por sobretemperatura.** Desenergiza el motor, si está en peligro de sobrecalentamiento.

## 2.5 Voltajes y corrientes nominales.

Existen millones de máquinas pequeñas de cd que trabajan con 6 y 12V. El nivel de 12V comprende de hecho hasta 14.7V, puesto que incluye toda la gama de dispositivos automotrices auxiliares que trabajan con 12V o menos de fuentes de batería y hasta 14.7V cuando el sistema para cargar la batería está en operación. Este voltaje está determinado por los requerimientos electroquímicos de los acumuladores normales de plomo y ácido. Por razones similares, hay toda una gama de máquinas que trabajan con los 25.5V normales de un sistema eléctrico de avión.

La NEMA adoptó los voltajes nominales normales para maquinaria que opera exclusivamente con cd, como sigue:

- a. Para generadores: 125, 252, 275 y 600V.
- b. Para motores: 120, 240 y 550V

Las diferencias entre los generadores y los motores tienen por objeto dar margen para las caídas de voltaje nominales en el alambrado de conexión. Los sistemas industriales operan a 120-125V y a 240-250V, mientras que los de tránsito rápido y de tracción para transporte operan a 500-600V.

Ahora la tendencia es hacia sistemas de industriales de control que aprovechan la flexibilidad inherente de motores de cd, pero que emplean ca como fuente primaria de energía. Las máquinas de cd trabajan entonces con ca rectificadas y a veces filtradas o modificadas por suministros de voltajes recortados o pulsantes. Esta tendencia ha demandado motores de cd con estructuras de campos laminados, lo que suele dar como resultado máquinas con diferentes voltajes nominales para sus circuitos de armadura y de campo en derivación.

En la actualidad, la NEMA está recomendando en su guía que los motores de cd pequeños, (los tamaños se especifican en secciones posteriores) se hagan funcionar con voltajes de armadura de 75, 90 o 150V cuando el suministro primario ca es monofásico. Al mismo tiempo, se sugiere que los campos operen con 50 o 100V. Los tamaños mayores de 400W o 0.4kW (alrededor de ½hp o más grandes), cuando trabajan con fuentes de ca monofásica, se espera que utilicen 90 o 180V para la armadura y 50, 100 o 200V para los campos.

Cuando estas mismas máquinas de cd pequeñas trabajan con una fuente trifásica rectificadas, el suministro de cd de armadura es en este caso de 240V, los campos trabajan con 100, 150 o 240V.

Los motores de tamaño mediano, emplean voltajes ligeramente mayores cuando trabajan con sistemas de control de ca rectificadas. Los voltajes de armadura son en este caso de 90 o 180V y los campos están una vez más a 50, 100 o 200V.

Cuando los motores de tamaño mediano trabajan con líneas de cd auténtica, se sugiere el antiguo valor de 240V de cd para circuitos de armadura en máquinas de hasta 200kW o más de 250hp. Estas máquinas deben tener circuitos de campo de 100, 150 o 240V, o cual depende de si se usa un control electrónico o voltaje de cd directo de la línea. Cuando se utiliza cd más alta de 500 o 550V para circuitos de armadura en la gama de tamaños de 5.6kW a 1 000kW, entonces es de esperar que los voltajes de campo sean de 240 o 300V.

Se puede esperar que los motores todavía más grandes de cd trabajen con suministros de cd de 500 o 700V, según el tamaño. Es obvio que el cuadro ya no resulta sencillo, ni se está de acuerdo plenamente en los límites de voltaje.

Cada alimentación de motor a un voltaje de líneas particular dará pues por resultado una corriente específica de línea bajo la carga nominal. Esta corriente debe ser suficientemente mayor que los volts multiplicados por el equivalente en corriente de la potencia de salida para dar lugar a las pérdidas normales de la máquina. Como consecuencia, el Código Eléctrico Nacional 430-147 NEC, (en E.U.A) reconoce ciertas relaciones de volts, potencia y corriente que son en base de la tabla 2-7.

kW nominales	hp de NEMA	Corriente de régimen a 120V	Eficiencia inferida a 120V	Corriente de régimen a 240V	Eficiencia inferida a 240V
0.10		2.1	40.0	1.1	40.0
	1/6	2.3	45.5	1.2	45.5
0.14		2.5	48.0	1.3	48.0
	1/4	2.9	53.6	1.5	53.6
0.20		3.1	54.3	1.6	54.3
	1/3	3.6	57.6	1.8	57.6
0.28		4.0	58.4	2.0	58.4
	1/2	5.2	59.8	2.6	59.8
0.40		5.5	60.5	2.8	60.5
0.56	3/4	7.4	63.0	3.7	63.0
	1	9.4	66.1	4.7	66.1
0.80		10.0	66.6	5.0	66.6
1.12	1 1/2	13.2	70.6	6.6	70.6
	2	17	73.1	8.5	73.1
1.6		18.2	73.3	9.1	73.3
	3	25	76.4	12.2	76.4
2.5		26.6	78.2	13.3	78.2
	5	40	77.7	20	77.7
4.0		42.7	78.1	21.3	78.1
5.6	7 1/2	58	80.4	58	80.4
	10	76	81.8	29	81.8
8.0		81.2	82.1	40.6	82.1
11.2	15	110	84.8	55	84.8

Con base en NEC 430-417, todos los datos de potencia en kW deducidos.

**Tabla 2-7. Corrientes con carga completa en amperes, motores de cd.**

La mayoría de las fuentes de información manejan de forma resumida la corriente de sobrecarga permisible cuando el motor funciona en régimen estacionario y con la ventilación en funcionamiento como lo muestra la tabla 2-8.

Corriente de carga en % de la nominal en servicio continuo	Tiempo
180	10 s
100	30 s
50	90 s
20	10 min
10	continuo

Tabla 2-8. Corrientes de sobrecarga.

En cuanto a los convertidores, la intensidad de línea del circuito de ca, de empleo depende se la clase de servicio deseado. Según la norma IEC146:

- a. **Servicio clase I.** Empleo al 100% de intensidad de línea, sin posibilidad de sobrecarga.
- b. **Servicio clase II.** Empleo al 100% de intensidad de línea, con posibilidad de 150% de intensidad de línea durante 1min. y que podrá repetirse cada 10 min.
- c. **Servicio clase III.** Empleo al 100% de intensidad de línea, con posibilidad de 125% de intensidad de línea durante 2h y 200% de intensidad de línea durante 10s.

A cada sobrecarga debe seguir el tiempo necesario para que el motor adquiriera su temperatura de régimen.

Y los voltajes normalizados son:

Tensión en ca del convertidor en V	1 x 200	1 x 380	3 x 220	3 x 380
Tensión de inducido	180	310	260	440
Tensión de excitación	190	340	180	220

Tabla 2-9. Voltajes normalizados para convertidores.

## Factor de forma.

Los motores de cd grandes para las normas NEMA son diseñados para funcionar a partir de una fuente de corriente directa y su desempeño variará en cada material con respecto a cuando funcione a partir de una fuente de corriente alterna rectificada. La diferencia en el rendimiento será más marcada cuando el número de pulsos del rectificador sea menor que seis o cuando la corriente del rectificador sea controlada por fase para producir un voltaje de salida del 85% o menos del máximo voltaje rectificado posible de salida.

Cuando los pequeños motores de cd destinados a usarse con alimentación electrónica de voltaje ajustable funcionan a partir de fuente de alimentación rectificada, es necesario que estén diseñados o hayan sido seleccionados para esta aplicación. NEMA sugiere que es posible un funcionamiento exitoso si la combinación da como resultado un factor de forma con carga nominal igual o menor que el factor de forma nominal del motor. En la tabla 2-10 se muestran los factores de forma recomendados de motores nominales, para algunas alimentaciones típicas de energía. *El factor de forma de la corriente es la razón del valor de rms (o eficaz) de la corriente con respecto a su valor promedio.* Este factor da una indicación del rizado de una onda de voltaje o corriente. Para factores de forma en la corriente de inducido mayores de 1.2 ÷ 1.3 puede ser necesaria la colocación de una reactancia en el circuito de inducido claro dependiendo del tipo de motor.

Fuente de potencia	Rango de factor de forma de corriente de inducido	Factor de forma de motor recomendado
<b>Tiristor de fase simple</b>		
Media onda	1.86-2.0	2
Media onda	1.71-1.85	1.85
Media onda u onda completa	1.51-1.7	1.7
Onda completa	1.41-1.5	1.5
Onda completa	1.31-1.4	1.4
Onda completa	1.21-1.3	1.3
<b>Tiristor Trifásico</b>		
Media onda	1.11-1.2	1.2
Onda completa	1.00-1.1	1.1

Tabla 2-10. Factores de forma recomendados.

## 2.6 Tamaños de carcasa.

Los tamaños de carcasas para motores y generadores normalizados por la NEMA, se visualizan como series de diámetros con pocas longitudes normalizadas dentro de cada diámetro. No existe una correspondencia de uno a uno entre la potencia de salida y tamaño de carcasa porque la velocidad introduce variaciones muy grandes de par y de enfriamiento. En la tabla 2-11 se muestra una familia típica de relaciones de caballos de fuerza, rpm y tamaño de carcasa, esta tabla se relaciona específicamente con los motores de 60°C y la construcción a prueba de goteo de General Electric, pero es razonablemente representativa de la construcción de calidad en la industria. Se observa que un tamaño de carcasa particular se puede usar con al menos ocho distintas combinaciones de potencia y rpm. La carcasa 256A se usa para 1hp a 400rpm y hasta 10hp a 2 500 y 3 500rpm, con una mezcla completa de potencias y velocidades entre esos límites.

hp	Velocidad (rpm)								
	3500	2500	1750	1150	850	650	500	400	300
Tamaño de carcasa									
1/2					187A	215A	216A	216A	
3/4				187A	215A	216A	218A	254A	
1			186A	187A	216A	218A	254A	256A	
1 1/2	186A	186A	187A	215A	218A	254A	256A	284A	
2	186A	187A	215A	216A	254A	256A	284A	286A	324A
3	187A	215A	216A	218A	256A	284A	286A	324A	
5	216A	216A	218A	256A	286A	324A	326A		
7 1/2	218A	218A	256A	286A	324A	326A			
10	256A	256A	284A	286A	326A				
15	284A	284A	286A	326A					
20	286A	286A	324A						
25		324A	326A						
30		326A							

Tabla 2-11. Potencias nominales en caballos de fuerza y tamaños de carcasa representativos, motores de cd.

En general, un número de carcasa dado tiene el mismo tamaño global y las mismas dimensiones de pie de montaje. Sin embargo, como las potencias de salida del motor aumentan en forma continua dentro de un tamaño dado, los esfuerzos sobre las flechas también lo han hecho y esto requiere flechas de diámetro mayor.

En la tabla 2-12 se muestran los grados de normalización que existen en cuanto a tamaños de carcasa de la NEMA, aclarando que todas las variaciones dentro de una serie se refieren a longitud adicional, con un cambio correspondiente de longitud de acuerdo con la separación de los pernos de montaje (Figura 2-16).



Todas las dimensiones se dan en pulgadas. Multiplicar por 25.4 para obtener milímetros. Ver figura 2-16 para la ubicación de las dimensiones.

Bastidor NEMA	Altura de la flecha	Flecha			Ubicación de pernos de montaje			Retroceso		
		Diámetro	Longitud de boca de conexión	Global	Ranura		Ancho		Longitud	Diámetro
					Cuadrada	Larga				
42	2.62	0.375	1.12	1.50	0.050	plana	3.5	1.69	0.28	2.06
48	3.00	0.500	1.5	1.88	0.050	plana	4.25	2.75	0.34 ranura	2.50
56	3.50	0.625	1.88	2.44	0.187	1.4	4.88	3.00	0.34	2.75
56H	3.50	0.625	1.88	2.12	0.187	1.4	4.88	3.00	ranuras	2.75
56HZ	3.50	0.500	1.88	1.50	plana	plana	y	y	ranuras	y
		0.875		2.25	0.188	1.4	5.50	5.00	ranuras	2.25
143T	3.50	0.875	2.25	2.50	0.188	1.4	5.50	4.00	0.34	2.25
145T	3.50	0.875	2.25	2.50	0.188	1.4	5.50	5.00	0.34	2.25
182	4.50	0.875	2.00	2.25	0.188	1.4	7.50	4.50	0.41	2.75
184	4.50	0.875	2.00	2.25	0.188	1.4	7.50	5.50	0.41	2.75
182T	4.50	1.125	2.50	2.75	0.250	1.8	7.50	4.50	0.41	2.75
184T	4.50	1.125	2.50	2.75	0.250	1.8	7.50	5.50	0.41	2.75
213	5.25	1.125	2.75	3.00	0.250	2.00	8.50	5.50	0.41	3.50
215	5.25	1.125	2.75	3.00	0.250	2.00	8.50	7.00	0.41	3.50
213T	5.25	1.375	3.13	3.38	0.312	2.4	8.50	5.50	0.41	3.50
215T	5.25	1.375	3.13	3.38	0.312	2.4	8.50	7.00	0.41	3.50
254U	6.25	1.375	3.50	3.75	0.312	2.8	10.00	8.25	0.53	4.25
256U	6.25	1.375	3.50	3.75	0.312	2.8	10.00	10.00	0.53	4.25
254T	6.25	1.625	3.75	4.00	0.375	2.9	10.00	8.25	0.53	4.25
256T	6.25	1.625	3.75	4.00	0.375	2.9	10.00	10.00	0.53	4.25
284TS	7.00	1.625	3.00	3.25	0.375	1.9	11.00	9.50	0.53	4.75
286TS	7.00	1.625	3.00	3.25	0.375	1.9	11.00	11.00	0.53	4.75
284T	7.00	1.875	4.38	4.62	0.500	3.3	11.00	9.50	0.53	4.75
286T	7.00	1.875	4.38	4.62	0.500	3.3	11.00	11.00	0.53	4.75
324TS	8.00	1.875	3.50	3.75	0.500	2.00	12.50	10.50	0.66	5.25
326TS	8.00	1.875	3.50	3.75	0.500	2.00	12.50	12.00	0.66	5.25
324T	8.00	2.125	5.00	5.25	0.500	3.9	12.50	10.50	0.66	5.25
326T	8.00	2.125	5.00	5.25	0.500	3.9	12.50	12.00	0.66	5.25
364TS	9.00	1.875	3.50	3.75	0.500	2.00	14.00	11.25	0.69	5.88
365TS	9.00	1.875	3.50	3.75	0.500	2.00	14.00	12.25	0.69	5.88
364T	9.00	2.375	5.62	5.87	0.625	4.3	14.00	11.25	0.69	5.88
365T	9.00	2.375	5.62	5.87	0.625	4.3	14.00	12.25	0.69	5.88
404TS	10.00	2.125	4.00	4.25	0.500	2.8	16.00	12.25	0.81	6.62
405TS	10.00	2.125	4.00	4.25	0.500	2.8	16.00	13.75	0.81	6.62
404T	10.00	2.875	7.00	7.25	0.750	5.6	16.00	12.25	0.81	6.62
405T	10.00	2.875	7.00	7.25	0.750	5.6	16.00	13.75	0.81	6.62
444TS	11.00	2.375	4.50	4.75	0.625	3.00	18.00	14.50	0.81	7.50
445TS	11.00	2.375	4.50	4.75	0.625	3.00	18.00	16.50	0.81	7.50
447TS	11.00	2.375	4.50	4.75	0.625	3.00	18.00	20.00	0.81	7.50
444T	11.00	3.375	8.25	8.50	0.875	6.9	18.00	14.50	0.81	7.50
445T	11.00	3.375	8.25	8.50	0.875	6.9	18.00	16.50	0.81	7.50
447T	11.00	3.375	8.25	8.50	0.875	6.9	18.00	20.00	0.81	7.50

Tabla 2-12. Dimensiones normales de carcasas de NEMA.

A pesar de los mejores esfuerzos de la NEMA, los diversos catálogos de fabricantes actuales están a veces en desacuerdo, de modo que la tabla 2-12 no coincide con todos los fabricantes en todas partes. Esta área de normalización es importante a causa de la larga vida útil de los motores y generadores eléctricos y máquinas que se utilizan.

Las máquinas de cd se han conservado tan próximas a las normas de carcasa NEMA porque así resulta práctico, pero a veces se encuentran en carcasas normales *más largas* para alojar el conmutador. Por ejemplo, el tamaño de carcasa 216 es sólo una pulgada (25.4mm) *más largo* que el 215. Ciertas unidades tienen flechas en ambos extremos, cuando es así, en los tamaños más grandes, un extremo es el más grande y el otro el más pequeño de los dos tamaños principales para esa carcasa básica.

El proceso de normalizar tamaños de carcasa de máquinas eléctricas para tamaños progresivos con dimensiones métricas reconocidos a nivel internacional fue al fin concluido por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). Las normas IEC para tamaño de motor aparecen ahora en algunos catálogos de fabricantes estadounidenses, en la que se adoptaron casi todos los tamaños tentativos de los años ochenta, aunque no ocurrió así con muchos tamaños intermedios sugeridos.

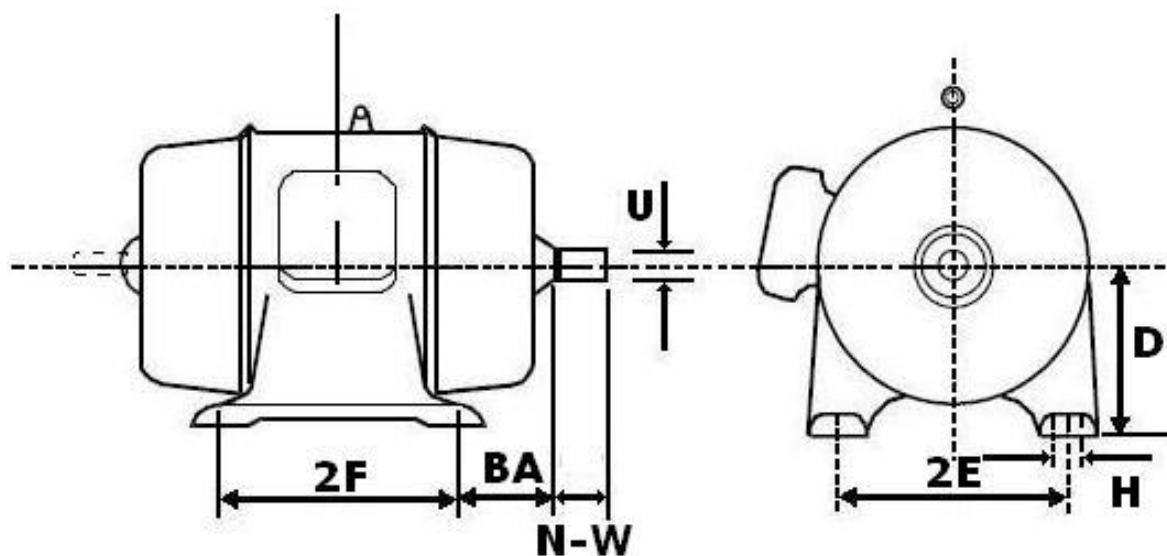


Figura 2-16. Dimensiones normales de motores de NEMA.

De hecho muchas de estas dimensiones de la IEC se aproximan mucho a las condiciones patrón de la NEMA. En la tabla 2-13 se muestra una lista parcial. Sin embargo, las alturas de las flechas elegidas concuerdan con la antigua ISO R496, habiéndose escogido una de cada tres o dos alturas de eje recomendadas por la ISO (Organización Internacional para la Estandarización).

Puesto que en la actualidad hay mucha diferencia entre los motores de diversos fabricantes dentro de una carcasa de NEMA dada, y como sólo la ubicación de la flecha y las dimensiones del pie de montaje son realmente críticas, se considera que éste es un enfoque práctico. La mayoría de los fabricantes podrá conservar casi todas sus herramientas y con ajustes menores, podrá comercializar a nivel internacional, las máquinas eléctricas aceptables.

Parcial: todas las dimensiones se dan en milímetros (25.4mm = 1in)										
Carcasa IEC	Tipo	Montaje de pie				Eje		Ranura de la flecha		
		A	B	C	H	D	E	Asiento	Ancho	Profundidad
2E		2F	BA	D	U	V	G	F	GD	
63	300	100	80	40	63	11	23	8.5	4	4
71	300 400	112	90	48	71	14	30	11	5	5
80	400 500	125	100	50	80	19	40	15.5	6	6
90	S L	140	100 125	56	90	24	50	20	8	7
100	S L	160	112 140	63	100	28	60	24	8	7
112	S M	190	114 140	70	112	28	60	24	8	7
132	S M	216	140 178	89	132	38	80	33	10	8
160	M L	254	210 254	108	160	42	110	37	12	8
180	M L	279	241 279	121	180	48	110	42.5	14	9
200	M L	318	267 305	133	200	55	110	49	16	10
225	S M	356	286 311	149	225	60	140	53	18	11
250	S M	406	311 349	168	250	70	140	62.5	20	12
280	S M	457	386 419	190	280	80	170	71	22	14
315	S M	508	406 457	216	315	85	170	76	22	14
355	S L	610	500 630	254	355	85	170	76	22	14

\*Véase la figura 2-16.

Nota: S= chico; M= mediano; L= grande.

**Tabla 2-13. Dimensiones de carcasa normales de IEC.**

Durante los años setenta se realizó un esfuerzo importante para hacer que Estado Unidos adoptará el entonces nuevo sistema métrico SI, lo que provocó muchos diseños que emplean dimensiones del SI. Existen muchas conformidades parciales, por ejemplo, un automóvil, en las que un componente nuevo tiene dimensiones en el SI, mientras que otras no. Las máquinas eléctricas tienen inherentemente unidades de larga durabilidad, en forma similar.

En la actualidad, se puede ver que las diferencias de perfil físico no van a ser drásticas. Por ejemplo, un motor de 10hp y 1 150rpm con tamaño de carcasa 386T o 386TS será reemplazado por su equivalente más próximo normalizado a nivel internacional.

Las normas en cuanto a rpm tendrán una equivalencia muy cercana, puesto que incluso en máquinas de cd se derivan, en forma ordinaria, de las velocidades de motores de inducción de ca. Así pues, 1 150rpm están dentro del alcance con carga de un motor de inducción seis polos cuando está operando con ca de 60Hz, una velocidad con carga típica de un motor de cd puede ser tan próxima como 1 140rpm o su equivalente en radianes por segundo.

Los motores de distintos tamaños se fabrican con una medida de carcasa tan pequeña como es razonablemente posible con eficiencias normales y temperaturas aceptables. Un motor equivalente de IEC podría muy bien tener el tamaño de carcasa 180L de la tabla 2-13, la elección dependerá de una temperatura y eficiencia aceptables, pero es poco probable una altura de la flecha mayor de 180mm. Puesto que 180mm es sólo 2.2mm mayor que 7in (equivalente a 7.087in), sería prudente proyectar una nueva máquina con altura de flecha de 180mm. Se podría incluir perfectamente una calza adicional de 0.087in (2.2mm), puesto que en la actualidad es probable que se use al inicio una carcasa de NEMA ya existente. Al sustituirlo, quizá unos 10 o 20 años después, o cuando se fabrique el motor 180F o su equivalente, se podría instalar en el mismo espacio, si se fuera a usar un repuesto con 160mm de altura de flecha, sería fácil suministrar un separador adicional de 20mm. Si se trata de una máquina con transmisión de engranes, sería recomendable proporcionar la altura de la flecha de 180mm con calza, puesto que si sólo se suministraran la 7in básicas (177.8mm), en el futuro no encajaría una unidad nueva de 180mm.

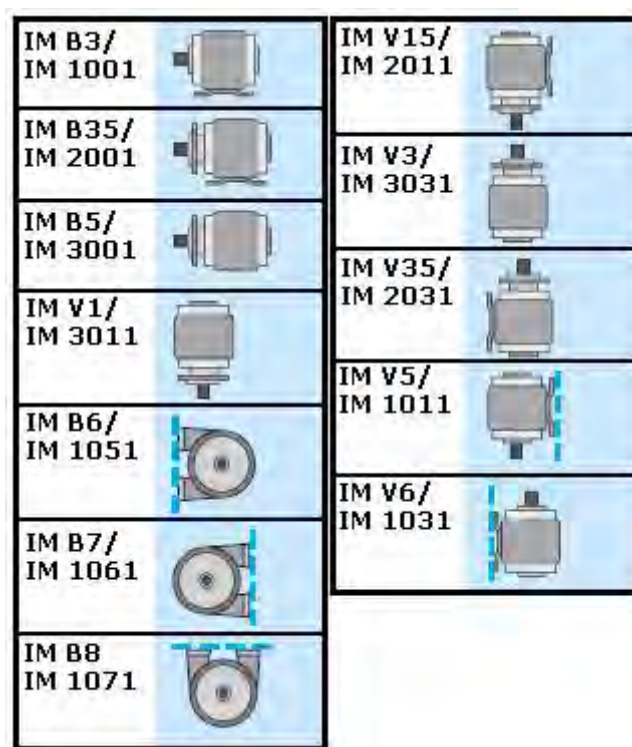
El diámetro de la flecha es un poco menos seguro, pero con base en las tablas 2-12 y 2-13 probablemente sería de 42 o 48mm. Tal vez se usaría una flecha más pequeña de hasta 38mm para una altura de flecha de 160mm. Es relativamente fácil taladrar o encasquillar una polea o un engrane. Si se trata de una polea, es un repuesto de bajo costo, en especial si es una con boca de conexión cónica acuñable de marca registrada, donde sólo es necesario cambiar el accesorio de inserción.

De acuerdo con la tabla 2-13, la separación longitudinal (2F) de los orificios para pernos de montaje sería 279mm, que es muy cercana a la original de 11.00in. De hecho, 279mm equivale a 10.984in, de modo que la diferencia nominal de 0.016in, o más o menos 1/64in, se puede probablemente pasar por alto al considerar el espacio entre los orificios para pernos. Ocurre que la separación lateral (2E) es la misma en este caso. Como resultado, una carcasa NEMA 286 se puede sustituir en forma directa por un motor 180L y los pernos encajan en su lugar. Esto se cumple en especial si se elige un perno del tamaño preferente de 12mm de diámetro. Puesto que esto equivale a un diámetro de 0.472in, se tiene espacio libre adicional respecto al tamaño preferente original de 0.5in.

Se puede ver que todo este asunto se encuentra sometido a una consideración muy cuidadosa y si se reflexiona lo suficiente al inicio de un nuevo diseño, se verá que casi todos los problemas de intercambio de motores son bastante sencillos.

Todo este asunto de las formas constructivas y de montaje es en cierta forma complejo y es que mucho tiene que ver el hecho de que dependiendo el país del constructor es la norma que aplica. Hasta este momento se han tratado normas NEMA y IEC para el montaje y se ha visto similitud entre ellas. En Europa otras normas que tienen analogía con las normas IEC son la norma UNE y la norma DIN, pero se puede decir que la norma DIN es la que predomina, ya que la norma UNE está basada en gran parte en la norma DIN y por consiguiente con la norma DIN y la norma IEC se tiene la conjunción de las tres.

Así otra opción, en las formas constructivas se tiene la norma DIN EN 60034 con la brida diseñada de conformidad con IEC 60072. Dicha norma presenta dos códigos, la designación se realiza mediante una letra mayúscula seguida de una o dos cifras, tal como se muestra en la figura 2-17, donde se reflejan las variantes constructivas más usuales.



