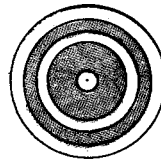
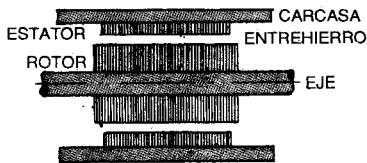


Capítulo 1

CARACTERISTICAS GENERALES

- 1.1 Generalidades
- 1.2 Clasificación de las máquinas eléctricas
- 1.3 Características comunes
- 1.4 El motor y el generador elementales
- 1.5 Materiales eléctricos conductores
- 1.6 Materiales eléctricos aislantes
- 1.7 Materiales magnéticos



CARACTERISTICAS GENERALES

1.1 GENERALIDADES

Frecuentemente en la industria se requiere convertir una forma de energía disponible en otra compatible con una aplicación determinada.

Existe una gran variedad de estos convertidores de energía, siendo los más comunes los motores eléctricos y los generadores eléctricos.

Otros tipos de convertidores de energía, como los electroimanes y los transformadores se estudian en el curso anterior.

Los motores y generadores eléctricos que se estudiará en el presente libro son máquinas electro-magnético-mecánicas de aplicación en la industria, en el campo, en el comercio y en el hogar, las cuales utilizan el campo magnético como medio de acoplamiento para la conversión de la energía eléctrica en mecánica y viceversa.

Un motor convierte energía eléctrica en energía mecánica, mientras que un generador convierte energía mecánica en energía eléctrica. En la figura 1.1 puede verse un esquema de ambas formas de conversión.

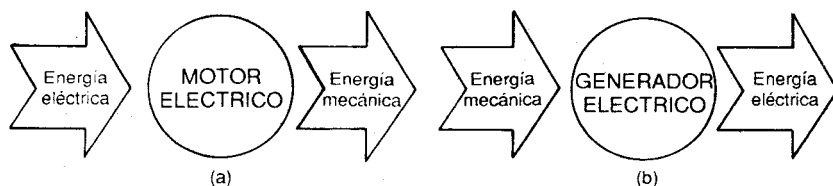


Figura 1.1 La conversión de energía (a) en un motor; (b) en un generador

La razón principal por la que el uso de las máquinas electromagnéticas se encuentra tan difundido se explica por la gran facilidad con que se puede almacenar la energía en un campo magnético durante la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa.

1.1.1. Máquinas eléctricas rotativas

Los generadores y motores eléctricos convencionales, llamados "máquinas eléctricas", convierten energía mediante un movimiento rotatorio.

Los motores eléctricos se construyen en tamaños desde una pequeña fracción de caballo de potencia, hasta miles de caballos de potencia.

En los generadores eléctricos actuales, son comunes valores nominales de cientos de miles de Kilowatts.

La sencillez en la construcción y la solidez del diseño, así como la naturaleza de los aparatos que se conectan (en el caso del generador, el motor primo y, en el caso del motor, la carga impulsada) exigen de un movimiento rotatorio para los generadores eléctricos y la mayoría de los motores.

Las cantidades enormes de potencia utilizada por la industria proviene usualmente de la potencia mecánica suministrada a los generadores eléctricos por medio de turbinas de vapor, de agua y, en algunos casos, por motores de combustión interna.

Debido a las grandes cantidades de energía envueltas en el proceso de conversión de energía, son extremadamente importantes la economía de la operación, así como la confiabilidad del equipo.

Las máquinas eléctricas rotativas consisten de un circuito magnético, uno o más circuitos eléctricos y soportes mecánicos, con, por lo menos, un embobinado. Véase, por ejemplo, la figura 1.2.

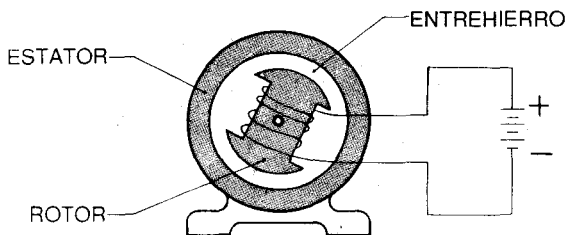


Fig. 1.2 Constitución de una máquina eléctrica rotativa.

Para un motor, tal embobinado se alimenta desde una fuente de energía eléctrica y, para un generador, tal embobinado (si hay solamente uno), es una fuente de energía eléctrica.

