



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y PROYECTO DE
CONSTRUCCIÓN DE UN MOTOR
TRIFÁSICO DE DOS ARMADURAS

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA: ELÉCTRICO ELECTRÓNICO)
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
(AREA: ELECTRICA)
PRESENTAN:
JOSÉ LUIS REYES CRUZ
ISAAC VELÁZQUEZ FLORES



DIRECTOR DE TESIS:

ING. JUAN MANUEL ROJAS GOMEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA 2007



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.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Por estar siempre cuidándome y apoyándome cuando más lo he necesitado en el transcurso de mi vida.

A MI ESPOSA

A ti Martha que siempre has estado a mi lado en las buenas y en las malas por ser una persona tan especial en mi vida, gracias por tus consejos, por tu ayuda, y por ser como eres.

“TE AMO GRACIAS POR ESTAR CONMIGO”.

A MIS HIJOS

Martha Oliva, José Eduardo por haberme dado sus tiempos que le correspondían dentro del ámbito familiar, que esto sea una motivación, con el deseo que continúen luchando sin darse nunca por vencidos.

A TODAS AQUELLAS

Personas que ya no se encuentran conmigo: mi tía Teodora Avalos, mi tío Luis Reyes y a todas aquellas quienes ya no pudieron ser testigos de mis logros.

Le agradezco infinitamente al Ing. Juan Manuel Rojas Gómez por sus consejos, aportaciones y paciencia en la elaboración de este trabajo, gracias por su apoyo y por sus enseñanzas, así como del tiempo que le dedico a la revisión de este trabajo en virtud de la mejoría de este.

“MUCHAS GRACIAS”

A la Facultad de Ingeniería y a todos nuestros profesores que nos motivaron a ser cada vez mejor.

Así mismo doy las gracias a aquellas personas que de diversas formas me apoyaron, creando en mi un sentimiento de lucha y amor hacia mi trabajo y por todas las actividades que realice día con día, cuyo propósito es crecer en el ámbito profesional y social.

Sr. Reyes Cruz José Luis

A mis padres agradezco que han estado conmigo durante todo este tiempo en el cual me han mostrado su confianza y apoyo incondicional y que me tuvieron una gran paciencia en esos momentos cuando la presión me traicionaba.

A mi hermano, su esposa y mis sobrinos quienes siempre tienen una sonrisa para mí a pesar de que yo en ocasiones exprese mi mal humor sin motivo.

A mis familiares quienes varias veces aceptaron que sacrificara el tiempo de reuniones familiares con tal de cumplir mis deberes escolares.

A la Facultad de Ingeniería por haberme brindado la oportunidad de pertenecer a una comunidad académica de gran prestigio.

A la UNAM, mi alma mater por haberme aceptado en sus aulas para que lograra alcanzar mi meta.

A mis Profesores quienes me enseñaron no solamente en lo académico sino también me dieron lecciones de vida invaluable.

A mis Compañeros quienes fueron un punto de apoyo en esas jornadas largas de estudio, y con quien disfrute de agradables momentos y a quienes siempre tengo en mi memoria.

Al Ing. Juan Manuel Rojas Gómez, de quien tuve la suerte de ser alumno y en quien reconozco a un gran maestro y una excelente persona

Sr. Velázquez Flores Isaac

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	4
I.- Panorama De Los Motores Eléctricos Para Tracción Industrial	
1.1.- Antecedentes	6
1.2.- Motores eléctricos típicos	10
1.2.1.- Motor de Corriente Directa	10
1.2.2.- Motor de Inducción	20
1.2.3.- Motor Sincrono	31
II.- El Motor De Dos Armaduras	
2.1 Elementos que conforman el motor de dos armaduras	43
2.2 Principio de funcionamiento	46
2.3 Análisis de su respuesta	51
2.3.1 Teóricamente	51
2.3.2 Experimentalmente	59
2.4 Comparación del motor de dos armaduras	77
III.- Diseño Del Motor Trifásico De Dos Armaduras	
3.1 Antecedentes de diseño	68
3.2 Valores base o de diseño	71
3.3 Cálculos de diseño del Motor 2A	109
IV.- Proyecto De Construcción Del Motor Trifásico De Dos Armaduras	
4.1 Selección y disponibilidad de materiales	134
4.2 Programa de actividades para la construcción	148
4.4 Pruebas a realizar	158
V.- Conclusiones	163
VI.- Anexos	165
VII.- Glosario	166
VIII.- Bibliografía	168

INTRODUCCIÓN

El ser humano se ha servido siempre del ingenio y del estudio detallado de los problemas para encontrarles una solución. Una de las cosas, en las que ha demostrado su habilidad es en la construcción de maquinas eléctricas de muchas clases para solucionar sus problemas. En la actualidad, los objetos tecnológicos de que dispone la humanidad son innumerables, y cada día se añaden nuevas ideas e inventos que nos hacen la vida más fácil. El motivo por el que se crea una nueva maquina eléctrica es la existencia de su necesidad presente o previsible. El proceso de creación se inicia con la concepción de un dispositivo, que sirva para una determinada finalidad. La práctica real un proyecto consiste en la aplicación de una combinación de principios científicos y de conocimientos adquiridos por experiencia. Rara vez un problema de diseño tiene una solución fácil y difícilmente se encuentra la solución al primer intento y esto suele poner en situación incomoda al proyectista de maquinas eléctricas principiante. Aunque el arte del proyecto de maquinas eléctricas sólo se puede aprender con muchos años de practica y experiencia.

Para nuestra tesis, hemos decidido realizar nuestro trabajo acerca del motor de dos armaduras, resultado del trabajo de los ingenieros J. M. Rojas Gómez y V. Pérez Amador B. (QEPD). Para lo cual diseñaremos dicho motor, para lo cual consideramos las opciones para realizar este trabajo y consideramos dos caminos a seguir.

La primera opción era diseñar cada parte que conforma el motor de manera independiente, esto es, el estator y el rotor por separado para un mismo valor de potencia y velocidad que establezcamos y de tal manera que puedan ser acoplados, esta fue la manera en que se creo el primer prototipo del motor de dos armaduras (M2A). A pesar de ser creado de forma rudimentaria demostró su funcionalidad y sentó las bases para seguir perfeccionándolo.

La otra opción es realizar el estudio eléctrico, magnético y mecánico completo de este motor con fin de caracterizarlo y de esta manera poder plantear un método de diseño más firme y si es posible obtener su circuito equivalente que nos permita diseñarlo de manera correcta, esta ultima parecería ser la opción más viable y más segura, sin embargo, creemos que se deben explorar los dos caminos de diseño, ambas deben realizarse con el fin de comprobar su viabilidad y tener los argumentos necesarios para en

determinado momento desechar alguna de las opciones según los resultados obtenidos, por lo que en nuestro caso decidimos enfocarnos en la primera opción y dejar el análisis para futuros trabajos que se realicen al respecto del M2A. Después del diseño de la maquina decidimos incluir la cotización de la construcción del motor diseñado con el fin de dar una idea en caso de que alguien decida llevar a cabo el diseño aquí descrito.

Como sabemos la existencia de dos sistemas de energía eléctrica, corriente directa (CD) y corriente alterna (CA) siendo el más usual el de corriente alterna por la transmisión de grandes cantidades de energía a grandes distancias, este sistema es el más usado en la actualidad, por este motivo, hemos proyectado, el motor de doble armadura con alto par de arranque. En la actualidad es muy costoso un equipo completo de corriente directa que sería el sistema de rectificación, el motor, gastos de importación, montaje y puesta en operación. Hemos proyectado una investigación sobre el campo de las maquinas eléctricas trifásicas un motor experimental con alto par de arranque, que consiste en un estator trifásico conectado en estrella y una armadura conectada en delta con su respectivo conmutador el cual tendrá las escobillas distribuidas 120° mecánicos, obteniendo las características de una armadura de un motor serie de corriente directa con alto par de arranque.

Además de continuar con el estudio del M2A, lo que nos motivo a realizar este trabajo fue el deseo de adentrarnos en el área de diseño de motores, ya que a pesar de que sus estudios es una parte importante de nuestra formación académica, lo referente al diseño de maquina se maneja de manera muy superficial y dicho conocimiento puede sernos útil en nuestra vida profesional cuando concluyamos la licenciatura.

I.- PANORAMA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS PARA TRACCIÓN INDUSTRIAL

1.1.- Antecedentes

Las primeras observaciones de fenómenos magnéticos fueron hechas por los griegos hace dos mil quinientos años. En aquellos tiempos se había observado que un resto fósil llamado *Ámbar* al ser frotado era capaz de atraer pequeños trozos de tela y otros materiales livianos. La palabra electricidad deriva justamente del griego *electrón*, que quiere decir ámbar.. En la ciudad de Asia menor llamada Magnesia. Encontraron que existían ciertas piedras que eran capaces de atraer trozos de hierro llamándolas imanes naturales. Los polos de un imán se les llama polo magnético norte y sur. Muchos años después, en el siglo XVII, logro comprobarse que no solo el ámbar se “electrizaba” al frotarlo, sino muchos otros materiales, como el vidrio, la madera, el lacre, etc. Estos descubrimientos hicieron que ya no se detuviera la investigación sobre esa misteriosa energía, capaz de atraer pequeños objetos o, en otros casos, rechazarlos. Numerosas experiencias llevaron al físico Francés Charles Du Fay afirmar que existían dos clases de electricidad, a las que llamo positiva (+) y negativa (-).La primera ley de la electricidad nos dice que dos materiales cargados con electricidad del mismo signo se rechazan. Mientras que, cargados con signos contrarios, se atraen. Otro descubrimiento de aquella época fue comprobar que en algunos materiales, como los metales, por ejemplo, la electricidad circulaba de un extremo a otro, mientras que en otros, como la porcelana, el vidrio, la seda, etc. eso no sucedía. A los primeros se les llamo *conductores* y a los últimos *aisladores*.

Antes del año 1800, el estudio de los fenómenos eléctricos y magnéticos solo intereso a unos cuantos científicos como William Gilbert (medico de la reina Isabel I de Inglaterra, escribió un libro llamado De Magnete acerca del magnetismo), Luigi Galván (realizo el experimento de las ancas de rana), Otto Von Guericke (diseño una maquina de fricción con la cual se podía producir un flujo continuo de electricidad), Benjamín Franklin (realizo experimentos con descargas eléctricas e invento el pararrayos), y algunos mas que hicieron importantes contribuciones a un insuficiente acopio de conocimientos fragmentado sobre electricidad, pero en ese tiempo no se conocían aplicaciones y los estudios solo fueron motivados por una simple curiosidad intelectual.

Hasta entonces se obtenía electricidad frotando materiales que producían pequeñas corrientes. Pero a finales del siglo XVII se descubrió otra manera de

generarla: al unir una barra de zinc y otra de cobre con un alambre y luego sumergirlas en un recipiente con agua ligeramente acidulada (con unas gotas de ácido) para que hiciera de fluido conductor. Se producía una corriente eléctrica que circulaba por el alambre. Basándose en este fenómeno, el italiano Alessandro Volta invento, en el año 1800, la pila eléctrica. Para ello utilizó fichas semejantes a monedas, de cobre, Zinc y cartón humedecido en salmuera (que hacía las veces de agua acidulada), apilándolas repetidamente una sobre otra. Al tocar con una mano la ficha de cobre de la base, y con la otra la de zinc de la parte superior de la pila, Volta recibió una leve descarga eléctrica. El científico italiano había así inventado una manera práctica no solo de generar, sino también de almacenar electricidad. En 1810, cuando Volta había ya perfeccionado su pila, realizó por casualidad otro descubrimiento.

Mientras daba una conferencia, el físico danés Hans Christian Oersted empujó, sin querer, una brújula bajo un alambre con corriente eléctrica, y vio con asombro como la aguja dejaba de marcar el norte, colocándose perpendicular al cable. Esto demostraba que el cable, además de conducir electricidad, generaba a su alrededor una fuerza similar a la de un imán, es decir, producía un campo magnético. Así se encontró la relación entre fenómenos eléctricos y magnéticos. Oersted fue el primero en mostrar que una carga eléctrica podría producir efectos magnéticos con la condición de que la carga estuviera en movimiento.

Años después, Joseph Henry, un joven profesor norteamericano, hizo un descubrimiento muy importante: se le ocurrió recubrir los alambres que conducían la electricidad con un material aislante, y los enrolló alrededor de una barra de hierro en forma de <U>. Al conectarlo luego a una pila, la corriente eléctrica magnetizó el hierro. Henry había construido un electroimán. Entre 1800 y 1815 ocurrieron impresionantes avances en la comprensión de los fenómenos eléctricos y magnéticos. André Marie Ampère, Georg Ohm y Karl Gauss realizaron importantes descubrimientos que llegaron a ser fundamentales para elevar el concepto de la electricidad de un fenómeno científico interesante a una gran tecnología con aplicaciones sociales de grandes alcances.

Ampère y otros ya habían observado que los campos magnéticos eran generados por corrientes eléctricas, sin embargo, ninguno había descubierto como se podían obtener corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos. Michael Faraday era ayudante del laboratorio de la Royal Institution en Londres, por lo que un día reflexionando acerca de que si la electricidad producía magnetismo, se cuestionó diciendo “¿no será posible que el magnetismo produjera electricidad?”,

Y por el año de 1831 construyo lo que seria en la actualidad el primer dinamo del mundo, además de formular la ley que lleva su nombre. Varios investigadores como Charles Wheatstone, Alfred Varley, Carl Siemens y Grame aplicaron los principios de inducción en la cimentación de primitivos generadores eléctricos en el periodo comprendido entre 1840 a 1870.

Las Maquinas eléctricas operan bajo el principio de inducción electromagnética. En 1831, Faraday encontró que se podría obtener electricidad a partir de campos magnéticos “cambiantes”(en movimiento), donde se dio lugar a la ley de inducción. A la cantidad magnética cuyo cambio produce una tensión inducido se le llama Flujo magnético (ϕ)

$$\phi = \int \bar{\beta} da \quad 1.1$$

$\bar{\beta}$ = densidad de flujo

La ley de Ampere establece la relación entre un campo magnético y la corriente eléctrica $\oint \bar{H} d\ell = I$, donde \bar{H} es el vector de intensidad del campo, I es la corriente total, la mayoría de los campos magnéticos más intensos se obtienen por medio de bobinas, que consisten de muchas espiras (vueltas) de alambre conductor y en cuyo caso las líneas de fuerza eslabonan todas las espiras de la bobina donde $F = NI$, siendo la fuerza magnetomotriz F_{mm} . Para describir un campo magnético en forma completa se requiere de:

intensidad de campo magnético (\bar{H})

$$\bar{\beta} = \mu \bar{H} \quad 1.2$$

μ = permeabilidad

El descubrimiento del fenómeno de la Inducción electromagnética por Faraday, dio lugar al invento del generador eléctrico, es el punto inicial de la electrotecnia. Tomas Alba Edison, quien mejoro la lámpara incandescente, también propuso el proyecto de un nuevo generador que demostró tener un rendimiento de casi 90 %, esta nueva maquina se utilizo para el suministro de energía eléctrica, se hizo mediante corriente continua a baja tensión, utilizando el generador de corriente continua (Dinamo) desarrollado en 1870 por Grame. Inicialmente la carga estaba constituida por lámparas incandescentes de filamento de carbón.

Nikola Tesla en 1888, invento el primer motor de corriente alterna y se fabrico en la Unión Americana por Whestinghouse. Las maquinas eléctricas son convertidores electromecánicos de energía cuyo funcionamiento se basa en los fenómenos de la inducción y del par electromagnético.

Clasificación de los motores eléctricos

Las maquinas eléctricas se pueden dividir por dos criterios.

por su estructura:

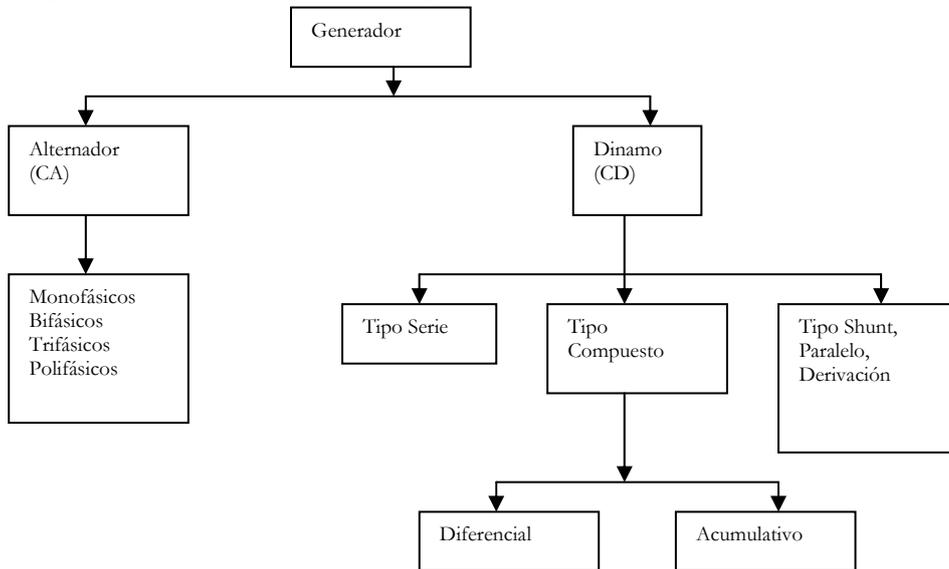
- ❖ Maquinas eléctricas estáticas (transformadores)
- ❖ Maquinas eléctricas giratorias (Motores y generadores)

Si la maquina transforma energía mecánica en eléctrica se denomina generador y si transforma energía eléctrica en mecánica se denomina motor.

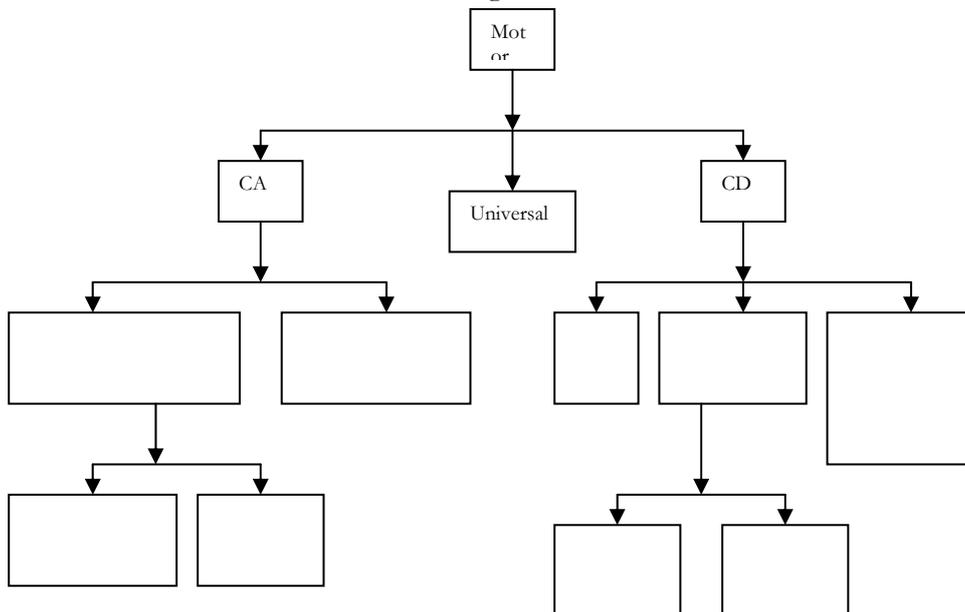
por su fuente de alimentación:

- ❖ Corriente Alterna
- ❖ Corriente Directa

Los generadores se dividen de la siguiente manera:



A su vez, los motores se dividen de la siguiente forma:



Elementos de diseño y construcción de las maquinas eléctricas

- ❖ partes magnéticas
- ❖ partes mecánicas
- ❖ partes eléctricas

1.2.- Motores eléctricos Típicos

1.2.1.- Motor de corriente Directa

La máquina de corriente directa es un dispositivo electromecánico que transforma energía eléctrica de corriente directa en energía mecánica del tipo rotatorio o viceversa. Fig. 1.1

Los cuatro elementos principales de un motor de corriente directa son un campo magnético, un conductor móvil, un colector y las escobillas. El conductor móvil es una espira y recibe el nombre de *armadura* o *rotor*.