**Figura 2-17. Formas constructivas más usuales según la norma DIN EN 60034. (Tipo de construcción y posición)**

La designación en el caso más general se realiza mediante las letras IM seguidas de cuatro cifras: la primera indica la forma de construcción, la segunda y tercera se refieren a las disposiciones de montaje y la cuarta caracteriza el o los extremos libres del eje. Dada la gran variedad de formas constructivas que incluye esta normalización para mayores detalles es necesario remitir a quien desee saber más acerca de, a la mencionada norma.

## 2.7 Tipos de cubiertas.

Un motor de cd puede estar envuelto en diversas formas normalizadas. La NEMA define un grupo de tipos de cubierta de motor que han sido respetados durante largo tiempo por la industria eléctrica. Es probable que algunos de los tipos se combinen con los acordados por la IEC o la ISO, para simplificar la manufactura, los inventarios y las ventas.

Las cubiertas más complicadas requieren por lo común tamaños de carcasa más grandes para una potencia dada puesto que la ventilación está restringida. El costo y el tamaño físico de los motores totalmente cerrados es mayor que el de los motores abiertos de la misma potencia, ciclo de trabajo y elevación sobre la temperatura ambiente.

Los tipos de cubiertas clasificadas por la NEMA son los siguientes:

- a. **Cubierta abierto.** Es una estructura de carcasa con extremo abierto que permite máxima circulación de aire para ventilación. Esta construcción tiene por lo común características que impiden que los objetos que caen hagan contacto con partes eléctricamente cargadas o en movimiento.
- b. **Cubierta a prueba de goteo.** Está construida de tal manera que las partículas líquidas o sólidas que caen a no más de 15° respecto a la vertical no penetran en la cubierta ya sea directamente o al escurrir por la superficie.
- c. **Cubierta prueba de salpicadura.** Lleva más adelante la protección contra goteo de tal manera que las partículas que llegan a más de 100° respecto a la vertical no penetran. Adviértase que cada aumento de protección reduce en forma ordinaria la ventilación.
- d. **Cubierta con guardas.** Esta cubierta está dispuesta de tal manera que ningún objeto accidental o intencional pueda penetrar. Consiste en una varilla de ½in (12.7mm), que no puede penetrar las pantallas o guardas.
- e. **Cubierta a prueba de intemperie.** Es la variación del diseño a prueba de goteo y a prueba de salpicadura que impide que la lluvia, nieve o polvo arrastrados por el viento hagan contacto con partes eléctricas.
- f. **Cubierta totalmente cerrada.** Ésta es un confinamiento cerrado (cubierto), pero no necesariamente a prueba de aire.

- g. Cubierta a prueba de explosión.** Está diseñada para contener una explosión interna e impedir ignición de gases o vapores específicos que rodean al motor. Se puede conseguir por medio de pantallas o trampas de llamas especificadas, como en una abertura para aire de carburador de motor marino de gasolina. No significa que sea una cubierta total, aunque sí puede ser así.
- h. Cubierta a prueba de ignición de polvos.** Totalmente encerrada y construida para excluir la entrada de polvos inflamables o polvos que pudieran acumularse y afectar el rendimiento.
- i. Cubierta impermeable.** Diseñada de tal manera que su cobertura total puede ser rociada por el chorro de una manguera sin efectos perjudiciales. Se permiten fugas en la flecha si se drenan en forma específica. Esta cubierta se utiliza en maquinaria para procesar productos lácteos y otros alimentos, donde a diario se hace limpieza e incluso esterilización.

Otras especificaciones que se utilizan son los denominados *grados de protección* dictados por la norma UNE 20-324-78 que establece un sistema de especificación general de las cubiertas de cualquier material eléctrico ya que no es exclusivo de las máquinas eléctricas, siempre y cuando la tensión nominal de los equipos eléctricos no exceda de 72.5kW.

De acuerdo con dicha norma, el grado de protección se designa mediante las letras IP (*International Protection*) seguidas de tres cifras cuyo significado es el siguiente:

- a.** La primera caracteriza la protección de las personas frente a los contactos con partes bajo tensión y/o piezas en movimiento, situadas en el interior de la envolvente, así como la protección del material contra la penetración de cuerpos sólidos extraños.
- b.** La segunda cifra define la protección contra los defectos perjudiciales ocasionados por la penetración del agua.
- c.** La tercera cifra se refiere a la protección del material contra daños mecánicos.

En la mencionada norma se gradúan y detallan los diferentes niveles de protección posibles en cada uno de los tres apartados precitados, así como los procedimientos de ensayos normalizados para verificarlos. En las tablas 2-14 y 2-15 extraídas de la citada norma, muestran la graduación de dichos niveles de protección relacionados con la primera y segunda cifra característica. Por lo general, en las máquinas eléctricas la tercera cifra no se indica.

Primera cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	Ninguna protección especial
1	Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 50mm.	Una gran superficie del cuerpo humano, por ejemplo la mano (pero ninguna protección contra una penetración deliberada). Cuerpos sólidos demás de 50mm de diámetro.
2	Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 12mm.	Los dedos u objetos análogos que no excedan 80mm de longitud. Cuerpos sólidos de más de 2.5mm de diámetro.
3	Protegido con los cuerpos sólidos superiores a 2.5mm.	Herramientas, alambres, etc., de diámetro o de espesor superiores a 2.5mm. Cuerpos sólidos de más de 2.5mm de diámetro.
4	Protegido contra los cuerpos sólidos superiores a 1mm.	Alambres o bandas de espesor superior a 1.0mm. Cuerpos sólidos de más de 1.0mm de diámetro.
5	Protegido contra el polvo.	No se impide del todo la penetración del polvo, pero éste no puede penetrar en cantidad suficiente como para perjudicar el buen funcionamiento del material.
6	Totalmente protegido contra el polvo.	No hay penetración de polvo.

Notas:

1. Las descripciones abreviadas que figuran en la columna 2 de esta tabla, no deben utilizarse para especificar el modo de protección; sólo deben servir como designaciones abreviadas.
2. En el caso de material provisto de orificios de vaciado o de orificios de ventilación, la aplicación de esta tabla para las primeras cifras características 3 y 4, se indica en la norma UNE correspondiente.
3. En el caso de material provisto de orificios de vaciado, la aplicación de esta tabla para la primera cifra característica 5, se inicia en la norma UNE correspondiente.

**Tabla 2-14. Grados de protección contra contactos y contra cuerpos extraños.**



Segunda cifra característica	Grado de protección	
	Descripción abreviada	Definición
0	No protegido	Ninguna protección especial
1	Protegido contra las caídas verticales de gotas de agua.	Las gotas de agua (que caen verticalmente) no deben producir efectos perjudiciales.
2	Protegido contra caídas de agua con una inclinación máxima de 15°.	La caída vertical de gotas de agua no debe producir efectos perjudiciales cuando la envolvente está inclinada hasta 15° de suposición normal.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia.	El agua que caiga en forma de lluvia en una dirección que tenga respecto a la vertical un ángulo inferior o igual a 60°, no debe producir efectos perjudiciales.
4	Protegido contra proyecciones de agua.	El agua proyectada sobre el envolvente desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
5	Protegido contra los chorros de agua.	El agua lanzada sobre el envolvente por una boquilla desde cualquier dirección, no debe producir efectos perjudiciales.
6	Protegido contra los embates del mar.	Con mar gruesa o mediante chorros potentes, el agua no deberá penetrar en la envolvente en cantidad perjudicial.
7	Protegido contra los efectos de la inmersión.	No debe ser posible que el agua penetre en cantidad perjudicial en el interior de la envolvente sumergida en agua, con una presión y un tiempo determinado.
8	Protegido contra la inmersión prolongada.	El material es adecuado para la inmersión prolongada en agua en las condiciones específicas por el fabricante. <i>Nota: Esto significa normalmente que el material es rigurosamente estanco, pero para ciertos tipos de material, esto puede significar que el agua puede penetrar con tal de que no produzca efectos perjudiciales.</i>

Nota: Las descripciones abreviadas que figuran en la columna 2 de esta tabla, no deben utilizarse para especificar el modo de protección; sólo deben servir como designaciones abreviadas.

**Tabla 2-15. Grados de protección contra el agua.**

## **2.8 Enfriamiento y límites de temperatura.**

La inmensa mayoría de los motores eléctricos se enfrían con aire, de manera que la temperatura ambiente o circundante determina la eficacia del enfriamiento del motor. La temperatura que limita la durabilidad del motor es la de los alambres de los devanados de la armadura. Aquí el problema no es tanto el cobre como la eficacia del aislamiento, las temperaturas altas oxidan y carbonizan gradualmente los materiales de aislamiento, lo cual reduce su capacidad para aislar. Conforme los materiales cambian lentamente, pasan poco a poco de buenos a malos aisladores y por último a conductores parciales.

El antiguo aislamiento permite que fluya una corriente en cortocircuito hacia donde no fluía antes. Este cortocircuito puede sacar sólo en forma parcial del circuito una vuelta o dos de devanado. Cuando este aumento progresivo de conductividad alcanza una situación en la que puede fluir una corriente considerable, pronto ocurre la falla. Lo que ocurre comúnmente es que una parte localizada del devanado se funde debido al efecto de este corto circuito, en el mejor de los casos el devanado se destruye. La falla puede muy bien dar por resultado una falla progresiva de otros devanados no afectados hasta entonces y puede ocurrir un incendio grave puesto que casi todos los aislamientos arden cuando se calientan lo suficiente. Éste es el proceso que mantiene activo al mercado de repuestos de motor y a los reconstructores de motores.

La temperatura ambiente es la base a partir de la cual se inicia todo calentamiento interno. Evidentemente, un lugar con temperatura alta reduce la capacidad de los motores, puesto que da por resultado temperaturas anormales dentro de un motor que por lo demás es normal. Las temperaturas ambientales de hasta 40°C pueden ser perfectamente aceptables a pesar de ser superiores a la normal de habitación de alrededor de 20°C. Si el motor está asociado con un dispositivo de temperatura alta, como una estufa o un horno, su temperatura ambiental puede muy bien ser desorden de 60°C (140°F), esto ya se aproxima a algunas temperaturas limitantes de aislamiento.

En estos casos se deben emplear aislamientos especiales, pues, de lo contrario, el motor comenzará a fallar gradualmente sin siquiera funcionar. Los conductos especiales de aire de enfriamiento que operan de manera continua son una alternativa.

A continuación se enumeran los diferentes tipos de enfriamiento o refrigeración utilizados en los motores eléctricos:

- a. **Ventilación natural.** Motor enfriado por el aire movido por el rotor del motor.
- b. **Autoventilación.** Motor enfriado por ventilador (aspas) colocado sobre el propio eje del motor.
- c. **Ventilación forzada.** Motor enfriado por medios externos a base de aire u otro fluido refrigerante.
- d. **Enfriamiento interno.** El motor es enfriado por movimiento del aire que circula a través del motor que remueve el aire de forma constante.
- e. **Enfriamiento superficial.** El motor se enfría por evacuación del calor al medio ambiente refrigerante.
- f. **Enfriamiento en circuito cerrado.** Al motor llega aire enfriado que se ha hecho pasar por un intercambiador de calor que enfría el aire caliente, evacuado del motor.
- g. **Enfriamiento por medios líquidos.** El enfriamiento del motor se hace por agua u otro fluido que previamente se ha enfriado, haciéndolo pasar por un intercambiador de calor.

Los motores y los generadores por lo general muestran los datos sobre elevación permisible de temperatura en sus placas de características. El valor típico es de 50°C, puede ser 60°C o más con aislamientos inorgánicos.

Puesto que en realidad la temperatura interior de los puntos calientes del devanado es la que limita la duración del aislamiento, la combinación de temperatura ambiente más su elevación de temperatura es el verdadero criterio.

En la actualidad los materiales de aislamiento, en cuanto a temperatura nominal de acuerdo con la NEMA, no se sabe qué formas de clasificación se acordarán a nivel internacional bajo el IEC o la ISO, pero se piensa que se adoptará una distribución similar. La similitud tendrá que basarse en las muy reales limitaciones de temperatura de los materiales de aislamiento disponibles en el mercado internacional.

Las limitaciones actuales de temperatura se sintetizan en la tabla 2-16. La categoría más antigua de aislamiento conocida como clase O, u orgánica, es de menor importancia porque representa materiales orgánicos secos, sin barnizar o sin impregnar, los cuales ya no se usan en esta forma.

La lista de datos de elevación de temperatura con respecto a la ambiental de 20°C no es oficial, pero se incluye para mostrar lo que se puede esperar si el motor tiene una ubicación favorable. De manera similar, la diferencia de 15°C entre la temperatura superficial de una bobina y su punto más caliente es convencional, más que específica. Esto se basa en las diferencias promedio cuando las mediciones se hacen con termopares que se insertan en los devanados. Los datos de elevación permisible de temperatura de placa de características aparecen en la segunda columna.

La tabla 2-17 muestra los límites de elevación de temperatura de las partes de un motor de cd que están cubiertas por algún aislante, en específico muestra las temperaturas de lo motores de cd grandes.

Finalmente la norma UNE 21-304 clasifica los límites de temperatura de los aislamientos como se muestra en la tabla 2-18 y con mucha similitud con NEMA.

Lista parcial de materiales	Clase	Elevación permisible de temperatura para una temperatura de aire ambiental supuesta de 40°C (placa de fabricante)	Elevación razonable de temperatura si la temperatura del aire ambiental es 20°C (temperatura de habitación)	Probable temperatura de superficie de devanado bajo condiciones máximas	Límite máximo de temperatura en punto más caliente del devanado, °C
Aislamiento orgánico sin impregnación o líquido aglutinante.	<b>O</b>	50	70	75	90
Materiales de clase O impregnados, aislamientos de esmalte, materiales celulosos, celulosa moldeada, fenólicos, resinas.	<b>A</b>	65	85	90	105
Minerales inorgánicos con algún aglutinante orgánico de clase A.	<b>B</b>	90	110	115	130
Esmaltes epóxicos, materiales poliestéricos-epóxicos modificados, fibras de vidrio, teflón.	<b>F</b>	115	135	140	155
Materiales inorgánicos con aglutinantes de silicón, hules de silicón.	<b>H</b>	140	160	165	180
Mica, porcelana, vidrio, cuarzo en forma pura.	<b>C</b>	Sin límites asignados			

Tabla 2-16. Límites de temperatura para materiales de aislamiento.

Elemento	Parte de máquina	Método de determinación de la temperatura	Servicio industrial en general							
			Carga 100% nominal continua semicerrada				Carga 100% nominal continua totalmente cerrada			
			Clase de aislamiento				Clase de aislamiento			
			A	B	F	H	A	B	F	H
1	Devanados del inducido y todos los otros devanados aparte de los que están dados en los elementos 2 y 3	Resistencia del termómetro								
			50	70	90	110	55	75	95	115
			70	100	130	155	70	100	130	155
2	Devanados de campo multicapas	Resistencia	70	100	130	155	70	100	130	155
3	Devanados de campo de una sola capa con superficies sin aislar expuestas y devanados de cobre desnudo	Resistencia del termómetro								
			60	80	105	130	65	85	110	135
			70	100	130	155	70	100	130	155
4	Colector y anillos de colector	Termómetro	65	85	105	125	65	85	105	125

Tabla 2-17. Límites de elevación de temperatura para motores de cd de servicio industrial.

Clase de aislamiento	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatura límite permisible en °C	90	105	120	130	155	180	más de 180

Tabla 2-18. Límites de temperatura UNE 21-304.

## 2.9 Otros factores de selección.

Cuando se adquiere un motor eléctrico cada fabricante o distribuidor tiene la obligación de informar las medidas y precauciones que se deben tener cuenta antes, durante y después de poner en marcha la máquina. Por lo general esta información es mediante manuales o en el mejor de los casos por asistencia técnica personalizada. De los manuales que se han consultado para este trabajo de empresas como Siemens AG<sup>®</sup> empresa Alemana con sede en México, en el D.F. (centro de operaciones y administrativas) y con dos fábricas una en el Estado de Jalisco y la otra en el Estado de Querétaro, WEG Industrias S.A.<sup>®</sup> empresa Brasileña con su sede en México en el Estado de México y Baldor Electric Motors<sup>®</sup> empresa Estadounidense con su sede en México en el Estado de Guanajuato, varían de forma mínima los procedimientos de instalación y manejo de la máquina así como en sus términos y condiciones de garantía.

En general algunos de los puntos que coinciden estos fabricantes y seguramente otros fabricantes son:

- a. Leer el manual antes de cualquier contacto con el motor.
- b. Seguir al pie de la letra los procedimientos y normas del manual.
- c. Inspeccionar la máquina de forma visual al momento de la entrega.
- d. Instalar y manejar el motor sólo con personal calificado.
- e. Instalar el motor en el lugar que previamente se estudio para la aplicación, el cual cumple con todas las especificaciones que el fabricante o distribuidor exige.
- f. Informar al fabricante o distribuidor cualquier falla o anomalía cuando se pone en marcha por primera vez el motor.
- g. Seguir estrictamente el plan de mantenimiento que el fabricante o distribuidor exponen en su respectivo manual.
- h. Utilizar sólo repuestos de piezas averiadas o gastadas, autorizadas y certificadas por cada fabricante o distribuidor.

Al seguir de manera fiable los manuales, los fabricantes aseguran un funcionamiento óptimo, estable y sobre todo una larga vida del motor eléctrico, ya que empresas como las que se mencionan aseguran que sus motores son construidos bajo las más estrictas normas de calidad y se les realizan las pruebas necesarias y por lo tanto entregan motores en perfectas condiciones.

## **Variación de velocidad mecánica.**

Es muy importante establecer la forma en que el motor será conectado a la carga. Si se trata de un acoplamiento directo, la velocidad del motor debe ser igual a la de la carga, pero si la conexión es por medio de engranaje, transmisión de banda, etc., debe tomarse en cuenta la relación de velocidades y considerarse que el par varía en proporción inversa a la velocidad, sólo que en este sentido y recordando la mayor virtud de los motores de cd viene dada principalmente por la posibilidad de variar su velocidad, conservando otras particularidades del mismo, como es por ejemplo el par.

Normalmente, el eje de un motor de cd no va unido directamente a la aplicación, mucho menos si éste es de media y gran potencia, la transmisión de movimiento hacia la máquina o elementos a accionar se hace normalmente a través de un *reductor* de velocidad, con la finalidad principal de aumentar su par motriz, al haber reducción de la velocidad del motor respecto a la aplicación.

Al reducir la velocidad dado por el motor, se consigue un incremento del par motor en la misma proporción en que se reduce la velocidad, circunstancia que resulta importante en el momento del arranque de una máquina, especialmente cuando se trata de inercias importantes.

La selección del tipo de reductor se hará en función a los parámetros y cálculos que habrá de realizar para cada aplicación concreta que se realice, lo que obligará a conocer las necesidades a cubrir sobre la máquina y por lo tanto las prestaciones que se van a pedir al motor, al reductor y a los acoplamientos hasta la máquina. No todos los reductores dan las mismas prestaciones, razón por la cual, ante una aplicación se elegirá aquél que mejor se ajuste a la necesidad planteada.

Existen diversas clases de reductores considerando su construcción y forma de obtener la reducción de velocidad. Entre los diferentes tipos de reductores, se citan los siguientes:

- a.** Reductor de engranajes cilíndricos.
- b.** Reductor de grupo cónico.
- c.** Reductor de corona-tornillo sin-fin.
- d.** Reductor tipo tandem.

Entre los variadores de velocidad se enumeran los *variadores de poleas extensibles* y *los variadores de fricción*. Si a un motor eléctrico, se acopla a un reductor se forma un *motorreductor*. Debido a la gran variedad de reductores es necesario tomar en cuenta ciertas características para seleccionar un reductor y así ajustar el reductor a las dimensiones y necesidades de la aplicación. Las características a considerar son:

- a. Tipo de motor y sus características.
- b. Trabajo a realizar en la aplicación.
- c. Tipo de reductor y sus características.
- d. Par nominal en la aplicación.
- e. Velocidad necesaria en la aplicación.
- f. Con freno o sin freno.
- g. Con sentido de giro, o con inversión de giro.
- h. Posición de montaje.
- i. Ángulo de salida del eje de salida.
- j. Dimensiones del eje de salida.
- k. Horas de marcha diaria.
- l. Número de arranques al día.
- m. Temperaturas extremas en que va a funcionar el motorreductor.
- n. Otras características que se consideren oportunas.
- o. En caso de duda, consultar con el proveedor.
- p. Una vez montado el motorreductor, síganse las consignas de mantenimiento y conservación dadas por el constructor.

### **Transmisión del movimiento.**

El movimiento del eje del reductor se transmite a la máquina a través de un sistema de transmisión. Los sistemas de transmisión pueden a su vez ser un medio para aumentar o disminuir la velocidad de salida del eje del reductor y aplicarla a la máquina. A continuación se presentan diferentes sistemas de transmisión mecánica:

- a. **Transmisión directa.** Unión motorreductor máquina a través de un acoplamiento.



**b. Transmisión por poleas y correa.** En este caso, habrá una polea motriz (salida reductor) y una polea conducida (máquina). La transmisión entre ambas poleas es por correa. Las poleas pueden ser acanaladas, dentadas o planas y en consecuencia, las correas serán de tipo trapezoidal, dentadas o planas. La figura 2-18 muestra un ejemplo de este tipo de transmisión. Si la polea conducida es mayor que la motriz, la velocidad del eje conducido será menor que la velocidad del motor. La relación se mantiene si la conducida es menor que la conductora.

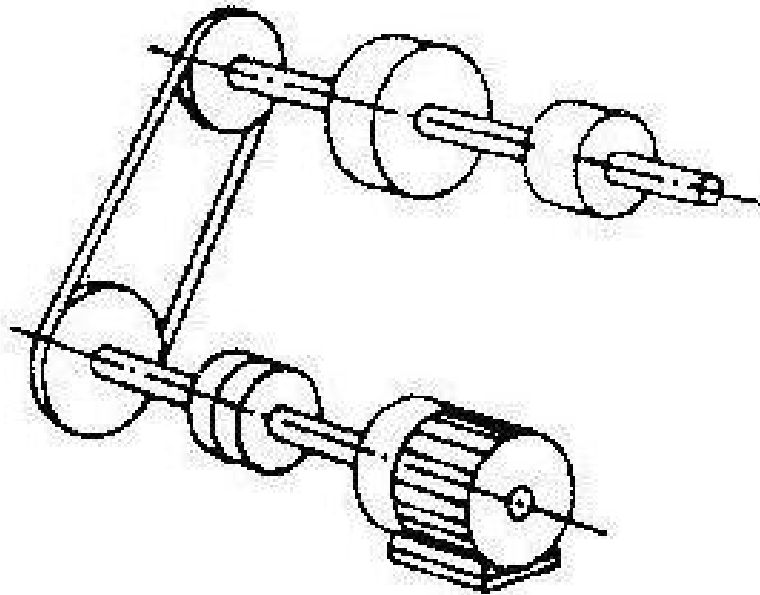


Figura 2-18. Transmisión por poleas y correa.

**c. Transmisión por piñones y cadena dentada.** Como en el caso de la transmisión por polea y correa, aquí habrá también un piñón motriz y un piñón conducido. La unión entre piñones se hace a través de una cadena. La cadena podrá ser simple, doble o triple. En estos casos, los piñones también serán simples, dobles o triples. Pueden transmitir igual velocidad o aumentar o disminuir la velocidad del eje de salida del reductor. (Figura 2-19)

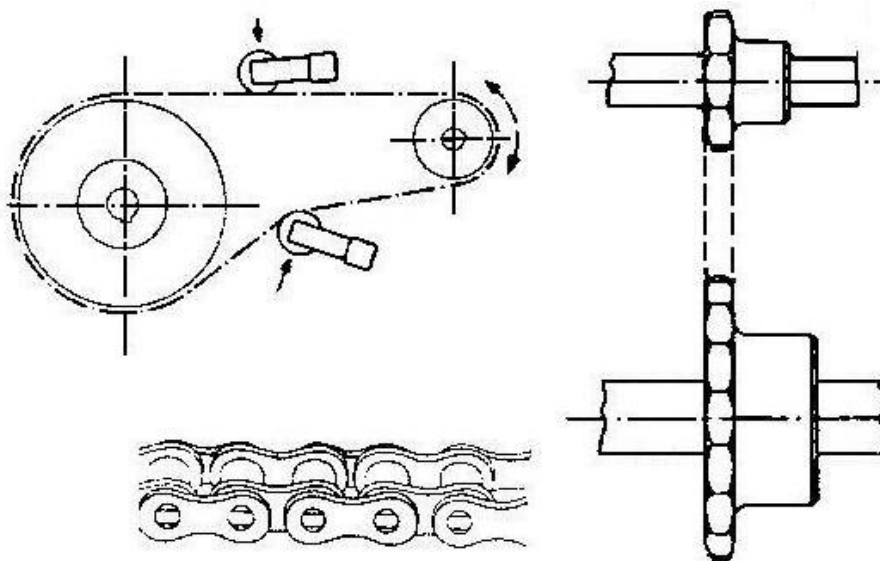


Figura 2-19. Transmisión por piñones y cadena dentada.

**d. Transmisión por engranajes.** En este caso, el engranaje motriz (rueda) estará en contacto directo con el engranaje conducido (piñon), no habiendo por tanto ningún dispositivo o sistema de unión entre ambos engranajes. Según que el piñon sea igual, mayor o menor que la rueda, se conseguirá en la aplicación igual, menor o mayor velocidad de la que tiene el eje de salida del reductor. (Figura 2-20)

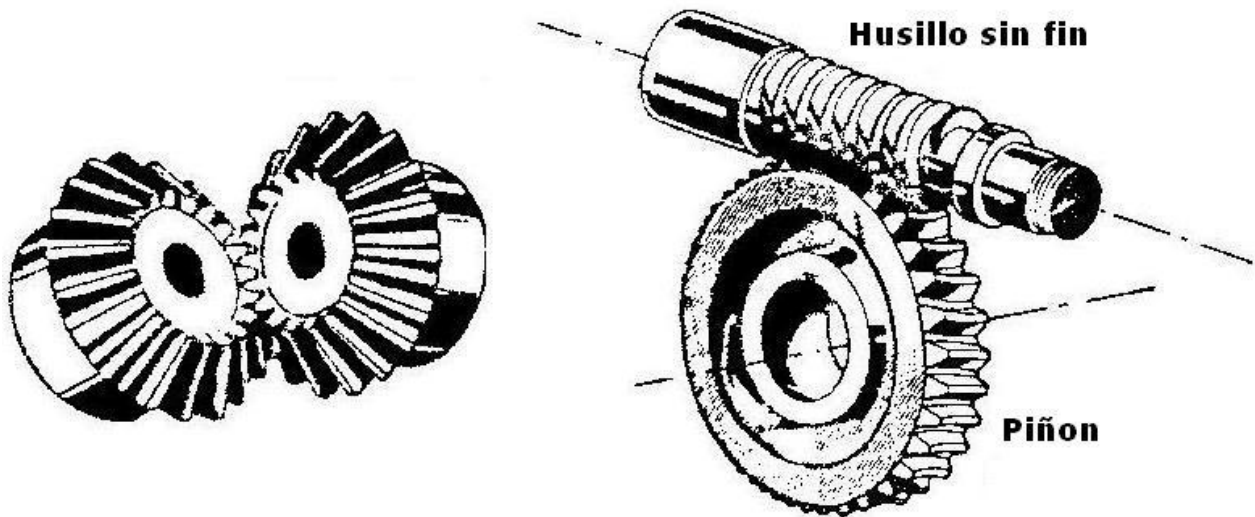


Figura 2-20. Transmisión por engranajes.