El circuito magnético contiene hierro interrumpido por un entrehierro entre el miembro estacionario o estator y el miembro rotativo o rotor, tal como se observa en la figura 1.2.

Los núcleos magnéticos sujetos a flujos magnéticos alternos o flujos que sufren rápidas variaciones en el tiempo son usualmente laminados (formados por placas paralelas) para asegurar bajas pérdidas por corrientes parásitas y respuestas rápidas. Véase la figura 1.3.

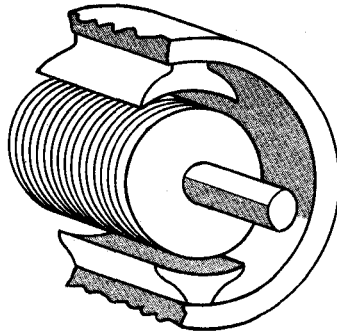


Fig. 1.3 Núcleo del rotor de una máquina eléctrica hecho de placas

Sin embargo, aparatos más pequeños, con circuitos magnéticos de configuraciones complejas, generalmente tienen estructuras laminadas para reducir los costos de fabricación, ya sea que la excitación sea de corriente continua o de alterna.

Los embobinados de las máquinas pequeñas se hacen con alambre redondo. En máquinas grandes, el material conductor tiene una sección transversal rectangular para un empaquete más compacto en el espacio ocupado por el embobinado.

El material conductor más común es el cobre. El aluminio tiene un uso limitado.

Las máquinas rotativas se estudiarán mayormente en su estado estable, es decir, funcionando en condiciones permanentes.

1.1.2 Usos de las máquinas eléctricas rotativas

Toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada y distribuida en la forma de corriente alterna, y sólo una pequeña fracción de aquella se utiliza en la forma de corriente continua actualmente en nuestro medio.

Aunque los motores de corriente continua se adaptan mejor para procesos industriales que demandan altos grados de flexibilidad en el control de velocidad y torque de lo que están los motores de corriente alterna convencionales que operan de fuentes de frecuencia constante, su uso en nuestro medio ha decaído bastante.

Se les usa sobre todo en buques y aviones comerciales y de combate y en aplicaciones industriales específicas (laminadoras, por ejemplo).

En la industria nacional, la máquina que mueve las fábricas y los talleres es el motor de corriente alterna que con fuentes de frecuencia variable viene superando definitivamente a los motores de corriente continua.

1.1.3 Los campos magnéticos

Las máquinas rotativas presentan dos campos magnéticos, el del estator, y

el del rotor. Uno de ambos es el campo principal, es decir, aquél sin el cual la máquina eléctrica no puede funcionar de ninguna manera como tal (ni con carga, ni sin ella); a este campo se le suele llamar también **inductor** y el circuito eléctrico que lo origina se denomina de excitación o de campo.

El otro campo, que se origina en la otra estructura, se denomina **inducido**; al circuito eléctrico que lo produce se le suele llamar **armadura**. Este campo aparece cuando la máquina trabaja con carga. En vacío, este campo es prácticamente nulo.

1.2 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS

Las máquinas eléctricas se clasifican, en general, como **máquinas estáticas** (reactores y transformadores, por ejemplo) y **máquinas móviles** o de movimiento mecánico **lineal** (electroimanes de armadura) y de movimiento **rotativo** (motores y generadores).

A su vez, las máquinas **rotativas** pueden ser de dos tipos: las hay de **corriente continua** (porque toda la potencia eléctrica intercambiada con la red exterior es de corriente continua) y de **corriente alterna** (porque la mayor parte o toda la potencia eléctrica intercambiada con la red exterior es de corriente alterna).

1.2.1 Máquinas de corriente continua

Las máquinas de corriente continua convencionales presentan siempre la misma configuración, es decir, las estructuras del estator y del rotor tienen en todas la misma forma, tal como puede verse en la figura 1.4. El estator es de polos salientes y el rotor es cilíndrico.

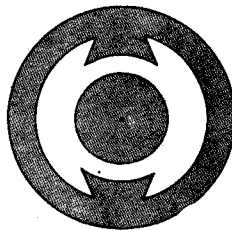


Fig. 1.4 Configuración de una máquina de corriente continua.

Asimismo, el campo inductor es originado en el estator, mientras que el inducido, en el rotor.