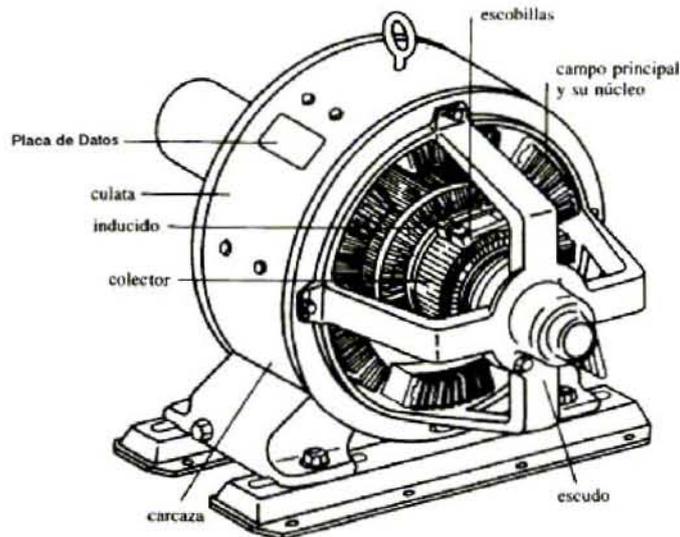


Fig. 1.1: Motor de corriente Directa

Clasificación

El criterio fundamental por medio del cual se clasifica a las máquinas de corriente directa es el tipo de excitación, según el cual existen las siguientes máquinas: de imán permanente, excitación independiente, excitación en derivación, excitación compuesta y excitación serie. La clasificación de los motores de corriente Directa (CD) se divide de la siguiente forma.

Imán Permanente

Las máquinas de corriente directa de imán permanente carecen de bobinas de campo, debido a que el imán permanente genera por sí mismo el flujo magnético requerido para el correcto funcionamiento de estas máquinas. Con una tensión de línea fino se comporta en gran medida como un motor en derivación, pero es ligeramente menor y de costo mas bajo. Su velocidad se controla variando la tensión en línea. Este tipo de motor se usa mucho en modelos a escala y en juguetes. Los motores con campo de imán permanente se usan también en algunos accesorios automotrices, sobre todo cuando el tamaño y el costo son primordiales. Estos motores son un poco más recientes debido al desarrollo de

imanes de bajo costo y alta densidad de flujo y, todavía mas recientemente, de imanes de cerámica.

Excitación Independiente

En el caso de la excitación independiente, se requiere de una fuente de alimentación exclusiva para las bobinas de campo, la cual proporciona una corriente eléctrica que contribuye con las piezas polares (núcleo ferromagnético) a la generación del flujo magnético del campo principal.

Excitación En Derivación

El aspecto fundamental de las máquinas con excitación en derivación es el hecho de que el circuito de excitación está conectado en paralelo con la armadura, por lo que se requiere de una sola fuente de tensión para alimentar a ambos circuitos.

Excitación Compuesta

La excitación compuesta es un caso especial de la excitación en derivación, sólo que se cuenta con un devanado adicional de excitación que se conecta en serie con la armadura. La polaridad de dicho devanado determina si la excitación es acumulativa (ambos devanados en el mismo sentido, por lo que los flujos se suman) o diferencial (caso contrario).

Excitación Serie

La excitación serie se caracteriza porque ambos devanados (campo y armadura) se encuentran en la misma malla, es decir, esta máquina no cuenta con un circuito de excitación derivado. Se puede deducir de lo anterior que las corrientes de carga y de excitación son en realidad la misma. Si se utiliza en la modalidad de motor, esta máquina requiere solamente de una fuente de tensión para su operación.

Descripción Física

En la Fig. 1.2 aparece un motor de CD con sus piezas fundamentales.

Carcaza: Se le llama a veces Yugo, este es el cimiento de la maquina y sostiene a todas las demás piezas, además sirve para completar el campo magnético entre las piezas polares

Piezas polares: Están formadas por muchas capas delgadas de hierro o acero llamadas laminaciones, unidas entre sí y sujetas por dentro de la carcasa. Estas piezas sostienen las bobinas de campo y están diseñadas para concentrar el campo producido por las bobinas. Laminando los polos se reducen las corrientes parásitas.

Bobinados de campo: Cuando están montados sobre las piezas polares, forman electroimanes que suministran el campo magnético necesario para el funcionamiento del motor. Los bobinados están formados de alambre aislado que ha sido enrollado de manera que encajen en forma ajustada alrededor de las piezas polares. La corriente que circula por las bobinas produce el campo magnético.

Casquetes: Están montados en los extremos del bastidor principal y contienen los cojinetes (baleros) de la armadura. El casquete posterior suele sostener un cojinete solo mientras el anterior sostiene el juego de escobillas.

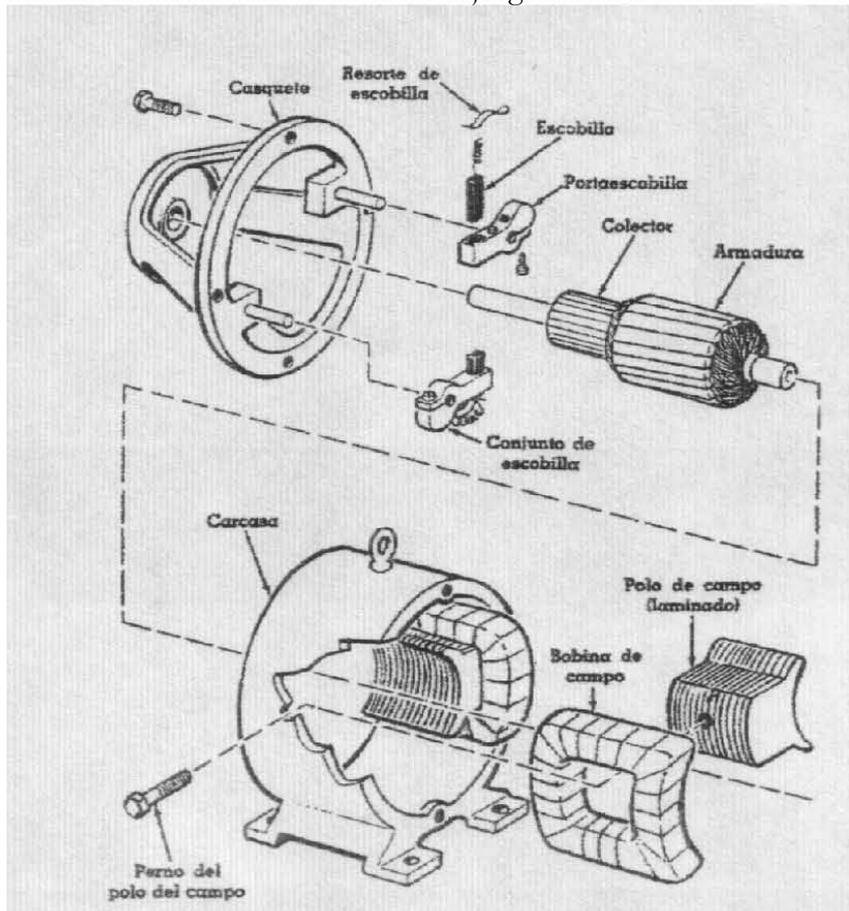


Fig. 1.2: Despiece de un motor de CD

Porta escobillas: Consiste en una pieza de material aislante que sostiene las escobillas y sus conductores respectivos. Los portaescobillas vienen asegurados con grapas o tornillos al casquete delantero. En algunos motores los portaescobillas pueden girar el árbol para su ajuste.

Inducido: Prácticamente en todos los motores de CD el inducido gira entre los polos del estator. El inducido está formado por el eje, núcleo, bobinas y colector. El núcleo del inducido está laminado y tiene unas ranuras en las cuales van colocadas las bobinas.

El colector: está hecho con segmentos de cobre aislados entre sí y con respecto al eje por mica. Estos segmentos, llamados delgas, están asegurados con tornillos de retención para impedir que patinen debido a la fuerza de rotación. En los extremos de las delgas hay unas pequeñas ranuras a las cuales se sueldan las bobinas del inducido.

El árbol: el eje sostiene el conjunto del inducido y gira apoyado en los cojinetes de los casquetes. Entre el inducido y las piezas polares hay un pequeño espacio llamado entrehierro, para impedir el rozamiento entre esas partes durante la rotación, El entrehierro siempre es mínimo para que la fuerza del campo sea máxima.

Escobillas: Estas rozan sobre el colector y transportan la tensión generada a la carga. Las escobillas suelen estar hechas de grafito duro y son mantenidas en sus sitios por los portaescobillas. Las escobillas pueden subir y bajar dentro de los porta escobillas para seguir las irregularidades de la superficie del colector. Un conductor aislado flexible, denominado “chicote”, se conecta cada a cada una de las escobillas con el circuito externo.

La máquina de corriente directa consta de dos partes fundamentales, el rotor y el estator. En este caso, el rotor hace las veces de armadura, mientras que el estator funciona como campo, al generar y contener el flujo magnético de excitación.

Rotor

El rotor constituye la parte móvil de la máquina de corriente directa. Sobre una flecha común se encuentran montados el núcleo y el embobinado de la armadura, así como el conmutador. El núcleo tiene forma cilíndrica y está conformado mediante láminas troqueladas a fin de minimizar pérdidas por circulación de corrientes parásitas. Su objetivo es contener el campo que fluye a

través del circuito magnético de la máquina. Sobre su superficie se localizan una serie de ranuras, las cuales están orientadas paralelamente a la flecha, y cuya función es alojar los conductores del embobinado. El embobinado es un conjunto de espiras de material conductor conectadas entre sí, de tal forma que sobre las secciones alojadas internamente en las ranuras se inducen las fuerzas electromotrices y electromecánicas que son el origen del fenómeno de conversión de energía. El conmutador es un dispositivo cilíndrico formado por un número determinado de contactos de cobre, comúnmente denominados delgas, cuya función es la de establecer un contacto eléctrico entre el embobinado del rotor y las terminales externas, así como canalizar las corrientes eléctricas por las espiras adecuadas, en función de la posición angular del rotor expresada en grados eléctricos.

Actualmente existen dos formas principales para conectar las espiras del embobinado. En el devanado imbricado cada espira está conectada a las dos espiras adyacentes, a través de cada una de sus terminales. Si tomamos una espira de referencia, la cual parte de una determinada delga y llega a la siguiente delga, entonces la espira que le sigue partirá de ésta última delga, repitiéndose este arreglo hasta retornar a la delga original, cerrándose así el circuito. Este devanado exige tantas escobillas como polos, además de que el devanado imbricado se adapta bien a máquinas de CD de intensidad elevada y de baja tensión. La otra posible conexión se conoce como devanado ondulado, en este caso el lado de la bobina no se conecta a la parte posterior, pero se desarrolla hacia delante a otros lados de la bobina, de esta manera el devanado progresa, pasando sucesivamente cada polo norte y sur hasta que regresa al lado de la bobina de la cual partió; de esta manera las conexiones siempre avanzan en la misma dirección alrededor de la armadura en lugar de moverse en direcciones alternas como es el caso de los devanados imbricados, su nombre deriva de la forma en que se desarrolla (en forma de onda). Este tipo de devanado solo requiere dos escobillas, independientemente del número de polos además de que se adapta bien a aplicaciones de alta tensión y baja intensidad.

Estator

El estator, constituye la parte estática de la máquina de corriente directa. Además de contener las partes electromagnéticas inmóviles fundamentales para el funcionamiento de la máquina, el estator tiene la función de envolver todos los componentes de la misma y proporcionar el medio físico para sujetarla y/o

anclarla donde sea requerido. Sobre el estator se localiza generalmente una caja de conexiones que permite el acceso a las terminales eléctricas. En el interior de la coraza del estator, se localizan los polos magnéticos, los cuales en conjunto con ella, forman parte del circuito magnético de la máquina. Los polos están formados de dos partes, la pieza polar y la zapata polar. La primera de ellas constituye el núcleo del polo, y en torno a ésta se encuentran enrolladas las bobinas de excitación. La zapata polar tiene la función de distribuir el flujo magnético sobre una superficie grande del rotor, así como la de mantener la bobina de excitación en su lugar. A través de ésta bobina circula la corriente de excitación, cuya función es conducir el campo magnético principal.

En las tapas anterior y posterior del estator se localizan los rodamientos (baleros o chumaceras, dependiendo del tamaño de la máquina), que sostienen la flecha y permiten que gire libremente. En el interior de la tapa posterior se localizan además los portaescobillas, los cuales sostienen y aíslan a las escobillas. Estas son elementos que establecen una conexión eléctrica entre las partes fijas y las rotatorias (conmutador), y están hechas de materiales de baja dureza a fin de que sean ellas las que se desgasten, y no el conmutador.

Principio De Funcionamiento

Un motor práctico debe producir *movimiento rotatorio continuo*. Esto lo hace originando una fuerza de giro o *par*, sobre un conductor que lleva corriente, al cual se le ha dado forma de espira. El par determina la cantidad de energía que puede aprovecharse para producir trabajo útil. Cuando mayor sea el par, mayor será dicha energía; por lo que más trabajo útil puede desempeñar el motor. El motor elemental de CD consiste en una espira de alambre que gira entre dos polos de un imán. Los extremos de la espira están conectados con delgas del colector que, a su vez, hacen contacto con las escobillas. Las escobillas tienen conductores que van a una fuente de tensión de corriente directa. La aplicación del par sobre una espira va a originar un movimiento circular como se muestra a continuación, en la Fig. 1.3

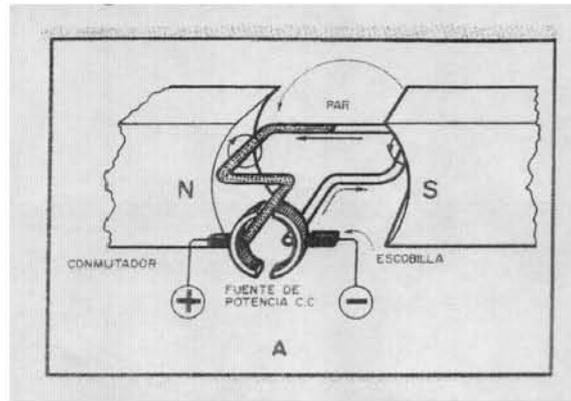


Fig. 1.3: motor elemental de CD

La corriente fluye por la espira creando el campo magnético, en la parte superior, el polo norte y el polo sur en la inferior. Los polos magnéticos de la espira serán atraídos por los polos opuestos correspondientes del campo. Como resultado, la espira girara en el sentido contra reloj, colocando frente a frente a los polos contrarios. Cuando la espira ha girado 90 grados hasta la siguiente posición se produce la conmutación y la corriente de la espira se invierte de sentido. A raíz de esto el campo magnético generado por la espira también se invierte, Ahora esta frente a frente polos iguales, lo que significa que se rechazan, y la espira sigue girando para tratar de acercar los polos opuestos, esto se muestra a continuación en la Fig.1.4

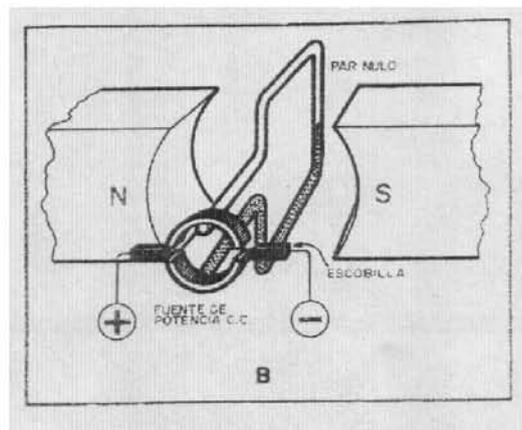


Fig. 1.4

Al girar 180 grados, mas allá de la posición anterior, la espira se encuentra en la siguiente posición, donde se produce una nueva conmutación y la espira sigue girando. Fig. 1.5

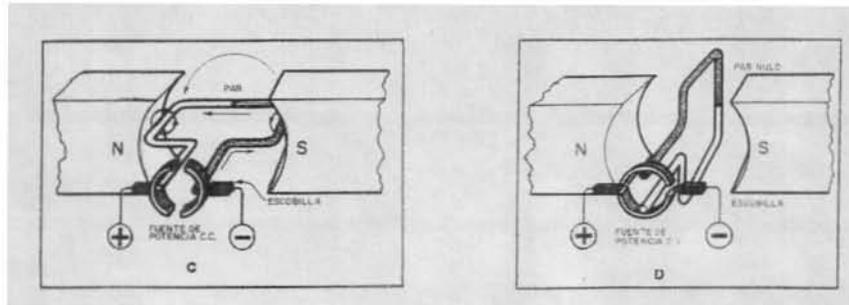


Fig. 1.5: conmutación en el colector

El *plano neutro* de un motor es la posición en que la espira rotatoria está perpendicular a las líneas de flujo del campo magnético fijo. Cuando la espira rotatoria está en el plano neutro, no se produce par. Fig. 1.6, Se usa el *colector* para mantener girando continuamente el motor de corriente directa, en lugar de que solo oscile con respecto al plano neutro. El colector invierte la dirección de la corriente que fluye en la espira rotatoria cada vez que esta atraviesa el plano neutro.

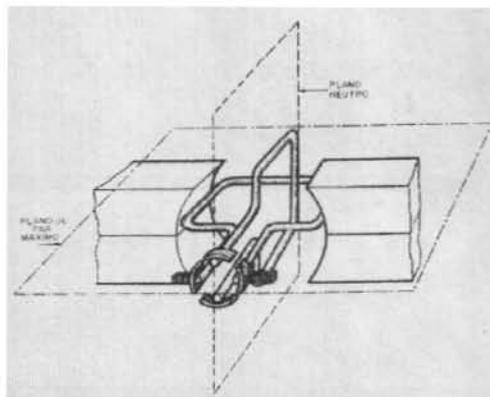


Fig. 1.6: Plano neutro

La máquina de corriente directa consta de un estator (campo) y un rotor (armadura). A través de las bobinas de los polos del estator se hace circular una corriente directa que genera un campo magnético, cuyas líneas de flujo se encuentran contenidas en el núcleo. Este flujo magnético es conocido como *flujo*

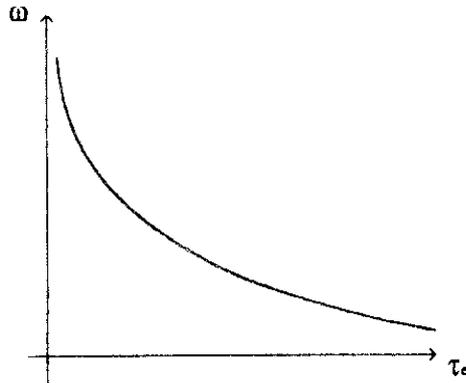
polar o *campo principal*. El sentido del flujo magnético del campo principal se define a partir de la regla de la mano derecha, aplicada a las bobinas de los polos del estator. Según esta regla, la posición del dedo pulgar nos indica la dirección del campo magnético, mientras que los demás dedos se orientan en la dirección del flujo de las corrientes que circulan en las espiras de la bobina. Dependiendo del sentido de este campo, si las líneas de flujo “salen” del núcleo del estator a través de un polo, éste se define como *polo norte*, mientras que el polo a través del cual “entran” se define como *polo sur*. Por lo tanto, en el interior de la carcasa del estator, el sentido del flujo será del polo sur hacia el polo norte.

Por otra parte, en el rotor se genera otro campo magnético, conocido como *flujo de armadura*, con la característica fundamental de ser estacionario en el espacio, independientemente del estado de giro o reposo del rotor. Este campo se genera a partir de las corrientes circulantes en los devanados de la armadura, siguiendo la regla de la mano derecha. Los sentidos de la corriente en las espiras responden a la diferencia de potencial existente entre las delgas a las cuales están conectadas, independientemente del tipo de devanado de que se trate. Cuando las escobillas hacen contacto con dos delgas y las cortocircuitan, se obliga, debido a la estructura de los devanados, la circulación de corriente. La corriente entrará a la armadura a través de una escobilla cuya polaridad sea positiva, y saldrán de ella a través de otra que sea de polaridad negativa. Es precisamente mediante la interacción del campo de armadura y el campo principal que se crea un enlace entre rotor y estator, lo que a su vez hace posible la transformación entre energía mecánica y eléctrica. El campo de armadura se encuentra desalineado con respecto al principal un cierto ángulo definido por el cociente de 180° entre el número de polos. Las fuerzas de atracción y repulsión magnética que se generan entre los polos del rotor y del estator tienden a alinear ambos campos.

Sin embargo, al girar el rotor un cierto ángulo pequeño, se llevará a cabo el proceso de conmutación, en que las escobillas se recorrerán una delga. Al ocurrir la conmutación, debido a que el circuito es cerrado y uniforme, se llega a un estado idéntico al anterior. De esta manera, los campos magnéticos generados en un determinado estado, que comenzaban a girar, después de la conmutación son reorientados a la posición de la cual partieron, por lo que se les considera estáticos.