**e. Transmisión por cardan.** Es una unión directa, reductor con máquina, que permite desalineaciones respecto al eje del reductor y aplicación del movimiento en planos diferentes. (Figura 2-21)

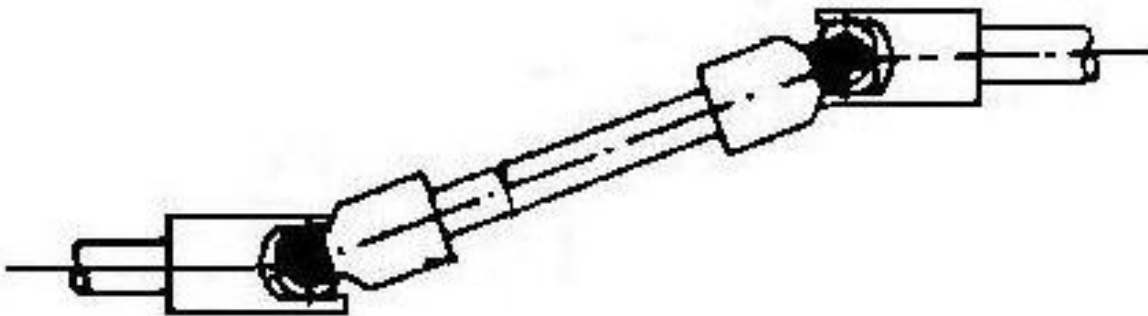


Figura 2-21. Transmisión por cardan.

f. **Transmisión por fricción.** Es una transmisión en la que la rueda motriz transmite el movimiento a la rueda conducida por fricción. Podrá darse un deslizamiento, cuando supere la adherencia. (Figura 2-22)

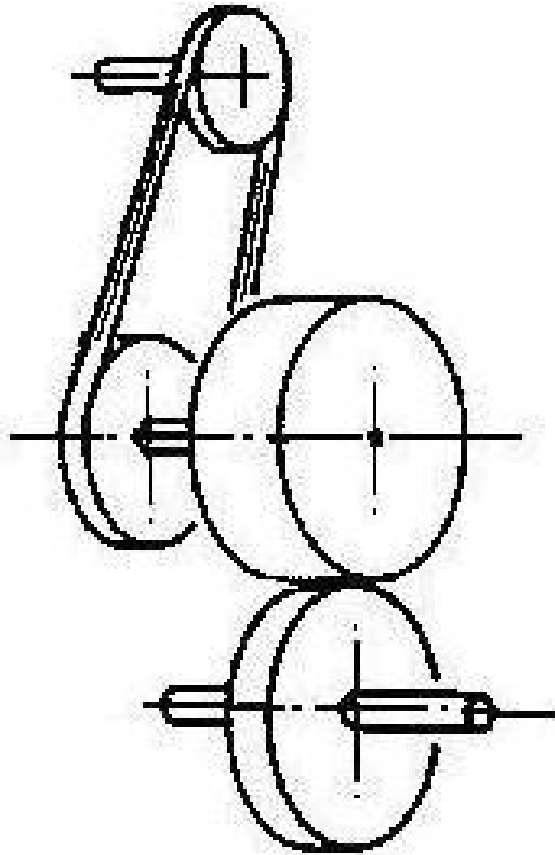


Figura 2-22. Transmisión por fricción.

Otros sistemas de transmisión, son los llamados, de carga radial sobre la extremidad del eje lento y se dan por cadena, correa trapezoidal, engranajes rectos y directos y por rueda de fricción (goma sobre metal).

### **Acoplamientos.**

La figura 2-23 muestra un esquema, de un conjunto motor-reductor-máquina y como se ve la función de los acoplamientos es unir dos ejes en rotación, por lo que en función de los diámetros del eje del motor (o motorreductor), de la aplicación y del par nominal de acoplamiento se determinará el acoplamiento a poner en la transmisión de fuerza.

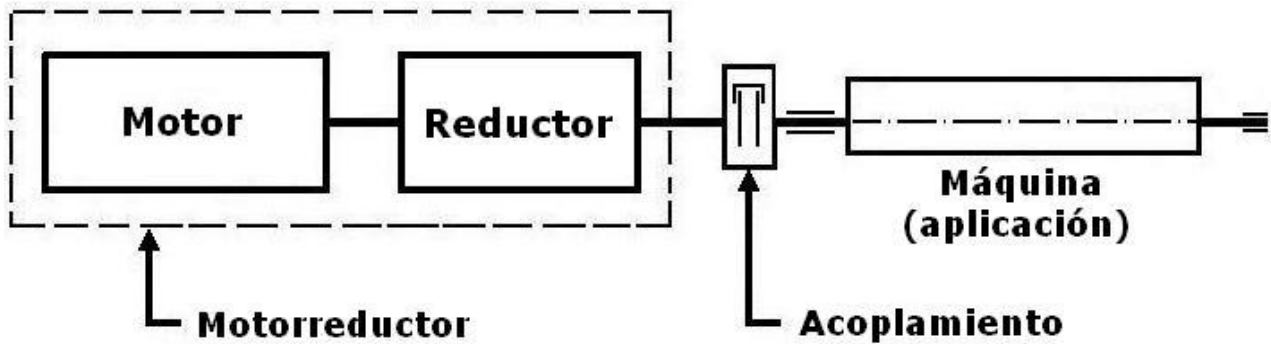


Figura 2-23. Conjunto motor-reductor-máquina.

Los parámetros para la selección de un acoplamiento son los siguientes:

- a. Potencia nominal a transmitir (kW ó hp).
- b. Par nominal a transmitir (daNm).
- c. Irregularidades de acoplamiento.
- d. Coeficiente de seguridad (K).
- e. Par mínimo de trabajo (daNm).
- f. Velocidad de rotación máxima (rpm).
- g. Desalineaciones. Decalajes.
- h. Dimensiones de los ejes ( $\phi$  y longitud).
- i. Ambiente. Temperatura. Agentes exteriores.

Otros accesorios que lleva la transmisión de movimiento del eje del motor hasta la aplicación, son los *embragues* que es un aparato que permite acoplar o desacoplar dos ejes mecánicos por accionamientos mecánicos, hidráulicos, neumáticos o electromagnéticos. Si a este dispositivo se le añade un freno se tiene un bloque embrague-freno, el cual se utiliza para no parar el motor para embragar y frenar.

El *limitador de par por fricción*, realiza su función cuando la potencia demandada es superior a la prevista. Esta sobrecarga tiene su origen en cargas de choque, sobrecargas u obstrucciones en la máquina conducida. El limitador protege los órganos de transmisión, tales como, cadenas, engranajes, correas, motores, así como máquinas a las que llega el par transmitido.

Los coeficientes de seguridad de un acoplamiento, se muestran en las siguientes tablas.

<b>Coeficiente K1</b>	
<b>Motor eléctrico o turbina</b>	<b>Máquina receptora</b>
1	<b>1</b> Marcha regular, muy baja inercia.
1.2	<b>2</b> Marcha irregular, baja inercia.
1.4	<b>3</b> Marcha irregular, inercia media.
1.7	<b>4</b> Marcha irregular, inercia media a golpes medios.
2	<b>5</b> Marcha irregular, inercia importante a golpes importantes.
2.4	<b>6</b> Marcha irregular, inercia muy importante a golpes importantes.

Tabla 2-19. Coeficiente de seguridad K1.

<b>Coeficiente K2 Frecuencia de arranque.</b>					
<b>Coeficiente K2 (Ver tabla K1)</b>	<b>Número de arranques por horas</b>				
	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>
<b>1</b>	1	1.2	1.2	1.5	1.6
<b>2 3</b>	1	1.1	1.2	1.3	1.4
<b>4 5 6</b>	1	1.05	1.1	1.2	1.2

Tabla 2-20. Coeficiente de seguridad K2.

<b>Coeficiente K3 Horas de funcionamiento por día.</b>				
<b>Horas de funcionamiento por día</b>	<b>0 - 2</b>	<b>2 - 8</b>	<b>8 - 16</b>	<b>16 - 24</b>
<b>Coeficiente K3</b>	0.9	1	1.1	1.2

Tabla 2-21. Coeficiente de seguridad K3.

## Vibración.

Se especifican los límites de vibración para motores completamente ensamblados, funcionando sin acoplamiento. El parámetro de vibración preferido es la velocidad pico en in/s o mm/s. La tabla 2-22 proporciona los límites de vibración en los cojinetes de motores montados de manera elástica. La norma es de 0.15in/s, para motores montados rígidamente, los límites dados en esta tabla se reducen al 80% de los valores de la tabla.

Velocidad (r/min)	Frecuencia rotacional (Hz)	Velocidad pico in/s
3600	60	0.15
1800	30	0.15
1200	20	0.15
900	15	0.12
720	12	0.09
600	10	0.08

Tabla 2-22. Límites de vibración de NEMA.

Otra condición de operación es la de la *altitud sobre el nivel del mar*, que para motores de cd fraccionarios, medianos y grandes la altitud no debe exceder los 1 000m.

Finalmente y haciendo un recuento de los factores que intervienen en el proceso de selección de un motor de cd, se pueden destacar los siguientes:

### a. Características de la máquina o carga a accionar.

- Acoplamiento directo.
- Acoplamiento por transmisión (correas, cadena, engranaje, etc.).
- Fuerza axial en el eje del motor.
- Fuera radial en el eje del motor.

### b. Ambiente en que va a trabajar el motor (grado de protección).

- Limpio.
- Sucio.
- Gas.
- Humedad.

### c. Servicio.

- Continuo (S1).
- Temporal (S2).
- Intermitente (S3, S4, S5).
- Ininterrumpido (S6, S7, S8).

**d. Características del motor. (hp y rpm)**

- Par (M) en Nm.
- Par en velocidad mínima.
- Par en velocidad base.
- Par en velocidad máxima.

**e. Ciclo de trabajo. (min. y % del ciclo)**

- Continuo.
- Intermitente.
- Periódico.
- Variable.

**e. Carga máxima en % de la nominal.**

- % de carga durante "x" segundos.

**f. Tensiones.**

- Armadura.
- Excitación.

**g. Normas bajo las cuales se construyo o diseño.**

- NEMA. (National Electrical Manufacturers Association)
- DIN. (Deutsche Industrie Normen)
- UNE. (Una Norma Española)
- IEEE. (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- IEC. (International Electrotechnical Commission)
- ISO. (Organización Internacional para la Estandarización)
- Alguna otra que exija el país en que se comercia el motor.

**h. Sentido de giro. (visto desde el lado derecho)**

- Sentido manecillas del reloj
- Sentido contrario a las manecillas del reloj
- Ambos.

**i. Temperatura de ambiente en °C.**

**j. Altitud sobre el nivel del mar en m.**

**k. Para el convertidor.**

- Tensión de la red. (numero de fases)
- Frecuencia.
- Tolerancia en la tensión.
- Corriente nominal
- Controlado o semicontrolado. (diodos, tiristores)

**l. Otros datos que el cliente considere necesarios.**

MOTOR EXCITACIÓN INDEPENDIENTE	MOTOR EXCITACIÓN SERIE
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Par de arranque muy elevado.</li> <li>-Motor bastante estable.</li> <li>-Fácil control de su velocidad de forma automática.</li> <li>-Imprescindible reóstato de arranque.</li> <li>-Utilizado en motores de pequeña y gran potencia.</li> <li>-Amplia gama de velocidades.</li> <li>-Arranque sin carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Par de arranque muy elevado.</li> <li>-Muy inestable. Tendencia a embalsarse.</li> <li>-Imprescindible reóstato de arranque.</li> <li>-Precisa un gran control.</li> <li>-Arranque con carga.</li> </ul>
MOTOR EXCITACIÓN DERIVACIÓN	MOTOR EXCITACIÓN COMPUESTA
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Par de arranque menos elevado que el motor serie.</li> <li>-Motor muy estable.</li> <li>-Conviene colocar un reóstato de arranque en el bobinado inducido.</li> <li>-La velocidad es muy estable, aunque varié el par de arranque. Desde vacío a plena carga, la velocidad puede variar aproximadamente en un 5%.</li> <li>-Arranque sin carga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Buen par de arranque. Mejor que el motor shunt.</li> <li>-Muy estable no se embala.</li> <li>-Precisa reóstato de arranque.</li> <li>-La velocidad es relativamente estable.</li> <li>-El motor compuesto largo tiene mayor variación de velocidad que el motor shunt.</li> <li>-Par muy variable con la velocidad.</li> <li>-El motor compuesto corto es estable pero rara vez se utiliza.</li> <li>-Arranque puede iniciarse con carga, según predomine el bobinado serie o derivación.</li> <li>-En cualquier caso con reóstato.</li> <li>-Motor apto para trabajar con grandes inercias.</li> </ul>

**Tabla 2-23. Características de los diferentes motores.**



## 2.10 Procedimiento de ensayo.

La finalidad primordial de un ensayo, es comprobar si cada componente, cada pieza de material accesorio y el motor en su fabricación, se ajustan a lo requerido por el cliente y previsto en el proyecto.

Siendo así, se pueden distinguir tres finalidades básicas en la realización de los ensayos finales:

**a. Evaluación de prototipos.** Pretende confrontar los datos característicos obtenidos en una máquina durante las pruebas de funcionamiento con los previstos durante la elaboración de su proyecto. De esta manera los informes de los ensayos funcionan como el eslabón final entre el producto y la o las personas que lo concibieron, se comparan con los valores deseados, en caso necesario se hacen las correcciones pertinentes para lograr los valores óptimos de la máquina producida.

**b. Evaluación de la máquina o lote de máquina que ya posee prototipo.** Cuando existe un prototipo totalmente verificado y aprobado, se deben ensayar las demás máquinas y para una aprobación final, se comparan los resultados con los valores obtenidos en el prototipo. En este caso no es económicamente viable llevar a cabo todas las pruebas efectuadas en la máquina original, sino sólo una parte de ellas. Es evidente que se pueden seleccionar algunas pruebas que, una vez efectuadas con resultados satisfactorios, pueden garantizar, con buen margen de seguridad, que la máquina está dentro de los patrones preestablecidos. Estos ensayos se llaman *pruebas de rutina*.

Las máquinas de altas prestaciones, proyectadas específicamente para atender las necesidades de un determinado cliente no poseen prototipos previamente probados, por esta razón, una vez fabricadas se deben ensayar y comparar los valores obtenidos con los previstos en el proyecto.

Todas las máquinas fabricadas se deben someter por lo menos a los ensayos de rutina, esta actividad es una obligación del fabricante idóneo y una garantía adicional para el cliente que puede solicitar en cualquier momento los protocolos del ensayo final de la máquina.

**c. Inspección final con el cliente.** Una vez probada internamente por el fabricante, el cliente debe exigir ensayar la máquina en su presencia. Es importante puntualizar que no siempre está al alcance del fabricante el poder probar todos los motores que fabrica, tal es el caso de la ejecución de una prueba en carga de un motor muy grande, sobretodo si es de fabricación especial y por lo tanto de aplicación muy particular. No cabe duda de que tal ensayo no es posible en las instalaciones de ningún fabricante. Por esta razón, algunos ensayos deseados por el cliente sólo se pueden realizar en la ubicación donde se instalará el motor o el fabricante puede utilizar métodos indirectos para determinar los parámetros deseados.

En cuanto a las normas técnicas de ensayos, éstas tienen la finalidad de establecer los procedimientos que han de seguirse durante la ejecución de las pruebas destinadas a la determinación de las características de las máquinas, así como los valores mínimos exigibles para la aceptación de éstas. Las normas más comúnmente especificadas para ensayos de motores eléctricos son las dictadas por organismos como la *IEC*, la *NEMA* y el *IEEE*.

La selección de la norma a través de la cual se controlará el motor en las pruebas finales será atribuida a la que especifique la máquina. El fabricante debe adoptar las normas solicitadas, realizando las pruebas de conformidad con lo prescrito en las mismas normas.

Una vez fijadas las características del motor solicitado por el cliente, hay que comprobar si la máquina corresponde tanto eléctrica como mecánicamente a las especificaciones preestablecidas. Con esa finalidad se realizan, cuando es posible, ensayos en las dependencias del fabricante, con o sin inspección por parte del cliente. De todo esto, se deduce la importancia de la especificación correcta del cliente en relación a lo exigido con respecto a las normas y tolerancias que se deben emplear. Un mismo ensayo, hecho bajo normas diferentes, puede ocasionar resultados ligeramente diferentes sujetos también a tolerancias distintas.

En el caso de motores de potencia bastante elevada que imposibilite el ensayo, o parte de él, por el fabricante, se pueden adoptar, claro está de común acuerdo, algunas otras opciones, como ya se mencionó anteriormente, métodos indirectos y pruebas en las instalaciones propias del cliente, con la ventaja de que se observa la máquina en su condición real de funcionamiento tanto en el aspecto eléctrico como mecánico (vibración, acoplamiento, etc.)

Aclarando que en lugar de instalación no se dispone de los recursos de un campo de pruebas, razón por la cual deben aparecer algunas dificultades y eventualmente un número mayor de imprecisiones en los resultados de los ensayos.

Con todo esto la principal finalidad no es la descripción detallada de los ensayos, debido a que ésta ya se encuentra en las propias normas, pero si examinar su finalidad y los puntos específicos que se deben observar en la prueba.

Antes de iniciar la descripción de las pruebas de rutina que se hacen normalmente a un motor de cd, es importante resaltar que obligatoriamente se le tiene que aplicar carga, esto se debe única y exclusivamente a la conmutación que puede generar chispar excesivas en las escobillas. Por lo anterior se resalta a su vez, la importancia de comprobar la colocación de las escobillas en la zona neutra, así como de la actuación eficaz de los interpolos. De ahí la razón de que este ensayo sea una prueba de rutina.

## **Ensayos de rutina.**

- a. Medición de la resistencia óhmica del campo y del inducido.**
- b. Ajuste de las escobillas en la zona neutra.** En rigor está prueba del fabricante, sin tolerancia a la norma, ya que una mala colocación de las escobillas implica una producción excesiva de chispas.
- c. Ensayo en vacío.** Con tensión y velocidad nominales, normalmente ejecutado en los dos sentidos de rotación del motor, se anotan los valores de la corriente del inducido, tensión y corriente de campo.
- d. Ensayo de carga.** Tensión, par motor y velocidad nominales. También ejecutados en los dos sentidos de rotación. En este ensayo, se debe observar atentamente el proceso de conmutación.
- e. Medida de la resistencia de aislamiento.** Campo e inducido.
- f. Tensión aplicada.** Campo e inducido.

## **Ensayos de tipo.**

- a. Elevación de temperatura.**
- b. Curva en vacío.** Manteniendo la velocidad angular constante, se observa la variación de tensión de inducido en función de la corriente de excitación.
- c. Curva de carga.** Par-Velocidad para varios porcentajes de carga manteniendo la tensión del inducido constante.
- d. Separación de pérdidas y determinación del rendimiento.**
- e. Sobrevelocidad.**
- f. Medida de vibración.**
- g. Otros ensayos que se ejecutan de común acuerdo entre fabricante y cliente.**

## **Ensayos finales de entrega.**

- a. Ensayo de accesorios.** Evaluación general de los accesorios que componen el motor, como los son, la resistencia de calentamiento. Termistores, termopares, tacómetro, motor auxiliar de ventilación, medidores de descarga y presión, etc.
- b. Ensayo dimensional y visual.** Evaluación de las dimensiones principales del motor que deben incluir, como mínimo:
  - Altura de la punta del eje.
  - Longitud de la punta del eje.
  - Distancias entre los agujeros de los pies (cuando el motor tiene pies de fijación).
  - Condiciones generales para el acoplamiento.
  - Cuando se trata de motores con bridas se debe comprobar la perpendicularidad y concetricidad de ellas con respecto al eje.
- c. Ensayo de pintura.** Normalmente se comprueban tonalidad, adherencia y espesor de capa. Eventualmente, en el caso de ambientes agresivos, en que se deben emplear las protecciones especiales en la pintura, el fabricante deberá proveer el certificado de las tintas que se emplean. Es lógico que se deba manifestar esa exigencia cuando se compra el motor.

## **Sugerencias y aclaraciones.**

Al comprar una máquina o lote de maquinas, el cliente deberá definir qué pruebas se deberán ejecutar en la entrega final de la máquina y si se presenciaron o no. Es evidente que, conforme a lo mencionado, aunque no se especifique ninguna prueba, el fabricante está obligado a realizar, por lo menos, los ensayos de rutina y elaborar una relación de los mismos que el cliente podrá solicitar en cualquier momento.

De todo esto, dependiendo de las características de la máquina comprada y de la importancia de esa máquina dentro del sistema en que estará instalada, el cliente se debe enterarse de garantías adicionales solicitando determinadas pruebas presenciadas para comprobar los parámetros garantizados por el fabricante. Se debe advertir que aunque el cliente haya presenciado las pruebas, el fabricante no está exento de responsabilidad por la calidad de la máquina. Toda relación completa de los ensayos existentes es extremadamente extensa y puede ser comprobada en las normas de los organismos mencionados anteriormente.

De cualquier forma, también se pueden realizar siempre pruebas no normalizadas mediante un acuerdo previo entre suministrador y el comprador, lo que hace totalmente imposible el suministro de una relación completa de las pruebas existentes. Finalmente el cliente debe asociar siempre las pruebas que se exigen a la aplicación del motor para no incurrir en costos adicionales innecesarios.

## Capítulo 3. Aplicación del motor de corriente directa.



**Siderurgia - Laminación**



**Siderurgia - Laminación en frío**



**Siderurgia - Cilindro tensor de alimentación de tiras**



**Minería - Cintas transportadoras**



**Preparación y molienda de caña de azúcar**



**Cemento - Extractor de aire**

### **3.1 Introducción.**

Los motores de cd se caracterizan por su versatilidad. Por medio de varias combinaciones de devanados de campo excitados en derivación o en paralelo, en serie y de excitación separada, son diseñadas para mostrar una amplia variedad de características velocidad-par, tanto para funcionamiento dinámico como para funcionamiento de régimen permanente. Por la facilidad con que son controlados, los sistemas de los motores de cd, se utilizan con frecuencia en aplicaciones que requieren una gran gama de velocidades de motor, o el control preciso del rendimiento del motor.

En años recientes, la tecnología de sistemas de control de ca de estado sólido se han desarrollado lo suficiente al grado que estos sistemas están reemplazando a los motores de cd en aplicaciones que antes se asociaban casi exclusivamente sólo con motores de cd. No obstante, la versatilidad de los motores de cd y la relativa simplicidad de sus sistemas de mando garantizan su uso continuo en diversas aplicaciones. Sólo por citar un claro ejemplo de las ventajas de un motor de cd tenemos:

En un laminador de tiras de acero en frío, que produce láminas de calibre ligero para latas, una bobina de 15 toneladas de acero en tira ( $2/3$  de milla de longitud y  $1/11$  de pulgada de espesor) se arranca hacia la laminadora a varios cientos de pies/minuto, cinco pares de rodillos impulsados por motores de cd aprietan sucesivamente a la tira. A medida que la tira tiene un espesor menor, viaja a través de cada sección con mayor rapidez, hasta que abandona la laminadora a 70 millas/h (6 millas de largo y  $1/100$  de pulgada de espesor. Velocidad controlada aumentando la velocidad de la tira a medida que pasa a través de cada sección) está provista por lo motores de cd impulsores. Un sólo reóstato ajusta la velocidad y ningún sistema de impulso mecánico es necesario.

### **3.2 Aplicaciones del motor de corriente directa.**

El uso de los motores de cd tiene lugar con más frecuencia cuando:

- a.** Se necesita una amplia variación de velocidad ajustando esa variación de manera escalonada.
- b.** Se necesita un par de salida ya sea constante o variable o la combinación de ambos.
- c.** Se necesita aceleración, desaceleración o inversión de rotación rápidas.
- d.** Se necesita precisión fina en el control de velocidad.
- e.** Se necesita mantener una correlación precisa entre dos o más partes de una línea de procesamiento.
- f.** Son necesarios los requerimientos de alto par de sobrecarga en la parte inferior de un proceso con amplia variación de velocidad.

Lo anterior se puede tomar como un preámbulo de las razones por lo cual un motor de corriente directa tiene que ser considerado en un proceso de selección. Las aplicaciones más destacadas de un motor de cd son:

- a.** Los motores de arranque (marcha) de motores de gasolina y diesel en autos, camiones, tractores, etc.
- b.** Para mover el limpiaparabrisas y accionar los elevadores de ventanas de un automóvil. (Motores de paso)
- c.** Para impulsar ventiladores de aire acondicionado, calentadores, etc.
- d.** Maquinas operatrices en general.
- e.** Bombas de pistón.
- f.** Pares de fricción.
- g.** Herramientas de avance.
- h.** Tornos.
- i.** Bobinadoras.
- j.** Mandriladoras.
- k.** Trituradoras.
- l.** Máquinas textiles.

- m.** Gañidos y grúas.
- n.** Pórticos.
- o.** Vehículos de tracción.
- p.** Prensas.
- q.** Máquinas de papel.
- r.** Industria química y petroquímica.
- s.** Industrias siderúrgicas.
- t.** Hornos, exhaustotes, separadores y cintas transportadoras para la industria del cemento y otras.
- u.** Laminadoras de metales y laminadoras de inversión caliente.

A manera de comentario, el costo actual en el mercado, de un motor de cd varía de forma considerable según el fabricante y factores económicos que no permiten establecer un patrón de precios, sólo aproximados. Para efectos de este trabajo, se realizó un cálculo promedio, el cual sólo arroja el precio unitario sin accesorios de control, medida y sin contemplar que tan completo es, en cuanto a protección, aislamiento, refrigeración etc., es el motor eléctrico. Además el precio es en dólares americanos (USD) ya que, aunque en México existen muchas distribuidoras y algunos fabricantes directos, basan sus ventas en este tipo de moneda, así que es evidente que estos precios varían según el valor del dólar en el país.

Un motor de cd de baja potencia como de 0.06hp y 1 800rpm cuesta alrededor de 280USD, uno de mediana potencia de 10hp y 1 750/2 300rpm, su precio ronda en alrededor 6,719USD, uno de gran potencia como de 500hp y 1 150rpm cuesta alrededor de 172, 203USD.

Por citar más ejemplos, un motor de cd a prueba de explosión de entre 1.50 y 2hp y 1 750rpm, su precio promedio es de 4, 481USD. Un motor lavable de 5hp y 1 750rpm, que se puede decir que es especial cuesta alrededor de 6,556USD. Finalmente se aclara, que para motores de construcción especial llámese para alguna aplicación muy específica los fabricantes no dan precios al menos que se tenga la verdadera intención de adquirir uno. Lo mejor es y para evitar especulaciones es consultar directamente a los fabricantes.



### 3.3 Variantes del motor de corriente directa.

El motor de corriente directa tiene dos variantes importantes en cuanto a *estructura y funcionamiento*, los cuales no son considerados netamente parte del concepto esencial y puro de un motor de corriente directa independientemente de sus ventajas y desventajas. El primero de ellos el *motor universal*, básicamente es un motor que funciona con voltaje de cd como con voltaje de ca y es por ello que algunas fuentes de información lo colocan dentro de la sección de corriente directa otras dentro de la sección de corriente alterna, otras simplemente lo manejan por separado. El segundo llamado *motor de imán permanente* o de *magnetismo permanente*, se caracteriza por que obtiene el flujo magnético para operar a partir de imanes y no tiene devanado de campo. Ambos tipos son de capacidades de potencia fraccionaria y subfraccionaria.

No es parte de este trabajo determinar si son o no son parte básica de los motores de corriente directa, es por eso que no se pretende analizarlos a fondo, por lo que sólo se analizan las principales características de cada uno de ellos y sólo se presentan como variantes del motor de corriente directa.