Por el bobinado del estator circula corriente continua de valor constante.

Por el bobinado mismo del rotor circulan corrientes alternas, aunque cuan-

do este bobinado se pone en contacto con la red exterior de continua un dispositivo, el colector, convierte dicha corriente alterna en continua.

Como ejemplo de estas máquinas se tiene los antiguos generadores de automóviles, llamados también dinamos y los siempre aplicables motores eléctricos para el arranque de los vehículos automotores, llamados también arrancadores. Los pequeños motores de juguete son también un buen ejemplo de este tipo de máquinas.

1.2.2. Máquinas de corriente alterna

Las máquinas de corriente alterna convencionales son un poco más difíciles de clasificar por cuanto, si bien la configuración de la estructura del estator es la misma en todos los tipos, es decir, se trata de una estructura cilíndrica, sin excepciones, sin embargo, en lo que respecta a los rotores, se advierte algunas diferencias, tal como puede verse en la figura 1.5.

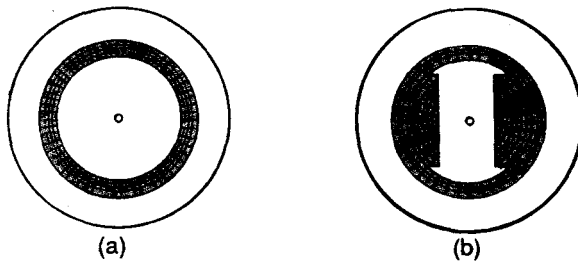


Fig. 1.5 Tipos de rotores de máquinas de corriente alterna: (a) cilíndrico (b) de polos salientes.

Existen máquinas de corriente alterna con rotor cilíndrico, figura 1.5 (a), que son la mayoría, y las máquinas con rotor de polos salientes, figura 1.5 (b).

Por otro lado, la ubicación de los bobinados inductor e inducido difiere de unas máquinas a otras y hasta puede ocurrir que se utilice corriente continua para alimentar uno de los bobinados. De allí que las máquinas de corriente alterna, a su vez, tengan una clasificación más. Estas pueden ser **síncronas** o **asíncronas**.

1.2.2.1 Máquinas síncronas

Estas son máquinas de corriente alterna cuya característica esencial de funcionamiento es que su velocidad es constante, es decir, que permanece invariable con la carga; como dicha velocidad se denomina velocidad de sincronismo, estas máquinas adquirieron ese nombre.

El estator de estas máquinas es cilíndrico y la corriente que circula por el bobinado del estator es corriente alterna, usualmente trifásica.

El rotor, en cambio, puede ser cilíndrico o de polos salientes, tal como se observó al principio, ver la figura 1.5 nuevamente, pero la corriente que circula por el bobinado del rotor es corriente continua.

El campo inductor es originado por la corriente continua del rotor.

El campo del inducido o armadura es originado por las corrientes alternas del estator.

La corriente continua del bobinado del rotor proviene, en principio, de una fuente exterior de corriente continua (así era en los generadores antiguos; en los generadores modernos, proviene de un generador auxiliar de corriente alterna cuya tensión es rectificada por medio de un dispositivo rectificador de diodos, montado en el mismo eje de la máquina principal).

En los generadores antiguos, para poder introducir la corriente continua en el rotor se utilizaba un sistema de anillos deslizantes más escobillas, tal como se ve en la figura 1.6 (a).

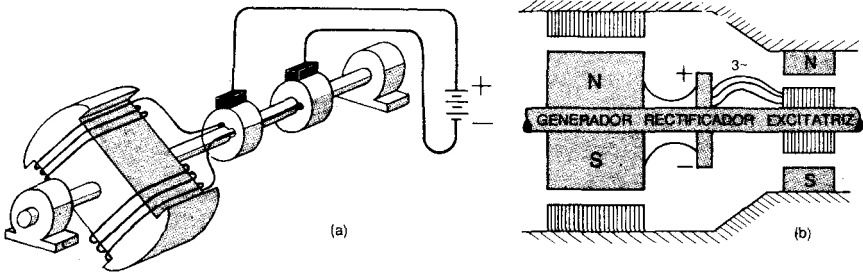


Fig. 1.6 Forma de alimentar el bobinado del rotor de una máquina síncrona: (a) antigua, (b) moderna.