Curvas características

La curva de mayor importancia para el motor de corriente directa y en general para cualquier máquina, es aquella que muestra la característica par-velocidad y corriente-velocidad. A continuación, se muestran estas en las siguientes Figuras (Fig. 1.7 y 1.8) de acuerdo a una máquina de corriente directa con excitación serie:



1.7: Curva Corriente Velocidad

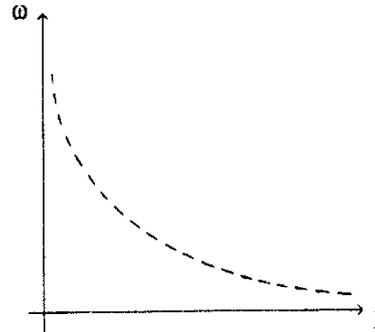


Fig. 1.8: Curva Par-Velocidad

Como puede observarse, la máquina de corriente directa con excitación serie presenta un muy alto par de arranque, proporcional al cuadrado de la corriente, el cual se conserva aún a bajas velocidades de operación.

1.2.2.- Motor De Inducción

La máquina de inducción es un dispositivo electromagnético que efectúa una transformación entre energía eléctrica de corriente alterna y energía mecánica del tipo rotatorio. Generalmente su uso se limita a la modalidad de motor, pues funcionando como generador implica dificultades de operación.

La característica fundamental del motor de inducción radica en que solamente uno de sus elementos, rotor o estator, se conecta a una fuente de alimentación, mientras que la otra trabaja por inducción electromagnética. En la mayoría de los casos la alimentación eléctrica se lleva a cabo a través del estator.

La gran desventaja del motor de inducción es que demanda altas corrientes (hasta ocho veces mayor a la nominal) bajo condiciones de operación en que el

deslizamiento es elevado, como en el arranque o con el rotor bloqueado (deslizamiento máximo).

La máquina de inducción es la opción más económica en campos de aplicación en los que no se requiere de un control de velocidad muy preciso, pero es deseable transmitir un flujo de potencia constante a una carga mecánica estable, por ejemplo una bomba hidráulica o la banda transportadora de una línea de producción. La mayor parte de las cargas mecánicas industriales cumplen con esta característica, por lo que el motor de inducción tiene una gran aceptación en este campo.

Clasificación

Las máquinas de inducción se clasifican en función de su tipo de rotor, pudiendo ser de *rotor devanado* o *rotor de jaula de ardilla*. Para el segundo caso existe además una subclasificación en la que se consideran algunas características físicas de las barras de jaula, tales como la geometría y áreas de la sección transversal, y la distancia entre la barra y la superficie del rotor. En diversas máquinas de inducción los perfiles de ranura varían para que cumplan con diversas especificaciones tales como una mayor aceleración, buena regulación de velocidad, bajo deslizamiento, etc.

Descripción Física

Las partes físicas más importantes en un motor son el rotor y el estator:

Rotor

El rotor constituye la parte móvil del motor de inducción y se clasifican en dos tipos: de *rotor devanado* y *rotor jaula de ardilla*. Su característica sobresaliente, ya sea del tipo devanado o jaula de ardilla, radica en que no requiere de conexión eléctrica alguna con una fuente de alimentación, pues su operación resulta del principio de inducción electromagnética.

En el caso del rotor devanado (Fig. 1.8), los devanados, previamente contruidos a partir de conductores de cobre y material aislante, se colocan en el interior de las ranuras y se fijan mecánicamente con anillos que los mantienen en su lugar, aún cuando se someten a la fuerza centrífuga resultante del movimiento

giratorio. Cabe señalar que existen anillos de contacto y escobillas que permiten el acceso a los devanados, pero sólo con la finalidad de limitar la corriente de arranque mediante la introducción de elementos resistivos desde el exterior de la máquina. En el caso de las máquinas polifásicas, las terminales de los devanados se conectan en estrella y sus extremos libres se canalizan hacia el exterior para unirse con los anillos de contacto, permitiendo a su vez, la conexión en serie con los reóstatos limitadores de corriente de arranque.

El rotor jaula de ardilla consta de conductores macizos de fundición de cobre o aluminio colados directamente en las ranuras del núcleo, cortocircuitados en sus extremos mediante anillos. En rotores pequeños estos anillos forman parte de la misma fundición, mientras que en los de mayor tamaño se encuentran soldados a los conductores mediante un proceso independiente. En algunos casos se incluyen aspas de ventilación forzada como parte integral de la estructura de la jaula de ardilla. Las barras de la jaula de ardilla son paralelas entre sí, sin embargo pueden no serlo con respecto al eje del rotor. En la gran mayoría de los casos presentan una pequeña desviación axial, de modo que sus extremos se encuentran desplazados una distancia igual a la existente entre ranuras del estator, como se puede apreciar en la Fig. 1.9.

En un rotor jaula de ardilla, las barras conductoras no están aisladas del núcleo, ya que al ser resistividad del cobre o la del aluminio mucho menores a la del hierro, estas barras presentan el camino de menor resistencia al paso de la corriente, la cual fluye exclusivamente a través de ellas.



Fig. 1.8: Rotor devanado
Estator

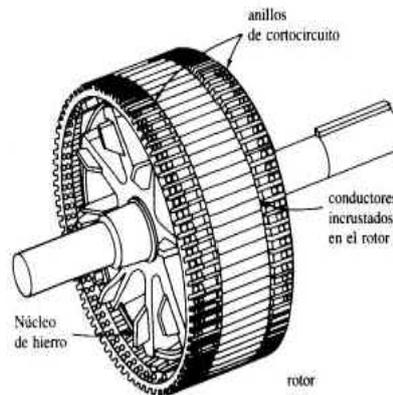


Fig. 1.9: Rotor jaula de ardilla

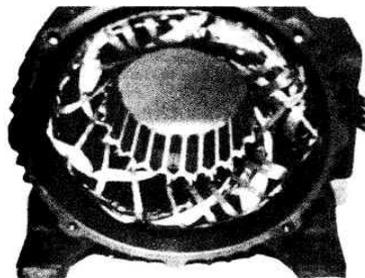


Fig. 1.10: Estator de un Motor de Inducción

El estator de un motor de inducción consta principalmente de núcleo y devanado. El núcleo se construye a partir de laminaciones troqueladas de material ferromagnético, aisladas mediante una capa de barniz, apiladas y atornilladas para conformar una estructura cilíndrica hueca, en cuya cara interior se localizan ranuras axiales destinadas a alojar los conductores de los embobinados. El estator constituye el medio físico donde se genera y contiene el flujo magnético, así como el órgano en el que se inducen las fuerzas contraelectromotrices. A su vez, el estator es el cuerpo mismo del motor de inducción, porque envuelve todos sus componentes, proporcionando además el medio de fijación y/o anclaje. En la Fig. 1.10 puede verse un estator típico de dos polos.

Existen diversos tipos de devanados de estator, los cuales varían en función de las necesidades y aplicaciones del motor. Las principales características que agrupan a los diferentes devanados son el núcleo de fases, el número de capas y/o el número de polos magnéticos. Para comprender esto es necesario definir dos aspectos importantes.

Distancia angular polar o paso polar: Distancia angular entre dos polos.

Dominio polar: La zona de influencia de un polo magnético.

Como se puede observar en la Fig. 1.11, para una máquina de dos polos la distancia polar y el dominio polar (paso polar) son equivalentes (180°), mas no así su ubicación.

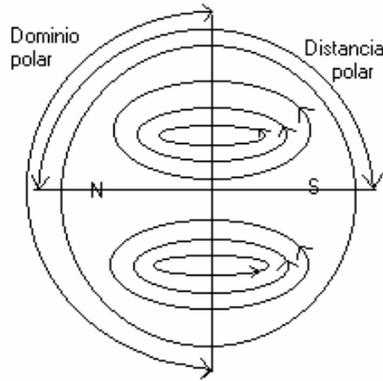


Fig. 1.11: Distancia y Dominio Polar

Para medio periodo ($T/2$) los polos giran un paso polar. Analizando la Tabla I observamos la relación entre el desplazamiento eléctrico y el desplazamiento geométrico de las corrientes.

No. de polos	θ_e (°)	θ_m (°)	θ_e/θ_m
2	360	360	1
4	360	180	2
6	360	120	3
:	:	:	:
P			P/2

Tabla I: relación entre el numero de polos y los grados eléctricos y geométricos

Por lo tanto $\frac{\theta_e}{\theta_m} = \frac{p}{2}$

Grados eléctricos (θ_e): desplazamiento angular eléctrico de las corrientes.

Grados geométricos (θ_m): desplazamiento angular geométrico o mecánico de los polos en el tiempo.

Si despejamos θ_m y la derivamos con respecto a dt obtenemos:

$$\omega_s = \frac{2}{p} \omega_e \text{ [rev/seg]} \quad 1.3$$

("s" indica que es velocidad angular síncrona)

en RPM N_s equivale a:

$$N_s = \frac{f(120)}{p} [rpm] \quad 1.4$$

Donde

f: es la frecuencia de la fuente que alimenta al motor

p: es el número de polos del motor

Por lo cual, las únicas formas en que se puede variar la velocidad sincrónica de una máquina son:

- ❖ Cambiando la frecuencia eléctrica.
- ❖ Cambiando el número de polos de la máquina.

El diseño de un núcleo se debe ajustar a las características del devanado que habrá de alojar. Por lo tanto, el número de ranuras y la profundidad de estas deben ser las adecuadas a fin de tener un correcto ensamble entre ambas partes. Así mismo, los devanados pueden ser de una o varias capas, prevaleciendo fundamentalmente las de una (*simplex*) y dos (*duplex*) capas. Por último, los devanados de estator se pueden diseñar a fin de generar cualquier número par de polos magnéticos para cubrir el requerimiento de la velocidad predeterminada de operación de la máquina. Como indica la ecuación de la velocidad síncrona del motor de inducción. El control del deslizamiento puede lograrse variando, bien, la resistencia del rotor, bien la tensión de los bornes del motor.

Principio De Funcionamiento

Sin duda, el motor asíncrono o de inducción es la máquina eléctrica en donde más claro se manifiesta el fenómeno de la inducción electromagnética. Quizás al principio no resulta fácil de apreciar cómo es que el rotor puede girar sin recibir alimentación eléctrica alguna. La respuesta es simple: toda la potencia mecánica que entrega el rotor le es transmitida a través de un campo magnético mediante el fenómeno de la inducción electromagnética.

En el momento en que se conecta una fuente de alimentación al estator, se genera un campo magnético estático (motor monofásico) o giratorio (motor polifásico) como consecuencia de la circulación de corrientes por las bobinas de sus devanados.

En el estator trifásico las bobinas se encuentran físicamente distanciadas un ángulo de 120° . Si estas son alimentadas con un sistema eléctrico trifásico equilibrado, en el que las corrientes son de la misma magnitud y están desfasadas 120° eléctricos entre sí, se produce el *campo síncrono* como resultado de la contribución del campo magnético generado independientemente por cada bobina. Las corrientes que componen al sistema trifásico son:

$$i_a = I_{\max} \text{sen}(2\pi ft) \quad 1.5$$

$$i_b = I_{\max} \text{sen}(2\pi ft - 120^\circ) \quad 1.6$$

$$i_c = I_{\max} \text{sen}(2\pi ft + 120^\circ) \quad 1.7$$

La Fig. 1.12 muestra el efecto que se obtiene en el estator del motor al aplicarle una corriente alterna trifásica a cada una de sus fases, es decir, que van a entrar tres corrientes, una por cada fase y estas se van a combinar de tal manera que el rotor lo ve con un solo campo magnético giratorio de magnitud constante y que gira a la velocidad N_s .

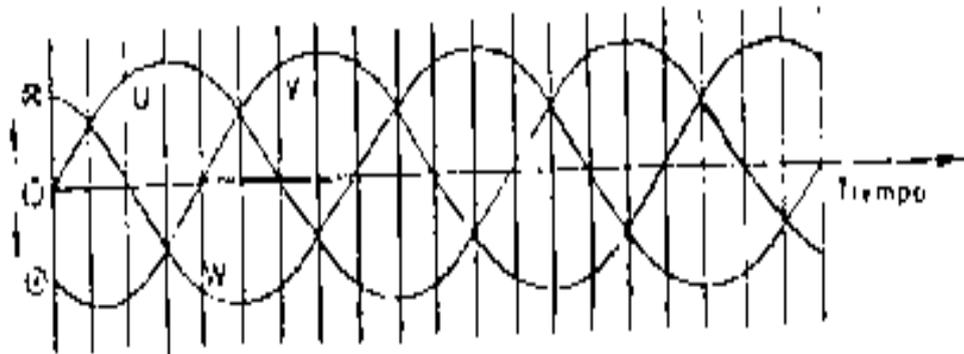


Fig. 1.12 Curva senoidal para la corriente respecto al tiempo en las tres fases del estator

La corriente que está arriba del eje del tiempo es positiva y entrante hacia la hoja de papel (Fig. 1.12), esta se representa por medio de una cruz "x"; obviamente la corriente que queda por debajo del eje del campo es negativa y en dirección saliente de la hoja del papel hacia el observador, esta se representa por medio de un punto "." (Fig. 1.12).

Apoyándonos alternativamente en otra Figura, fácilmente se analiza el comportamiento en 12 tiempos de la corriente trifásica mismos que corresponden a la Fig. 1.13

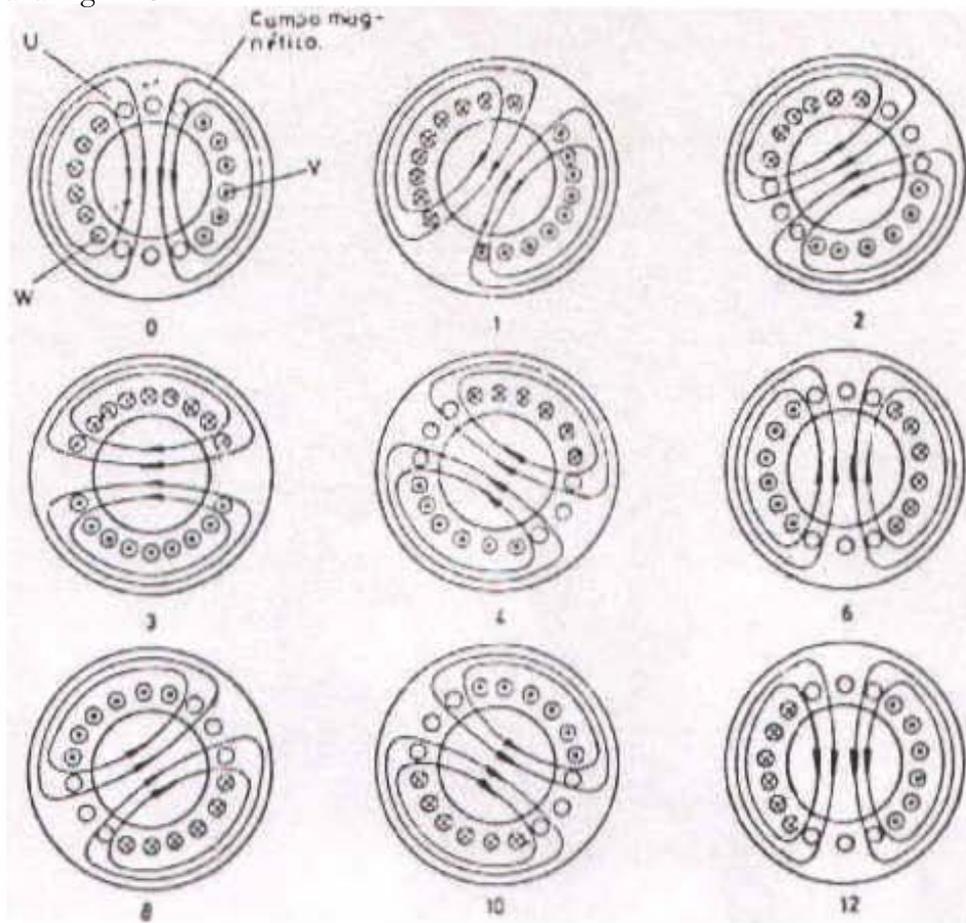


Fig. 1.13 Campo magnético giratorio

Las entradas y salidas de corriente de estas tres fases a que se hace referencia, están plenamente identificadas por las letras UVW. Se observa que en el tiempo "0" de la Fig. 1.13, la corriente W es entrante, la corriente V (que está al lado opuesto a la corriente W) sale del papel y se dirige hacia el observador y la fase U se encuentra sin corriente.

En el tiempo "0" de la Fig. 1.13 las tres ranuras de la parte superior de la fase U se han desplazado hacia la derecha quedando en la fase V, y por las cuales

sale la corriente (tiempo 1). Las ranuras de la parte inferior de la fase U del tiempo “0” se han desplazado hacia la izquierda quedando en la fase W, y por las cuales entra la corriente (tiempo 1).

En la Fig. 1.13 tiempo “3”, se observa que en la fase U la corriente ha alcanzado su valor máximo en sentido positivo, mientras que para la fase V la corriente ha disminuido hacia la mitad de su valor máximo pero en sentido negativo y para la fase W la corriente casi ha alcanzado su valor máximo pero en sentido negativo. y analizando la Fig. anterior, se origina un campo giratorio de las siguientes características:

- ❖ Es giratorio.
- ❖ Su magnitud es constante.
- ❖ Su sentido de giro depende de las secuencias de las corrientes que lo generan.
- ❖ Su desplazamiento angular va en sincronía con el desplazamiento angular eléctrico de las corrientes que lo generan.
- ❖ Su velocidad angular (ω_s) es proporcional a la frecuencia de las corrientes que lo generan.

Si se continuara analizando las Figuras 1.12 y 1.13 se podrá concluir que los demás tiempos que no se describieron funcionan bajo los mismos principios que los tiempos 0 y 1, además de que cuando el campo síncrono ha concluido un ciclo de 360° , los tiempos 0 y 12 son idénticos en cuanto a características de funcionalidad y es entonces cuando se empieza una vez más un nuevo ciclo.

Cuando un motor de inducción se encuentra en reposo y es conectado a su fuente de alimentación, aparece súbitamente el campo síncrono, cuyas líneas de flujo cortan a los conductores del rotor, se induce a su vez, la circulación de las corrientes, las cuales generan un campo magnético independiente. Al que se denomina *campo del rotor*. Es mediante la interacción del campo del rotor y el campo síncrono que el rotor comienza a girar. Dado el sentido de las fuerzas de atracción y repulsión, el sentido de giro del rotor es el mismo que el del campo síncrono. Conforme el rotor se acelera, la velocidad relativa de este con respecto a la del campo síncrono va disminuyendo, por lo tanto, la magnitud de la tensión y las corrientes inducidas también decrecen. Consecuentemente, la magnitud del campo del rotor es menor, al igual que las fuerzas de atracción y repulsión entre ambos campos y por desarrollado. El rotor se acelera hasta una velocidad de

equilibrio ligeramente menor a la velocidad síncrona, en que la magnitud del campo magnético inducido es estrictamente la necesaria para que el par desarrollado cubra las pérdidas del rotor y la carga acoplada (sí es que existe). La velocidad síncrona es físicamente inalcanzable, aún cuando el motor en vacío y sus pérdidas son mínimas, pues al no existir campo magnético inducido, el par desarrollado vale cero.

Un concepto fundamental en el estudio analítico del modelo de operación del motor de inducción es el *deslizamiento* (s), el cual se define como la fracción de velocidad síncrona que pierde un rotor en un instante dado. Su expresión matemática es:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad 1.8$$

N_s = velocidad sincronía

N_r = velocidad del rotor

Esta relación entre velocidad síncrona (N_s) y la velocidad del rotor (N_r) estará comprendida, para la modalidad del motor, en el intervalo $0 < s \leq 1$. Los límites corresponden a las velocidades máxima (N_r casi igual a N_s) y mínima (reposo total) del rotor, respectivamente. También se acostumbra expresar el deslizamiento en porcentaje y en función de la relación de las frecuencias eléctricas en [rad/s], de las corrientes que circulan por los devanados de estator y rotor. Esto se logra al sustituir N_s por ω_s y N_r por ω_r en la ecuación anterior, en cuyo caso el valor de deslizamiento no se altera.

Curvas Representativas

Un elemento indispensable para comparar los beneficios ofrecidos del motor de 2A sobre el motor de inducción, es precisamente analizando y comparando las curvas representativas de ambos. Pero, en este caso, no existe un método analítico aplicable a la práctica para la obtención de dichas curvas. Se acostumbra obtenerlas mediante pruebas de laboratorio. Las pruebas esenciales para la caracterización de una máquina de inducción son las siguientes:

Obtención de las curvas de saturación en vacío.