#### **Motor Universal.**

Un *motor universal* es un motor con devanado serie o con devanado serie compensado previsto para funcionar, aproximadamente, con la misma velocidad e igual potencia suministrada, tanto con corriente directa como con corriente alterna monofásica de frecuencia no superior a 60Hz. y aproximadamente de la misma tensión eficaz.

Los motores universales son muy empleados en artefactos eléctricos, abrelatas, dispositivos de masaje, cortadores de cabello, herramientas portátiles, taladros, sierras, lijadoras, aspiradores, licuadoras, batidoras, exprimidores, máquinas de cocer, dentales y muchos otros aparatos del hogar.

En vacío sus velocidades de operación son e levadas, algunas veces sobrepasan la 20 000rpm, con estas velocidades es posible obtener las mejores características universales, es decir lo más parecido tanto a corriente directa como corriente alterna. Y por lo tanto, los inducidos son diseñados de manera que no sufran deterioro a tales velocidades. Las potencias nominales varían de 0.010 a 1hp, para los motores de servicio continuo y también mayores para los de servicio intermitente. Comúnmente los motores correspondientes a las mayores potencias nominales están diseñados para velocidades a plena carga comprendidas entre 4 000 y 16 000rpm, y para 20 000rpm o más los de las más pequeñas potencias nominales.

Generalizando su funcionamiento, se puede decir que los motores universales son similares a los motores de cd tipo serie (ya estudiados). Cuando éstos se estudiaron se mencionó que, el sentido de rotación del eje no dependía de la polaridad de la tensión aplicada, pudiendo sólo ser invertido por la inversión de la conexiones de la armadura, así se llega a concluir que si un motor de cd tipo serie se conecta a una fuente de ca, también se producirá un par motor que tiende a hacerlo girar en un sentido determinado.

Sin embargo un motor de cd tipo serie no funciona del todo bien cuando se alimenta con corriente alterna, ya que la ca produce grandes cantidades de corrientes parásitas y pérdidas por histéresis y por lo tanto afectando el rendimiento, la resistencia óhmica de los devanados, proyectados para motores de cd, debe sumarse a la reactancia inductiva. Este nuevo factor hace que la impedancia total de los devanados aumente, con la consiguiente pérdida de potencia, las bobinas que quedan en cortocircuito a través de las escobillas, son recorridas por corrientes muy intensas, produciendo chispas en el colector y provocando el desgaste rápido de las mismas.

Para contrarrestar los efectos de la ca, los motores universales para el caso de las pérdidas, se diseña el circuito magnético que incluye el estator con su carcasa externa y el núcleo del inducido, con láminas de hierro al silicio de alta permeabilidad, asiladas entre sí. Con respecto a la reactancia de los devanados de los campos, estos motores se diseñan, para mantener un valor relativamente bajo, con núcleos de polos cortos y devanados de pocas espiras. A este fin, también conviene tener en cuenta que la densidad de flujo y la reluctancia de todo el circuito magnético deben mantenerse en un valor bastante bajo. La reducción de la reluctancia puede obtenerse disminuyendo el espacio comprendido entre el estator y la armadura, sin que esto, no obstante, pueda interferir con el buen funcionamiento mecánico del motor.

La reluctancia del inducido puede mantenerse en un valor adecuado, empleando devanados compensadores montados en el núcleo del estator. Si los devanados de campo y el compensador están conectados en serie, la compensación se denomina conductiva, pero si el devanado compensador está conectado en cortocircuito, se dice que el inducido está compensado inductivamente. La finalidad del devanado compensador es establecer un fuerza magnetomotriz opuesta a la producida en el inducido, con fines de neutralización, evitando así la distorsión o desviación del flujo magnético del estator y al mismo tiempo reduciendo la reactancia del inducido. El empleo del devanado compensador se restringe a lo motores de alta potencia, pues para los de potencia fraccionaria este problema se resuelve simplemente con la disminución de la cantidad de espiras de los campos.

Finalmente, la mayoría de los motores universales, están diseñados para funcionar con corriente alterna y esta funciona de la siguiente manera; la corriente en el circuito del inducido se invierte naturalmente 120 veces por segundo (para 60Hz.), pero el campo inductor y el flujo del estator se invierte igualmente 120 veces por segundo, haciéndose estas inversiones *en fase con las de la corriente del inducido*. Con corriente alterna, el par varía instantáneamente 120 veces por segundo, pero el par desarrollado es siempre del mismo sentido, (sin importar si es ca ó cd), pero hay que tener claro que hay efectos que se manifiestan con corriente alterna y que no existen con corriente directa. La figura 3-1 muestra un motor universal.

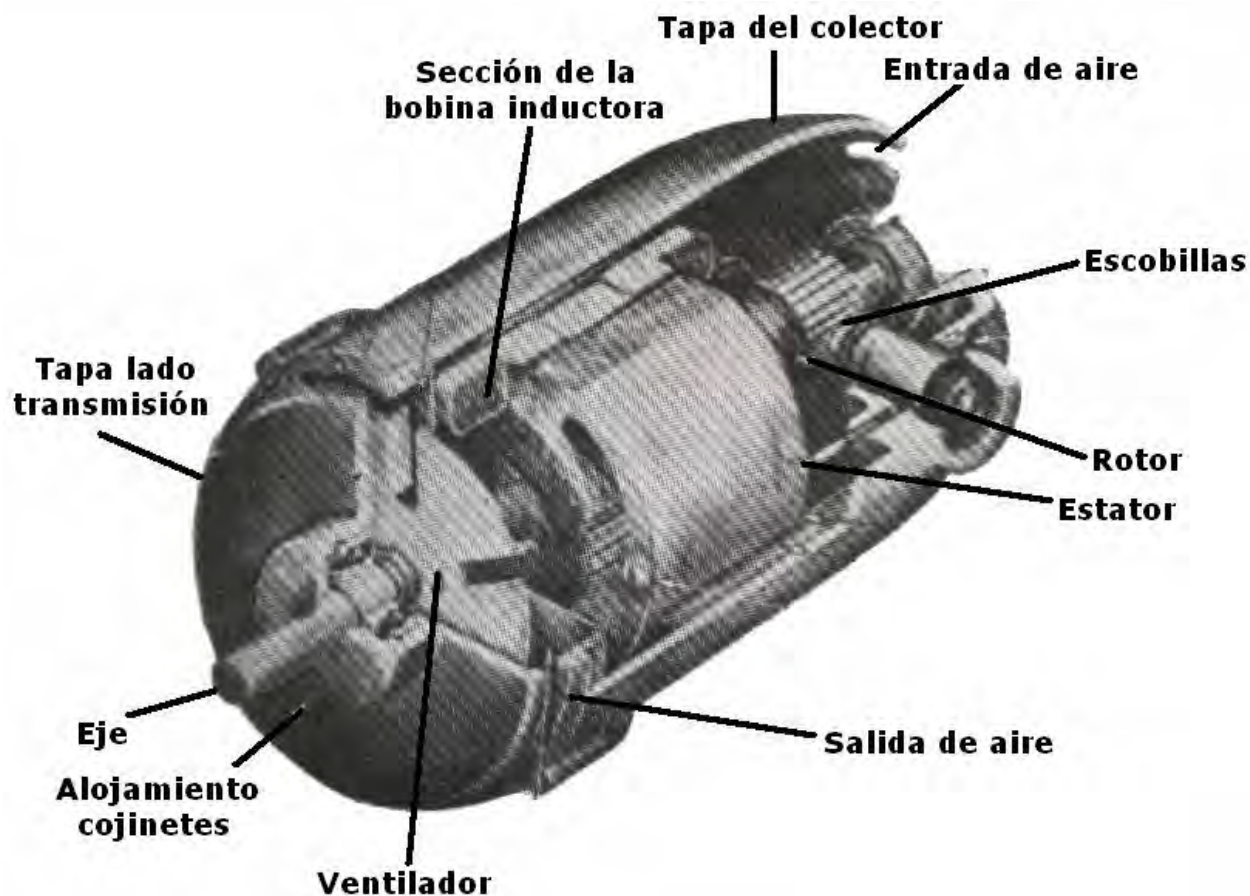


Figura 3-1. Identificación y disposición típica de las partes de un motor universal ordinario, de polos salientes. (NEMA)

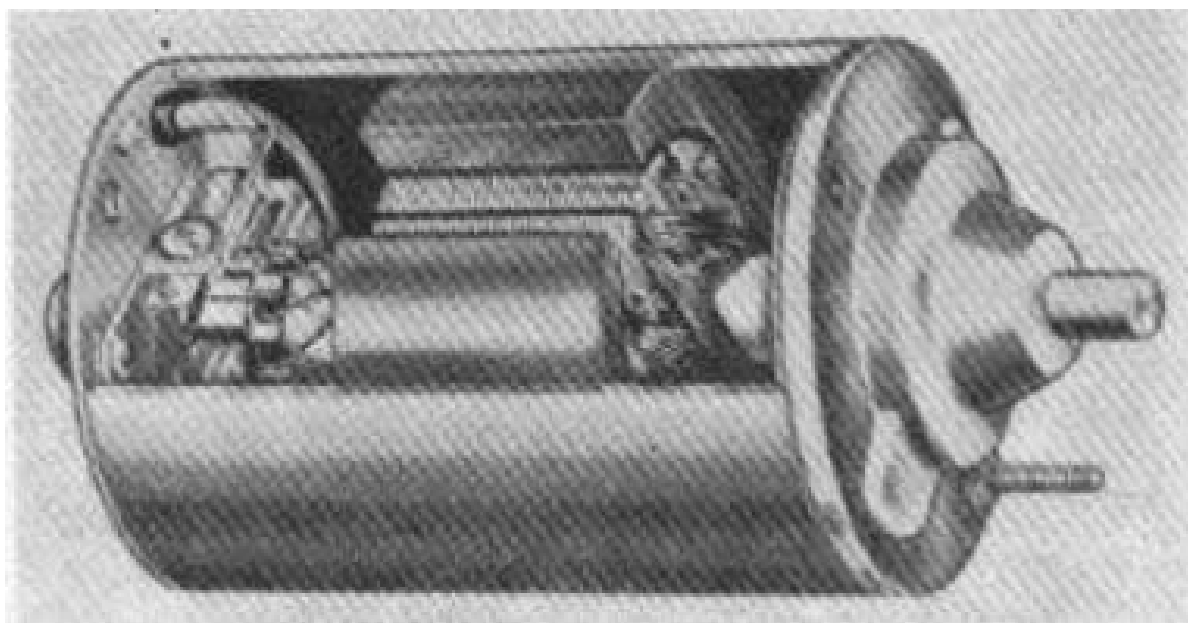


Figura 3-2. Vista en corte de un motor de imán permanente (America Bosch Arma Corporation).

## **Motor de imán permanente.**

Un motor para cd de imán permanente es un motor para cd en que el flujo de excitación lo proporciona uno o varios imanes permanentes dispuestos en el circuito magnético del motor. Al no existir devanado de campo, la alimentación se conecta únicamente a las escobillas para la armadura. La figura 3-2 muestra una forma de construcción de un motor de imán permanente. Los polos están formados por imanes permanente de ferrita cerámica al bario, fijados mediante epoxi adhesivo a la carcasa inductora exterior, construida de acero en forma entubada, la carcasa de acero constituye una parte del circuito magnético, haciendo las veces de núcleo; sirve de armazón estructural del motor.

Otra forma de construcción similar a la descripción anterior, salvo que el material de que está construido el imán permanente está fundido en forma de anillo continuo, en lugar de las dos piezas representadas.

En el motor representado en la figura 3-2 los imanes tienen la misma longitud axial que el inducido. En algunos motores, los imanes son axialmente de mayor longitud que el inducido, con el fin de proporcionar un mayor flujo a este último. En algunos de estos motores, los polos de *alnico* están provistos de piezas polares de hierro dulce para conducir axialmente el flujo a un punto preciso sobre el inducido.

Los motores para cd de imán permanente se suministran habitualmente para potencias nominales comprendidas desde alrededor de 0.001 a 0.33hp. Generalmente son de alta velocidad, con velocidades nominales comprendidas entre 2 000 y 20 000rpm. En su mayor parte están contruidos para funcionar con tensiones bajas, tales como 6, 12 ó 24V.

Los rendimientos superiores al 60% son muy frecuentes para el motor de imán permanente puesto que no existen las pérdidas propias de la excitación y tienen menor calentamiento y menos pérdidas con el consiguiente mayor rendimiento que un motor comparable de corriente directa con un devanado inductor.

Este tipo de motores se pueden encontrar, en productos movidos por baterías, cepillos de dientes, cuchillos eléctricos, quebradoras de hielo, rasuradoras, podadoras, cortadores de cabello, mezcladoras de bebidas, juguetes, y aparatos militares.

### **3.4 Motores de corriente directa para usos especiales.**

Realmente es imposible presentar todas las clases de usos especiales de los motores de cd, aún así se presentan los más representativos.

#### **Motores de arranque para motores de combustión (marcha).**

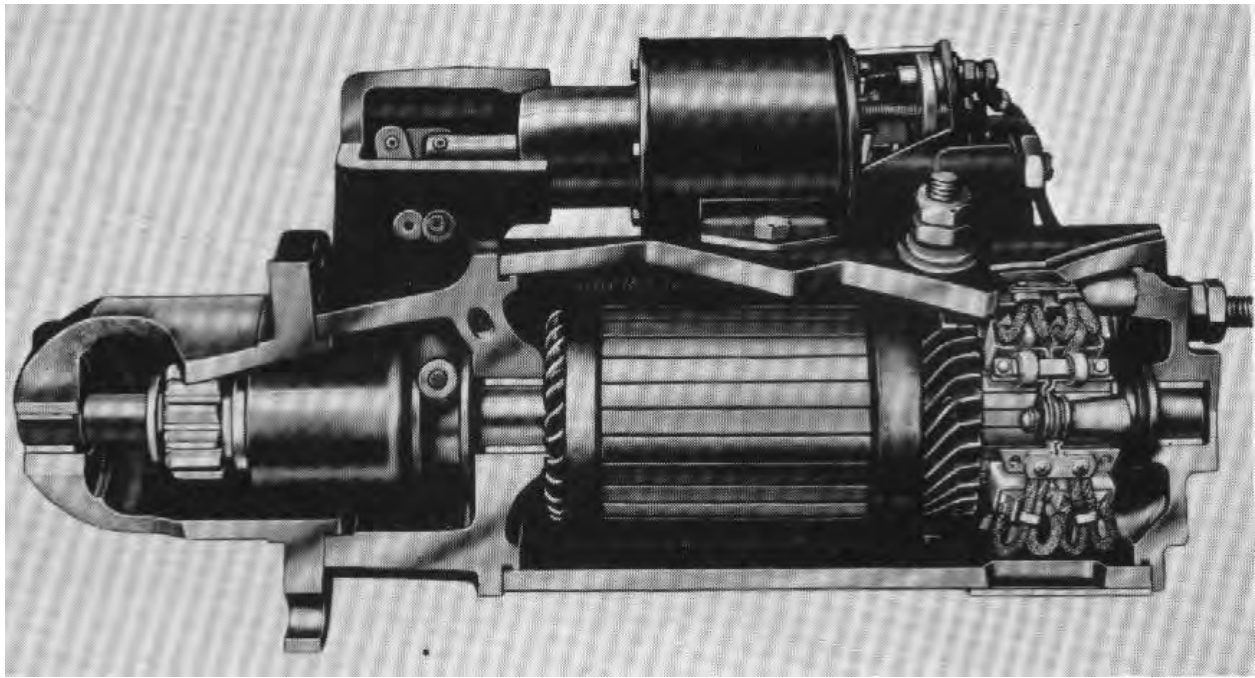
Los motores de arranque o mejor conocidos como *marcha*, tienen la función de hacer girar el motor de combustión interna para ponerlo en marcha. No son parte de ningún otro sistema como los de ignición y combustible, que se requieren para poner en marcha el motor y hacer que trabaje con su propia fuerza. (Existen otros tipos o métodos de arranque, como motores neumáticos, hidráulicos, auxiliares de gasolina, cartuchos explosivos y más)

Los tamaños físicos de las marchas varían desde la de 3in de diámetro empleada para los motores marinos de fuera de borda hasta las de 6in de diámetro. Para motores pequeños la medida es de 4in de diámetro, de 4.5in para motores de gasolina de automóviles y camiones ligeros, los de 5in de diámetro para motores de gasolina grandes y diesel para autobuses y los de  $5 \frac{9}{16}$  y  $6 \frac{5}{8}$  in de diámetro para los motores diesel grandes empleados en equipos generadores, motores estacionarios, motores diesel marinos y motores de vehículos militares.

La potencia de estos motores de arranque es desde alrededor de 1/8hp en los más pequeños hasta unos 30hp en los más grandes. Los voltajes van desde 6 hasta 110V<sub>cd</sub>, con los intermedios de 12, 24, 30, 32, 48 y 64V. La selección del tamaño y potencia de la marcha depende de los requisitos del motor a accionar. Los voltajes se determinan con otros factores, como son el del sistema eléctrico utilizado para alimentar diversas cargas eléctricas, por lo tanto, las marchas se deben diseñar y hacer funcionar con un voltaje del sistema que quizá no sea el óptimo para el sistema de arranque en particular.

El mecanismo normal que se emplea para acoplar la marcha con el motor para el arranque es con un piñón montado en el extremo del eje de salida o de la armadura de la marcha, al cual se mueve para que se acople con la cremallera o corona en el volante del motor. El diámetro de esta cremallera suele estar limitado, en los automóviles, por la distancia entre la cubierta del volante y el piso y en el caso de los motores de fuera de borda, por el tamaño de la cubierta del motor o el espacio libre para accesorios.

La figura 3-3 muestra una marcha de  $5 \frac{1}{8}$ in con palanca de cambios controlada por solenoide. Este tipo de marcha consta de tres partes principales: el motor eléctrico, el solenoide y la palanca de cambio y el impulsor.



**Figura 3-3. Construcción de un motor de arranque (marcha) de 51/8 in de diámetro.**

El motor eléctrico consta de una armadura, un armazón y bobinas de campos y los portaescobillas. Todos los circuitos están diseñados para conducir corrientes muy altas, hasta 1 000A en servicio intermitente. Las conexiones del conmutador y de la bobinas de campos se hacen con soldadura de gas o arco, soldadura para alta temperatura, que puede soportar altas temperaturas momentáneas no importando que el aislamiento para el motor sea clase A, ya que el tiempo total requerido en funcionamiento es corto. El requisito de duración de aislamiento en una marcha es el opuesto al de la mayor parte de los motores eléctricos, porque también debe soportar altas temperaturas momentáneas de funcionamiento del orden de 260°C en diversas piezas, pero el aislamiento clase A suele ser el adecuado para la duración requerida, que está, basada en 10 000 a 50 000 arranques con duración de 1 a 5s la construcción de las escobillas y el conmutador es muy importante, debido a la corriente elevada, que puede llegar a 3 000A en algunas de las marchas grandes.

El mecanismo de solenoide y palanca de cambios incluye un solenoide axial que tiene dos funciones:

- a. Mover la palanca de cambios para desplazar el impulsor y acoplar el piñón con la cremallera del volante, por medio de la palanca y articulaciones.
- b. Cerrar un juego de contactos eléctricos en serie con la marcha para completar el circuito eléctrico en la marcha después de que se ha acoplado el piñón.

El solenoide tiene dos devanados o bobinas. La primera, que es la bobina de retracción, se excita sólo cuando el piñón está acoplado y después los contactos del solenoide la ponen en derivación cuando gira la marcha. La segunda bobina, llamada de sujeción, mantiene el impulsor y el piñón acoplados y los contactos del solenoide cerrados con suficiente presión.

Finalmente, las marchas deben tener algún mecanismo para su acoplamiento mecánico con el motor durante el arranque y para desacoplarlas después de que arranca el motor de combustión. El requisito de desacoplamiento de la marcha se basa en las velocidades relativas de rotación de la marcha y del motor, que son tales que la reducción de engranes entre ellas producirá velocidades excesivas que destruirían la marcha sino se desacopla después de que arranca el motor.

## **Motores para minas.**

Los motores eléctricos son la fuente primaria mecánica en la industria minera. La aplicación de los motores para minas se divide en dos grupos básicos. El primer grupo se emplean como *auxiliares* en el trabajo básico de extracción. El segundo grupo incluye la aplicación de motores en el *frente de trabajo*, para el empleo directo en el corte y extracción de minerales. La diferencia entre estos dos grupos es que los motores auxiliares suelen ser modificaciones de los motores industriales para usos múltiples y los del frente están destinados a funciones específicas, los motores auxiliares suelen estar fijos en el piso, mientras que los del frente están montados en la maquinaria minera.

El ciclo de trabajo de los motores auxiliares suele estar bien definido y es estable mientras que el trabajo de los motores para el frente consiste en cargas aleatorias y cierto número de carga de choque. Las exigencias eléctricas y mecánicas totales de los motores para el frente de trabajo, son mucho mayores que para los motores auxiliares. Estas exigencias hacen que los motores para el frente sea de un diseño muy especializado y específico en las máquinas mineras. Es por ello que el resto de la descripción de los motores para minas, se dedicará a las características especiales del diseño y construcción de los motores del tipo para el frente.

Los motores de cd para minas generalmente funcionan con potencial constante de 250 o de 500V a partir de voltaje variable de un panel de rectificación de ca, para servicio de extracción y suelen tener velocidades base de 1 175 o 1 750rpm. Estas velocidades se han seleccionado para coincidir con la de los motores de ca de cuatro o seis polos a fin de lograr un término medio entre tener una velocidad suficiente para dar a la potencia requerida y también una que sea lo bastante baja para obtener confiabilidad.

Las características de diseño dependen del empleo real del motor. Los motores para *bombas* suelen ser de devanados en serie estabilizados o compuesto con regulación de velocidad entre sin carga y plena carga entre 10 y 15%. Los motores para *brazos cargadores* y *cortadoras* suelen tener alto grado de compuesto con regulación de velocidad de 30 a 35%. Los motores para *tracción* tienen devanado en serie y la armadura se construye para soportar una velocidad hasta de 6 000rpm que pueden ocurrir por acarreo ocasionado por los carros remolcados.

En los casos en que los motores se ponen en paralelo en forma mecánica, a menudo se hace coincidir su velocidad con una variación de  $\pm 3\%$  para obtener la característica correcta de compartición de carga. En otros casos, esa compartición en estos motores se obtiene con el empleo de motores de característica compuesta acumulativa con campos diferenciales en serie conectados a través de los circuitos de armadura del otro motor.

Este tipo de motores deben ser de construcción más fuerte que los industriales para resistir los voltajes, corrientes y pares temporales así como los choques externos mecánicos, que aplican serios esfuerzos en los devanados y en la estructura mecánica.

Debido al peligro presente de las acumulaciones de gas metano, que es explosivo y de polvo de carbón que es muy combustible en los frentes de trabajo de la una mina, los motores para esas zonas se deben diseñar de modo que sean a prueba de explosión, es decir, que se tienen que construir de modo que puedan funcionar con seguridad en la peligrosa atmósfera con gas y polvo, sin que se produzcan incendios o explosiones ni contribuyan a la propagación de incendios originados por otras causas.

Las características a prueba de explosión de un motor se obtienen con una construcción que contenga en forma segura dentro de la carcasa, cualquier incendio o explosión que pueda ocurrir allí, sin que se desprendan chispas o llamas que a su vez inflamarían las el gas o el polvo que rodean el motor.

Esta característica se logra con el empleo de carcasas fuertes y resistentes, que puedan soportar la fuerza de una explosión interna y mediante uniones largas y herméticas entre las piezas de la carcasa para enfriar y extinguir las llamas y chispas producidas por una explosión interna antes que pueda salir a la atmósfera.

Otro factor es el espacio limitado en el frente de la mina, el tamaño de las maquinas y en consecuencia el de los motores están limitados también, por lo tanto, el diseño externo de estos motores es especial para poder instalarlos en el reducido espacio de las maquinas y poderles dar mantenimiento. Las carcasas son de construcción fuerte y compacta y tienen aberturas amplias y soportes desmontables para permitir el acceso a las piezas que necesitan ajuste, inspección o mantenimiento. Las partes de la carcasa como el armazón, tapas soportes y cubiertas de cojinetes, se hacen con acero o de hierro dúctil fundido de sección adecuada para soportar los grandes esfuerzos del servicio minero. (Figura 3-4)

Finalmente debido al requisito a prueba de explosión todos los motores de minas son totalmente cerrados. Los tipos más comunes son sin ventilación o enfriados por ventilador, aunque se utilizan también motores con armazones o ejes enfriados por líquido.



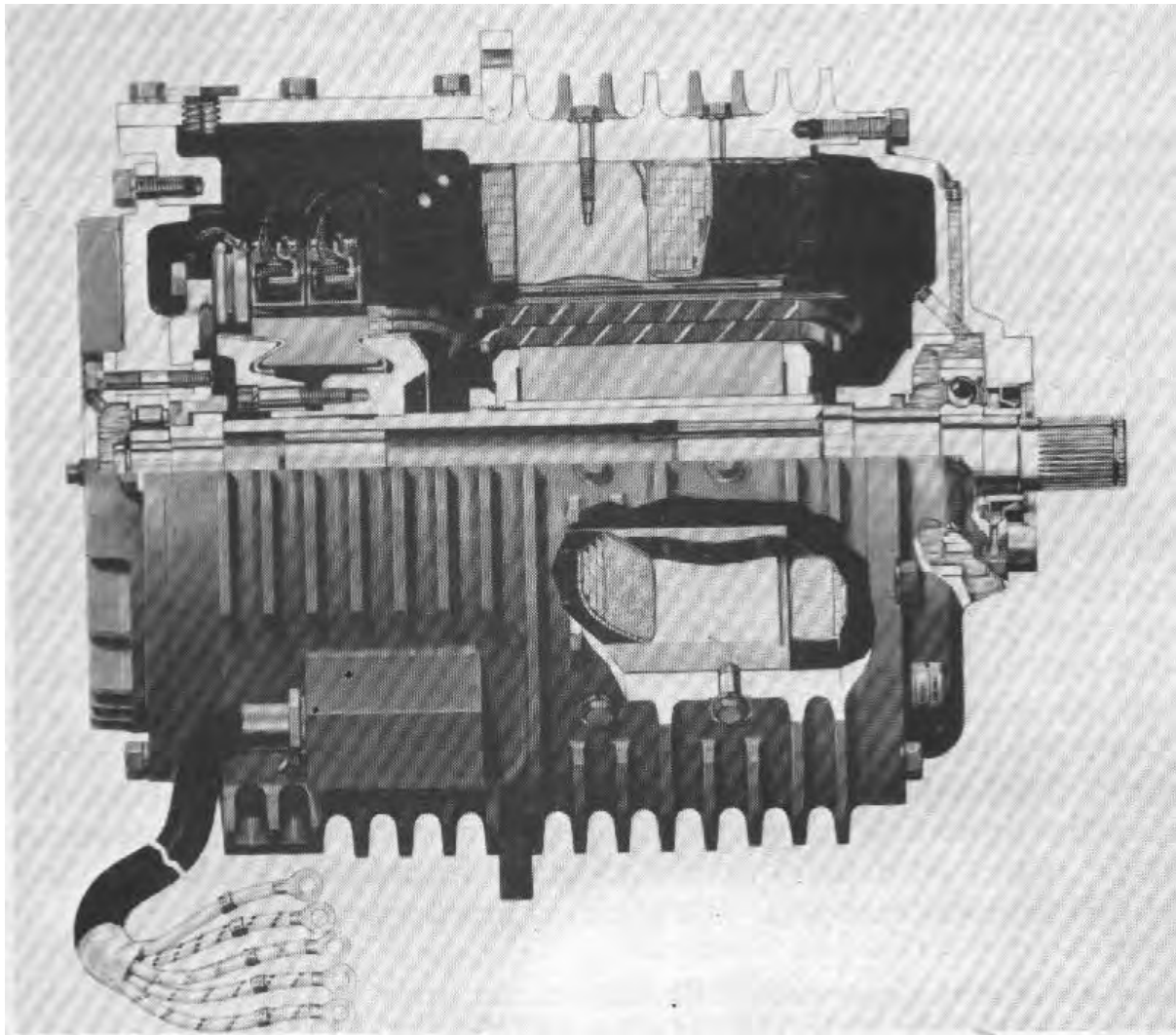


Figura 3-4. Motor típico a prueba de explosión para minas, de 20hp con 250V<sub>cd</sub>.