Estas máquinas, en la actualidad, se usan sobretodo como generadores en las centrales eléctricas, hidráulicas y térmicas, en los pequeños grupos electrógenos, pudiéndose de alguna forma incluir en esta clasificación a los alternadores de los vehículos automotores.

Su aplicación como motor en nuestro medio no está difundida.

1.2.2.2 Máquinas asíncronas

Estas también son máquinas de corriente alterna, pero que se diferencian de las máquinas síncronas porque su velocidad no es la misma en vacío que con carga, sino que conforme se aumenta la carga, la velocidad disminuye algo, siendo la máxima cuando trabaja en vacío.

En vacío, la velocidad del motor es cercana a la denominada velocidad de sincronismo.

En estas máquinas, tanto el estator como el rotor son estructuras magnéticas cilíndricas y por ambas estructuras circulan corrientes alternas.

El campo inductor es originado por las corrientes que circulan por el bobinado del estator, mientras que el inducido, por las del rotor.

Si bien el rotor es cilíndrico, existen dos tipos de bobinados de rotor, uno formado por barras longitudinales cortocircuitadas en sus extremos y que por su forma recibe el nombre de **rotor de jaula de ardilla**, ver figura 1.7 (a), y otro, formado por bobinas realizadas de idéntica forma que en el estator y que por su forma el rotor se denomina **rotor bobinado**, ver figura 1.7 (b):

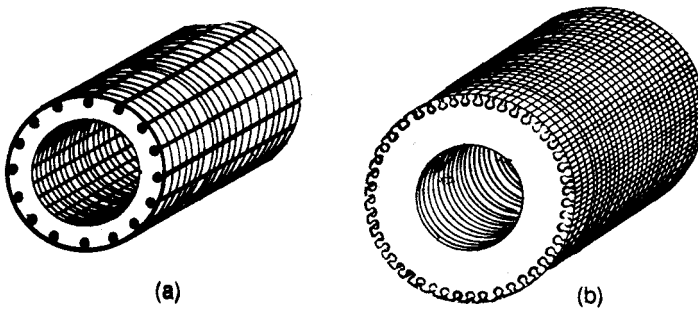


Fig. 1.7 Formas de rotores de máquinas asíncronas:
(a) rotor de jaula de ardilla, (b) rotor bobinado.

El uso más difundido de esta máquina es como motor y en nuestro medio se usa más, y también se construye, los motores con rotor de jaula de ardilla.

Los motores de rotor bobinado son muy caros y no se construyen en el país.


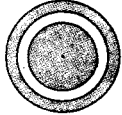



En la Tabla 1.1 se muestra un resumen de la clasificación de las máquinas eléctricas convencionales que serán materia del presente libro.

Realmente, éstos son los únicos tipos de máquinas eléctricas rotativas convencionales de importancia que existen.

Nótese que esta clasificación general es independiente de que la máquina trabaje como motor o como generador. Las máquinas eléctricas rotativas se caracterizan por tener un comportamiento reversible, es decir, que la misma máquina se puede hacer funcionar como motor o también como generador.

Las máquinas que no están incluidas en esta clasificación son máquinas de pequeña potencia o son máquinas de laboratorio o son máquinas especiales

Tabla 1.1 Clasificación general de las máquinas eléctricas rotativas convencionales

Clases de Máquina	Tipo de máquina	Configuración del rotor	Esquema	Ubicación (corriente) Inductor (...) Inducido (...)
cc				estator (cc) rotor (ca)
	Observaciones. – Uso del colector: conmutador más escobillas.			
ca	Síncronas	Rotor cilíndrico		rotor (cc) estator (ca)
		Polos salientes		
	Observaciones. – Uso de anillos deslizantes más escobillas.			
	Asíncronas	Jaula de ardilla		estator (ca) rotor (ca)
Rotor bobinado				
Observaciones. – El motor de rotor bobinado usa anillos rozantes más escobillas.				

cuya aplicación no está difundida y que, por lo tanto, no conviene incluirlas para evitar una complicación innecesaria en el mencionado esquema.

1.3 CARACTERÍSTICAS COMUNES

Todas las máquinas eléctricas tienen características que les son comunes desde el punto de vista geométrico y de funcionamiento.