Obtención de las curvas par velocidad.

A continuación se muestran las dos curvas más importantes de este motor. La curva de saturación en vacío Fig. 1.14

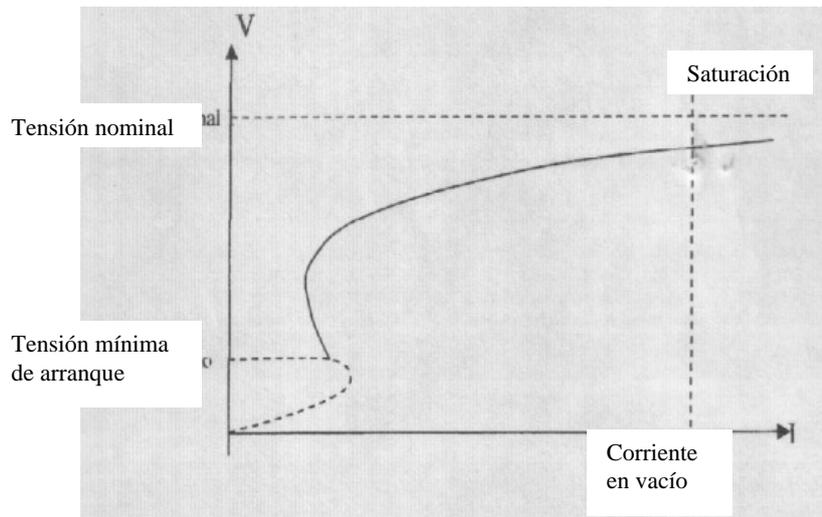


Fig. 1.14: Curva de saturación en vacío

La curva par-velocidad (Fig. 1.15) comprende la totalidad del rango de operación del motor de inducción, que va desde la condición de rotor libre hasta la de rotor bloqueado, incluyendo las zonas de inestabilidad (zonas en que la curva en que la pendiente es positiva). Esta curva ilustra la operación de este motor según su diseño (A, B, C, etc.), esta clasificación es de acuerdo a la corriente de arranque, par máximo desarrollado y otros aspectos relacionados.

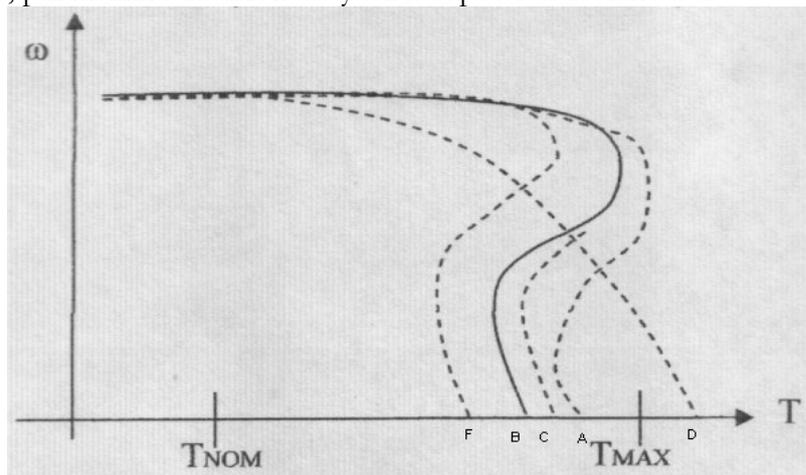


Fig. 1.15 Curva Par Velocidad

Las designaciones más comunes son:

Clase A: Es un motor jaula de ardilla para usarse a velocidad constante. Sus principales características son buena capacidad de disipación de calor, Alta resistencia y baja reactancia de arranque, Aceleración bastante rápida hacia la velocidad normal, desafortunadamente su corriente de arranque varía entre 5 y 7 veces la corriente nominal, ha sido reemplazado por los motores Clase B en los últimos años, se utiliza en ventiladores, sopladores, bombas, tornos, etc.

Clase B: De par de arranque normal (110 – 150 % de par normal) y baja corriente de arranque (500 – 700% de la corriente a plena carga) es el más usado del tipo de motores jaula de ardilla, se aplica frecuentemente en máquinas herramientas, ventiladores, bombas, prensas, etc.

Clase C: De par de arranque elevado (200 – 250 del par normal) y baja corriente de arranque (450 – 500% de la corriente a plena carga), se utiliza en compresoras y bombas alternativas, elevadores, trituradores, etc.

Clase D: Con el más alto par de arranque (250 – 300% del par normal) y baja corriente de arranque (450 – 800% de la corriente a plena carga), son utilizados en máquinas con cargas de alta inercia e intermitentes como punzadoras, cizallas, cortadoras, ascensores, grúas, prensas, etc.

Las clases F y D son llamados de inducción de arranque suave, pero obsoletos hoy en día.

1.2.3.- Motor Síncrono

Al igual que la máquina de inducción, la máquina síncrona es un dispositivo electromecánico capaz de efectuar la transformación entre energía mecánica de tipo rotatorio y energía eléctrica de corriente alterna, en cualquier sentido.

El uso de la máquina síncrona se limita casi exclusivamente a la modalidad de generador, sin embargo existen algunas aplicaciones específicas en que se justifica su uso como motor, por ejemplo cuando se requiere acoplar directamente varios motores. Con el acoplamiento directo de motores síncronos se anula cualquier efecto de arrastre o frenado que pudiera presentarse en caso de que se utilizara otro tipo de máquina eléctrica. Otra aplicación de la máquina sincrónica en la modalidad de motor es su operación en vacío como compensador reactivo. El motor síncrono es utilizado en aquellos casos en que los que se desea velocidad constante. Como motor se usa principalmente cuando la potencia demandada es muy elevada >1 MW. El motor síncrono gira a la velocidad de sincronismo (fórmula 1.4)

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Por ejemplo si la fuente es de 60Hz, si el motor es de dos polos, gira a 3600 RPM; si es de cuatro polos gira a 1800 RPM y así sucesivamente. Para variar la velocidad es necesario variar la frecuencia de alimentación mediante la utilización de equipos electrónicos, en el caso de motores de gran potencia se utilizan los cicloconvertidores, para el caso de motores de baja potencia se utilizan inversores. Este motor o gira a la velocidad constante dada por la fuente o, si la carga es excesiva, se detiene. Debido a la posibilidad de variación de la excitación, el motor síncrono de CA posee una característica que no tiene ningún otro tipo de motor de CA: el factor de potencia al cual funciona puede hacerse variar a voluntad, puede ceder o absorber potencia reactiva.. Como curiosidad vale la pena mencionar que el motor síncrono, al igual que el motor de corriente directa, precisa de un campo magnético que posibilite la transformación de energía eléctrica recibida por su correspondiente armadura en energía mecánica entregada a través del eje.

Otra característica, y a veces poco usual, de los motores síncronos polifásicos (y monofásicos) es que, como en el caso de algunos motores monofásicos inherentemente no arranca por sí mismo. Al igual que el alternador de CA, debe llevarse a su funcionamiento a su velocidad mediante medios auxiliares y luego debe conectarse a la línea. Otra peculiaridad de los motores síncronos es su susceptibilidad a las oscilaciones, particularmente cuando las cargas están sometidas a variaciones bruscas o no son uniformes durante un ciclo de revolución, como en el caso de estampadoras, cizallas, compresoras o bombas. El uso de devanados amortiguadores en la estructura de los rotores ha terminado con ese problema y al mismo tiempo, ha hecho posible que el motor síncrono pueda arrancar por sí mismo como motor de inducción.

Clasificación

Las máquinas se clasifican en función de su tipo de rotor, pudiendo ser de *rotor liso* o de *rotor de polos salientes*. El rotor liso contiene ranuras axiales en donde están alojados los conductores de sus devanados, mientras que el de polos salientes, como su nombre lo indica, se caracteriza porque tiene piezas y zapatas polares en torno a las cuales se colocan los devanados. En la Fig. 1.16 se muestra la sección transversal de los dos tipos de rotores existentes para máquinas síncronas.

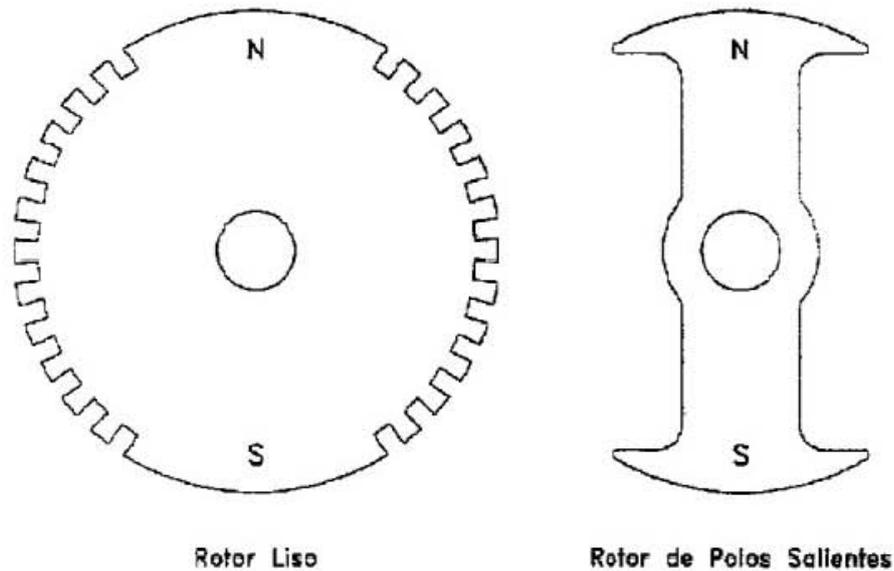


Fig. 1.16: Tipos de rotor del Motor Síncrono

En el rotor liso (también denominado rotor cilíndrico) los devanados se encuentran alojados dentro de ranuras axiales, cepilladas en un núcleo cilíndrico de hierro sólido a fin de lograr en este una alta resistencia mecánica. Este tipo de rotor generalmente se construye para generar dos o cuatro polos magnéticos y encuentra su principal aplicación en máquinas de gran tamaño y altas velocidades (3600 y 1800 rpm a 60 Hz, para dos y cuatro polos, respectivamente).

La construcción del rotor de polos salientes es más sencilla que la del rotor liso, pues después de su colado de hierro, en que adquiere su forma final, ya no requiere de maquinación alguna. Los devanados se arrollan directamente sobre las piezas polares y quedan firmemente sujetas por la zapata polar. Los polos salientes son mecánicamente débiles y presentan alta resistencia al aire, resultando comparativamente más ruidosos. Este tipo de rotor se utiliza en máquinas que trabajan a bajas velocidades, por lo que se construyen con un gran número de polos magnéticos

Descripción Física

La estructura de una máquina eléctrica tiene dos componentes principales: estator y rotor, separados por un entrehierro.

Rotor

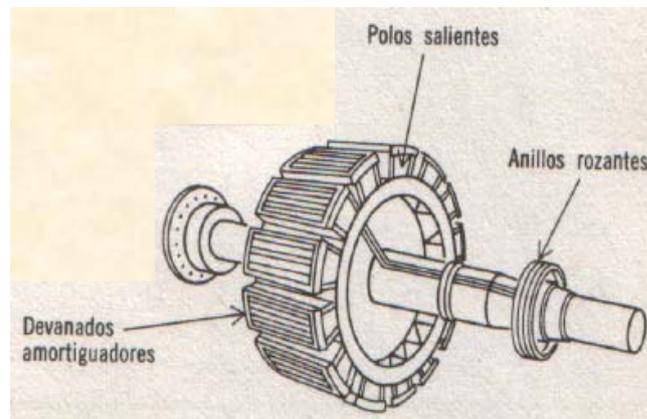


Fig. 1.17: Rotor de polos salientes

La mayoría de los motores síncronos están contruidos para funcionar a velocidades bajas y moderadas. Estos rotores tienen *polos salientes o protuberantes*, devanados sobre núcleos sujetos con pernos a una araña anular y de acero fundido, con buenas propiedades magnéticas. Los motores diseñados para más altas velocidades se llaman *rotores lisos* y tienen sus núcleos insertados en ranuras de colas de milano y sujeto rígidamente a la araña anular, generalmente hecha de acero laminado.

Los devanados del rotor generalmente están hechos de alambre de cobre devanado en cada uno de los núcleos, y en motores muy grandes, las bobinas están hechas de cintas de cobre. La Fig. 1.17 muestra la Fig. de un rotor síncrono.

Estator

El estator de motor síncrono es el mismo que del motor de inducción. Este generalmente consta de la cubierta de acero soldado o hierro fundido que sostiene un anillo ranurado de acero dulce laminado. Las laminaciones se aíslan entre sí y las ranuras en ellas se alinean mediante material de fibra córnea. Las bobinas del devanado del estator se alojan en las ranuras alineadas abiertas del

anillo de acero. Todas las bobinas están aisladas individualmente y son semejantes e intercambiables. Fig. 1.18

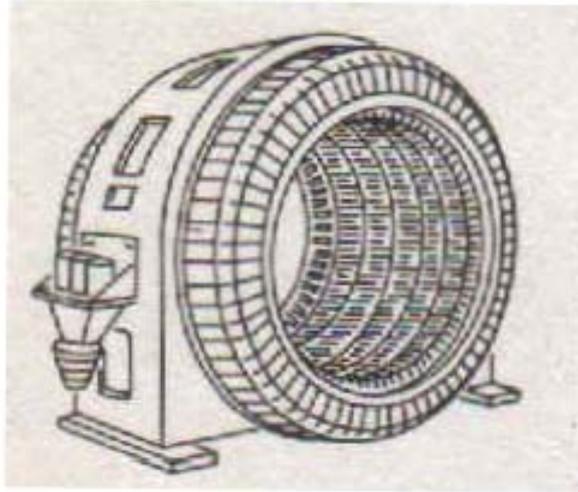


Fig. 1.18: estator de un motor síncrono

Los polos magnéticos en el estator no son distinguibles a simple vista debido a que no se usan piezas polares, como en el rotor. Los polos se producen en cualquier instante en las bobinas que producen la corriente apropiada y, como las fases de la corriente difieren en las bobinas, los polos se desplazan de una bobina a otra para seguir la elevación y la caída de la fase de una bobina a otra. Así pues, se dice que el estator tiene polos *distribuidos*.

Estas partes están hechas con materiales ferromagnéticos. En la mayor parte de los casos, las ranuras son cortadas en la parte interna y externa del estator en las cuales se colocan conductores. El núcleo de hierro se usa para maximizar el acoplamiento entre las bobinas del estator y del rotor, para incrementar el flujo magnético y disminuir el tamaño de la máquina. Si el estator y/o rotor son sujetos de campos variantes en el tiempo, el núcleo es laminado para reducir las pérdidas por las corrientes de Eddy.

En el ámbito constructivo, la diferencia existente con la máquina de inducción radica en sus rotores ya que se utiliza el mismo estator. Como consecuencia de las diferencias entre rotores, los modos de operación de ambas máquinas son también distintos. La máquina síncrona utiliza un estator

constituido por un devanado trifásico distribuido a 120° idéntico a la máquina asíncrona, el rotor está formado por un devanado alimentado desde el exterior a través de escobillas y anillos rozantes mediante corriente continua.

Debe suministrarse alimentación de CD al circuito de campo del rotor. Como éste está en movimiento (el rotor), es necesario adoptar construcciones especiales con el fin de suministrar energía al campo. La solución común es el uso de "anillos deslizantes y escobillas". Los anillos deslizantes son aros que rodean el eje de la máquina, pero aislados del mismo eje. Cada extremo (f y $-f$) del arrollamiento de la bobina de campo está conectado a un anillo y sobre cada anillo hace contacto una escobilla. Si a las escobillas se les conecta una fuente, en todo momento quedará aplicada la misma tensión al devanado de campo, sin importar velocidad o posición angular. Este método de anillos deslizantes causa a algún problema en las máquinas sincrónicas debido a que requieren mayor mantenimiento por la periodicidad con que deben revisarse su estado de desgaste. Además, la caída de tensión en las escobillas puede causar considerables pérdidas de potencia en las máquinas con altas corrientes de campo. A pesar de todo esto, el método es muy usado por su economía.

Principio De Funcionamiento

El principio de funcionamiento del motor síncrono se basa en la interacción de los campos magnéticos de rotor y estator. La corriente de campo I_f del motor produce un campo magnético B_R de estado estable. Un sistema de tensión trifásico se aplica al estator de la máquina, el cual producirá un flujo de corriente trifásica en los embobinados. Un sistema de corrientes trifásicas en un embobinado de inducido produce un campo magnético rotatorio uniforme B_S . Por tanto, hay dos campos magnéticos en la máquina y el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo del estator, tal como dos barras imantadas tratan de alinearse si se encuentran una cerca de la otra. Puesto que el campo magnético del estator está girando, el campo magnético del rotor (y el rotor mismo) constantemente tratarán de alcanzarlo. Cuanto más grande el ángulo entre los dos campos magnéticos (hasta cierto máximo) el motor síncrono, mayor el momento de torsión sobre el rotor de la máquina. El principio básico del funcionamiento de un motor síncrono es que el rotor de la máquina "cace" al campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo, sin que lo llegue a alcanzar.

Para mantener el par motor necesario en el rotor, este debe girar a una velocidad tal que sus polos cambien de posición al mismo tiempo que la corriente del estator alterna con la frecuencia; es decir, que un motor síncrono gira a una velocidad determinada por el número de polos, y por la frecuencia de la fuente de alimentación. Esta velocidad recibe el nombre de *velocidad síncrona*, y de ella recibe su nombre el motor, ya que girara a la velocidad síncrona y no a otra. Es necesario introducir el concepto de *ángulo par* con la finalidad de analizar la potencia transmitida del estator al rotor, a través del enlace magnético, en función del desfase espacial que se presenta entre sus respectivos campos magnéticos. Para fines de nuestro análisis consideraremos a la condición de operación en vacío, en que los campos de rotor y estator se encuentran alineados con sentidos opuestos (polos norte amarrados con polos sur), como la posición neutra del ángulo par, es decir, $\Phi = 0^\circ$. En la Fig. 1.19 se ilustran las posiciones de rotor y estator correspondientes a $\Phi = 0, 90, \pm 180$ y -90° , para una maquina síncrona de dos polos, en que los grados eléctricos y los grados mecánicos son de igual magnitud.