### **Motores para servicios militares.**

Los motores de cd de muy reducidas dimensiones son usados para una gran variedad de aplicaciones en aviones tanto militares como civiles. Estos motores se caracterizan por su poco peso y están contruidos para satisfacer las severas exigencias propias del medio ambiente, generalmente están destinados para circuitos de 28V o menos.

En la figura 3-5 se observan dos motores típicos, sus diámetros son nominalmente de 3.5cm y usualmente son de devanado serie desdoblado. Pueden estar provistos de un freno capaz de para el motor en el un intervalo de 3 a 5 revoluciones desde una velocidad de 10 000rpm, de un reductor de engranajes planetarios o con ambos. En lugar de un freno, puede ser suministrado un regulador. El motor más pequeño de los representados (Globe type GJY) tiene una longitud básica máxima de 6.35cm, un potencia nominal para servicio continuo de 0.01hp a 10 000rpm, un par de 45%, un rendimiento de 49%, y una velocidad de vacío de 25 000rpm. El motor más grande representado (Globe type GJA) tiene una longitud básica máxima de 7.6cm, una potencia nominal para servicio continuo de 0.02hp a 10 000rpm, un para de 325%, un rendimiento a plena carga de 50% y una velocidad en vacío de 22 000rpm.

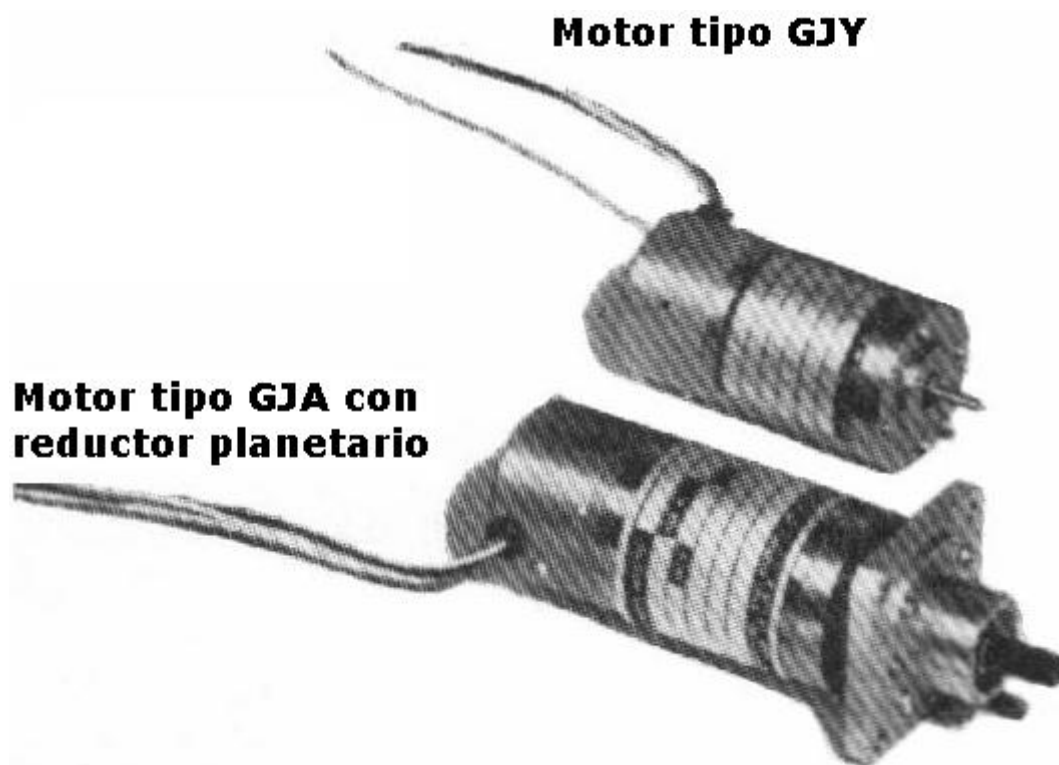


Figura 3-5 Motores miniatura de cd contruidos según especificaciones militares. (*Globe Industries Division of TRW, Inc.*)

### **Motores para servicio marítimo.**

En la figura 3-6 se observa un pequeño motor de cd especialmente construido para servicios marítimos. Este tipo de motor tiene una tapa frontal de fibra de vidrio y un montaje completo de escobillas totalmente moldeado con la misma. Su diámetro es aproximadamente de 12.7cm. Su potencia nominal va de 0.10 a 0.75hp, su tensión de 6 a 110V, y sus velocidades de 500 a 4 000rpm. Pueden ser de excitación serie o compuesta, siendo usados en la marina en aplicaciones tales como bombas, sopladores y lavabos.

### **Motores para carretillas eléctricas destinadas al manejo de materiales.**

Este tipo de motor es eléctricamente reversible, especialmente diseñado para las carretillas (montacargas) destinadas al manejo de materiales funcionando con baterías de acumuladores, con sus devanados inductores acoplados en dos circuitos en paralelo. Estos motores son habitualmente bobinados para 24 a 30V aún cuando pueden serlo para una tensión más alta, sus velocidades van desde 1 725 a 5 000rpm y sus potencias nominales son desde 1/10 a ½hp. Tales motores están equipados con un freno magnético. La figura 3-7 representa el motor para tal aplicación.

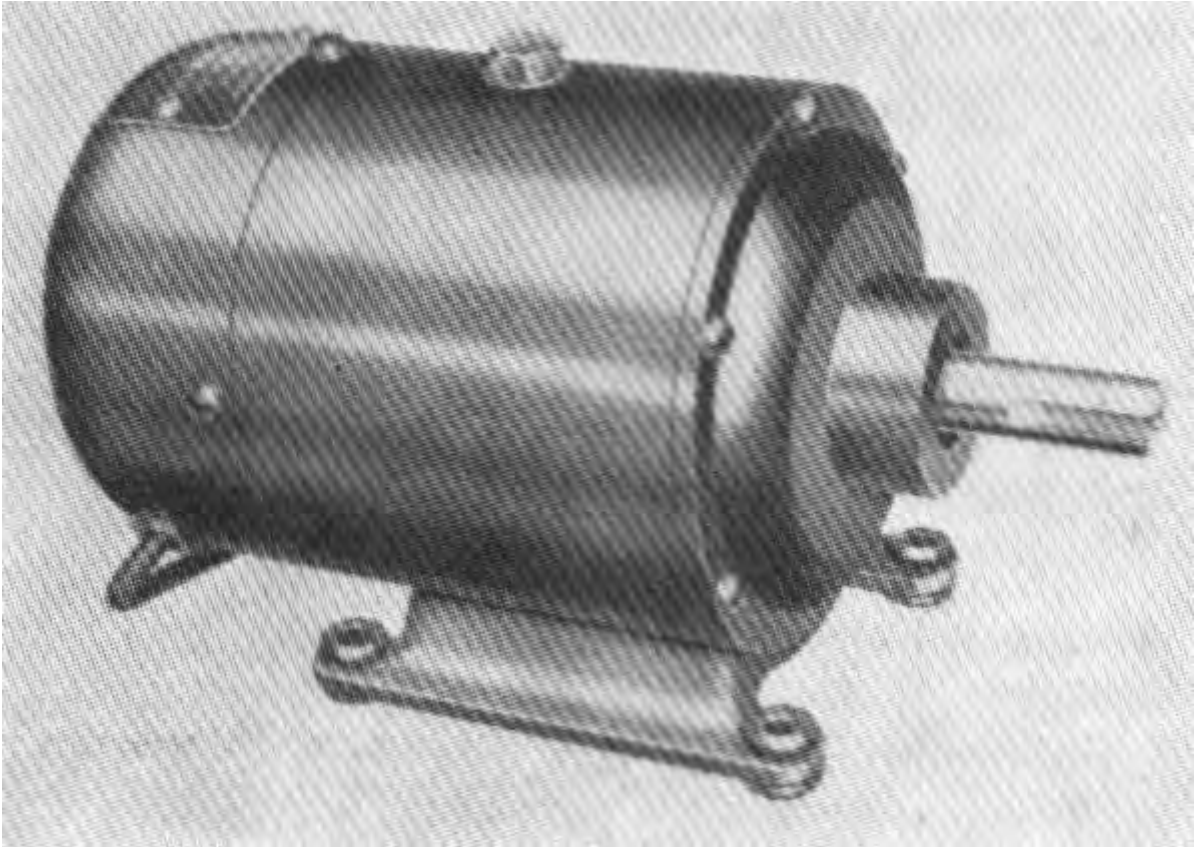


Figura 3-6. Pequeño motor de cd para el servicio de la marina. (*Crowell Desings, Inc.*)

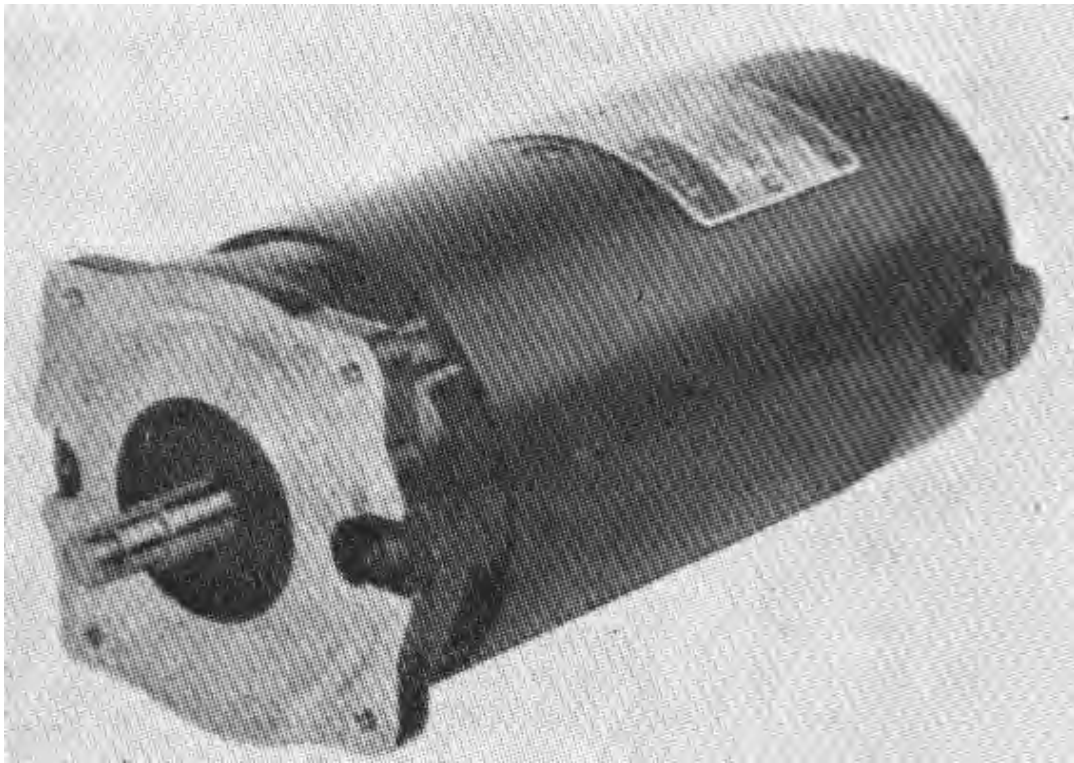
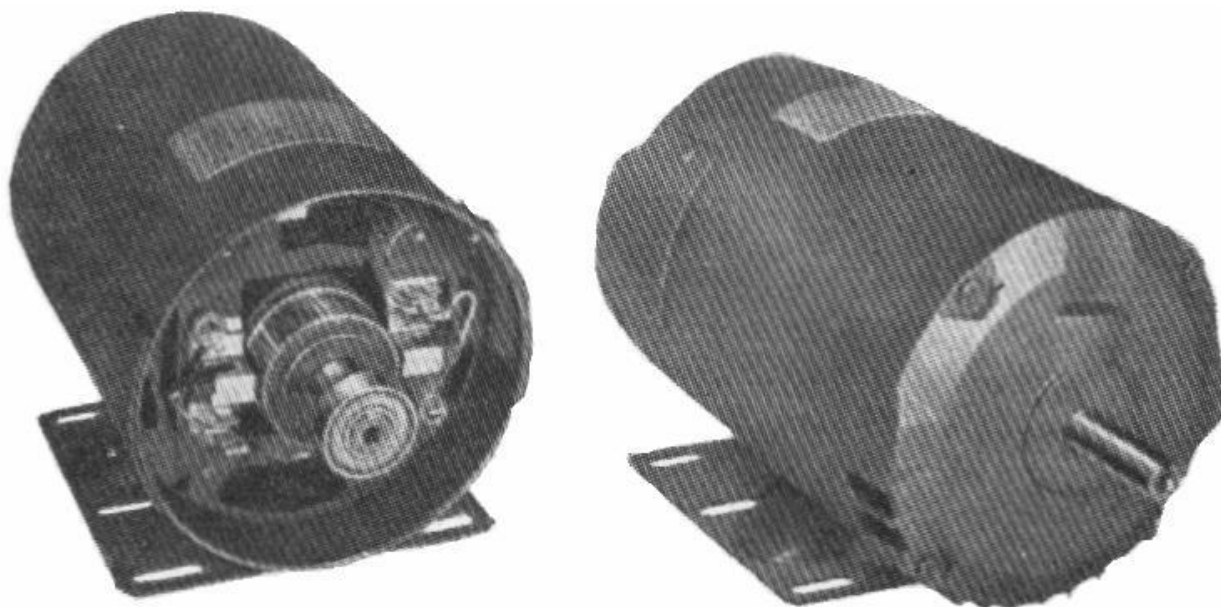


Figura 3-7. Motor de baja tensión para funcionar alimentado por batería. (*General Electric*)

### **Motores serie de inductor desdoblado.**

Los motores serie de inductor desdoblado son habitualmente previstos para un servicio con cambio del sentido de giro de marcha, la simplicidad de su control los hace ideales para este servicio. La figura 3-8 muestra un motor serie de inductor desdoblado, en el cual se observa el inductor dividido en dos secciones. Algunas veces, sólo hay dos bobinas inductoras, una por cada polo, otras veces, dos bobinas inductoras están arrolladas sobre cada polo, en este caso, la mitad del devanado de cada polo es excitado para cada sentido de giro. Esta última disposición da unas condiciones de flujo algo mejor equilibradas pero conduce a algunas complicaciones extras.



**Figura 3-8. Motor serie de inductor desdoblado. (Reliance Electric Company)**

El motor de la figura 3-8, de potencia fraccionaria, está diseñado para funcionar con corriente directa rectificada o con un generador o batería de alimentación, su estructura inductora, está totalmente formada por chapas, el inducido, es de aislado clase B, además se pueden apreciar las tapas de acceso a las escobillas y los terminales de conexión rápida, finalmente se observa su pie con seis ranuras, las cuales permitan variar las dimensiones del montaje.

### **Motores Invertibles.**

Cuando pueden usarse las características de la excitación en serie, el motor serie de inductor desdoblado es ideal porque sólo tiene tres hilos y puede ser controlado por un sencillo conmutador monopolar de dos vías como el de la figura 3-8. No obstante, existen aplicaciones reversibles en que no están permitidas o mejor dicho no son convenientes las características de la excitación serie; tales aplicaciones son las de aparatos de elevación, de máquinas-herramienta, de avanzadores de electrodos para hornos eléctricos o de soldadoras de arco. La figura 3-9 muestra las conexiones

esquemáticas de un motor compuesto dispuesto para este servicio, se observa que se invierten las conexiones del inducido mientras que el inductor paralelo se deja conectado a la línea. Es preferible dejar el inductor paralelo excitado durante la maniobra del conmutador con el fin de evitar la interrupción del circuito de excitación paralelo. El interruptor de línea está representado como un interruptor separado no acoplado mecánicamente al conmutador y con preferencia no debe funcionar simultáneamente con éste último.

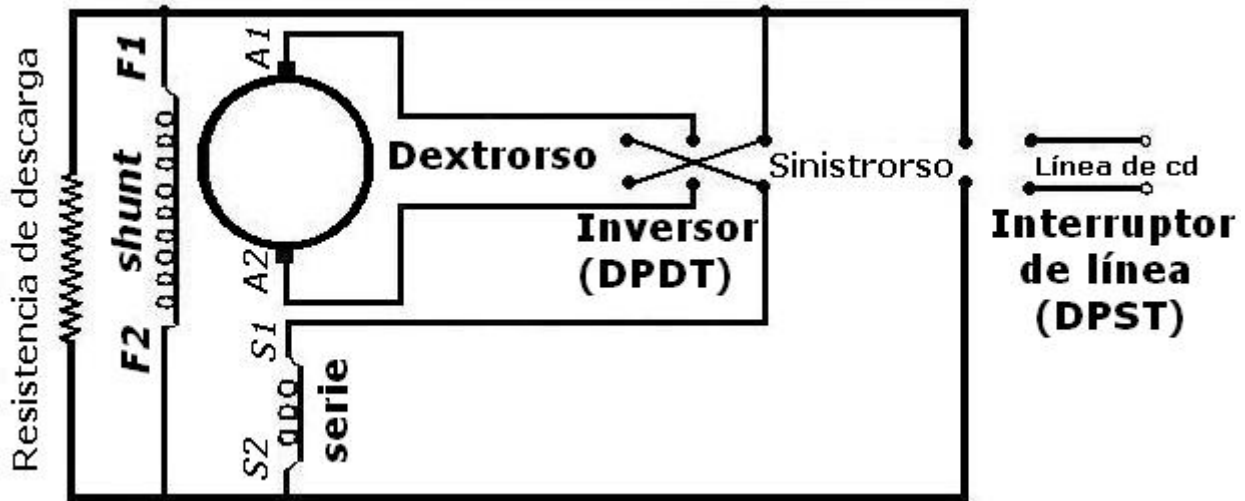


Figura 3-9. Diagrama esquemático de conexiones de un motor de cd compuesto reversible eléctricamente.

El mando se simplifica si el interruptor de línea es monopolar y combinado con el conmutador, en este caso es suficiente un conmutador tripular. Esta disposición tiene además la ventaja de que el motor está siempre desexcitado en la posición abierta del conmutador tripular. Estas ventajas hacen atractivo el uso de esta disposición. Sin embargo, tiene el serio inconveniente de que en inductor paralelo es abierto y en cada inversión produce una onda de muy alta tensión en los bornes del inductor que dará lugar a una fuerte chispa debajo de las escobillas, pudiendo provocar un arco entre escobillas vecinas. En motores de potencia fraccionaria se pueden registrar ondas de muchos de miles de voltios, haciéndose necesario un aislamiento superfuerte de los devanados inductores, en motores grandes ya ni que decir.

Algunos de los factores a considerar acerca de este tipo de motores y que por lo tanto es importante informarse del constructor, cuantas inversiones puede soportar el motor por minuto y si es necesario o no, un aislamiento para los devanados inductores. Los motores para más de 1725 y 3 450rpm son más propensos a no ser convenientes para este servicio que aquellos otros que están previstos para una velocidad o potencia (o ambas) más bajas. Otro factor a considerar, es el de la fuerte absorción de corriente por el motor en el momento de cerrar el conmutador.

## Motor de dos velocidades.

En la figura 3-10 está representado el esquema de acoplamiento y conexión a la línea de un ingenioso motor de cd de dos velocidades. El motor está previsto para funcionar como un motor compuesto acumulativo sobre la conexión de baja velocidad. Para el funcionamiento a gran velocidad, el motor está acoplado como un motor paralelo, pero los inductores serie están montados en serie con el inductor paralelo de tal manera que el inductor serie se opone al inductor paralelo, reduciéndose así, el número de vueltas efectivo en el inductor paralelo. De ello resulta que la excitación paralelo es más débil con el montaje para gran velocidad que para el de baja velocidad; además, con este último montaje, la velocidad está reducida todavía más por la excitación serie acumulativa.

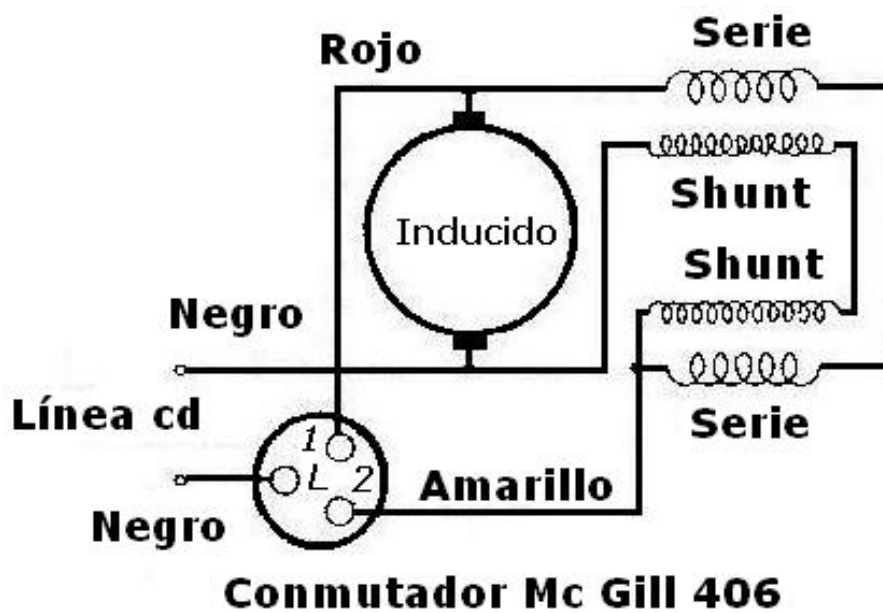


Figura 3-10. Esquema de acoplamiento y de conexión a la línea de un motor de cd de dos velocidades. (Marathon Electric Manufacturing Company)

## Motores temporizadores.

Se fabrican pequeños motores temporizadores para cd con o sin reguladores, depende la exactitud requerida en la velocidad para su aplicación. En la figura 3-11 está representado un *motor temporizador básico* sin regulación, con velocidades en la flecha de 3 000rpm y tensiones nominales de 4.5 a 45V. La construcción de este motor es totalmente diferente de la de cualquiera de los motores que se han estudiado hasta esta parte del trabajo, puede observarse de la figura, que el inducido está formado por una caja de aluminio (o inconel que es una aleación de níquel, cromo y hierro), sobre la que están arrolladas directamente las bobinas. Un imán inductor de alnico está montado sobre la estructura de apoyo, *en el interior de la parte hueca del inducido giratorio*.

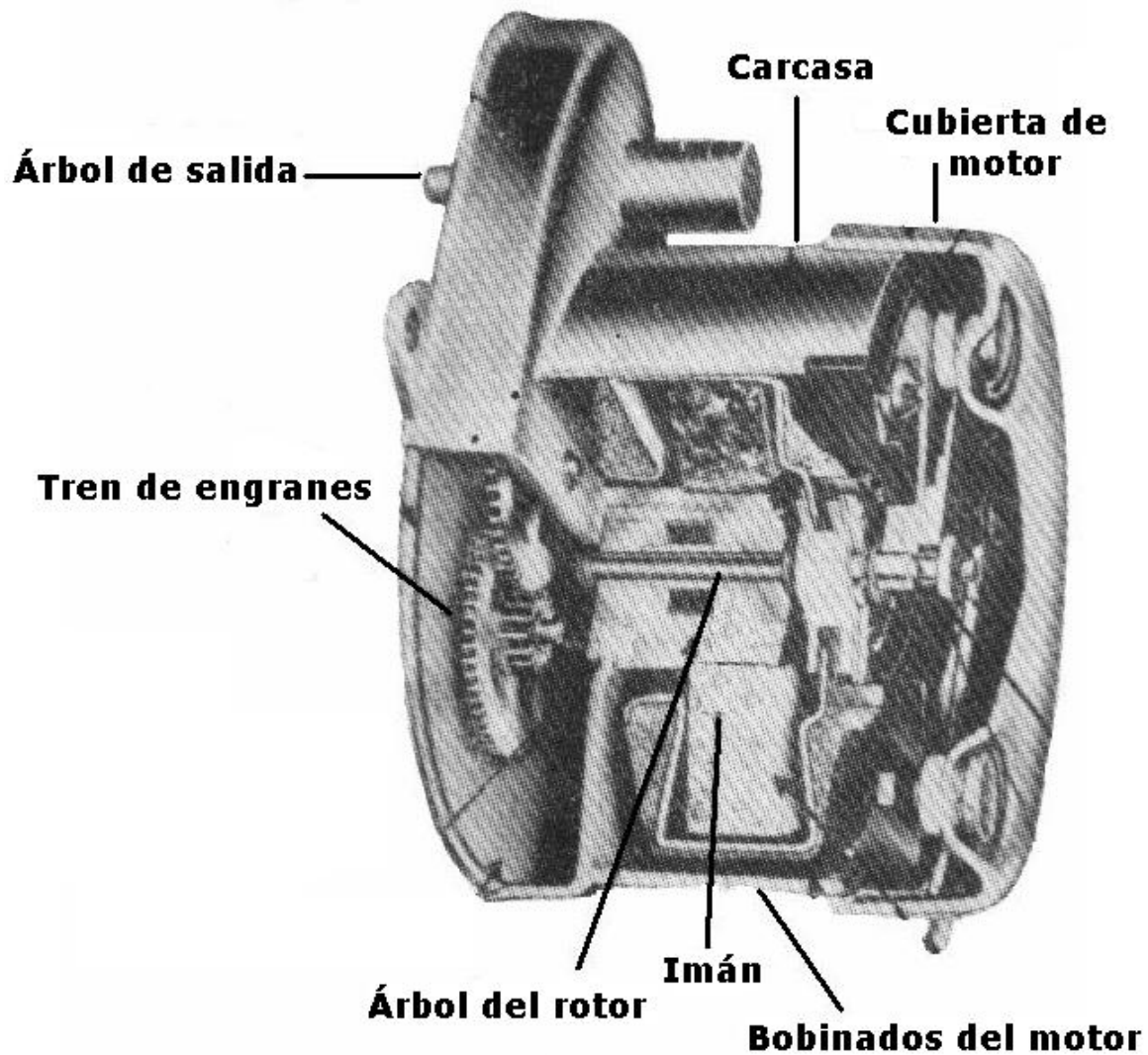
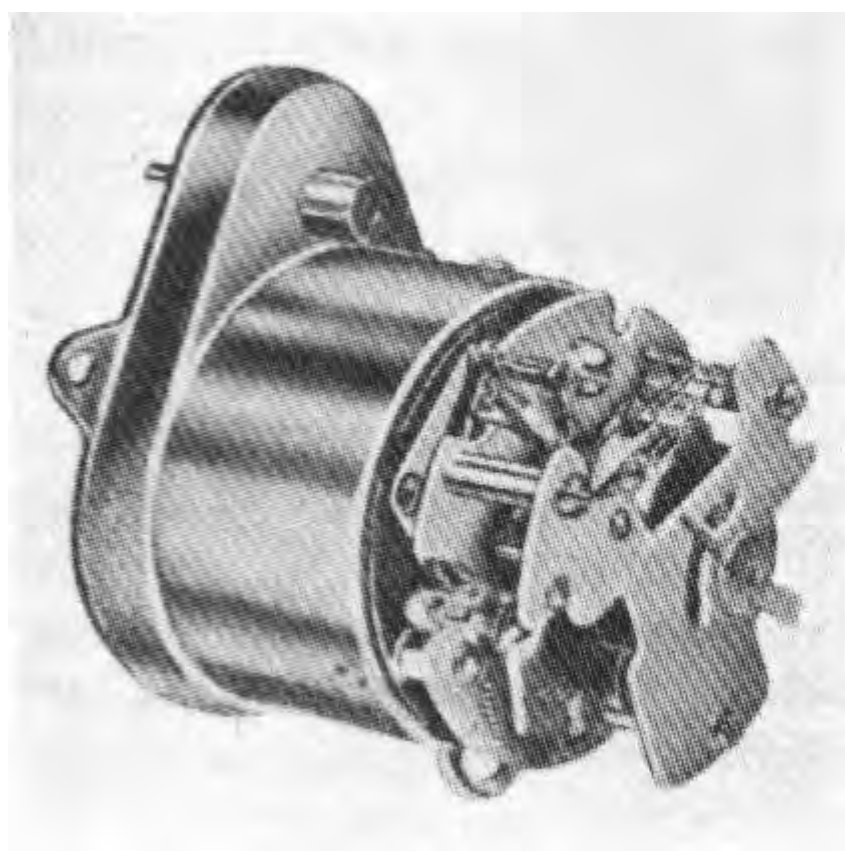


Figura 3-11. Motor temporizador de cd. (*The A. W. Haydon Company*)

El circuito magnético está completado por la propia envoltura del motor. De esta manera, no existen las chapas de inducido, con sus dientes salientes como en los motores ordinarios y las consiguientes juntas. Durante la rotación del motor, son generadas corrientes parásitas en la caja de material no férreo. El efecto de estas corrientes parásitas es el de imponer una carga dinámica al motor, reduciendo sustancialmente su velocidad, pero haciendo que la velocidad sea menos sensible a cambios debidos a variaciones de la carga aplicada, ya que la carga dinámica debida a las corrientes parásitas varía según el cubo de la velocidad de funcionamiento. Además, la sobrecarga debida a las corrientes parásitas de la caja del rotor proporciona también una compensación de temperatura en grado apreciable, porque la tendencia que tiene la velocidad del motor a incrementarse debido a la reducida resistencia en el cobre de los arrollamientos a bajas temperaturas está compensada por un aumento de corriente parásita, puesto que la resistencia de la caja también disminuye con la reducción de temperatura. La caja retórica puede ser de aluminio o de inconel, según cuales sean las características deseadas.