Desde el punto de vista geométrico, se puede decir que toda máquina eléctrica rotativa está constituida por:

- a) una carcasa o cubierta exterior;
- b) una estructura magnética fija cilíndrica o estator;
- c) una estructura magnética móvil cilíndrica o rotor;
- d) un entrehierro o espacio de aire que separa el estator del rotor para que este último pueda girar;
- e) un bobinado estatórico; y
- f) un bobinado rotórico.

Desde el punto de vista del funcionamiento, se puede decir que en todas las máquinas eléctricas rotativas:

- a) existe un campo magnético inductor;
- b) existe un campo magnético inducido;
- c) interactúan en el entrehierro los campos magnéticos inductor e inducido;
- d) se convierte energía mecánica en eléctrica y viceversa;
- e) la conversión de energía utiliza el campo magnético como medio de acoplamiento;
- f) es posible un comportamiento reversible como motor o como generador (principio de reciprocidad de Lenz); y
- g) se regulan automáticamente (es decir, por sí mismas) ante las variaciones de la carga dentro de un amplio rango.

También puede agregarse las siguientes características comunes:

- a) los núcleos de ambas estructuras magnéticas son de material ferromagnético;
- b) los conductores de los bobinados son de cobre; y
- c) el entrehierro es de aire.

En la figura 1.8 puede verse el esquema común de las máquinas eléctricas rotativas.

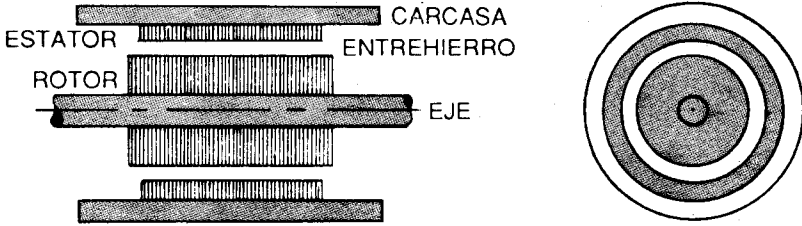


Fig 1.8 Geometría común a todas las máquinas eléctricas rotativas.

1.4 EL MOTOR Y EL GENERADOR ELEMENTALES

En los cursos de Física se estudia el principio físico de un motor y un generador eléctricos partiendo de un modelo muy sencillo, es decir, un campo magnético inductor \mathbf{B} formado por dos polos N y S y un conductor metálico de longitud l entre los polos, tal como se ve en la figura 1.9.

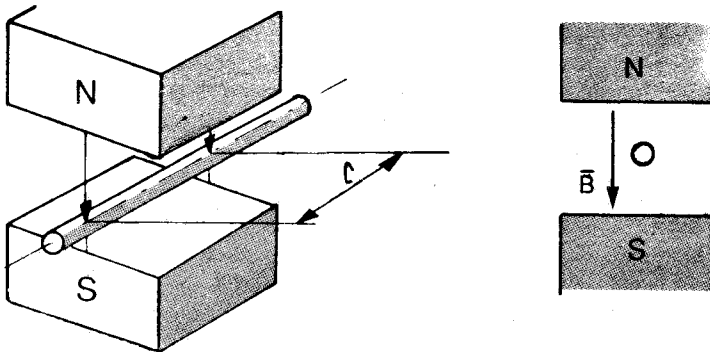


Fig. 1.9 Componentes del modelo elemental de una máquina eléctrica.

Para una mejor comprensión de los fenómenos se recurre a dos leyes fundamentales, la ley de Faraday o ley del flujo cortante, cuya forma vectorial es útil en este caso:

$$\vec{E} = \int_{\text{longitud}} \vec{v} \times \vec{B}$$

donde E es la f.e.m. inducida en los bornes del conductor cuando éste se desplaza transversalmente al campo \mathbf{B} con una velocidad \mathbf{v} . Véase la figura 1.10 y obsérvese que la f.e.m. apunta hacia adentro.

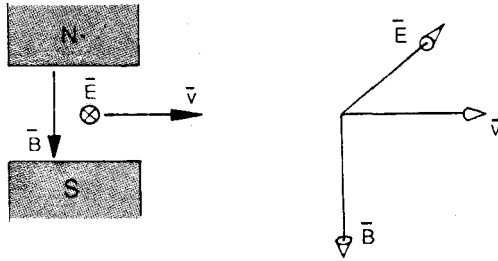


Fig. 1.10 Generador eléctrico elemental

Esta ley expresa claramente el principio de funcionamiento de un generador eléctrico con los terminales abiertos o desconectados, es decir, suponiendo que no pasa corriente por el conductor.