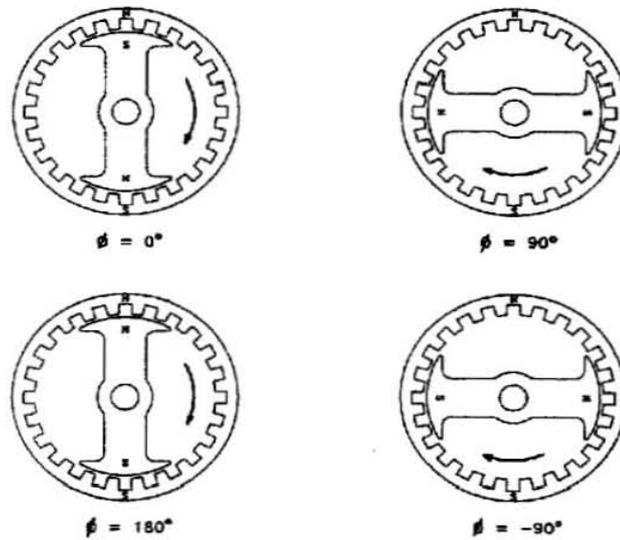


Fig. 1.19: Posición del rotor a diferentes valores de ángulo par

La aplicación del concepto anterior solo es válida cuando la maquina se encuentra girando a la velocidad síncrona, es decir, cuando el ángulo par está dentro del intervalo $-90^\circ \leq \phi < 0^\circ$ en la modalidad de generador, o $0^\circ < \phi \leq 90^\circ$ en la modalidad de motor. A fin de que este concepto sea aplicable a cualquier

maquina sincronía, independientemente de su numero de polos, es necesario expresarlo en grados eléctricos (ϕ_e) en función de los grados mecánicos (ϕ_m) y el numero de polos (p) por medio de la ecuación de conversión.

$$\phi = \frac{2\phi_m}{p} \quad 1.9$$

En la modalidad de motor, en la cual hemos enfocado nuestro estudio, los limites del intervalo corresponden a las condiciones de operación en vacío y carga máxima, respectivamente. Debido a que el rotor del motor sincrónico presenta pérdidas, es decir, entrega menos potencia de la que recibe, el valor del ángulo par nunca podrá ser cero, pues las pérdidas pueden ser consideradas como una pequeña carga. Por su parte, el límite máximo al que puede llegar el ángulo par es 90° , que representa el punto de máxima potencia que el motor puede entregar físicamente. Si se incrementa la carga por encima del límite definido por $\Phi_e = 90^\circ$, es decir el par resistente (el de la carga) supera al par máximo que puede desarrollar el motor, este sale de sincronismo al ser imposible para el rotor mantenerse amarrado con el campo sincrónico. Una vez que se a perdido la sincronía entre rotor y estator, el par desarrollado se anula y el motor tiende a detenerse debido a que existe un deslizamiento de alta velocidad relativa entre el campo del estator y los polos del rotor, resultándoles imposible volver a amarrarse. El comportamiento de la potencia transmitida en función del ángulo par se muestra en la grafica de la figura 1.20

Cuando el motor se encuentra trabajando de manera estable bajo una condición de carga dada, la cual se modifica súbitamente, se presenta una oscilación en su operación. El ángulo par tiende a adoptar el valor correspondiente a la nueva carga

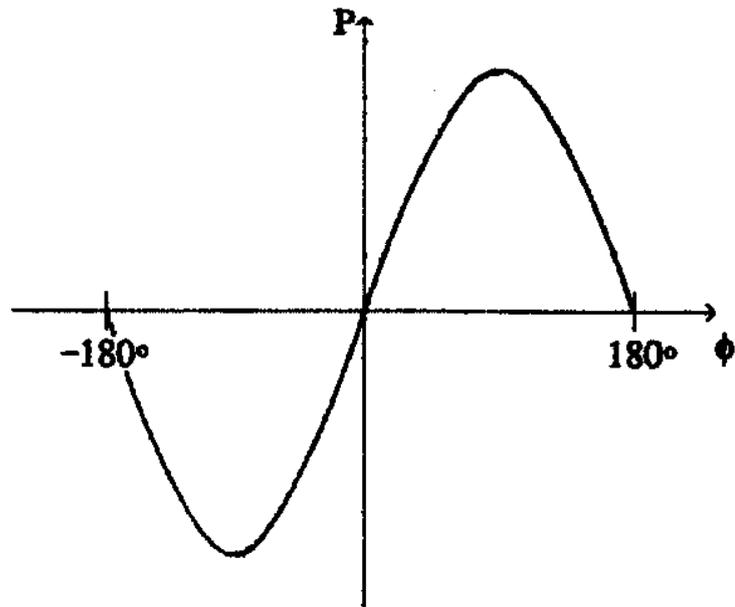


Fig. 20: Grafica Potencia Vs Angulo par

Curvas Características

Para comprender plenamente las características de operación del motor síncrono es necesario que nos auxiliemos en su circuito equivalente, modelo eléctrico que nos permite plantear relaciones fasoriales representativas de la tensión y las corrientes que intervienen en el proceso de transformación de energía. El modelo simplificado del motor síncrono muestra la relación entre la tensión interna (E) y la tensión en terminales (V) en función de la corriente de armadura (I_A) y la impedancia de los devanados, la cual está formada por una corriente resistiva (R_A) y una reactancia (X_s). La componente real de esta impedancia es constante pues corresponde a la resistencia de los devanados, mientras que la componente imaginaria, al estar ligada a la reactancia sincrónica, es variable en función de la corriente de excitación. En la Fig. 1.21 se muestra el circuito equivalente del motor síncrono.

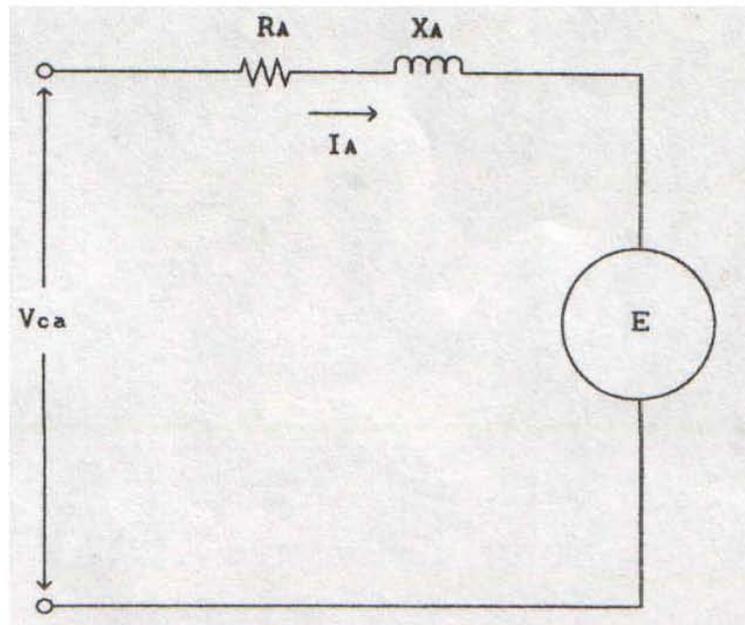


Fig. 1.21: Circuito equivalente del motor sincrónico

De acuerdo a las leyes fundamentales de los circuitos, la tensión interna está definida por la diferencia entre la tensión en las terminales del motor y la caída de la tensión que se presenta en las componentes resistivas y reactivas de los devanados debido a la circulación de la corriente de armadura, como lo indica la siguiente ecuación

$$E = V - I_A(R_A + jX_A) \quad 1.10$$

En la representación fasorial de la ecuación anterior resulta conveniente expresarla como suma, donde el fasor de tensión, que representa la referencia de ángulo cero, es la tensión terminal o externa como se muestra a continuación:

$$V = E + I_A(R_A + jX_A) \quad 1.11$$

Según la corriente de armadura se encuentre adelantada o atrasada con respecto a la tensión terminal, de la ecuación anterior se generaran los diagramas fasoriales correspondientes, los cuales aparecen en la Fig. 1.22.

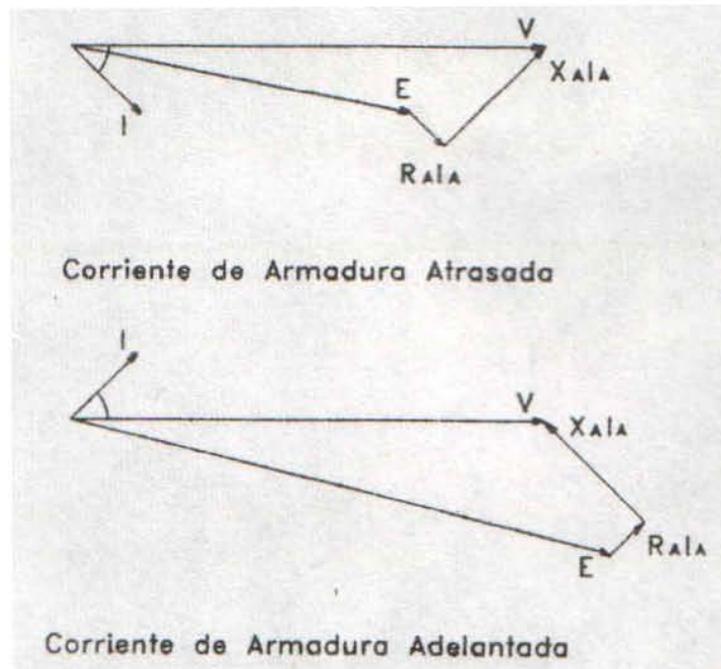


Fig. 1.22: Diagramas fasoriales de la corriente de armadura

Una característica singular del motor síncrono es que el factor de potencia al que opera se puede variar en función de la magnitud del campo de excitación. Lo anterior se puede apreciar en los diagramas fasoriales que aparecen arriba.

Cuando el motor opera con un factor de potencia unitario se dice que está *críticamente excitado*. Si la corriente de excitación es pequeña, el factor de potencia será atrasado, conociéndose este caso como *subexcitación*. El caso contrario, en que la corriente es grande, se tendrá un factor de potencia adelantado y esta situación se llama *sobreexcitación*. La curva que se obtiene al graficar la variación de la corriente de excitación contra la corriente de armadura (siendo esta última función de la tensión interna, el cual no es medible) se conoce como *curva V*, nombre que recibe por su perfil característico. Se acostumbra obtener varias curvas V para diferentes condiciones de carga a fin de caracterizar plenamente un motor síncrono. En la Fig. 1.30 se puede apreciar una familia típica de curvas V .

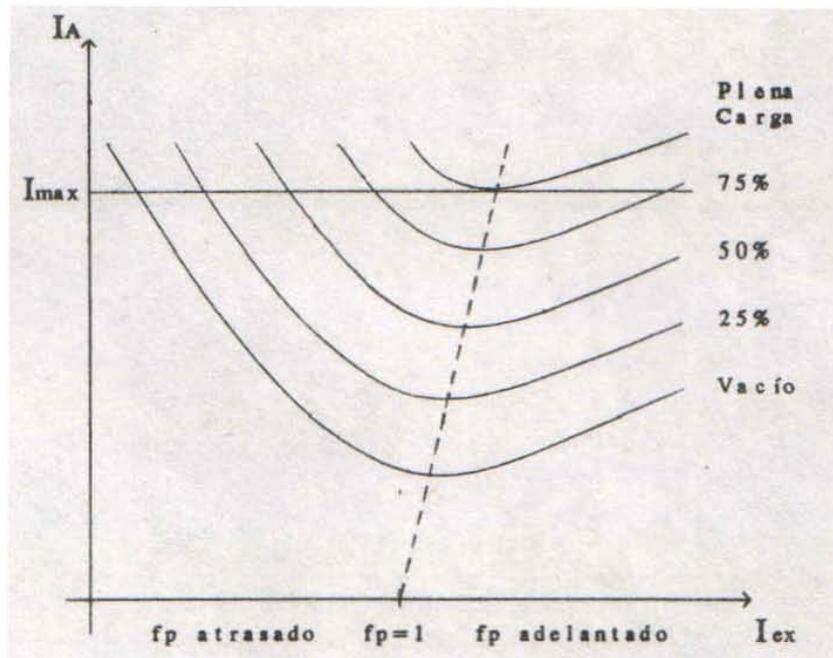


Fig. 1.23

La curva cuyo vértice se localiza en la intersección de las referencias de corriente de armadura máxima (límite de seguridad) y factor de potencia unitario corresponde a la carga nominal del motor, el cual forzosamente opera con factor de potencia unitario. Conforme disminuye la carga acoplada al motor, la curva V se desplaza hacia el eje de las abscisas, aumentando la gama de factores de potencia a los cuales puede trabajar el motor, ya sea adelantado o atrasado. La máxima variación del factor de potencia se logra cuando el motor opera en vacío, situación que se aplica en los sistemas eléctricos para corrección del factor de potencia. A un motor síncrono operando bajo estas circunstancias se le conoce como *compensador reactivo*.

II.- EL MOTOR DE DOS ARMADURAS (M2A)

2.1.- Elementos Que Conforman El Motor De Dos Armaduras

Algo que merece ser mencionado con respecto del motor de dos armaduras es el hecho de que a pesar de que una auténtica innovación tecnológica dentro del campo de las máquinas eléctricas, esto no implica que su construcción involucre elemento alguno que no exista actualmente en las demás máquinas eléctricas convencionales. De hecho, todos los elementos que constituyen el prototipo experimental en el cual hemos basado la investigación a la que se refiere esta tesis, fueron tomados directamente de máquinas de corriente directa y corriente alterna comunes. En este capítulo se explicará detalladamente la construcción física del nuevo motor de dos armaduras sin incluir la descripción de cada uno de sus elementos, pues al ser exactamente los mismos que los de otras máquinas, esto ya se llevó a cabo en los capítulos correspondientes.

Con el fin de lograr una familiarización con el ensamble del motor 2A, en el presente capítulo se han incluido fotografías del primer prototipo funcional en las que se resaltan algunas de sus características relevantes. Este material solamente deberá considerarse como auxiliar dentro del proceso descriptivo, pues de ninguna manera muestra la totalidad de los elementos que en conjunto conforman este motor.

La máquina 2A, al igual que cualquier otra máquina eléctrica rotatoria, es un dispositivo de conversión entre energía eléctrica y energía mecánica, y por lo mismo sigue los mismos principios de construcción en base a un rotor y un estator. Estos dos elementos se encuentran acoplados mecánicamente mediante los rodamientos del estator sobre los cuales descansa la flecha del rotor, obteniéndose, al observarse desde un corte perpendicular al eje de la máquina, un ensamble concéntrico. En la fotografía de la figura 2.1 se puede apreciar una vista general del prototipo experimental, en la que destaca el aspecto constructivo concéntrico en tomo a la flecha del rotor.

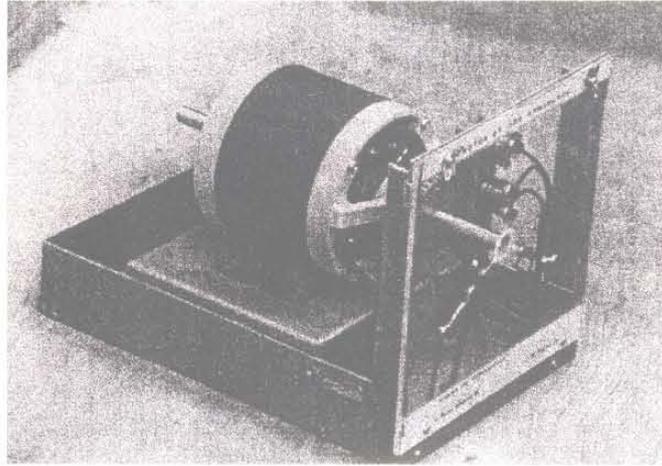


Fig. 2.1: El prototipo del motor 2A

En el caso específico del prototipo de motor 2A el cual se ha tomado de base para el desarrollo de la presente tesis, el rotor se tomó directamente de una máquina de CD y se instaló sin habersele hecho modificación alguna. El que este rotor haya sido funcional en su nueva aplicación no implica que en otros estudios posteriores, en que se profundice más en la teoría del motor 2A, se puedan hacer ajustes en su diseño a fin de lograr un funcionamiento más cercano al óptimo. El rotor utilizado tiene 25 ranuras en las cuales se aloja un devanado ondulado tipo *duplex* (doble capa), diseñado para generar cuatro polos magnéticos cuando es polarizado a través de dos escobillas mediante una fuente de CD. La tensión nominal de alimentación de este rotor es de 80 [V], teniendo capacidad de conducción de una corriente a plena carga de 3 [A], la cual se divide en dos partes iguales que circulan en las dos ramas que en conjunto conforman el devanado.

En el caso del estator, el cual formaba parte originalmente de una máquina de corriente alterna convencional, sí fue necesario llevar a cabo una modificación a fin de adaptarlo para su uso en el motor de dos armaduras. Dicho cambio consistió en agregar un portaescobillas con objeto de alimentar, a través del conmutador, a los devanados del rotor con corriente alterna trifásica, con lo que se obtiene una característica constructiva que a simple vista resulta fuera de lo común en el ámbito de las máquinas eléctricas, al tratarse de un motor de corriente alterna. Más extraño aún es el hecho de que se requieran precisamente tres escobillas para su operación o, en caso de que el devanado

del rotor fuera imbricado, un número de escobillas múltiplo de tres. En las fotografías de las figuras 2.2 y 2.3 se puede apreciar con toda claridad la disposición de las tres escobillas, separadas 120° geométricos entre sí, sujetas por medio del portaescobillas en torno al conmutador del rotor.

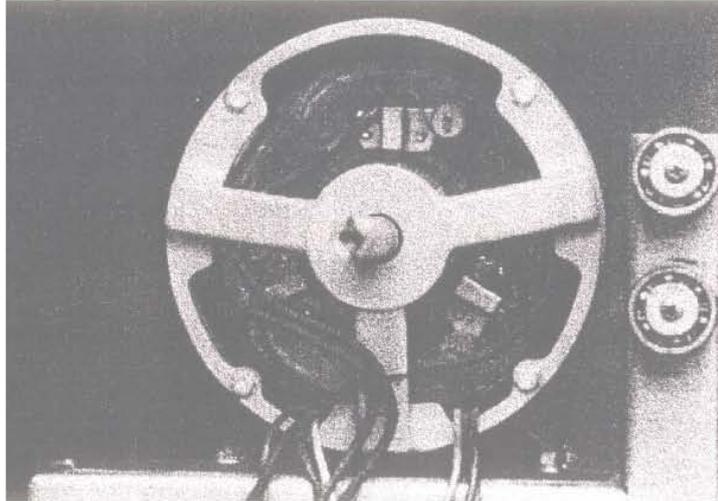


Fig. 2.2: Portaescobillas

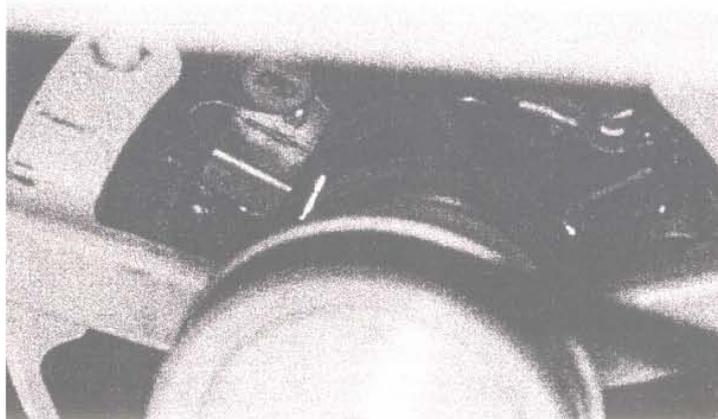
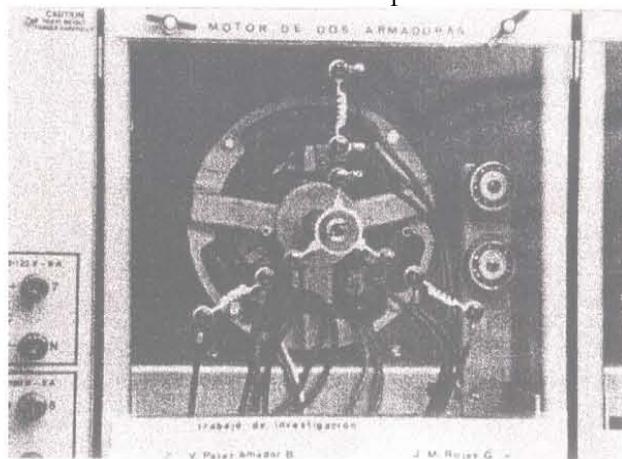


Fig. 2.3: Conmutador

El núcleo del estator cuenta con 24 ranuras en las que está alojado un devanado tipo duplex (doble capa) trifásico diseñado para alimentarse a 127 o 220 [V], para conexiones Δ y Y respectivamente, con capacidad de conducción de corriente a plena carga de 1.5 [A]. El estator también está diseñado para generar cuatro polos magnéticos, resultando posible, como se demostrará en el

siguiente capítulo, el acoplamiento de su campo magnético con el generado por el rotor. El estator se tomó directamente de una máquina de inducción trifásica ya existente, cuidando que sus dimensiones y características generales fueran las adecuadas para poderse acoplar mecánicamente con el rotor de motor de CD previamente elegido.

Para facilitar el manejo a nivel experimental del prototipo del motor de dos armaduras, en cuanto a la posibilidad de alambrear las diferentes conexiones de los devanados trifásicos de rotor y estator mediante cualquier combinación serie-paralelo y Δ -Y, se dejó libre acceso a las terminales de cada devanado a través de bornes de conexión montados sobre una carátula frontal, en la cual se muestran de forma esquemática e independiente las bobinas que conforman los respectivos devanados, como se puede apreciar en la fotografía de la figura 2.4. La construcción del prototipo se efectuó tomando piezas de diversas máquinas eléctricas pertenecientes al sistema modular experimental *Lab~Volt®*, de tal forma que el nuevo motor mantuviera el esquema modular y pudiera acoplarse con todos los demás componentes del sistema.



Fotografía 2.4

2.2.- Principio De Funcionamiento

Proceso de conmutación en el rotor

El funcionamiento del motor de dos armaduras es posible gracias a la existencia de un ángulo par constante que resulta del desfase angular entre los campos de rotor y de estator, para una condición de operación

específica. Al ser estos dos campos giratorios, la única manera de mantener constante este ángulo de desfase radica en que ambos campos deben girar estrictamente a la misma velocidad, en este caso la síncrona. La única forma de evitar que la velocidad del campo magnético del rotor sea afectada por la velocidad de rotación del rotor mismo, y por lo tanto se mantenga siempre en sincronismo, consiste en la utilización de un conmutador. Este dispositivo, como ya se mencionó en el capítulo referente al motor de CD, permite independizar el estado de giro del rotor con respecto al de su campo magnético. El prescindir de este elemento (sustituyéndolo por ejemplo por anillos de contacto, que mantienen una alimentación fija en cada devanado) significaría que a la velocidad de giro del campo magnético se le tendría que sumar algebraicamente la correspondiente al rotor.