Estos motores son de aplicación en los casos que la estabilidad de velocidad requerida es del orden de 10% en más o menos *con tensión nominal*, por otra parte, las alteraciones en la tensión aplicada serán causa de una variación adicional de la velocidad, la cual, es proporcional a la alteración de la tensión aplicada.

En la figura 3-12 se muestra un *motor temporizador de cd regulado* cronométricamente, con el regulador montado al exterior del motor, es prácticamente el representado en la figura 3-11. El inducido gira a 2 700rpm, estando también previsto para que pueda funcionar normalmente a velocidades mayores bajo cargas normales. Una resistencia para regulación de la velocidad, en serie con el circuito del inducido, basta para obtener bajo cargas débiles, velocidades inferiores a la de 2 700rpm. Los contactos están dispuestos de forma que esta resistencia pueda ser conectada y desconectada del circuito de regulación de velocidad.



**Figura 3-12. Motor temporizador de cd regulado. (The A. W. Haydon Company)**

Durante el funcionamiento, estos contactos se obtienen mediante el escape, iniciándose una pulsación de corriente, dichos contactos son abiertos por medio de una leva dispuesta sobre el árbol del motor. Así la duración de la pulsación de corriente depende de la posición efectiva del inducido con respecto al volante. Esta pulsación correctiva tiene lugar a cada oscilación del escape, o sea 15 veces por segundo, o una vez por cada tercera parte de una revolución del inducido. La estabilidad de la velocidad, dentro de una alteración de la tensión en mas o menos 20%, es en 0.1% a 18.3°C. Para una variación de temperatura comprendida entre -54°C y +74°C, la estabilidad de velocidad es sólo de mas o menos 0.3%.



## Motores sin núcleo.

El motor *sin núcleo* no tiene núcleo magnético en la armadura rotatoria. Hay dos formas de construcción fundamentalmente distintas, dependiendo de la forma física elegida. Las ventajas que se obtienen son; *una inercia reducida del rotor de la armadura*, lo que permite una aceleración en extremo grande y en consecuencia una constante de tiempo de respuesta muy pequeña en el mecanismo de control y *muy poco, o casi nada de bailoteo*, es decir, la tendencia del motor a moverse en pequeños jalones angulares conforme el par apenas sobrepasa el campo de fuerzas magnéticas de atracción de la armadura. El bailoteo es causado por la estructura dentada o no uniforme de la estructura del núcleo magnético de la armadura. Se puede reducir introduciendo en sesgo o pequeño ángulo helicoidal en los dientes de la armadura y se puede eliminar por completo si la armadura no tiene núcleo magnético.

Describiendo por separado estos dos tipos principales de motores sin núcleo, el primero de ellos se puede describir del tipo con *rotors de disco o de circuito impreso*, el cual tiene la armadura con la forma de un disco plano, con el espesor apenas suficiente para darle cierta resistencia estructural y para permitir conectarle los conductores del circuito de la armadura en ambas caras, entonces la forma natural de construcción lleva al uso de un circuito impreso. En este caso la base estructural es el material laminado no conductor y no magnético. La separación entre los conductores de la armadura se graba en las caras originales cubiertas de cobre del material básico laminado de la placa. En los modelos más pequeños incluso los segmentos del conmutador se pueden hacer a partir del circuito impreso.

Las variantes incluyen conmutadores separados que se fijan al circuito del rotor y separan devanados perforados o formados que se sujetan en forma adhesiva al tablero básico, en los modelos medianos. El resultado es que la armadura queda delgada a lo largo de la dimensión axial y por lo tanto no requiere de un núcleo magnético de acero al silicio para mantener el entrehierro entre los polos del campo en un tamaño razonable. Los polos del campo se disponen paralelos al eje de la armadura, en vez de hacerlo en forma radial. Esto crea líneas de flujo paralelas al eje a través del área del conductor de la armadura en la región en la que los conductores son esencialmente radiales. La figura 3-13 muestra la construcción de un motor de disco.

El flujo pasa del lado del conmutador del disco del devanado de la armadura al lado posterior de uno de los pares de polos y de la parte trasera al lado del conmutador en un par de polos adyacentes. Esto quiere decir que una bobina individual de devanado de la armadura debe ir radialmente hacia afuera a través del flujo del campo en una de las caras del disco y luego conectarse alrededor de su exterior a través de una parte de su circunferencia para conectarse con la otra cara del disco. La otra parte activa de esta bobina pasa luego en forma radial hacia adentro bajo la influencia del

siguiente par de polos de campo adyacentes, en estos casos pueden utilizarse devanados traslapados u ondulados. Aquí, la parte perimetral externa del devanado corresponde al extremo posterior de una bobina normal, como se usa en una armadura ordinaria con núcleo laminado. La longitud efectiva del conductor del devanado es igual a la dimensión radial de los polos de campo.

Conforme el tamaño de los motores aumenta, los problemas usuales del desarrollo de cualquier construcción intrínsecamente nueva se hacen aparentes. El calentamiento en el devanado de la armadura, causado por una pérdida normal del tipo  $I^2R$ , tiene una tendencia a deformar el disco y a aflojar las uniones de los devanados. Esta dificultad se supera mediante una selección cuidadosa de los materiales, por un aparte y por otra mediante una igualmente cuidadosa proporción del tamaño y el espacio del entrehierro del campo. Estos motores se pueden fabricar en cierto rango de tamaños y con cualquier construcción normal de polos de campo de devanados en serie, en derivación o compuestos. No obstante, en la actualidad se usan campos de imán permanentes.

Una de las limitaciones es que es difícil hacer más de una vuelta de devanado por bobina. El resultado es que este tipo de motores está limitado a voltajes pequeños, sin embargo, la mayoría de los servocontroles usan tanto motores como voltajes pequeños. Las ventajas inherentes de inercia pequeña y bajos voltajes umbrales de arranque hace que estos motores sean muy adecuados en el servicio de los sistemas control.

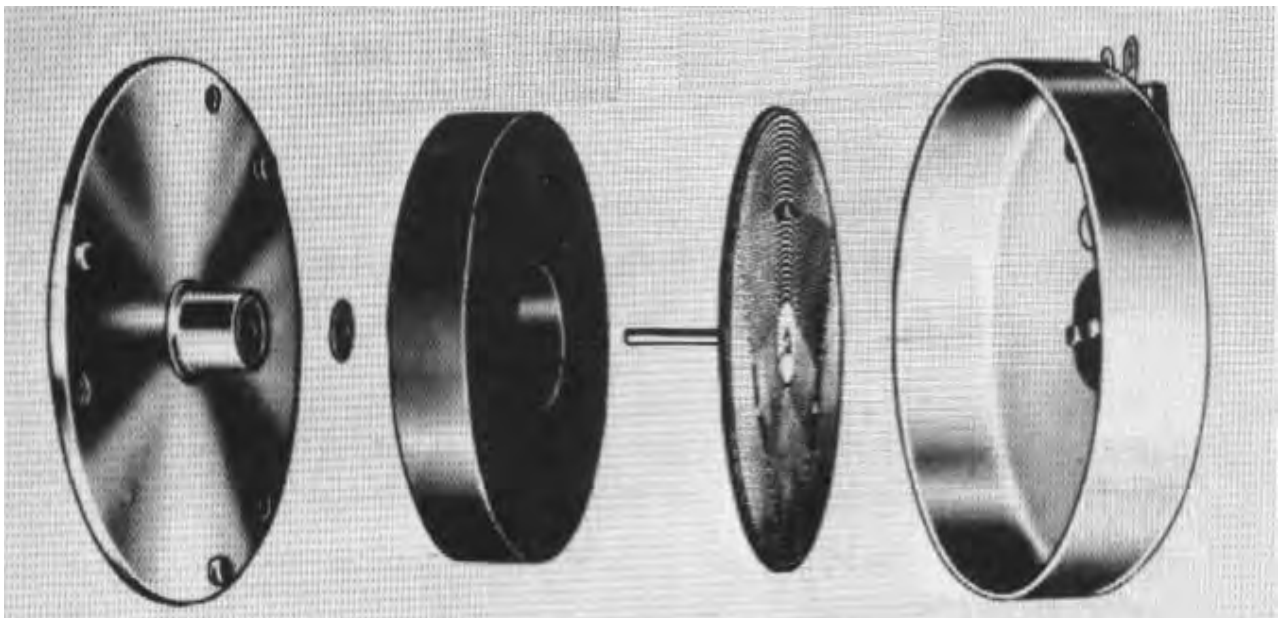


Figura 3-13. Motor de circuito impreso. (*Haydon Swicht and Instrument, Inc.*)

El segundo tipo o clase de motores sin núcleo se les llega a denominar *motores enlatados*, su nombre se debe al aspecto físico de estos pequeños cilindros. Los motores cilíndricos ya existían, como en las marchas de los automóviles, pero los motores muy pequeños se fabricaban por lo común con una carcasa abierta y una protuberancia en un extremo para su magneto de campo. Así, los motores pequeños con envase cilíndrico denominaron como motores enlatados. La forma se debe a que el envase exterior es una sencilla trayectoria de retorno de acero magnético del circuito del campo. El campo consiste por lo general en una pieza bipolar de alnico o de material magnético cerámico y se coloca de manera concéntrica *dentro* de la lata, el uso del material supermagnético cobalto al samario se incrementa día a día.

La armadura sin núcleo en forma de copa gira en el espacio concéntrico entre la lata exterior y el imán de campo interior. En este caso, aun más que en los rotores de disco descritos anteriormente, los devanados del rotor son su propia estructura de soporte. El devanado en forma de copa tiene una configuración parecida a la del devanado de un motor convencional que emplea un núcleo de laminaciones magnéticas. A fin de que esta construcción sea más práctica, los conductores del devanado activo se sesgan con respecto al eje, en un sentido en el exterior de la copa y en el otro sentido en el interior. Todo el devanado se moldea en forma de copa con un epóxico o cualquiera otra matriz adhesiva. El eje por lo común tiene un sólo extremo, llegando hasta el arreglo del conmutador. Esto último es perfectamente adecuado para los modelos miniatura que se producen. Se requieren extremos de campana de cerradura, uno en el extremo del conmutador para soportar el cojinete y el portaescobillas simplificado y otro para sostener el imán de campo y la lata o envase ubicado concéntricamente.

Estos motores también tienen una inercia muy pequeña y no tienden a bailotear a velocidades y potencias bajas, los usos que se les da son de servocontroles en instrumentación y por miles, en los modelos a escala, su desempeño es excepcionalmente bueno para el tamaño que tienen, ya que la tendencia al bailoteo de los motores convencionales pequeños con sólo tres ranuras en la armadura era y es muy severa. Esto podría haberse minimizado introduciendo más ranuras en la armadura y segmentos del conmutador. Sin embargo, en los modelos pequeños los alambres del devanado de la armadura son tan delgados como cabellos y hacer más bobinas de tamaño aún menor sería impráctico.

A pesar de sus ventajas el tamaño de los motores enlatados parece tener en el presente un límite debido a la dificultad de sostener en forma adecuada los devanados de la armadura contra los pares y los esfuerzos centrífugos. El intervalo actual de tamaño va desde poco más de una pulgada de diámetro (25-30mm) hacia abajo.

## Motores sin escobillas.

Este tipo de motores aprovecha el hecho de que no es necesario un mecanismo rotatorio de conmutación en el motor si el devanado de la armadura se coloca en una posición estacionaria en el estator, el campo es por lo general un imán permanente, el cual se monta sobre el eje y hace las veces del *rotor*. (Esta construcción invertida se parece mucho a las armaduras básicas de ca)

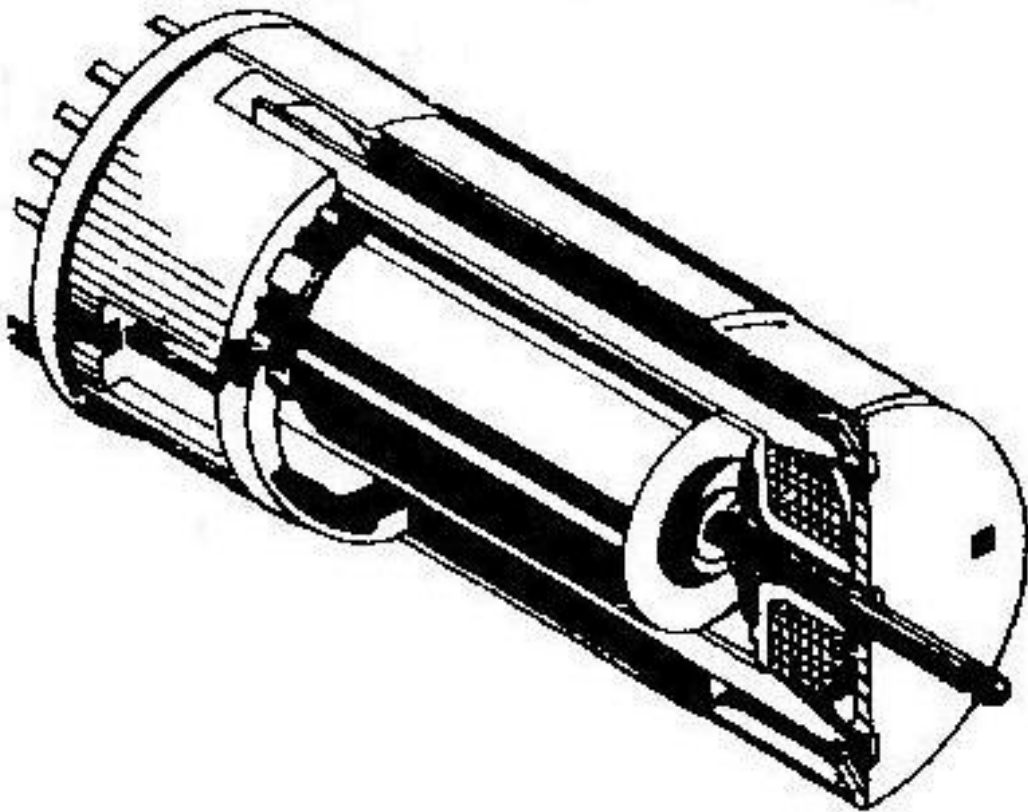
Se utilizan diversos medios para invertir la dirección del flujo de la corriente en la bobina de un motor de cd sin escobillas. En la mayoría de los métodos siguientes se requiere amplificación para una operación práctica.

- a. En las unidades sin escobillas de bajo costo se han empleado con éxito interruptores magnéticos de laminilla. Los interruptores son activados por una parte del imán de campo del rotor o bien por un pequeño imán de sincronización separado en el eje del rotor. Este mecanismo no elimina la interferencia de radiofrecuencia que resulta del movimiento mecánico entre el conmutador y las escobillas.
- b. Se han empleado interruptores de luz y fotodiodos, donde el paso de la luz se obstruye o se franquea de manera apropiada mediante una máscara en el rotor. La señal de salida resultante del fotodiodo se amplifica por medio de circuitos de estado sólido a fin de operar los elementos de conmutación.
- c. También se emplean dispositivos que aprovechan el *efecto Hall* para detectar la posición del rotor, estos elementos utilizan una señal de polarización de la corriente y se excitan mediante campos magnéticos variables. Producen pequeñas señales de voltaje que disparan transistores u otros dispositivos de estado sólido, como los SCR. El cambio en el enlace de flujo del imán del campo rotatorio se detecta con el dispositivo de efecto Hall. Varias de estas unidades se colocan entre los pares apropiados de bobinas del estator a fin de detectar la posición del rotor.

Es claro que estos dispositivos se usan en cantidades menores que los segmentos del conmutador a los que reemplaza. La configuración de la bobina de la armadura se parece entonces a la de un estator de ca bifásico o trifásico, de hecho todo el motor opera en forma parecida a uno síncrono de ca, en el que la frecuencia de la señal de ca se controla mediante la posición del eje y la velocidad, más que mediante el suministro de línea.

Esta analogía con los motores de ca va aún más allá por el hecho de que algunos motores de cd sin escobillas son en realidad motores síncronos de ca, excitados por un suministro de cd que se recorta en forma electrónica para producir una corriente alterna de frecuencia definida, este tipo de motor se utiliza cuando se desean velocidades de salida constantes y no se trata del motor de cd sin escobillas, de velocidad variable y realmente controlable que se considera aquí.

Sin duda los diseñadores de motores sin escobillas prefieren más el dispositivo de conmutación de efecto Hall ya que se exhiben casi las mismas características externas que uno convencional de cd de tamaño comparable y compensan su costo más alto por el hecho de ser absolutamente confiables y libres de interferencia de radiofrecuencia y riesgos de explosión. (Figura 3-14)



**Figura 3-14. Motor de cd sin escobillas, conmutado por transistores gobernados mediante generadores Hall. (Siemens America, Inc.)**

### 3.5 Ejemplo de aplicación.

La mejor forma de plasmar la importancia de un motor eléctrico, es observando una aplicación de manera directa. En este caso y por experiencia propia, tuve la oportunidad de tener ese contacto directo con motores eléctricos de corriente directa usados específicamente para montacargas eléctricos.

Esta experiencia se dio a partir de que laboré en una empresa dedicada principalmente al arrendamiento de montacargas eléctricos y de combustión interna, de nombre *Global Equipment, S.A. de C.V.* Una de mis responsabilidades era la de mantener en optimas condiciones los montacargas eléctricos que se encontraban en servicio dentro de la operación en distintas empresas.

Estos montacargas eléctricos son usados principalmente en lugares de almacenamiento, como bodegas, naves industriales, centros de distribución, centros comerciales, donde se requiere que no haya emisión de contaminantes, más que en lugares donde hay un proceso de fabricación, (aunque no están exentos). Y por supuesto un factor muy importante dentro de todo esto, son los motores eléctricos que mueven este tipo de equipos.

Una de las marcas que manejé durante mi estancia, fue un montacargas, el cual es mejor conocido en el ámbito de la industria del manejo de carga como *pasillo angosto* (por su construcción) de la marca *BT PRIME MOVER®*, empresa Estadounidense del estado Iowa, y el modelo más completo y funcional de toda su gama, es el RDX30, el cual está representado de forma esquemática en la figura 3-15.

Describiendo su funcionamiento de forma general se puede decir que es un equipo que trabaja con  $36V_{cd}$  con una capacidad de levantar hasta 1 360Kg. a una altura de poco más de 10m, claro que entre más grande es la altura disminuye esta capacidad de carga. Tiene un sistema de alcance o reach que permite extender o contraer la posición de la carga almacenada, que como se observa en la figura 3-15 esta distancia de extensión es de poco más de 1.30m, para almacenar y apilar a gran altura y sobre todo de forma profunda.

Se alimenta mediante una batería de plomo-ácido que pesa poco más de una tonelada, (peso ya contemplado al peso total del equipo), la cual se puede recargar con un cargador de  $220V_{ca}$  y así esta batería se puede utilizar muchas veces.

Además tiene la capacidad de girar sobre el mismo eje en  $360^\circ$  aún con carga, su velocidad de traslado es de 10.5km/h sin carga y de 9.7km/h con carga máxima, todo esto lo puede hacer con un peso total del equipo de 3040Kg. aproximadamente, más la carga que puede trasladar.

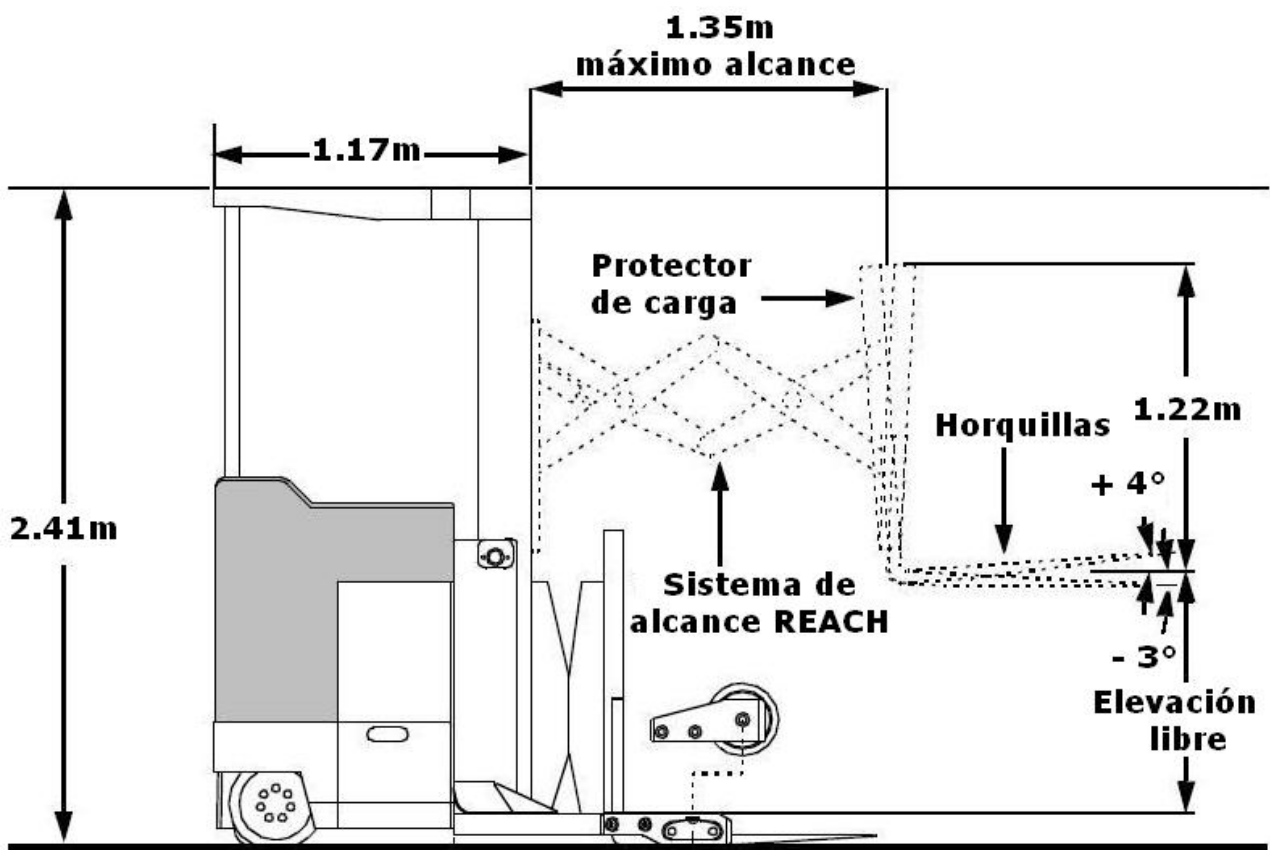


Figura 3-15. Esquema de un montacargas eléctrico. (BT PRIME MOVER)

Todas estas funciones las realiza basadas en tres motores de cd:

- a. **Motor de bomba.** Su función es la de dar la potencia junto con una bomba al sistema hidráulico, es de carcasa abierta protegido, con ventilador montado al eje, aislamiento tipo H, maneja ambos sentidos de giro, 13.1hp de potencia, 2 550rpm de velocidad, 320/570A de funcionamiento (descenso y elevación), con devanado de campo en serie compensado, su ciclo de trabajo es corto de 5min. aproximadamente con la corriente y voltajes nominales con un periodo de enfriamiento intermedio. (Figura 3-16)
- b. **Motor de tracción.** Su función es la de dar la propulsión al montacargas, va montado a la caja de transmisión, es de carcasa abierta protegido, es muy resistente, cuenta con un ventilador de enfriamiento, es de aislamiento H, maneja ambos sentidos de giro, devanado de campo en serie sencillo, 6hp de potencia, 1 960rpm de velocidad, 209A de corriente nominal, su ciclo de trabajo es de una hora continua con la corriente y voltajes nominales y cuenta con freno electromagnético. (Figura 3-17)
- c. **Motor de dirección.** Su función es darle dirección al sistema de propulsión o tracción del montacargas, maneja ambos sentidos de giro, su carcasa es totalmente cerrada, con devanado de campo compuesto y su ciclo de trabajo es continuo. (Figura 3-18)