La otra ley o ley de la fuerza F sobre un conductor, se expresa también matemáticamente de la forma siguiente:

$$\vec{F} = l \vec{I} \times \vec{B}$$

donde I es la corriente eléctrica (supongamos continua por ahora) que circula por el conductor quieto cuando éste es alimentado por una fuente de energía eléctrica y se encuentra entre los polos del campo. Véase la figura 1.11. Se observa que la fuerza apunta hacia la izquierda tratando de llevarse al conductor en ese sentido.

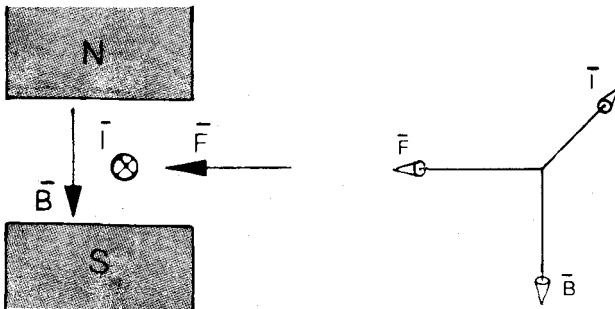


Fig. 1.11 El motor eléctrico elemental.

Esta ley expresa claramente el principio de funcionamiento de un motor eléctrico.

Volviendo al modelo del generador elemental, figura 1.10, ciérrse ahora el circuito del conductor por medio de una carga que consuma una corriente I cuando se le aplica la f.e.m. E , tal como se ve en la figura 1.12.

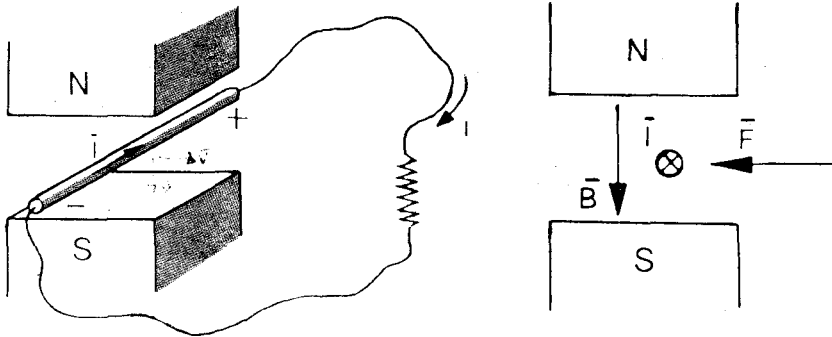


Fig 1.12 El generador elemental con carga.

Aplicando la ley de la fuerza resulta que el paso de la corriente I por el conductor produce la aparición de una fuerza electromagnética de sentido contrario al movimiento que tiende a detener el conductor; a esta fuerza se le llama fuerza antagonista.

Para que el conductor pueda mantener su movimiento es necesario que un motor primo suministre una fuerza que equilibre a dicha fuerza F .

Ahora bien, en el modelo del motor elemental, figura 1.11, se puede apreciar que el movimiento del conductor hacia la izquierda con una velocidad v inducirá en los bornes del conductor una f.e.m. E cuya polaridad se opone al sentido de la corriente I que pasa por el conductor, tal como se observa en la figura 1.13.

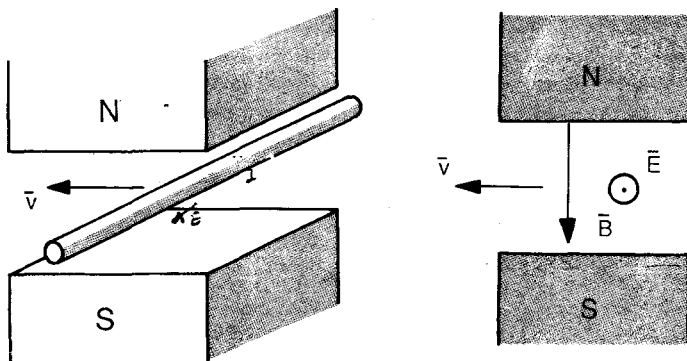


Fig. 1.13 El motor elemental con carga.