Para el caso de un rotor originalmente estático en que las corrientes fluyen en sus devanados como se muestra en la Fig. 2.5, el campo magnético se encuentra girando en régimen permanente con magnitud constante y a la velocidad síncrona. Cuando el rotor comienza a girar, su velocidad se suma inicialmente a la del campo magnético, pero sólo hasta el momento en que ocurre el proceso de conmutación, período muy breve en que el conmutador se desplaza angularmente sobre las escobillas la distancia equivalente a una delga, volviendo el campo magnético a su estado de giro original. Por lo tanto, se puede afirmar que el campo magnético se mantiene en sincronismo, independientemente del estado de giro o reposo del rotor.

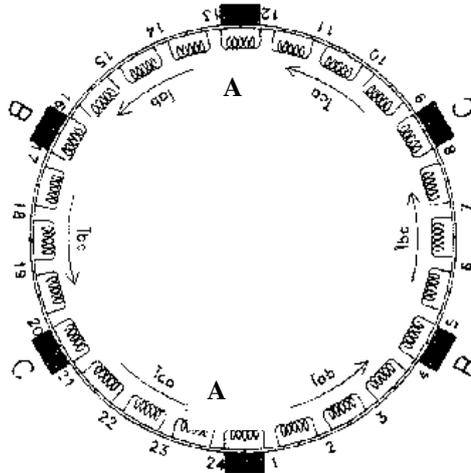


Fig. 2.5: Devanado del rotor

Acoplamiento de armaduras

En la generalidad de las máquinas eléctricas rotatorias se cuenta con un devanado de campo y un devanado de armadura. Según el tipo de máquina eléctrica, éstos se pueden localizar ya sea en el rotor o en el estator. La corriente del devanado de campo se caracteriza por ser prácticamente constante ante desviaciones en torno a la operación nominal de la máquina, mientras que la corriente del devanado de armadura varía en forma proporcional a la carga. Con la introducción del rotor de CD alimentado con corriente alterna trifásica en un estator típico de una máquina de CA se obtiene una configuración peculiar, ya que ambas corrientes (de rotor y de estator) varían en función de la carga, observando un comportamiento que coincide con el definido para las corrientes de armadura. Esta peculiaridad justifica plenamente el referirnos a este innovador dispositivo como máquina de dos armaduras.

Dada la existencia de dos armaduras en esta máquina, a fin de evitar confusiones en cuanto a cual de ellas nos referimos, las denominaremos en función del elemento de la máquina en el que se generan sus campos magnéticos, ya sea el rotor o el estator. Por lo tanto, al hablar de una corriente o un campo magnético de rotor o de estator, sabremos de antemano que se trata de la corriente o el campo magnético asociados a la armadura del rotor o a la del estator.

El acoplamiento de los campos magnéticos de rotor y estator se lleva a cabo mediante principios muy similares a los estudiados en el capítulo referente a la máquina síncrona. Los elementos que intervienen en este proceso son de hecho los mismos (ángulo par, carga acoplada y velocidad). Sin embargo existe un comportamiento dinámico radicalmente diferente, pues en la máquina síncrona el ángulo par se ajusta a la carga acoplada, bajo condición estricta de velocidad constante (síncrona), mientras que en la máquina de dos armaduras el ángulo par se ajusta por medio del desfaseamiento entre las tensiones de alimentación al rotor y al estator, variando la velocidad en función de éste para una condición de carga dada. Esta característica de respuesta, nunca antes vista en máquinas eléctricas rotatorias de corriente alterna, se debe a una singular interacción entre los campos magnéticos de rotor y de estator.

En el estudio de viabilidad magnética quedó demostrado que el campo magnético generado en el rotor es giratorio, al igual que el generado en un estator típico de una máquina de corriente alterna, por lo cual se les considera compatibles. Al introducir el rotor dentro del estator y alimentarlos en paralelo con una misma fuente trifásica, circularán en sendos devanados corrientes de armadura que producirán los campos magnéticos respectivos. Si en este momento la posición de las escobillas sobre el conmutador no corresponde a su punto neutro, en que el desfase existente entre los campos magnéticos giratorios de rotor y de estator valen cero, el campo magnético del rotor tiende forzosamente a alinearse con el del estator, arrastrando al rotor mismo en el proceso. Debido a la acción de conmutación que se presenta al desplazarse angularmente el rotor para cualquier posición de las escobillas diferente del punto neutro, el alineamiento entre los campos jamás se puede consumir, tal como se explicó en el capítulo referente al motor de CD. El principio de fijación de un ángulo par constante es la base del funcionamiento del motor de dos armaduras, y como se explicará a continuación, una de sus virtudes.

El comportamiento del motor 2A gira en torno al ajuste de su ángulo par, procedimiento que se lleva a cabo al desfase angularmente las alimentaciones del rotor y del estator. Este ajuste se puede realizar de dos formas distintas. La primera de ellas consiste en alimentar directamente a las dos armaduras con tensiones desfasadas entre sí, lo cual se puede llevar a cabo mediante el uso de fuentes independientes para rotor y estator, o bien alimentándolos en paralelo con una sola fuente intercalando un dispositivo de control de fase (ej. un motor de inducción con rotor bobinado) entre la fuente y una de las armaduras. La segunda opción consiste en un ajuste mecánico que se logra con la rotación del portaescobillas sobre el conmutador. Si tomamos uno de las tensiones de armadura como referencia, podemos definir el sentido de giro del motor en función del adelanto o atraso en la fase de otra tensión.

Desde un punto de vista dinámico, la fijación a voluntad del ángulo par en un valor específico nos brinda características sin precedente, pues se obtiene la posibilidad del control total sobre la fuerza de amarre que actúa sobre el rotor, y por lo tanto de su estado de giro o reposo. Esta última aseveración se fundamenta en el hecho de que, para una determinada carga acoplada, a cada valor del ángulo par corresponde una y solo una velocidad de operación, incluyendo el estado de reposo, en que el ángulo par vale cero. De acuerdo a este comportamiento dinámico, al cambiar súbitamente el ángulo par de un

motor 2A que se encuentra operando a una cierta velocidad, se presenta un transitorio en su operación durante el cual la velocidad se ajusta hasta quedar fija en el valor asociado al nuevo ángulo par, proceso que se lleva a cabo con una elevada rapidez de respuesta.

La respuesta dinámica del motor 2A involucra la capacidad de entregar o absorber grandes cantidades de energía en períodos de tiempo pequeños, razón por la cual es factible que se presenten considerables variaciones de su velocidad (aceleración o frenado), aún bajo condiciones de carga de alta inercia. Esta respuesta es tan poderosa que aplica inclusive a situaciones en que el ajuste de ángulo par involucra un cambio en el sentido de giro del rotor.

Otra enorme ventaja que brinda el poder manipular y fijar el ángulo par a voluntad radica en que, a diferencia de la máquina síncrona, no existe la posibilidad de que se presenten problemas de inestabilidad en su operación. En el caso del motor síncrono, como ya se explicó en el capítulo correspondiente, el ángulo par depende de la carga acoplada, lo cual limita su rango de operación estable entre los 0 y 90° eléctricos. Al modificarse súbitamente la condición de carga de este tipo de motor, el ángulo par oscila pudiendo sobrepasar el límite de los 90°, caso en que se pierde fuerza de amarre entre rotor y estator y como consecuencia, según la severidad del transitorio, puede llegar a perderse la sincronía entre ambas partes. En cambio, al ser imposible que el ángulo par oscile en el motor 2A, podemos operarlo en cualquier punto de la curva característica potencia-ángulo par, teniéndose la certeza de que entregará la potencia asociada a ese punto de operación sin que se presenten problemas de inestabilidad. Resulta importante recalcar que, como en el caso de la máquina síncrona, la potencia máxima transmitida corresponde a un valor del ángulo par de 90°.

Una característica de respuesta tan violenta como la de este motor involucra forzosamente el intercambio de una enorme cantidad de energía a través del enlace magnético entre las armaduras. Este intercambio energético, que se aplica tanto en la aceleración como en el frenado del rotor, ocurre durante los breves instantes en que se ajusta la velocidad y, en su caso, el sentido de giro (caso más crítico). Resulta evidente que esta energía no se genera ni se consume internamente en los enlaces magnéticos del motor, sino que forzosamente se debe canalizar a través de los devanados de éste y de los alimentadores del sistema eléctrico asociado, produciéndose corrientes de gran intensidad capaces de someter a los elementos de la máquina a considerables

esfuerzos mecánicos y/o térmicos. A pesar de que el motor 2A tiene la cualidad de poder tener aplicada la tensión nominal en sus terminales con el rotor bloqueado sin la típica demanda de altas corrientes que tienen otros motores, esto no implica que durante el arranque o cualquier otro transitorio ocasionado por ajustes en el valor del ángulo par, la intensidad de estas corrientes no se incremente varias veces por encima de su valor nominal, como se mencionó anteriormente.

2.3.- Análisis De Su Respuesta

2.3.1.- Teóricamente

En esta parte del capítulo se desarrollará un estudio teórico a fin de explicar la operación del motor 2A, apoyándonos en la teoría clásica de las máquinas eléctricas. Para lograr este objetivo se recurrirá a las referencias teóricas contenidas en los capítulos anteriores, en cuyas conclusiones se hicieron notar de antemano los aspectos relevantes para su uso en el estudio de este nuevo motor. Se explicarán detalladamente las particularidades tanto físicas como operativas que tienen lugar al interactuar, en el marco de un extraño ensamble nunca antes utilizado, los componentes de máquinas eléctricas comunes.

Alimentación trifásica del rotor

A fin de comprobar la posible alimentación de un rotor típico de una máquina de CD con corriente alterna trifásica, se requieren efectuar dos análisis de viabilidad, uno desde un punto de vista eléctrico y el otro desde un punto de vista magnético. El primero de ellos tiene como objetivo verificar que, al llevarse a cabo la conexión de la fuente de alimentación trifásica con las delgas del conmutador a través de las escobillas, existan trayectorias por las cuales puedan circular las corrientes balanceadas propias de un sistema trifásico sin que se presenten cortocircuitos entre cualesquiera de sus fases. El segundo análisis está enfocado al estudio del campo magnético generado a raíz de la circulación de las corrientes en los devanados y su capacidad de acoplamiento con los campos magnéticos giratorios característicos que se generan en el estator de las máquinas de corriente alterna convencionales.

Para llevar a cabo el estudio de viabilidad eléctrica nos auxiliaremos de un circuito equivalente simplificado del rotor que muestra la simple conexión eléctrica de las delgas del conmutador con los devanados y las escobillas. Para el caso de los devanados imbricado y ondulado, cuyas bobinas se encuentran conectadas al conmutador tal y como se describió en el capítulo referente a la máquina de CD, los circuitos equivalentes son los que se muestran en la Fig. 2.6.



Fig. 2.6

Mediante el análisis topológico de las Figuras anteriores resulta evidente que para ambos casos las bobinas de los devanados presentan una configuración eléctrica en Δ (delta), perfectamente balanceada en el caso del devanado imbricado, y con un desbalance pequeño en el caso del ondulado. Esta configuración es sumamente común en todo tipo de cargas eléctricas

trifásicas y elimina por completo la posibilidad de cortocircuito al efectuar la conexión. Por lo tanto concluimos que la alimentación trifásica de un rotor de CD es eléctricamente viable, y por lo tanto su aplicación en el motor de dos armaduras es perfectamente válida. La distribución física de las bobinas para los dos tipos de devanado se muestra en las figuras 2.7a y 2.7b. Resulta pertinente enfatizar que la posición de las escobillas corresponde a una alimentación trifásica del rotor, exclusiva del nuevo motor de dos armaduras. Nótese que en el devanado imbricado se tienen tres escobillas por cada par de polos magnéticos, mientras que en el devanado ondulado siempre se tendrán solamente tres, independientemente de su número de polos.

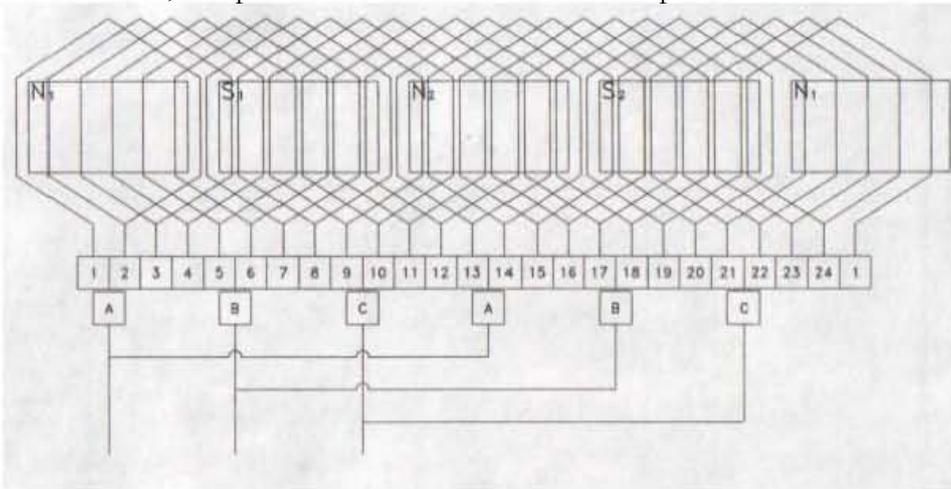


Fig. 2.7a

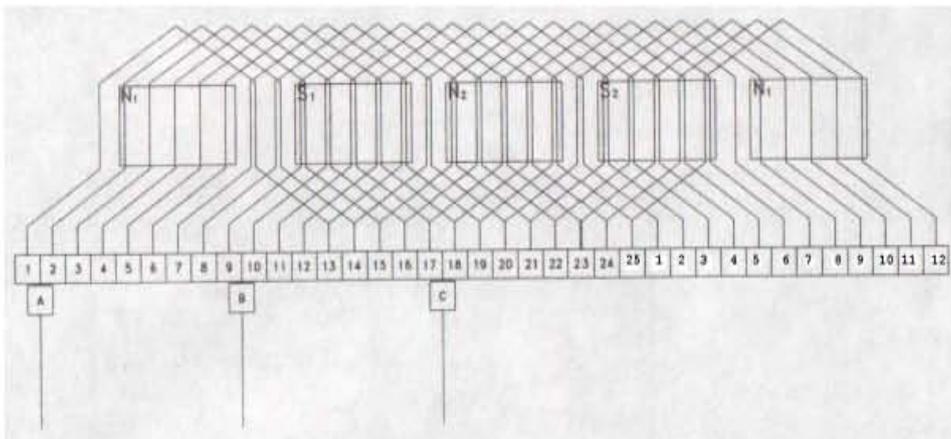


Fig. 2.7b

En general, para que los campos magnéticos de rotor y estator de cualquier máquina eléctrica puedan interactuar adecuadamente, éstos deben ser compatibles, es decir, deben compartir algunas características entre las cuales destacan tener igual número de polos y encontrarse ambos ya sea en estado de giro o de reposo. Considerando que el campo magnético producido por el estator de corriente alterna trifásica es giratorio, el objetivo del presente análisis es comprobar la compatibilidad magnética de este campo con el generado en un rotor de CD alimentado trifásicamente. El análisis dinámico, continuo en el tiempo, de los campos generados a partir de la circulación de corrientes por los devanados del rotor destaca por su enorme grado de complejidad. Por esto hemos simplificado significativamente este estudio mediante el uso del teorema de superposición, aplicado bajo las consideraciones que se explican a continuación.

En primer instancia hemos considerado para todo fin práctico que el circuito magnético opera en la región lineal de la curva de saturación de su núcleo, por lo que el campo magnético total será la suma de los campos magnéticos producidos independientemente por cada una de las corrientes fase a fase en la Δ . El diseño óptimo de todo motor eléctrico contempla su operación dentro de la zona de transición de la curva de saturación, en que comienza a perder la linealidad. Puesto que hemos despreciado esta característica, el resultado de nuestro análisis puede resultar inexacto desde un punto de vista cuantitativo. Sin embargo, desde un punto de vista cualitativo resulta apropiado para describir las características del comportamiento de este campo magnético, objetivo fundamental que se persigue mediante el presente estudio de viabilidad.

Por otra parte hemos considerado que el campo generado sigue a la polaridad de la fuente de alimentación, lo cual significa que al contarse con tres fuentes de alimentación cuya polaridad es alternante de manera senoidal, los campos magnéticos generados por cada una de las fuentes también tendrán un comportamiento senoidal de acuerdo al mismo régimen de variación.

Con objeto de lograr una mayor simplicidad, nuestro estudio de viabilidad magnética contempla el uso de fuentes de CD y por lo tanto campos magnéticos estáticos en el tiempo y en el espacio, a sabiendas de que al ser

sustituidas por las fuentes de corriente alterna originales, obtendremos entonces los campos magnéticos alternantes mencionados en el párrafo anterior. La validez de este procedimiento se puede demostrar de acuerdo a los argumentos que enseguida se exponen.

Si excitamos con corriente directa un circuito magnético que opera dentro de la región lineal de su curva de saturación, se genera un campo magnético estático en el tiempo y en el espacio de acuerdo a las leyes fundamentales del electromagnetismo. Al invertir la polaridad de la fuente de excitación necesariamente se invertirá el sentido de la corriente que fluye de sus terminales y, por ende, también cambiará el sentido del campo magnético. Una fuente de corriente alterna, cuya característica fundamental es la de variar la magnitud e invertir periódicamente la polaridad de la tensión en sus terminales en función del tiempo, produce un campo magnético de iguales características a las de esta alimentación.

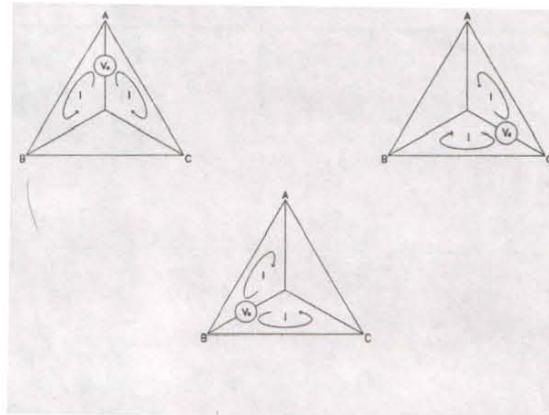


Fig. 2.8

A partir de las premisas anteriores, si aplicamos de manera independiente las tres fuentes de CD V_a , V_b y V_c , como se muestra en la Fig. 2.4. Obtendremos la circulación de corrientes en los devanados correspondientes a cada alimentación, tal como aparecen en las figuras 2.9a, 2.9b y 2.9c para el devanado imbricado y en las figuras 2.10a, 2.10b y 2.10c para el devanado ondulado. Nótese que la disposición de las corrientes es totalmente simétrica en el caso del devanado imbricado, mientras que muestra un ligero desbalance en el caso del devanado ondulado.