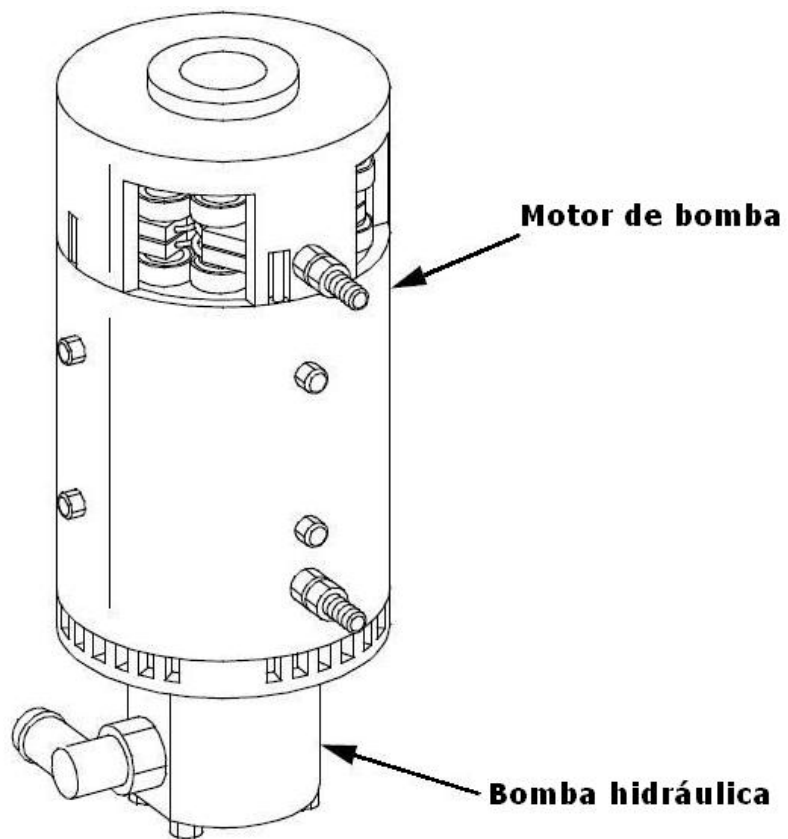


Figura 3-16. Motor impulsor del sistema hidráulico. (BT PRIME MOVER, Modelo RDX30)

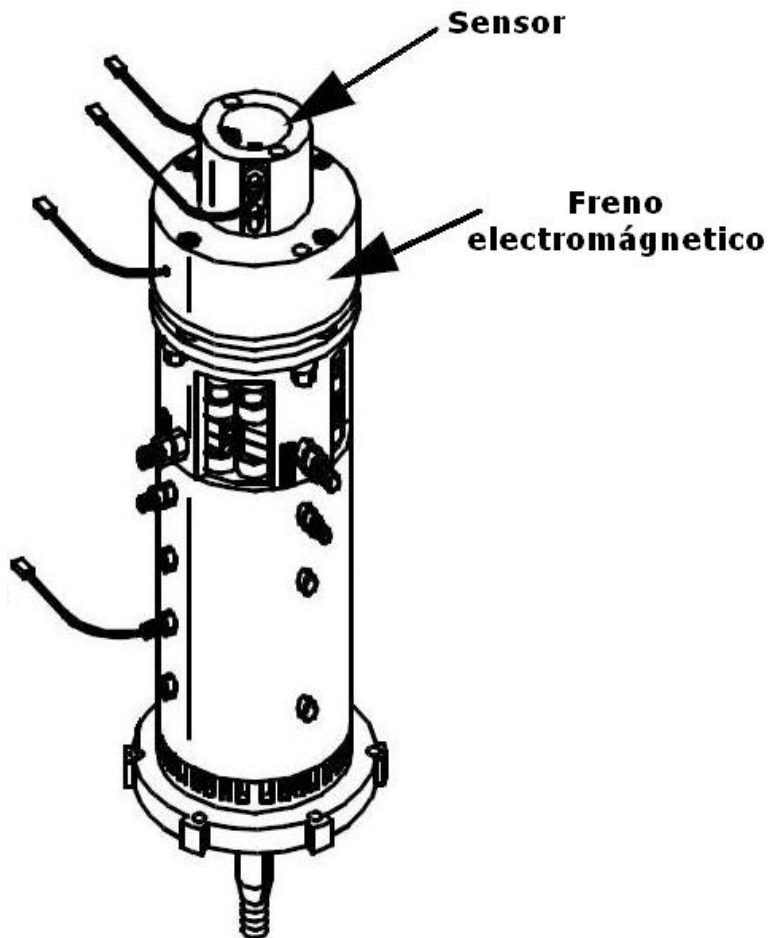


Figura 3-17. Motor de tracción. (BT PRIME MOVER, Modelo RDX30)



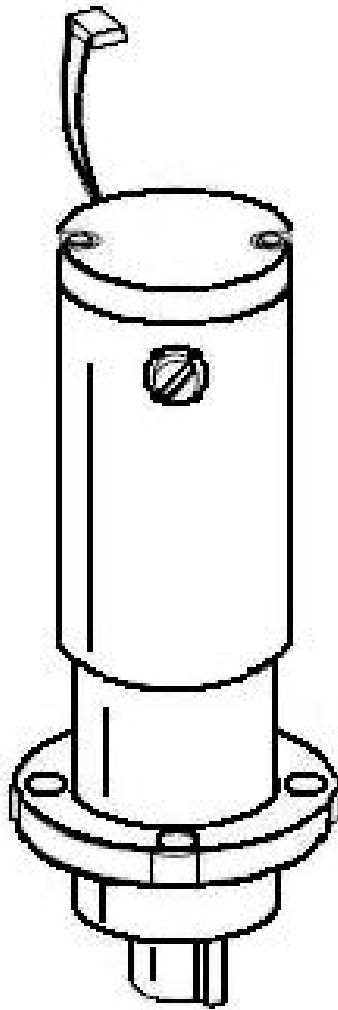


Figura 3-18. Motor de dirección. (BT PRIME MOVER, Modelo RDX30)



Foto 3-1. Posición de los motores de tracción y de dirección del Montacargas RDX30.

El control de estos motores es con 3 tarjetas lógicas, llamados panel de transistores, uno para el control hidráulico, otro para la tracción y el principal que controla prácticamente todas las funciones del montacargas, no sólo las de los motores eléctricos. Todo este control total se realiza mediante un panel, el cual cuenta con un display que muestra códigos de falla tanto de los motores como de algún otro dispositivo, horas de uso y nivel de batería. El operador controla todo esto mediante palancas y botones tipo joystick.



**Fotos 3-2 y 3-3. Montacargas RDX30. (BT PRIME MOVER)**

Finalmente se aclara que estos motores son fabricados especialmente para este tipo de montacargas por lo que no son de tamaños normalizados o estandarizados.

## Capítulo 4. Mantenimiento del motor de corriente directa.



## 4.1 Introducción.

En un motor de cd, la presencia en su estructura de puntos especialmente sensibles al desgaste, hacen que su mantenimiento, en algunos aspectos difiera del de otros tipos de motores. Algunos de los problemas específicos que afectan a este tipo de motor son, *la deformación del colector y el desgaste de las escobillas*, aunque no son los únicos, si son los que destacan su mantenimiento.

Cabe aclarar que esta fuera del alcance de este trabajo el exponer o proponer un programa de mantenimiento en específico para motores de corriente directa. Pero si presentar todas las características del mantenimiento de un motor de cd.

La tendencia actual de diseñar máquinas de bajo costo hace que los materiales utilizados trabajen más cerca de sus límites de resistencia mecánica y electromagnética, por lo cual cuando un motor trabaja en ambientes hostiles, la probabilidad de deterioro progresivo se ha incrementado.

En lo motores eléctricos puede haber fallas de tipo eléctrico, mecánico o una combinación de ambos, pudiendo ser debidos a factores *térmicos* como envejecimiento de los devanados por calentamiento excesivo, *químicos* como gases o líquidos corrosivos o de otra naturaleza. En general, la mayor parte de las fallas suelen estar relacionadas con el ambiente o ciclo de trabajo del motor y ocurren durante algún proceso transitorio, que es cuando los esfuerzos mecánicos y eléctricos a los que está sometido son mayores.

Las especificaciones de un motor eléctrico deben reflejar las condiciones mecánicas, eléctricas y ambientales en que trabajará, ya que estos aspectos tienen conexión directa con sus mecanismos de falla en servicio. Mecánicamente, los motores eléctricos pueden estar expuestos a periodos de marcha intermitente, arranques frecuentes y a ciclos de trabajo pesado, donde la carga varía frecuentemente entre plena carga y vacío con sobrecargas ocasionales. Esto puede provocar aflojamiento por envejecimiento y/o agrietamiento de los devanados, degradación del aislamiento por envejecimiento térmico, desgaste de los cojinetes etc. Del mismo modo, un motor que soporte una carga pulsante va a padecer un importante desgaste de sus cojinetes así como un nivel de vibración elevado.

Desde el punto de vista de la alimentación eléctrica, y en virtud de su situación en el sistema o su labor dentro del proceso industrial, un motor puede estar sujeto a una serie de transitorios en sus terminales de alimentación. Este tipo de situaciones puede causar importantes problemas, especialmente si el motor no tiene la suficiente capacidad para evacuar todo el calor producido por el desequilibrio de la alimentación. Transitorios más rápidos pueden sobrecargar el aislamiento debido al esfuerzo eléctrico no parece distribuido uniformemente a lo largo de todo el devanado.

De todos los transitorios el más severo que un motor experimenta se produce durante los arranques o reenganches de la alimentación, de modo que gran parte de las averías de un motor eléctrico se deben a que sufren repetidos arranques y trabajan durante cortos espacios de tiempo. Esto causa sobrecargas térmicas y mecánicas, aflojamiento de los devanados, movimiento de las conexiones eléctricas y esfuerzos en las cajas de terminales.

Ambientalmente hay problemas térmicos y de contaminación. Un motor eléctrico puede trabajar demasiado caliente debido a problemas de refrigeración, condiciones ambientales o, simplemente debido a que está trabajando por encima de sus condiciones de diseño. Aunque, un motor eléctrico debe ser diseñado para soportar las perturbaciones eléctricas, mecánicas y ambientales que va a encontrar durante su vida.

El objetivo principal del mantenimiento de un motor eléctrico, es el apoyo al proceso productivo, mediante la generación de condiciones de disponibilidad y fiabilidad óptimas, su relegación o su minimización, separado de la producción y de la toma de decisiones, repercute directamente en los beneficios y por lo tanto, su forma óptima de aplicación corresponde a una integración completa y eficaz con las demás áreas de la producción.

## 4.2 Clasificaciones del mantenimiento y tipos de fallas.

### Clasificaciones del mantenimiento.

Según su forma de ejecución y sus características particulares se pueden encontrar diferentes formas de aplicación del mantenimiento (no sólo de motores eléctricos); se puede, por lo tanto, efectuar diferentes tipos de clasificaciones atendiendo a distintos criterios:

#### Según las características de la actividad

- a. **Mantenimiento directo.** Realizado físicamente sobre el sistema afectado.
- b. **Mantenimiento indirecto.** Actividades tales como fabricación de repuestos, preparación de herramientas, etc.

#### Según el propósito

- a. **Mantenimiento correctivo.** Actividades encaminadas a devolver el sistema a su estado normal cuando la avería ya se ha producido.
- b. **Mantenimiento preventivo.** Actividades destinadas a impedir el estado de avería.

#### Según el método empleado

- a. **Mantenimiento planificado.** Con programación de actividades.
- b. **Mantenimiento sin planificación.** En función de las contingencias ocurridas.
- c. **Mantenimiento según estado.** Control de la fiabilidad y estado del sistema bajo mantenimiento

### Tipos de fallas.

Existe un gran número de fallas capaces de reducir el rendimiento de los equipos y procesos industriales. Todas ellas se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios; *según su naturaleza física (mecánicas, eléctricas, hidráulicas, etc.) según su gravedad, según la parte del proceso o del equipo al que afectan, etc.* En cualquier caso, lo fundamental es disponer de la máxima cantidad de información posible acerca de su origen, evolución y posibles causas, ya que todo método de diagnóstico se va a basar en dicha información. De forma muy general se pueden definir una serie de influencias en la ocurrencia de fallas, comunes a la práctica totalidad de las fallas.

## **Influencias intrínsecas**

- a. Errores de proyecto.
- b. Fiabilidad de los datos empleados para el diseño.
- c. Errores de fabricación.
- d. Errores de montaje, ajustes, tolerancias, etc.
- e. Esfuerzos residuales.
- f. Fallas en el control de calidad.

## **Influencias aleatorias**

- a. Condiciones ambientales.
- b. Utilización inadecuada o mala especificación
- c. Mantenimiento inadecuado.
- d. Control del proceso ineficaz.
- e. Ciclos de carga.

## **Desgaste y envejecimiento**

- a. Régimen de funcionamiento.
- b. Régimen de mantenimiento.
- c. Régimen térmico.
- d. Condiciones de tribología.
- e. Propiedad de los materiales.
- f. Medio de trabajo.

### **4.3 Mantenimiento preventivo del motor de corriente directa.**

Esta forma de mantenimiento surge debido a la necesidad de remediar los inconvenientes del mantenimiento correctivo. A diferencia del anterior, la sustitución de las piezas que pudieran causar fallas se realiza con una cierta periodicidad, determinada mediante criterios estadísticos. Así la sustitución de un determinado elemento puede realizarse después de cierto tiempo preprogramado o al producirse una falla, si ésta ocurre antes.

Debido a que toda falla tiene carácter aleatorio, es bastante improbable que las labores de mantenimiento preventivo realicen la sustitución de los elementos justo antes de que ésta se produzca, causando de este modo un evidente desaprovechamiento de la reserva de uso de los equipos. En cualquier caso es evidente que, para la planificación de actividades de mantenimiento preventivo, es necesaria una correcta aplicación de criterios estadísticos para determinar los tiempos óptimos de intervención, ya que si éstos no son los adecuados, podrían generarse importantes pérdidas.

El mantenimiento preventivo habitualmente comprende una serie de actividades características:

- a.** Limpieza y revisiones periódicas.
- b.** Conservación de equipos y protección contra los agentes ambientales.
- c.** Control de la lubricación.
- d.** Reparación y recambio de los puntos de la máquina identificados como puntos débiles.
- e.** Reparación y recambios planificados.

La principal ventaja del mantenimiento preventivo frente a las técnicas estrictamente correctivas estriba en una importante reducción de las paradas eventuales, obtenida al introducir una cierta periodicidad en la observación y reparación del sistema.

Las desventajas de esta forma de mantenimiento derivan de la dificultad de la esencia del concepto mismo, que es estimar de forma correcta los tiempos necesarios para realizar las intervenciones; si se interrumpe el funcionamiento normal de una máquina y se altera su vida útil de forma innecesaria, su reserva de uso será totalmente desaprovechada, además de producir una acumulación inútil de actividades preventivas que aumentan el gasto y reducen la disponibilidad. Por otro lado, si la programación preventiva se retrasa con respecto a la falla, el mantenimiento correctivo sustituye al preventivo con lo que vuelven a aparecer los inconvenientes citados anteriormente.



En esencia en un mantenimiento preventivo de un motor de cd, se debe inspeccionar periódicamente los niveles de aislamiento, lubricación de los rodamientos, el estado de los cojinetes, niveles de vibración, desgaste de las escobillas, conmutador y condiciones de los portaescobillas.

La carcasa debe ser mantenida limpia, sin acumulo de aceite o polvo en su parte externa para facilitar el intercambio de calor con el medio. La frecuencia con que se deben hacer las inspecciones depende del tipo de motor y de las condiciones locales de aplicación. Prácticamente los parámetros de tolerancia y ajuste de piezas, dependen del fabricante y por supuesto del tamaño del motor, aún así a continuación y a manera de ejemplo se presentan puntos importantes para evitar fallas, extraídos del manual de instalación y mantenimiento del fabricante *WEG Industrias S.A.*<sup>®</sup> y del manual de instalación y operación del fabricante *Baldor Electric Motors*<sup>®</sup> con la intención de tener una idea práctica y específica del mantenimiento de un motor de corriente directa.

### **Limpieza y resistencia del aislamiento.**

La máquina debe ser mantenida libre de polvo, suciedad y aceite por medio de una limpieza periódica. Mucha atención debe ser dada a la limpieza de los soportes de los portaescobillas y de los terminales, que pueden quedar cubiertos de polvo. Se deben retirar las escobillas y limpiarlas, para asegurar de que se muevan libremente en el alojamiento. Suciedad y polvo sobre la bobina pueden ser retirados con un cepillo duro (no metálico) y el aceite puede ser retirado con un solvente adecuado. En el caso de intercambiadores de calor aire/agua, es necesaria una limpieza periódica de los tubos del radiador a fin de que retire cualquier incrustación. El conmutador debe ser conservado libre de suciedades, aceites, etc. La resistencia de aislamiento debe ser verificada regularmente para monitorear los bobinados.

### **Portaescobillas.**

Los alojamientos deben permitir el libre movimiento de las escobillas, pero holguras excesivas provocan temblores y consecuentes chispazos. La presión de los resortes deberá variar entre 0 y 250g/cm<sup>2</sup>, salvo casos especiales. La distancia entre los portaescobillas y la superficie del conmutador deberá ser aproximadamente 2mm, para evitar quiebra de las escobillas y daños al conmutador. (Figura 4-1)

Los conjuntos de los portaescobillas son ajustados en la fábrica en la posición más favorable para la conmutación. Esta posición (zona neutra) es indicada por las marcas de referencia en soporte de los portaescobillas. Una vez estando ajustado el conjunto portaescobillas, no deberá ser cambiado de posición, pues sirve para cualquier valor de carga.

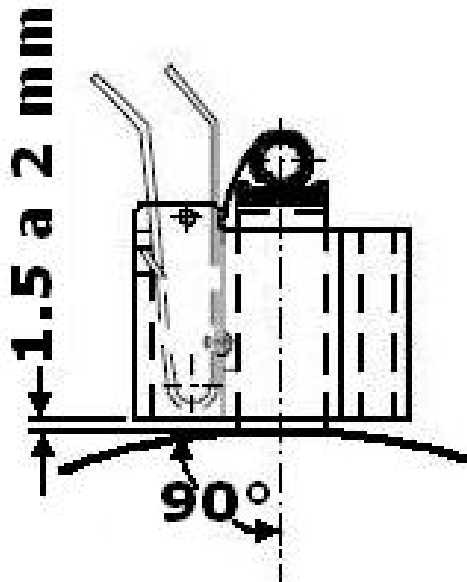


Figura 4-1. Tolerancia entre las escobillas y el conmutador.

### Ajuste de la zona neutra.

Cuando sea sustituido o reacondicionado el rotor, es probable que la posición del portaescobillas tenga que ser modificado. Para ajustar las escobillas en la posición neutra (calado de las escobillas) proceder de la siguiente manera:

#### Ajuste grueso.

- a. Aflojar los tornillos que prenden el anillo del portaescobillas.
- b. Energizar la armadura (50 a 80% de la corriente nominal lo máximo por 30 segundos), el campo permanece desconectado. Para limitar la corriente, usar una tensión baja, por ejemplo, de batería.
- c. Si la zona neutra estuviera desajustada, el rotor tendrá que girar. Para el ajuste de la posición neutra, girar el anillo de los portaescobillas en el sentido contrario al sentido de giro del motor.
- d. La zona neutra estará ajustada, cuando el rotor quedar parado.

#### Ajuste delicado.

- a. Después de ajustada la zona neutra (ajuste grueso), conectar el motor con tensión nominal (si es posible corriente nominal).
- b. Verificar los dos sentidos de rotación, la diferencia no podrá ser mayor que 1%.
- c. Caso la diferencia sea mayor que 1%, observar en que sentido la rotación está mayor. Para disminuir la rotación, girar el anillo de los portaescobillas en el mismo sentido de giro del rotor.
- d. Para aumentar la rotación, en un determinado sentido, girar el anillo de los portaescobillas en el sentido contrario de giro del rotor.

## Verificación de la conmutación.

Una conmutación bien efectuada es definida como la calidad de conmutación que no resulta en perjuicios al conmutador y las escobillas, lo que perjudicaría el buen funcionamiento del motor. La ausencia total de chispazos visibles no significa esencialmente una conmutación bien efectuada. Para verificación de la conmutación se debe aplicar carga al motor y observar el chispazo buscando determinar si éste es normal o no.

En caso de chispazo anormal a partir del nivel 1  $\frac{3}{4}$  (Figura 4-2), se debe determinar la causa o causas y eliminarlas. Las chispas resultantes de una conmutación insatisfactoria pueden tener causas mecánicas, como vibraciones en la máquina, deformación en el conmutador, presión inadecuada de las escobillas, etc.



Figura 4-2. Niveles de chispazos en la conmutación.

Causas eléctricas como mal contacto entre escobillas y conmutador, problemas en el bobinado de los polos de conmutación o en la armadura, picos de corriente, entrehierro desajustado, etc., y aspectos físico químicos, como excesiva humedad del aire y la existencia de vapores o gases corrosivos en el ambiente o la deposición de aceite o polvo sobre el conmutador.

## **Escobillas.**

Todos los fabricantes de motores eléctricos en sus recomendaciones de uso, hacen hincapié en el uso de refacciones y productos genuinos o en su defecto autorizado y recomendado por ellos, y por supuesto las escobillas no son la excepción, ya que a cada tipo de máquina es destinada previamente una calidad de escobilla. La selección del tipo y cantidad de escobilla es hecha en función de las características de cada máquina tales como la velocidad, la tensión, la corriente etc.

Las escobillas deberán ser constantemente observadas durante el funcionamiento; observar principalmente los siguientes puntos:

- a.** Asegurarse de que todas las escobillas sean de la misma calidad.
- b.** Asegurarse de que las escobillas tengan los cordajes de la misma longitud. Ni cortas ni largas demás, para permitir un libre deslizamiento.
- c.** Verificar si ocurren libres movimientos en los portaescobillas y si no existe algún material incrustado en la superficie interna de éste, que perjudique el movimiento de las escobillas.
- d.** Asentar las escobillas con una lija colocada entre la superficie del conmutador y las escobillas, con el lado abrasivo colocado para la superficie de contacto de la escobilla.
- e.** Para controlar el desgaste de las escobillas, observar la marca en relieve en la fase lateral (axial). La mínima altura que la escobilla debe tener para no ocurrir daños al conmutador es aquella en que la marca de desgaste todavía es visible. (Figura 4-3)
- f.** Al sustituir escobillas, cambiar siempre el juego completo.
- g.** Al sustituir escobillas gastadas por otras de la misma granulación, no debe ser retirada la pátina (Especie de barniz duro, de color aceitunado y reluciente) existente en el conmutador si tuviera aspecto normal.
- h.** Al sustituir escobillas por otras de calidad distinta, obligatoriamente se debe retirar la pátina existente en el conmutador, con uso de una lija fina.

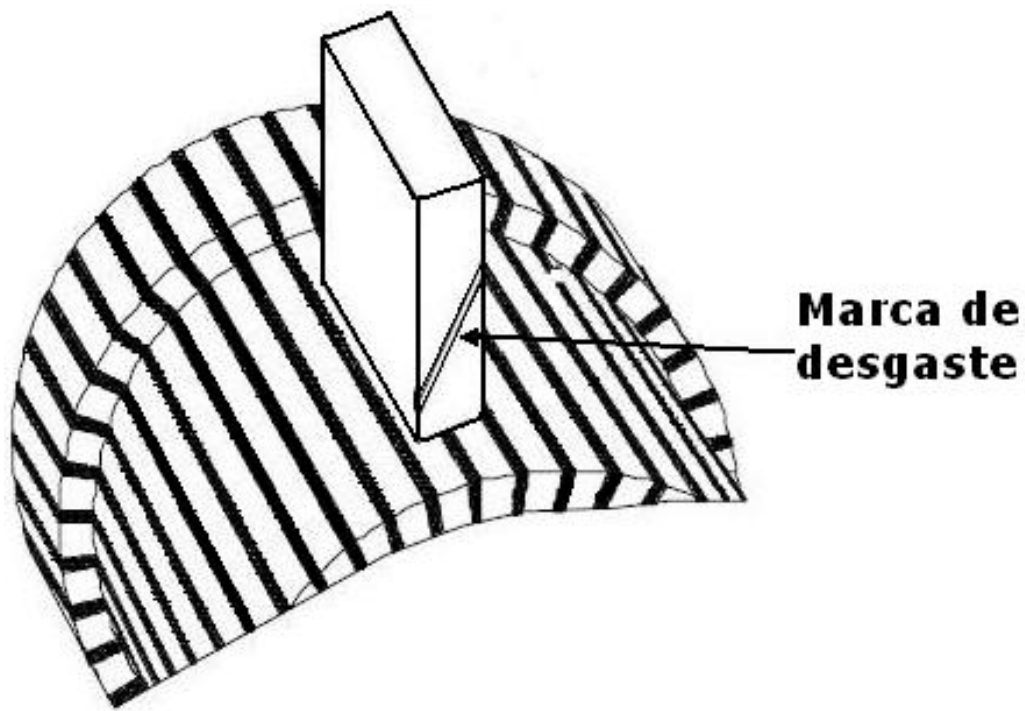


Figura 4-3. Representación de las dimensiones de las escobillas.

## Rodamientos.

La finalidad del mantenimiento en este caso es prolongar lo máximo posible la vida útil de los cojinetes. El mantenimiento abarca:

- a. Observación general del estado de los cojinetes.
- b. Lubricación y limpieza.
- c. Examen cuidadoso de los rodamientos.

El control de temperatura en los cojinetes también hace parte del mantenimiento de rutina. La temperatura puede ser controlada a través de termómetros o detectores de temperatura embutidos. El recalentamiento no deberá ultrapasar los 60°C (medido en el anillo externo del rodamiento). Los rodamientos deberán ser lubricados para evitar el contacto metálico entre los cuerpos rodantes y también para proteger los mismos contra la corrosión y desgaste. Las propiedades de los lubricantes disminuyen en virtud del envejecimiento y del trabajo, siendo que los lubricantes sufren contaminación en servicio, razón por la cual deberá haber la relubricación periódica.

## **Cantidad de grasa.**

Es importante que se haga una lubricación correcta, esto es, aplicar la grasa correcta en la cantidad adecuada, pues tanto una lubricación deficiente como una lubricación en excesiva traen efectos perjudiciales.

La lubricación en exceso provoca la elevación de la temperatura, debido a la gran resistencia que ofrece al movimiento de las partes rotativas, y principalmente al batido de la grasa, que acaba por perder completamente sus características de lubricación.

Esto puede provocar vaciamiento, con penetración de grasa para el interior y deposición sobre las bobinas, conmutador y escobillas. El ruido en los cojinetes deberá ser checado a intervalos que podrán variar de 1 a 4 meses. Un oído bien entrenado es capaz de distinguir ruidos anormales, un zumbido uniforme es señal de que el rodamiento está trabajando en perfectas condiciones.

Es aconsejable hacer la relubricación durante el funcionamiento del motor, para permitir la renovación de la grasa en el alojamiento del rodamiento. Si esto no es posible debido a la presencia de piezas giratorias cerca de la engrasadora (poleas, etc.) que puedan poner en riesgo la integridad física del operador, se procede de la siguiente manera:

- a.** Se inyecta aproximadamente la mitad de la cantidad total estimada de grasa y se pone el motor a girar durante aproximadamente 1 minuto en plena rotación.
- b.** Se para el motor y se inyecta el resto de la grasa.

La inyección de toda la grasa con el motor parado puede llevar a la penetración de parte del lubricante en el interior del motor, lo que puede perjudicar seriamente la conmutación pudiendo provocar paradas prolongadas de la máquina.

Es importante mantener las graseras limpias antes de la introducción de la grasa para evitar la entrada de materiales extraños en el rodamiento. Para esto, use exclusivamente pistola engrasadora manual.

## **Equipo para pruebas de mantenimiento correctivo.**

El equipo para pruebas de mantenimiento puede variar de casi nada hasta un exceso que rara vez se utiliza. Por lo que la siguiente lista es por cada categoría de pruebas y a su vez el citado en primera instancia es el más necesario; los siguientes son según las necesidades o deseos del usuario.