Por el carácter de dicha E se denomina usualmente fuerza contraelectromotriz f.c.e.m.

1.5 MATERIALES ELECTRICOS CONDUCTORES

En la construcción de máquinas eléctricas se emplean con fines conductores casi exclusivamente dos materiales: el cobre y el aluminio, especialmente el cobre por ser entre los materiales industriales el de más alta conductividad.

La plata, todavía más conductora queda excluida a causa de su precio.

El aluminio, cuya resistividad es 61% superior a la del cobre, se emplea a veces en ciertas bobinas polares de máquinas rotativas, para aprovechar las ventajas de su menor peso, y sobretodo, fundido, a presión, en los rotores de los motores pequeños de jaula de ardilla (devanados de aluminio inyectados) donde, además de ofrecer un sistema de construcción sólido y económico, que el cobre no admite por su dificultad de colada, proporciona más seguridad durante los períodos transitorios de sobrecarga (en los arranques, por ejemplo), teniendo en cuenta la capacidad térmica y la ausencia de soldadura.

El cobre se usa mayormente en estado de recocido y en forma de hilo o de barra. Si el hilo o barra no está muy bien recocido, las dificultades para formar y montar las bobinas aumentan bastante, pues el material se endurece muy de prisa con la manipulación y plegados sucesivos.

El cobre duro sólo se emplea en las máquinas para ciertas conexiones sometidas a esfuerzos mecánicos, y como delgas o segmentos de colector o en las jaulas de los motores asíncronos.

El hierro laminado o fundido se usa mucho en reóstatos de arranque.

El carbono y sus derivados, grafito, electrografito, constituyen materiales de contacto y para escobillas.

1.6 MATERIALES ELECTRICOS AISLANTES

Las máquinas eléctricas necesitan aislamientos para su construcción.

Aislamiento es la unión o combinación modelada (conformada constructivamente de aislantes diversos o distintos) de distintos aislantes, que se complementan en sus propiedades.

Aislamiento es la suma de las propiedades eléctricas que se obtienen con este aislante, incluso en condiciones anormales de servicio.

Los materiales aislantes deben tener buenas propiedades mecánicas, pero sobretodo, eléctricas y térmicas.

La capacidad de carga y las sobretemperaturas admisibles dependen mucho del aislante o combinación de aislantes utilizados.

Se utiliza una diversidad de materiales aislantes en los aislamientos de las máquinas eléctricas.

En la construcción de motores y generadores se utilizan, por ejemplo, la madera aislante, la madera prensada con resina sintética y papel aislante como aislamiento poco solicitado eléctricamente.

El presspán (papel húmedo prensado) se usa en máquinas de calidad normal, en las ranuras por su buen plegado.

Las virutas aglomeradas se usan como revestimientos de ranuras con altas solicitaciones. También se usa la mica.

Los aislamientos para altas solicitaciones térmicas se hacen a base de tejidos de fibra de vidrio.

Las cintas aislantes autoadhesivas se usan en el aislamiento de bobinas.

1.7 MATERIALES MAGNETICOS

Los materiales magnéticos forman una parte indispensable de las máquinas eléctricas rotativas. Se les conoce con el nombre de materiales ferromagnéticos.

Los materiales ferromagnéticos que más se utilizan en la construcción de máquinas eléctricas son el acero al silicio de diferentes calidades, el acero fundido, el hierro colado, el acero en chapas y forjado, aleaciones de acero especiales (para los imanes permanentes), etc.

Para el circuito magnético, las propiedades más importantes de estos materiales son la curva de magnetización y las pérdidas en función de la inducción y la frecuencia. A veces, también se requiere buenas propiedades mecánicas.

El acero al silicio es de reciente aplicación a las máquinas rotativas.

El hierro colado se emplea en las carcasas de las máquinas de corriente continua y en los rotores de las máquinas síncronas, en las que durante el funcionamiento de la máquina el flujo no varía.

La fundición de acero tiene las mismas aplicaciones que el hierro colado.

El acero en chapas se usa en las carcasas soldadas de las máquinas síncronas de alta velocidad.

Para la fabricación de imanes permanentes para las máquinas magnetoelectricas se emplean aleaciones de acero especiales que poseen después de la magnetización una gran remanencia y una gran fuerza coercitiva.