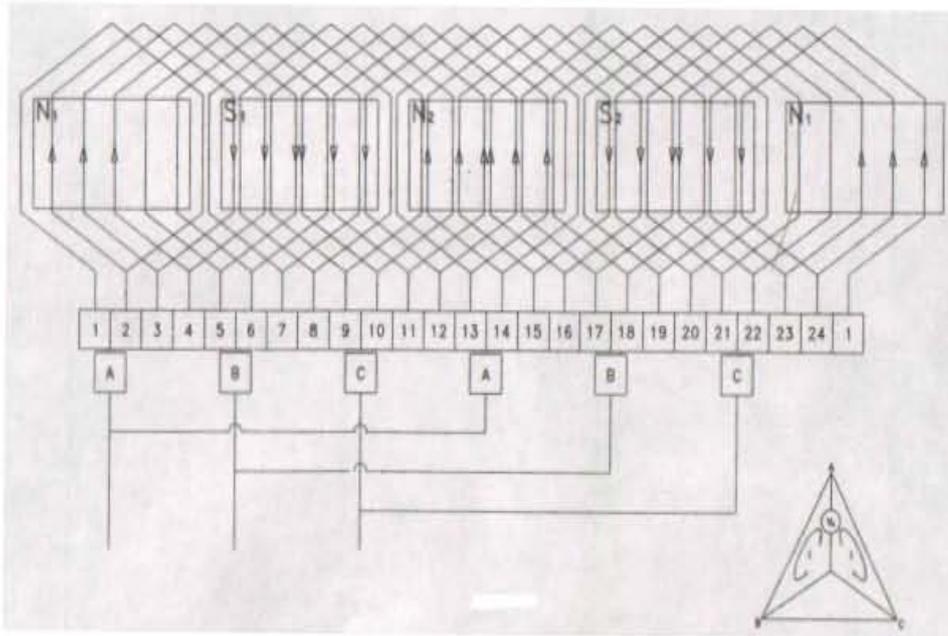


Fig. 2.9^a

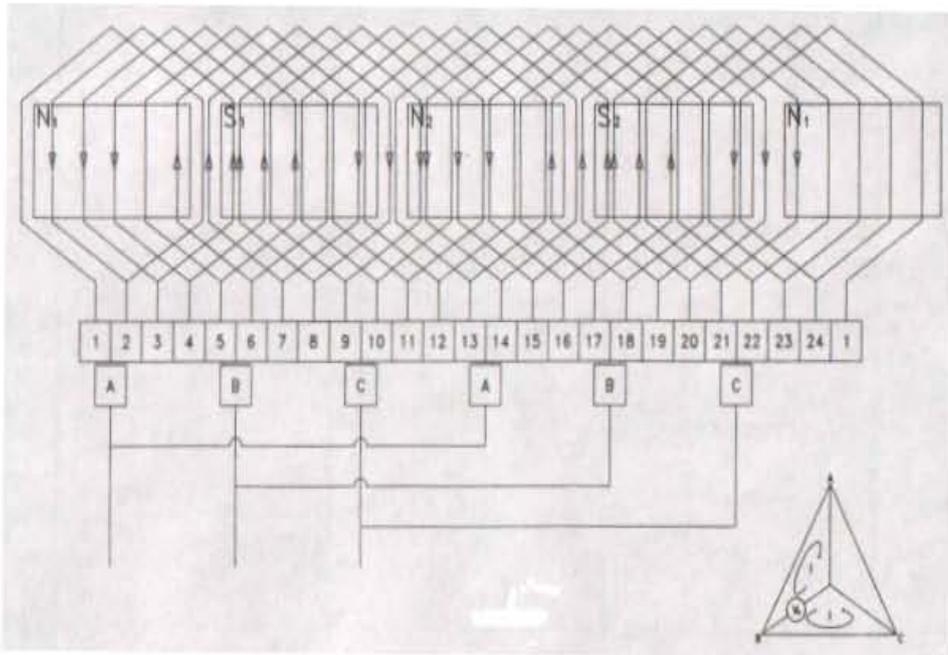


Fig. 2.9b

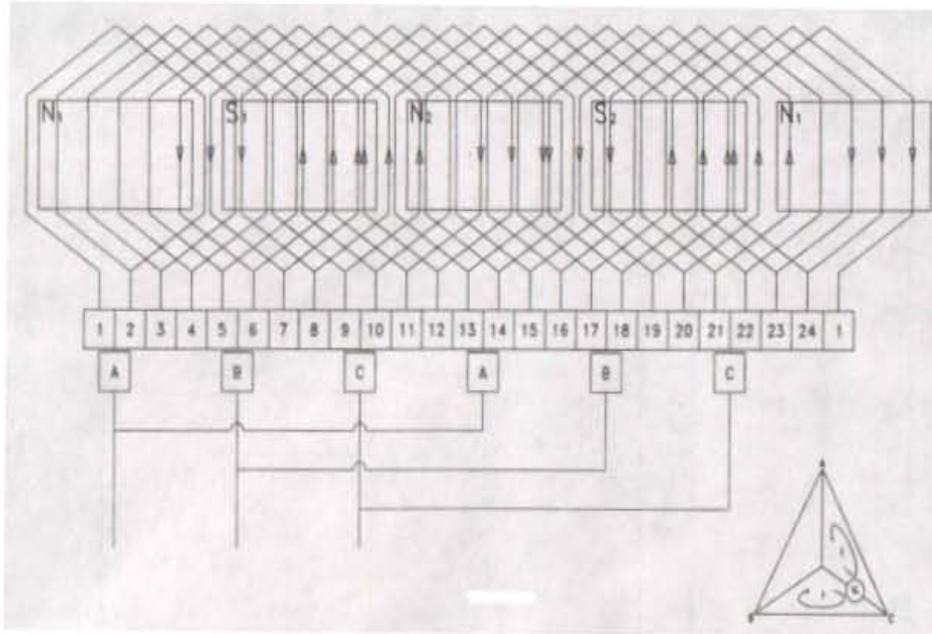


Fig. 2.9c

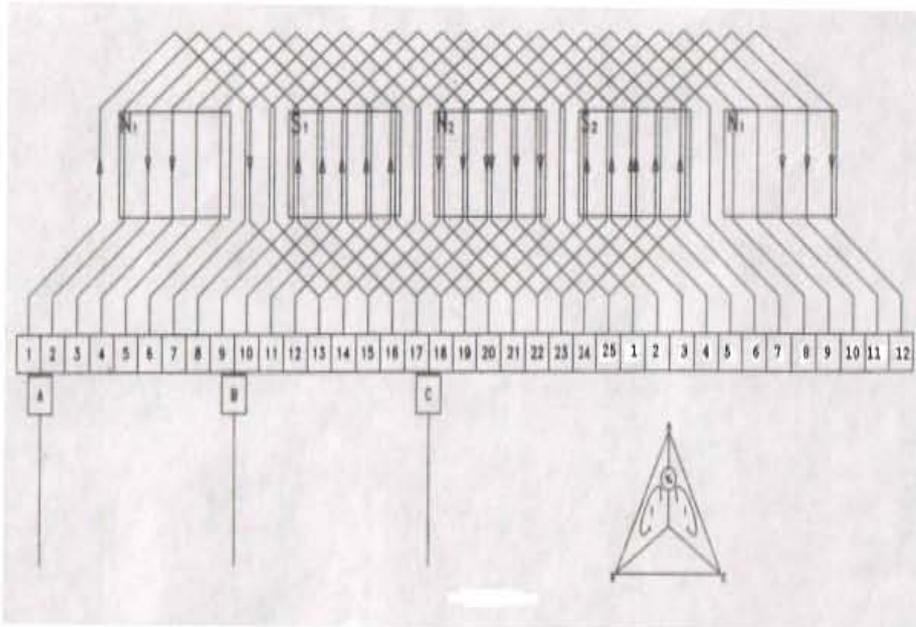


Fig. 2.10a

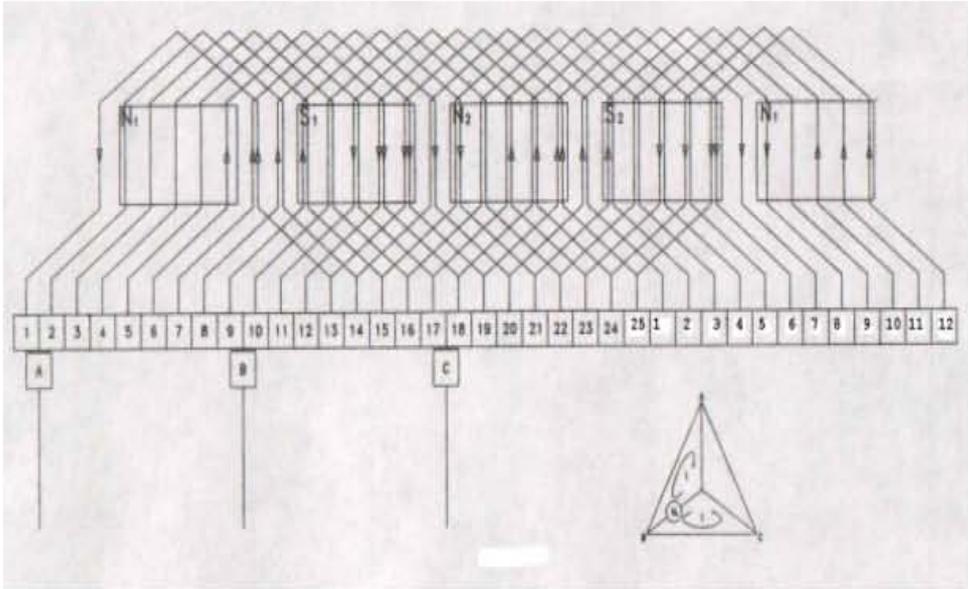


Fig. 2.10b

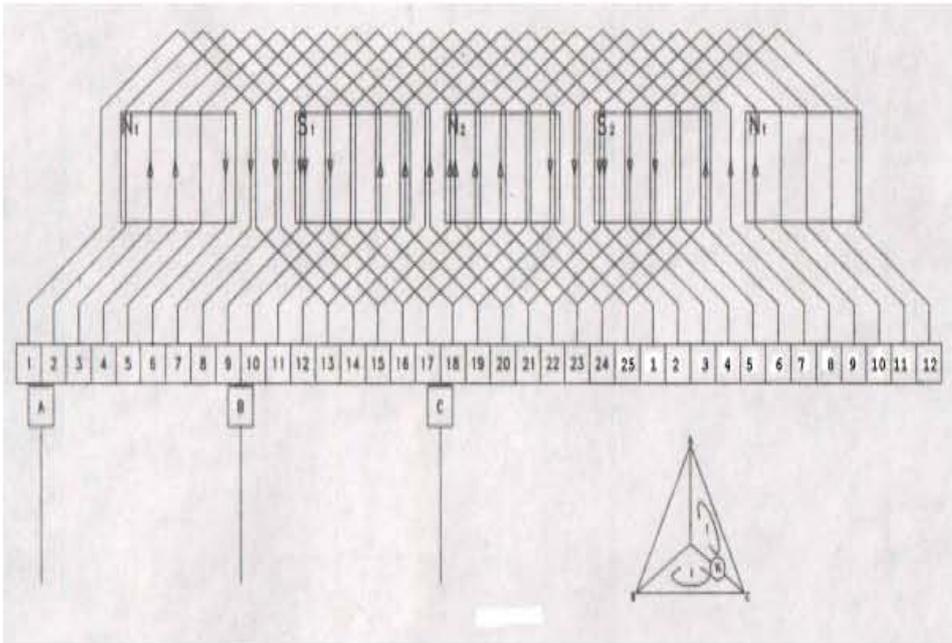


Fig. 2.10c

Al aplicar la regla de la mano derecha con el fin de obtener los campos magnéticos generados independientemente a partir de la circulación en los devanados de las corrientes correspondientes a cada fuente, nos percatamos de que éstos se encuentran desfasados entre sí un ángulo de 120° eléctricos. Considerando que los campos magnéticos son en realidad alternantes, se tiene como resultante un campo magnético giratorio de magnitud constante, de acuerdo con la demostración expuesta en el capítulo correspondiente al motor de inducción. Al existir compatibilidad entre este campo magnético y los generados por los estatores típicos de máquinas de corriente alterna trifásica, se demuestra la viabilidad magnética del rotor de CD al ser alimentado trifásicamente a fin de ser aplicado en el nuevo motor de dos armaduras. A continuación, en la Fig. 2.11 se ilustra la configuración espacial del campo magnético giratorio de cuatro polos para un corte normal al eje del rotor.

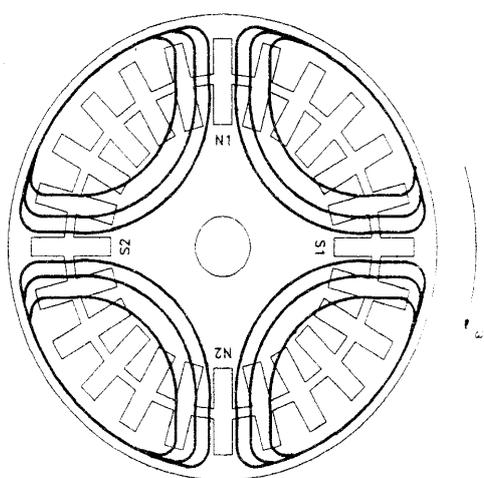


Fig. 2.11

2.3.2.- Experimentalmente

Dados los fines de esta tesis, se ha experimentado en el primer prototipo del motor 2A con el fin de entender mejor el funcionamiento del mismo, dado que su construcción no se puede considerar óptimo pues se ensambla a partir de elementos de otras máquinas, nos limitamos a caracterizar el motor 2A mediante la aplicación de la prueba de obtención de la curva par-velocidad. Esta prueba es relevante pues resalta una de las mayores virtudes de

este motor, que es la tendencia asintótica del par conforme la velocidad se aproxima a cero.

Una de las pruebas que se podría considerar prácticamente aplicable a todo tipo de motores, no solamente eléctricos, si no también térmicos e hidráulicos, es la medida del par y la velocidad a diferentes regímenes de carga. Si se considera al motor como una fuente de energía mecánica, resulta muy sugestivo establecer una analogía de comportamiento con las fuentes de energía eléctrica. Las características de la carga son las que determinan la intensidad de corriente circulante, de manera que la fuente solo proporciona (con la única limitación de su capacidad) lo que la carga le exija. De manera similar en los motores existe una velocidad, pero solamente desarrolla par mecánico cuando entra en acción la carga. Igual que sucede en las cargas eléctricas, para los motores son las cargas mecánicas las que determina el par y la potencia que deben desarrollar, también dentro de las limitaciones de su capacidad. Por lo tanto, los motores no necesariamente tienen que estar operando en todo momento a su potencia nominal. Esta especificación únicamente indica la máxima carga que son capaces de mover, pero pueden trabajar a cualquier régimen variable o continuo, que se localice entre las condiciones de vacío y las nominales, o inclusive, sobrepasarlas por un corto periodo, si a continuación hay posibilidades de recuperación. Es por esto, que se trata de investigar el comportamiento de los motores a diferentes regímenes de carga.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, se puede afirmar que las cargas accionan sobre los motores mediante un par, cuyo sentido es en oposición a la velocidad. Los motores reaccionan desarrollando un par mecánico a favor de la velocidad, conservando el movimiento y motivando un flujo de potencia, nótese que se dice “conservando el movimiento”, ya que el valor de la velocidad frecuentemente varía de acuerdo con el régimen de carga. (este es el caso de los motores de inducción). Analizando ahora con mas detenimiento el comportamiento de las cargas, se observa que accionan de manera similar a los frenos, es decir, en oposición a la velocidad. Sin embargo, es conveniente generalizar el concepto de freno, en vista de que se tiene conocimiento familiarizado de frenos industriales, o los frenos de los vehículos automotores, que operan solo por un momento hasta anular totalmente la velocidad.

Las cargas se comportan como frenos de acción continua y permiten a los motores conservar su movimiento, de modo que para simular en el laboratorio cualquier tipo de carga, se acopla el motor a un freno que se comporte según lo descrito. Es la razón de que al consultar las especificaciones de ciertos motores, frecuentemente se observa que el fabricante se refiere a la “potencia al freno”

Prueba al motor 2A

Probablemente la preparación del equipo para esta prueba es la que requirió mas tiempo, ya que acoplar el motor al electro dinamómetro implica maniobras y precauciones muy minuciosas. En base al equipo disponible en el laboratorio procedimos a utilizar un acoplamiento por banda, lo cual nos genera perdidas de potencia por transmisión, en esto también influye el paralelismo entre flechas. En el caso de acoplamiento por banda, es muy importante tener en cuenta que se transmite una potencia mecánica (en forma similar a como los transformadores transmiten una potencia eléctrica), de modo que el par aumenta en la proporción que disminuye la velocidad. Por tanto, el par leído en el electrodinamómetro no es el par del motor. Si se requiere una prueba muy rigorista habrá que tener en cuenta la eficiencia y el deslizamiento de las bandas; en caso contrario, se pueden despreciar. El diagrama de conexión del equipo se muestra en la figura 2.12.

La obtención de la curva par-velocidad se logra al operar el motor 2A en todo su rango de velocidades aplicando diversas cargas mecánicas, mediante el ajuste de la corriente de excitación de un dinamómetro, instrumento que a su vez sirvió para registrar el par asociado a cada condición de carga y el cual se describió anteriormente. La medición de la velocidad correspondiente a cada carga se lleva a cabo utilizando un tacómetro de arrastre acoplado a la flecha del motor. Los valores registrados para velocidades comprendidas dentro del intervalo 2060 [v [3360 [rpm], esto es debido a medidas de seguridad ya que no es recomendable trabajar un electrodinamómetro a mayor velocidad que la nominal, por que las fuerzas centrífugas (que aumentan en función del cuadrado de la velocidad) generadas en el rotor podrían provocar la destrucción del mismo, y posiblemente de toda la maquina, con el peligro de que este accidente resulte de consecuencias graves para las personas que se encuentran cerca; se muestran en la tabla II, La curva par-velocidad (grafica 2.1) se muestra también a continuación.

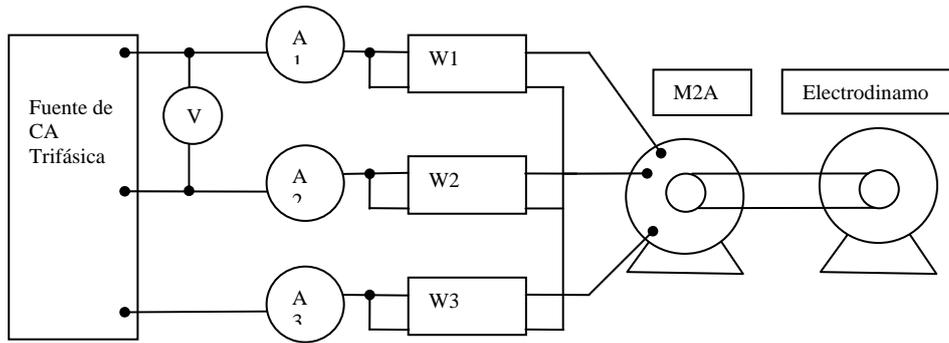


Fig. 2.12: Diagrama de conexión para la prueba del moto 2A

Tensión [V]	Par [Lbin]	Velocidad [rpm]	A1	A2	A3	Corriente Total [A]	W1	W2	W3	Potencia Eléctrica [W]
120	0.1	3360	1.1	1	0.8	0.966666667	40	36	39	115
120	0.2	3120	1.2	1.1	1.1	1.133333333	45	41	44	130
120	0.305	2960	1.4	1.2	1.2	1.266666667	52	48	50	150
120	0.395	2800	1.7	1.4	1.3	1.466666667	58	55	57	170
120	0.505	2680	1.8	1.7	1.5	1.666666667	63	59	60	182
120	0.6	2615	2	1.8	1.7	1.833333333	67	63	65	195
120	0.7	2480	2.1	2	1.8	1.966666667	70	66	68	204
120	0.805	2300	2.3	2.1	2	2.133333333	72	68	72	212
120	0.9	2290	2.4	2.2	2.2	2.266666667	75	72	75	222
120	1.05	2246	2.4	2.3	2.2	2.3	76	74	75	225
120	1.16	2060	2.7	2.5	2.3	2.5	80	78	78	236

Tensión [V]	Par [Lbin]	Velocidad [rpm]	Potencia Mecánica [W]	Factor de potencia	Eficiencia [%]	Potencia Aparente [VA]
120	0.1	3360	3.9770659	0.99137931	3.458318174	116
120	0.2	3120	7.385979528	0.955882353	5.681522714	136
120	0.305	2960	10.6859973	0.986842105	7.123998203	152
120	0.395	2800	13.09117525	0.965909091	7.700691326	176
120	0.505	2680	16.01952675	0.91	8.801937776	200
120	0.6	2615	18.57147737	0.886363636	9.52383455	220
120	0.7	2480	20.54817382	0.86440678	10.07263422	236
120	0.805	2300	21.91529022	0.828125	10.33740105	256
120	0.9	2290	24.39503815	0.816176471	10.98875593	272
120	1.05	2246	27.91403128	0.815217391	12.40623613	276
120	1.16	2060	28.28451391	0.786666667	11.98496352	300

Tabla II

Grafica 2.1: Curva Par-Velocidad



Prueba al motor con excitación serie

En un motor en serie se conecta internamente con las bobinas del campo principal en serie con el circuito de la armadura. Esto significa que toda corriente del circuito de la armadura pasa a través de los campos. Las bobinas de campos se diseñan y se construyen con pocas vueltas de alambre grueso para no introducir una resistencia exagerada en el circuito de alimentación. Estas vueltas de la bobina de campo proporcionan los ampere-vueltas necesarios con la elevada corriente del circuito de la armadura. La sección transversal grande da por resultado una resistencia pequeña y por tanto pérdidas pequeñas de potencia en el campo, aun con corrientes grandes. En un motor en serie el flujo del campo depende en su totalidad de la corriente de la armadura. Al operar debajo de la rodilla de la curva de saturación, el flujo magnético del campo es casi directamente proporcional a la corriente de la armadura. Su grave defecto; se dispara fácilmente en vacío o cuando la carga decrece, no se debe utilizar en maquinas herramienta, pues estas requieren velocidad constante, no deben ser utilizados en motores con transmisión por correa, por que esta puede patinar y el motor acelerarse

El par de un motor en serie es muy distinto de un motor en derivación. El par aumenta aproximadamente según el cuadrado de la corriente de la armadura hasta la aparición de la saturación, donde el flujo del campo ya no aumenta tan rápido. El par se hace entonces poco a poco lineal con respecto a I_a , Debe observarse que el par aumenta en forma casi parabólica y luego sigue un comportamiento de línea recta con respecto a la potencia en hp (o kilowatts). La velocidad disminuye de manera aproximadamente hiperbólica al aumentar la potencia. La curva de la corriente también es cóncava hacia arriba pero no aumenta tan rápido como el par. Por lo general no es posible determinar las características con seguridad para potencias muy pequeñas, ya que la velocidad podría ser destructivamente elevada. En consecuencia, nunca se desconecta de su carga ningún motor en serie, a menos que sea de los pequeños. No es seguro usar utilizar bandas o engranajes que puedan desconectarse por error; siempre deben emplearse acoplamientos directos o proporciones fijas en los engranajes. En la figura 2.13 se observa el diagrama de conexiones para la prueba del motor serie.