### **Pruebas de temperatura.**

Como las especificaciones del equipo eléctrico se expresan en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ), todos los termómetros deben tener esa escala para no tener que convertir. Las temperaturas nominales varían desde  $40^{\circ}\text{C}$  (ambiente estándar) hasta  $180^{\circ}\text{C}$  y las temperaturas que se midan es probable que varíen entre 20 y  $200^{\circ}\text{C}$ .

- a. Termómetro.** Los termómetros de vidrio son de precio razonable y suficiente exactitud. Están disponibles con ojillo para amarrarlos. No es aconsejable utilizar un termómetro con caja de acero en el equipo eléctrico. El bulbo se sujeta en la parte que va que se va a probar con mastique o un plástico similar. Se deja el termómetro en su lugar hasta que se obtiene una lectura constante en un periodo de 5 min.
- b. Pirómetro de contacto.** Este instrumento consta de un termopar y un voltímetro. El termopar genera un voltaje proporcional a la temperatura y el voltímetro está calibrado en grados de temperatura. La lectura se puede tomar en menos de un minuto. Se pueden obtener con conductores de diferentes longitudes.
- c. Detector de temperatura por resistencia (RTD).** Estos instrumentos suelen tener aislamiento para altos voltajes y consisten en un elemento resistivo. La resistencia varía de acuerdo con la temperatura y se utiliza en un circuito de puente. El brazo de equilibrio del puente está calibrado en grados. Con el empleo de conmutadores adecuados, se pueden probar cierto número de circuitos en secuencia.
- d. Equipo registrador.** En ocasiones, se necesita una gráfica registrada durante cierto tiempo cuando hay temperaturas variables. El instrumento consta de un mecanismo registrador en combinación con los instrumentos mencionados anteriormente.

## **Mediciones de voltaje.**

Dado que para muchos motores el voltaje correcto de funcionamiento es crítico, en todos los departamentos de mantenimiento preventivo deben saber cómo medir el voltaje.

- a. **Voltóhmetro portátil.** Estos instrumentos pueden tener una exactitud de 2% y su capacidad es desde unos milivolts hasta 600V de cd o ca. Algunos de ellos pueden tenerla capacidad para lecturas hasta de 6 000V, pero sólo se deben emplear en circuitos electrónicos, no en circuitos de potencia.
- b. **Voltímetro registrador.** En ocasiones, se necesita un registro de las fluctuaciones de voltaje en un periodo de tiempo.

## **Mediciones de corriente.**

- a. **Amperímetro portátil de gancho.** Estos instrumentos están disponibles para muchas capacidades diferentes de corriente. Este amperímetro no se debe emplear en circuitos con voltaje mayor que la capacidad de aislamiento del gancho. Se pueden lograr exactitudes del 2 al 5%.
- b. **Transformador de corriente (CT).** Se emplea cuando se requiere mayor exactitud y en donde hay altos voltajes. El primario se conecta en serie con el circuito que se mide y el secundario se conecta a un amperímetro la relación aparece en la placa de identificación. El circuito secundario suele tener 5A cuando circula la corriente de plena carga en el primario. La caja o el núcleo del transformador y un conductor del secundario se deben conectar a tierra.
- c. **Amperímetro registrador.** Este instrumento puede ser necesario si se quiere una gráfica en que aparezcan todas las lecturas.

## **Megaóhmetros (meggers).**

Es indispensable algún tipo de megger en un departamento de mantenimiento preventivo.

- a. **Portátil, con pilas.**
- b. **Megger manual con manivela para cd.**
- c. **Megger motorizado para cd.**
- d. **Megger para alto voltaje de cd (voltaje variable).**

Los voltajes pueden variar desde 50 o menos hasta más de 15 000V y las lecturas del megger pueden variar entre 25 y 10 000 megaohms. Su precio varía de acuerdo con la capacidad de voltaje, escalas de megaohms y la exactitud.



## **Mediciones de resistencia.**

Las escalas, exactitud y voltajes y los precios varían mucho.

- a. Voltómetros portátiles.**
- b. Puente de Kelvin para resistencia sumamente elevada.**
- c. Puente de Wheatstone para resistencia sumamente elevada.**
- d. Megaóhmetro (megger) para lecturas muy altas.**

Los puentes de Kelvin y de Wheatstone se consideran como instrumentos de laboratorio y necesitan mucho cuidado para su manejo y empleo.

## **Mediciones de vibraciones.**

Estas mediciones suelen ser necesarias a menudo, pues sentir las al tacto no es muy preciso.

- a. Instrumentos mecánicos.** Son sensibles para frecuencias bajas. Pero quizá no sigan las frecuencias altas.
- b. Instrumentos electrónicos.** Son muy exactos y seguirán las frecuencias altas.

## **Indicador de velocidad.**

Es un instrumento muy útil e imprescindible.

- a. Contador de revoluciones.** Este instrumento es del tipo con engranes para contar las revoluciones. Se debe emplear junto con un reloj y señalará las revoluciones por periodo de tiempo.
- b. Tacómetro con generador.** Este instrumento consta de un generador y un voltímetro. El voltaje del generador es proporcional a la velocidad y el voltímetro está calibrado en revoluciones por minuto. Estos instrumentos son ideales para mediciones remotas y se pueden calibrar para conductores de cualquier longitud.
- c. Estroboscopio.** Es un instrumento calibrado en que se emplea una lámpara que enciende en forma intermitente. Se emplea para que los componentes rotatorios o con vibración que parezcan estar inmóviles. Es de gran exactitud, salvo que se necesita conocer la velocidad básica. Si lo emplea una persona sin experiencia, pueden ocurrir errores del 100%.

## **Analizador de potencia.**

El empleo de un instrumento complejo como lo es un watímetro monofásico tiene que ser con mucha precaución, ya que son muy frágiles y pueden perder su exactitud con movimientos bruscos o empleo incorrecto.

#### 4.4 Mantenimiento correctivo del motor de corriente directa.

El mantenimiento correctivo es el modelo de mantenimiento, más común en la pequeña y mediana empresa. Se basa en la intervención en el caso de falla, manifestada como el colapso de un equipo o instalación, es decir, la interrupción súbita de la producción. Dentro del mantenimiento correctivo se pueden distinguir dos variedades:

- a. Mantenimiento correctivo con eliminación de la falla.** En este caso el mantenimiento consiste en la reparación de emergencia, efectuando la sustitución de los elementos averiados. Normalmente se realiza bajo fuertes presiones tratando de evitar caídas en la producción.
- b. Mantenimiento correctivo con eliminación de causas.** Este tipo de mantenimiento no sólo consiste en la sustitución de los elementos defectuosos sino en la eliminación de la causa que originó la falla. Por este motivo proporciona soluciones más duraderas, así como un incremento de la disponibilidad y fiabilidad a largo plazo. Obviamente, la participación de técnicos en este caso es más necesaria y el tiempo de intervención se incrementa, por este motivo suele realizarse en las paradas programadas.

Las ventajas del mantenimiento correctivo son:

- a.** Máximo aprovechamiento de la reserva de uso de los equipos. (se conoce como tal a su tiempo de vida útil remanente)
- b.** No se requiere una elevada capacidad de análisis ni infraestructura técnica o administrativa.

Los inconvenientes del mantenimiento correctivo son:

- a.** Interrupciones impredecibles de la producción que pueden provocar daños y averías en cadena de proporciones desconocidas.
- b.** Reducción de la vida útil de equipos e instalaciones.
- c.** Baja seguridad en la producción.
- d.** Necesidad de un *stock* de repuestos de dimensiones considerables.
- e.** Riesgo de fallo de elementos de difícil adquisición con el consecuente tiempo de espera.
- f.** Baja calidad del mantenimiento como consecuencia del poco tiempo disponible para realizar las reparaciones.

Por lo anterior, no es difícil deducir que el mantenimiento correctivo es de aplicación en aquellos casos en los que el costo total de las paradas causadas por actividades correctivas sea menor que el costo total por acciones preventivas. Esta situación sólo se da en el caso de pequeñas empresas y en general, en sistemas industriales secundarios, cuya eventual parada no afecta substancialmente a la producción.

Retomando el asunto de que el mayor problema de los motores de cd se presenta en el conmutador, es por eso, que el buen estado del conmutador es fundamental para el perfecto comportamiento del motor de cd. Por eso es importante una observación periódica del mismo.

El conmutador debe ser conservado libre de la presencia de aceite y grasa y los surcos entre las láminas deben ser mantenidos limpios. En condiciones normales de operación, la pátina que se forma sobre el conmutador presentará una coloración marrón oscura o ligeramente negra. Si la superficie está brillante, lustrosa o áspera, es probable que el tipo de escobillas deba ser cambiado. Por otro lado, una camada de coloración negra y espesa, que generalmente ocurre en sobrecargas prolongadas presencia de humedad, indica una deposición excesiva del material sobre el conmutador. En estos casos esta camada debe ser retirada por medio de piedra pómez (artificial) o lija fina (n° 220).

El desgaste en el conmutador es medido en la posición de la pista de las escobillas en relación a la superficie no utilizada. Siempre que esta diferencia sea superior a 0.1mm, el conmutador deberá ser reacondicionado.

Si la diferencia en altura entre láminas cualesquiera adyacentes sea mayor que 0.005mm, el conmutador deberá ser reparado. La ovalización del conmutador no deberá ultrapasar a 0.1mm. El reacondicionamiento del conmutador consiste básicamente en un torneado fino, lijado, esmerilado manual o rectificado y el posterior rebajamiento de las láminas de mica.

El rebajamiento de mica debe ser tal que la profundidad P de la ranura entre láminas quede entre 0.7 y 1.2mm. Esta operación debe ser ejecutada con el máximo cuidado, debiéndose usar una fresa cilíndrica o una lámina plana. Los rebordes que se forman deben ser eliminados manteniendo los chaflanes en los bordes de las láminas de acuerdo a la figura 4-4.

Es importante que ningún resto de mica permanezca en las paredes de la ranura. El mejor medio es usar una lente de aumento. Apenas el lado vivo de las aristas de las laminillas debe ser quebrado, por lo tanto hay retirar una cantidad mínima de cobre.

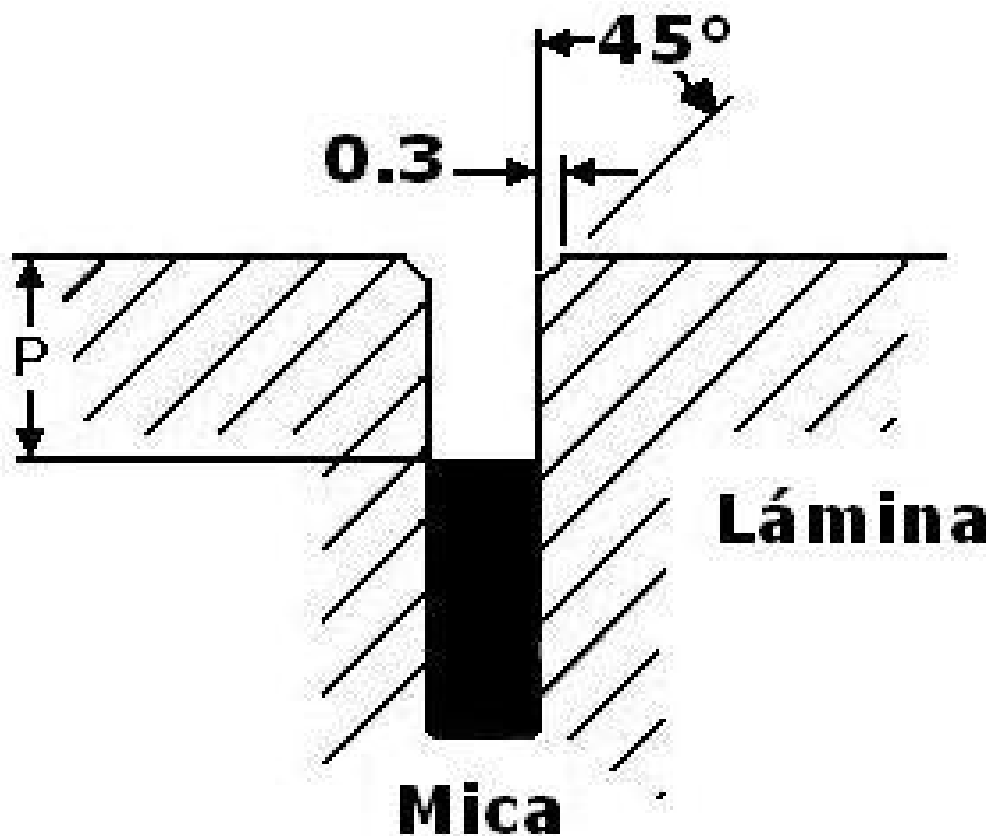
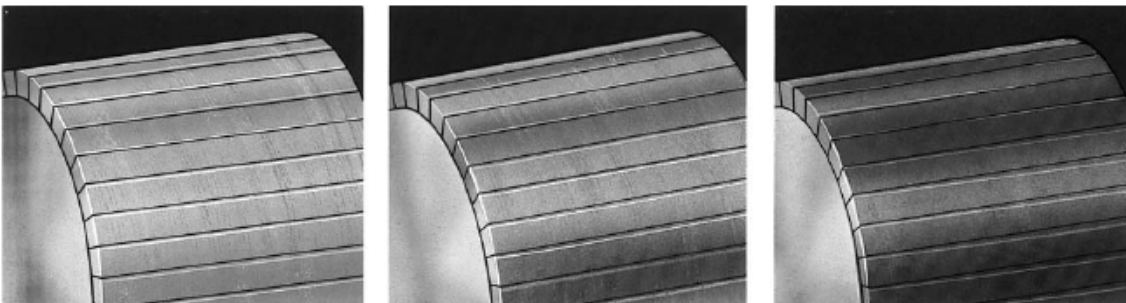


Figura 4-4. Rebajado de mica.

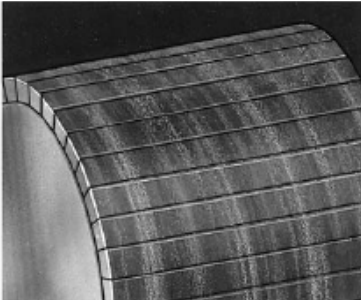
#### Guía del aspecto del colector.



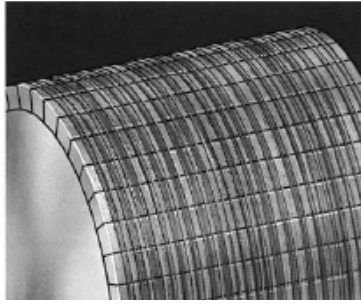
**Película Liviana:** Indica un buen funcionamiento de la escobilla. Las cargas livianas, la baja humedad, las calidades de escobillas con baja tasa de peliculización o la contaminación reductora de película pueden resultar en un color más claro.

**Película Mediana:** Es la condición ideal del colector para una máxima vida útil de las escobillas y del colector.

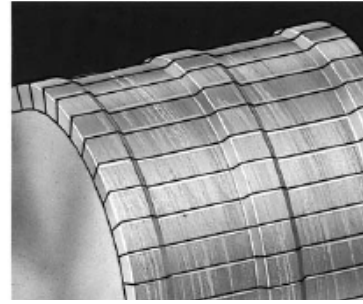
**Película Pesada:** Resulta de cargas altas, alta humedad o calidades de escobillas con alta tasa de peliculización. Los colores que no sean de tono marrón indican contaminación, que produce alta fricción y alta resistencia.



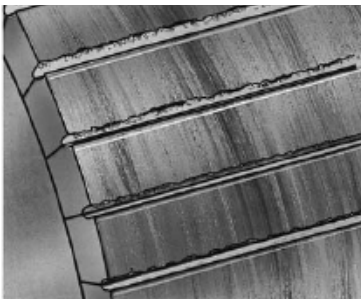
**Veteado:** Resulta de la transferencia de metal a la cara de la escobilla. Las cargas livianas y/o la presión ligera del muelle son las causas más comunes. La contaminación puede también ser un factor que contribuye a esta condición.



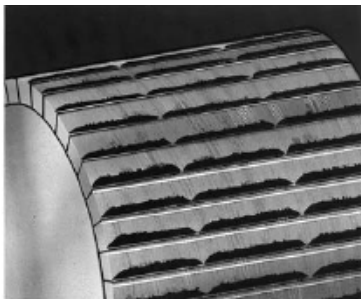
**Fileteado:** Es una complicación del veteado, ya que el metal transferido se endurece y se va labrando en la superficie del colector. Esta condición puede evitarse con mayores cargas y aumento de la presión del muelle.



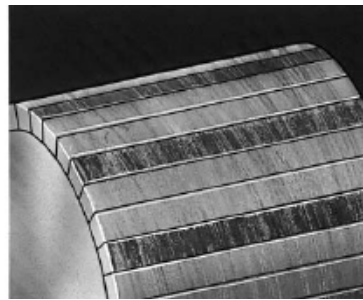
**Estriado:** Puede resultar de una calidad demasiado abrasiva de las escobillas. La causa más común es el mal contacto eléctrico que resulta en arcos y en el labrado eléctrico de la superficie del colector. El aumento de la presión del muelle reduce este desgaste eléctrico.



**Arrastre del Cobre:** Se produce debido al recalentamiento y el ablandamiento de la superficie del colector. La vibración o la calidad abrasiva de las escobillas hacen que el cobre sea arrastrado sobre las ranuras. El aumento de la presión del muelle reducirá la temperatura del colector.



**Quemadura del Borde de las Delgas:** Resulta de la mala conmutación. Verifique si la calidad de la escobilla tiene caída de tensión adecuada, si las escobillas están bien puestas en neutro y si la fuerza de interpolo (polo auxiliar o de conmutación) es la correcta.



**Marcadura en Barras de las Ranuras:** Resulta de una falla en los devanados del inducido. La configuración está relacionada con el número de conductores por ranura.

Finalmente, el diagnóstico eficaz de fallas es un método y enfoque analítico de las reparaciones y mantenimiento del motor. La experiencia es muy valiosa, pero no sustituye a un método lógico combinado con conocimientos básicos de electricidad y de diseño de motores. Con ayuda de la tabla 4-1 se podrá localizar con facilidad la zona del problema.

<b>FALLA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>CORRECCIÓN</b>
<b>El motor no arranca</b>	<i>Circuito abierto en el control</i>	Pruebe si hay resistor de arranque abierto, interruptor abierto o fusible fundido en el control
	<i>Bajo voltaje en las terminales</i>	Compruebe que el voltaje sea el nominal de la placa
	<i>Chumacera o cojinete pegados</i>	Reacondicione el eje y reemplace el cojinete
	<i>Sobrecarga</i>	Reduzca la carga o utilice un motor más grande
	<i>Fricción excesiva</i>	Compruebe lubricación de las chumaceras para determinar que se ha cambiado el aceite original después de instalar el motor. Desconecte el motor de la máquina impulsada y hágalo girar con la mano para determinar si la falla está en el motor. Desarme el motor; examine la colocación y ajuste correctos pieza por pieza; arme el motor
<b>El motor se para después de un tiempo corto</b>	<i>El motor no recibe corriente</i>	Pruebe voltaje en las terminales del motor, broches y relevador de sobrecarga
<b>El motor trata de arrancar pero actúan los relevadores de sobrecarga</b>	<i>Se arranca el motor con campo débil o sin campo</i>	Si es motor de velocidad ajustable, compruebe graduación del reóstato. Si está correcta pruebe el reóstato. Pruebe si las bobinas de campos están abiertas. Pruebe si el alambrado tiene conexiones flojas o rotas
	<i>El par del motor es insuficiente para impulsar la carga</i>	Pruebe que el voltaje sea el nominal de la placa; emplee un motor más grande o uno que tenga características de acuerdo a la carga.
<b>El motor funciona con mucha lentitud con carga</b>	<i>Voltaje de línea muy abajo</i>	Busque y elimine cualquier resistencia excesiva en la línea, conexiones o control
	<i>Escobillas adelantadas del neutro</i>	Ajuste escobillas al neutro
	<i>Sobrecarga</i>	Compruebe que la carga no exceda de la permisible para el motor
<b>El motor funciona con mucha velocidad con carga</b>	<i>Campo débil</i>	Pruebe si hay resistencia en los circuitos del campo en derivación. Compruebe si está aterrizado
	<i>Voltaje de línea</i>	Corrija la condición de alto voltaje
	<i>Escobillas retrasadas del neutro</i>	Ajuste escobillas al neutro

<b>Continuación</b>		
<b>FALLA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>CORRECCIÓN</b>
<b>Escobillas: Chisporroteo en las escobillas</b>	<i>Conmutador en malas condiciones</i>	Limpie y ajuste escobillas
	<i>Conmutador excéntrico o áspero</i>	Esmerile y rectifique conmutador, recorte la mica
	<i>Vibración excesiva</i>	Balancee la armadura. Compruebe que las escobillas se muevan libres en los portaescobillas
	<i>Resorte de portaescobillas roto o débil</i>	Reemplace el resorte y ajuste presión a la recomendada por el fabricante
	<i>Escobillas muy cortas</i>	Reemplace escobillas
	<i>Motor sobrecargado</i>	Reduzca la carga o utilice un motor más grande
	<i>Cortocircuito en la armadura</i>	Examine conmutador y elimine partículas de metal entre los segmentos. Busque si hay corto entre conductores adyacentes en el conmutador. Pruebe si hay cortos internos en la armadura y repárela
<b>Traqueteo o siseo en las escobillas</b>	<i>Holgura excesiva en los portaescobillas</i>	Ajuste portaescobillas
	<i>Angulo incorrecto</i>	Ajuste al ángulo correcto
	<i>Escobillas incorrectas para el servicio</i>	Consulte con el fabricante
	<i>Mica alta</i>	Corte la mica
	<i>Presión incorrecta del resorte de escobillas</i>	Ajuste al valor correcto
<b>El motor no alcanza toda su velocidad</b>	<i>Carga excesiva</i>	Reduzca la carga. Pruebe funcionamiento del reductor de carga (si lo hay) en la máquina impulsada
	<i>Bajo voltaje</i>	Aumente el voltaje
	<i>Campo excitado</i>	Compruebe que el contactor de aplicación de campo está abierto y el contactor de descarga de campo esté cerrado a través de la resistencia de descarga
<b>Conmutación deficiente</b>	<i>Presión insuficiente del resorte de escobillas</i>	Ajuste a la presión correcta; compruebe que las escobillas se muevan libres en los portaescobillas
<b>Una escobilla recibe más carga de la normal</b>	<i>Circuitos desequilibrados en la armadura</i>	Elimine alta resistencia en las uniones deficientes con la inserción del circuito de armadura o compensador o conductores del conmutador. Vea si hay mal contacto entre la barra colectora y sus anillos

<b>Continuación</b>		
<b>FALLA</b>	<b>CAUSA</b>	<b>CORRECCIÓN</b>
<b>Chisporroteo excesivo</b>	<i>Mal ajuste de las escobillas en el conmutador</i>	Asiente escobillas con lijas y pula la superficie del conmutador
	<i>Escobillas trabadas en el portaescobillas</i>	Desmunte portaescobillas y escobillas y límpielas con disolvente no tóxico: Elimine irregularidades en las superficies de los portaescobillas o puntos ásperos en las escobillas
	<i>Presión insuficiente o excesiva en las escobillas</i>	Compruebe y ajuste el brazo para la presión correcta, que varía según el tipo de motor
	<i>Escobillas fuera del neutro</i>	Ajuste escobillas al neutro
<b>Chisporroteo con cargas ligeras</b>	<i>Pintura, productos químicos, aceite o grasa u otros cuerpos extraños en el conmutador</i>	Utilice un motor diseñado para la aplicación. Limpie conmutador y protéjalo contra cuerpos extraños. Instale un motor totalmente cerrado diseñado para la aplicación
<b>Bobinas de campo sobrecalentadas</b>	<i>Cortocircuito entre vueltas o capas</i>	Reemplace bobina deficiente
<b>Conmutador sobrecalentado</b>	<i>Escobillas fuera del neutro o sobrecarga</i>	Ajuste las escobillas
	<i>Presión excesiva del resorte de escobillas</i>	Reduzca presión del resorte, pero no al grado de que haya chisporroteo en las escobillas
<b>Ranuración del conmutador</b>	<i>Escobillas mal distribuidas</i>	Distribuya las escobillas
<b>Desgaste rápido de escobillas</b>	<i>Conmutador áspero</i>	Rectifique conmutador y corte mica
	<i>Chisporroteo excesivo</i>	Compruebe que las escobillas estén alineadas con campos de conmutación
<b>Armadura sobrecalentada</b>	<i>Motor sobrecargado</i>	Reduzca la carga al valor permisible
	<i>Motor instalado en un local con poca ventilación</i>	Provea libre circulación de aire alrededor del motor
	<i>Devanados de armadura en corto</i>	Examine conmutador y elimine partículas de metal entre los segmentos. Pruebe si hay cortos internos en la armadura y repárela

**Tabla 4-1. Tabla de diagnostico de fallas.**



## **Conclusiones.**

La mayor dificultad y a la vez gran virtud, que tuve durante la realización de este trabajo fue la escasez de información técnica existente sobre motores de corriente directa, ya que todas las fuentes de información (salvo casos específicos) prácticamente basan su contenido en los motores de corriente alterna, y en cierta forma esto es un indicador suficiente para decir que los motores de corriente directa no son el pilar de la industria, pero como quedó demostrado aquí, no dejan ser parte de ella.

Espero que este trabajo sea de utilidad, tal vez no es el más completo, pero queda como una buena referencia y buena ayuda cuando de motores de corriente directa se trate o simplemente sirva de base para iniciar otros trabajos en un futuro. Porque nunca se sabe, de pronto la tan mencionada electrónica de potencia en un futuro le da más aplicaciones al motor de corriente directa y le da otra posición dentro de los motores eléctricos, porque una cosa sí es segura, en la tecnología nada está escrito.

Finalmente, me deja satisfecho, el trabajo realizado, ya que a pesar de esta escasez de información técnica, de la dificultad en la búsqueda de la misma, logré reunir y clasificar la más importante, sobre todo la experiencia propia de haber tenido contacto directo con motores de cd, y el sólo hecho de meterse a fondo en el tema, creo eso vale todo el esfuerzo realizado en esta tesis.

## Bibliografía.

- Chapman Stephen J., "Máquinas Eléctricas" 4ta. edición, Mc Graw Hill, Nueva York 2005.
- Beaty H./Kirtley James Jr., "Manual del motor eléctrico" 2da. Edición, Mc Graw Hill, Nueva York 2000.
- Alcalde San Miguel, "Electrotecnia" 4ta. Edición, Paraninfo, España 2006.
- Varios autores, "Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas", marcombo y ABB Service, España 1998.
- Richardson Donald V. y Caisse Arthur J., "Máquinas eléctricas rotativas y transformadores", 4ta. edición, PRENTICE-HALL Hispanoamericana, México 1997.
- Smeaton Robert W., "Motor Application and Maintenance Handbook", 2da. Edición, Mc Graw Hill, USA 1987.
- Peragallo Torreira Raúl, "Manual básico de motores eléctricos", 3ra. Edición, Editorial Paraninfo, Madrid 1996.
- Roldán Villoria José, "Motores eléctricos aplicación industrial", 2da. Edición, Editorial Paraninfo, Madrid 1996.
- Veinott Cyril G., "Motores eléctricos de potencia fraccionaria y subfraccionaria", marcombo, Barcelona 1978.
- Serrano Iribarnegaray Luis, "Fundamentos de Máquinas Eléctricas Rotativas", marcombo, Barcelona 1989.
- [www.weg.net/mx](http://www.weg.net/mx)
- [www.baldor.com](http://www.baldor.com)
- [www.siemens.com](http://www.siemens.com)