La razón por la que se decidió realizar las prueba a este motor fue el de comparar el comportamiento entre ambos motores por lo que se busco que se

trato de que este motor fuera parecido al prototipo para que así la comparación fuera más exacta. El motor utilizado tenía las siguientes características:

Potencia: $\frac{1}{4}$ Hp

Velocidad: 1800 rpm

Tensión: 120 V

los resultados obtenidos en este experimento se indican en la tabla III

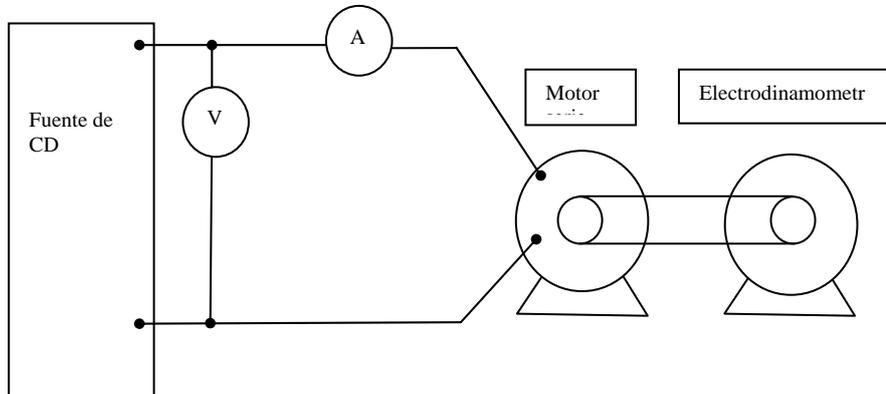


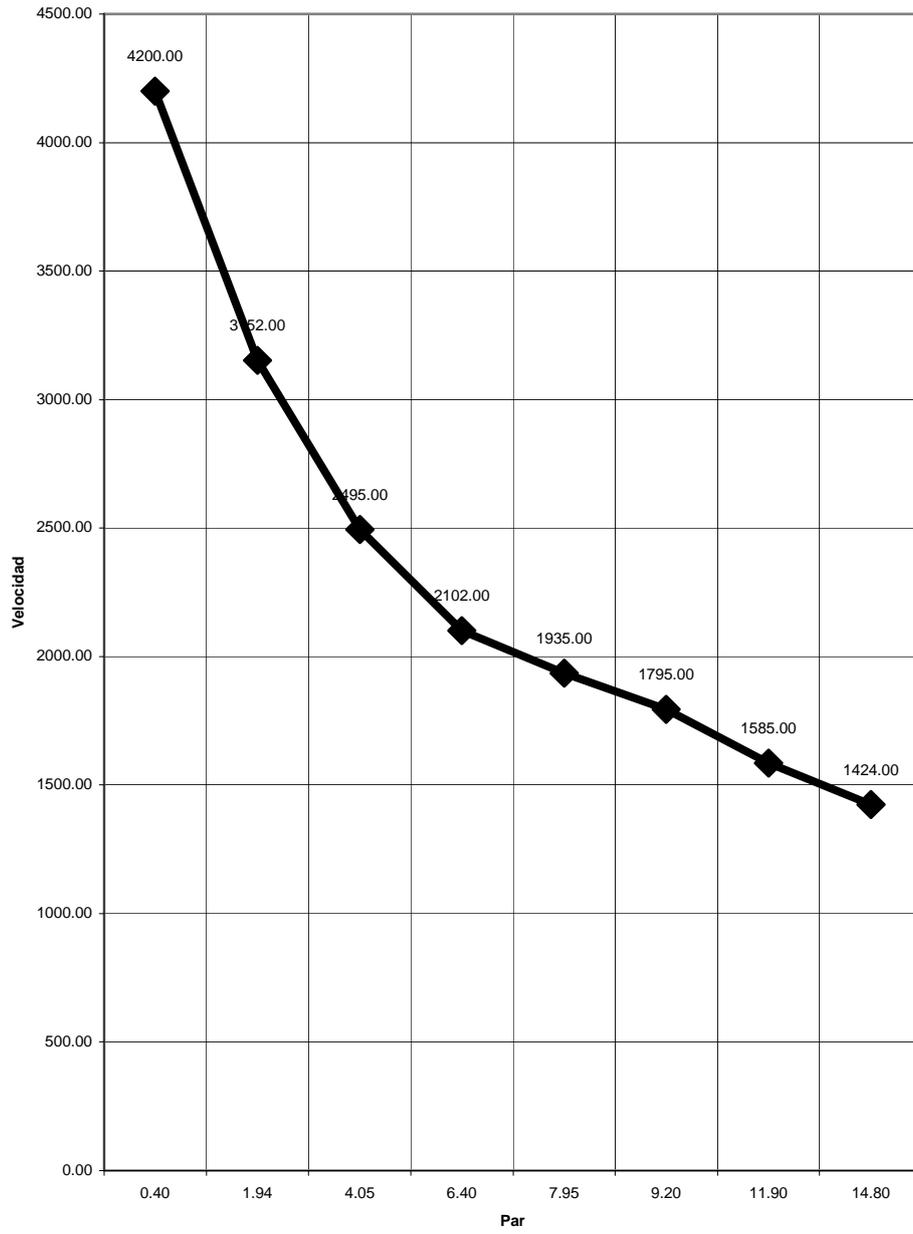
Fig. 2.13: Diagrama de conexión para la prueba del motor de excitación serie

Tensión [V]	Corriente [A]	Velocidad [rpm]	Par [Lbfin]	Potencia Eléctrica [W]	Potencia Mecánica []	Eficiencia [%]
120	1.1	4200.00	0.40	132	19.885329	11238.2241
120	1.5	3152.00	1.94	180	72.378812	29996.9964
120	2	2495.00	4.05	240	119.60493	37177.1992
120	2.5	2102.00	6.40	300	159.23414	39596.2236
120	2.8	1935.00	7.95	336	182.08393	40426.9668
120	3	1795.00	9.20	360	195.46805	40505.3246
120	3.5	1585.00	11.90	420	223.25425	39654.2075
120	4	1424.00	14.80	480	249.45672	38769.7325

Tabla III

Las curva Par-Velocidad obtenida se muestra en la grafica 2.3.

Grafica 2.3: Curva Par-Velocidad



2.4.- Comparación del motor de dos armaduras

Motor de CD: es sumamente versátil con un gran campo de aplicaciones, pues dependiendo del tipo de conexión se puede obtener diferentes respuestas, su ventaja principal es que arranca por si mismo, el problema fundamental es vencer la inercia en las aplicaciones de transporte.

Motor de inducción: su velocidad es variable, es la opción más económica en campos de aplicación en los que no se requiere de un control de velocidad muy preciso, pero es deseable transmitir un flujo de potencia constante a una carga mecánica estable (una bomba hidráulica o la banda transportadora de una línea de producción), este motor demanda altas corrientes (hasta 8 veces la corriente nominal) bajo condiciones de operación en que el deslizamiento es elevado, como en el arranque o con el rotor bloqueado (deslizamiento máximo)

Motor Sincrono: en su modalidad de motor, su aplicación se limita a campos muy específicos, principalmente por carecer de un par de arranque capaz de vencer la inercia de una carga mecánica en reposo. Una característica fundamental del comportamiento dinámico de la maquina sincronía es que su ángulo par se adecua a las diversas condiciones de carga, ya sea mecánica o eléctrica, a las que se le somete, manteniendo siempre su velocidad en perfecto sincronismo (excepto durante las oscilaciones transitorias en su operación). Sus características son velocidad constante, costo elevado, no arranca por si mismo, regula el factor de potencia.

Motor de 2 armaduras: En función de las características expuestas, la maquina de 2 armaduras es la contraparte de la de inducción, pues su velocidad es perfectamente regulable, tiene la capacidad tanto de entregar como de recibir potencia bajo condiciones de carga muy variables y su construcción resulta comparativamente costosa, el M2A no sustituye al motor de inducción. Bajo condiciones de rotor bloqueado y con tensiones nominales en fase aplicados en las terminales del estator y rotor solamente demanda la corriente necesaria para excitar su circuito magnético. El arranque se efectúa al existir un ángulo de fase entre las tensiones aplicados, siendo la demanda de corriente proporcional a la potencia transmitida a la carga acoplada, pero nunca de tan elevada magnitud como en un motor de inducción. Respecto al motor de CD con excitación serie, el M2A tiene la ventaja de que no se dispara cuando decrece o pierde la carga

III.- DISEÑO DEL MOTOR TRIFÁSICO DE DOS ARMADURAS

3.1.- Antecedentes De Diseño

En esta parte de la tesis expondremos los aspectos referentes al diseño de los elementos que conforman al motor de dos armaduras, con las bases asentadas en los capítulos anteriores podemos empezar por enfocarnos en revisar las características de las partes que utilizaremos en el diseño de nuestro motor, en un principio ampliaremos la información sobre dichas partes y sus características constructivas y después sobre la base del uso que deseamos darle a esta maquina definiremos los valores de diseño para realizar los cálculos de los parámetros de construcción. Cabe recordar que como se menciona al principio de esta tesis, se tomo la decisión de enfocarnos específicamente a la parte eléctrica y magnética del diseño del motor y dejar la parte estructural relacionada con el diseño de la carcasa, flecha, cojinetes, etc. para futuros estudios sobre este motor

Decisiones En El Diseño

El diseño en ingeniería es la concepción, análisis cálculos y creación de los planos necesarios para que las máquinas, las estructuras, los sistemas o los procesos desarrollen las funciones deseadas. El proceso de diseño incluye:

- 1) Reconocer una necesidad y establecerla en términos generales. Esto define el problema.
- 2) Considerar varios esquemas para resolver el problema y seleccionar uno para investigarlo con mayor cuidado. Los estudios de factibilidad respaldados por investigación especial, según sea el caso, son característicos de este paso del proceso.
- 3) Realizar un diseño preliminar de la máquina, estructura, sistema o proceso seleccionado. Esto establece características globales amplias y permite escribir las especificaciones para las componentes principales.
- 4) Realizar el diseño de todas las componentes y preparar todos los dibujos necesarios y las especificaciones detalladas.

Los dibujos y las especificaciones detalladas para un diseño completo son el registro de una multitud de decisiones, algunas de ellas grandes y otras pequeñas. El proyectista, en los pasos finales del proceso de diseño es

básicamente un tomador de decisiones. Debe trabajar sobre una base sólida de principios científicos, suplementados con información empírica. Sin embargo, debe entender que la ciencia sólo puede establecer límites dentro de los cuales debe tomarse una decisión, o dar una imagen estadística de los efectos de una decisión particular. Las decisiones finales se ven afectadas por muchos factores diferentes a la resistencia y a la rigidez, tales como la apariencia, el peso, las limitaciones de espacio, la disponibilidad de materiales y técnicas de fabricación, etc. Se hace un aproximado del peso del prototipo junto con el peso que este lleva encima. Las bases, para las ideas que van a dar las piezas y/o elementos necesarios, son precisamente las tareas determinadas que se pretende que el prototipo lleve a cabo y como las lleve a cabo, ya que de éstas se toman algunas opciones que después arrojan especificaciones que son esenciales para el diseño de las piezas. Ya tomadas éstas opciones y después de seleccionar de entre varios esquemas, se realiza un diseño preliminar, para el que se hacen algunos análisis de fuerzas, el cual establece características globales y permite escribir especificaciones para las piezas principales; se toma una vez más en cuenta el criterio de margen de seguridad para las especificaciones de las piezas, aunque, cabe decir que el pequeño análisis de fuerzas que se realiza arroja, en este caso, resultados que muestran que las piezas están sobradas en ese punto que es el esfuerzo. Esto se debe también a otros factores que se toman en cuenta para el diseño de éstas piezas como son las limitaciones de espacio, la disponibilidad de materiales, y técnicas de fabricación.

Dados los diseños, en el siguiente paso se preparan los dibujos necesarios con las especificaciones detalladas de cada pieza, para hacerlas. Para diseñar un motor con características adecuadas de operación y de un bajo costo con el objeto de poderlo vender a un precio razonable, será necesario tener presente los siguientes factores:

- ❖ Costos de material y manufactura bajos
- ❖ Calentamiento adecuado
- ❖ Alto factor de potencia y eficiencia
- ❖ Capacidad de sobrecarga suficiente
- ❖ Gran seguridad durante la operación

Las partes fundamentales del diseño de una maquina eléctrica son el circuito de excitación o inductor, el circuito inducido o armadura y por ultimo se debe prever la circulación de aire necesaria para el enfriamiento de la

maquina. El arte del diseño consiste en conciliar estos tres elementos en un compromiso que de un elevado rendimiento. El diseño de motores y generadores tropieza con ese mismo tipo de problema. El eje debe ser lo suficiente mente resistente para poder transmitir el par necesario, y, en caso de transmisión por polea, ha de soportar el esfuerzo de flexión producido por el giro de la correa en la polea. Además, el diámetro debe ser de tales dimensiones que no pueda producirse una flexión excesiva bajo el peso de las masas giratorias, y es necesario también prestar atención a que la velocidad critica de giro no tenga valores próximos al de la velocidad normal de giro. En la practica se podrá ver que el diámetro del eje varia para que puedan ser montados en él los diferentes elementos del rotor, como la armadura, el colector, etc.

Para usar la menor cantidad de material posible deberá diseñarse el circuito magnético empleando la mayor densidad de flujo posible. En el circuito eléctrico la densidad de corriente deberá ser máxima también. Estas altas densidades hacen que en el motor se produzca calor. Hay que adaptar al motor los dispositivos necesarios para disiparlo. En los motores chicos totalmente cerrados la radiación se encarga de disiparlo. En motores mayores además de la radiación se emplea la convención forzada. El motor debe llevar un ventilador.

Si al diseñar un motor se emplea para la densidad de flujo y corriente valores basados en la experiencia y se provee al motor de los adecuados métodos para disipar el calor producido en el, el calentamiento del motor no excederá el limite fijado por el aislamiento usado. El entrehierro pequeño produce serias dificultades en el maquinado del motor, además dificulta la ventilación de la maquina. El uso de ranuras semicerradas implica el uso de bobinas que no se pueden aislar con cinta antes de colocarse en las ranuras. Una adecuada capacidad de sobrecarga es siempre el resultado del empleado de métodos correctos de diseño y de los factores de servicio que recomiendan la practica.

Como las fallas más frecuentes en los motores son de aislamiento deberá seleccionarse a este de acuerdo con la temperatura máxima de operación del motor.

Una alta eficiencia se logra mediante el empleo de materiales magnéticos de reducido ciclo de histéresis y baja conductividad. Además hay que laminar tanto el rotor como el estator

Las diferentes partes a diseñar en un motor serán fundamentalmente:

- ❖ La coraza
- ❖ El sistema de ventilación
- ❖ Flecha y cojinetes
- ❖ Aislamiento
- ❖ Núcleo magnético
- ❖ Embobinados

3.2. -Valores Base o De Diseño

Unas de las primeras decisiones que tuvimos que tomar fue el de determinar los valores que nos servirían de base para diseñar el motor. Esto es complicado cuando no se tiene una gran experiencia en el campo del diseño de maquinas eléctricas, por lo que muchas de nuestras decisiones fueron tomadas de acuerdo a nuestros conocimientos y lo que logramos investigar, sabíamos que los datos que necesitábamos definir eran la potencia del motor, la velocidad, la frecuencia y la tensión de alimentación principalmente, tomamos la decisión de diseñar un motor de 15 Hp con una velocidad de 1800 rpm, por ser valores comunes de motores industriales, usando la frecuencia en México de 60 Hz, respecto a la tensión de alimentación optamos por un valor de 440 V. Decidimos calcular este motor para un factor de potencia muy común en la industria de 0.88 y una eficiencia de 0.85. Ahora mencionaremos algunos elementos de las maquinas eléctricas.

La Carcasa

La carcasa de las maquinas eléctricas cumple, entre otras, las siguientes funciones principales:

- ❖ Actúa como elemento de fijación y sustentación de las chapas del estator.
- ❖ Transmite al suelo o la base en la que se apoya la maquina, a través de las patas o las bridas, el par que se ejerce sobre el estator por lo que debe estar diseñado para resistir torsión y choques
- ❖ Evacua el exterior mediante radiación y convección el calor interno generado por las perdidas en la maquina.

- ❖ Actúa como elemento sustentador de las tapas portacojinetes y, en su caso, de otros elementos, tales como filtro, amortiguador de ruidos, etc.
- ❖ Sirve como envolvente protectora de los elementos internos de la máquina. protege a las partes móviles del motor del contacto humano evitando además averías que pudieran causar al motor cuerpos extraños que caen
- ❖ Forma parte, en ocasiones, del circuito magnético del estator.

De todas las funciones citadas, en las máquinas pequeñas y medianas, la construcción de la carcasa viene fijada, prácticamente, por las exigencias en cuanto a grado de protección que se requiere en la máquina. En las máquinas grandes o muy grandes, además de ello, debe también verificarse la correcta adecuación de la carcasa a las restantes exigencias enumeradas.

Con objeto de que el usuario de los motores tenga libertad al diseñar su equipo sin saber de antemano que motor va a usar, el ASA (Advertising Standards Authority) ha establecido para los motores dimensiones normalizadas de montaje. Una misma coraza sirve para toda una serie de tipos diferentes de motores. Por lo tanto al diseñar un motor habrá que consultar las tablas de la NEMA para determinar que número de coraza le corresponde. Este número fijará únicamente la altura de la flecha y la disposición de los taladros de la base, de tal manera que el diseñador tiene la libertad para escoger el diámetro del rotor y la longitud de la laminación de acuerdo con los procedimientos que ya se estudiarán más adelante.

La coraza en motores pequeños y medianos solían ser de placa de acero rolada, sin embargo en la actualidad parece que vuelve a usarse de hierro fundido. Deberá procurarse que el peso de la coraza sea lo más bajo posible.

Devanados

Un devanado o embobinado es un grupo de bobinas interconectadas de modo que sus tensiones generadas contribuyan positivamente al resultado deseado. En general las bobinas se enrollan sobre núcleos de hierro. Esto se hace para aumentar al máximo el acoplamiento de las bobinas, para aumentar la densidad de energía magnética asociada con la iteración electromecánica, y para conformar y distribuir los campos magnéticos

de acuerdo con los requisitos de cada diseño determinado de maquina. En cualquier clase de alojamiento existe originalmente un problema doble; de alojamiento y de transito.

De alojamiento, por que cada uno de los conductores activos debe estar colocado en un vano que lo sostenga y proteja de los poderosos esfuerzos electromagnéticos que podrían romperlo o dislocarlo si estuviera expuesto. Los vanos o ranuras apropiados para ello

En general se puede decir que para cualquier tipo de maquina rotatoria construir los devanados de armadura significa:

1. Colocar en las ranuras de la armadura el numero de conductores previsto en el calculo de la maquina eléctrica (con sección y aislamiento correspondientes a la corriente y voltaje de la maquina).
2. Conectar estos conductores de manera que los voltajes inducidos parcialmente, se asumen correctamente, para estos es necesario trazar el diagrama o esquema del devanado.

Terminología Usada En Los Devanados De Armadura

- ❖ Conductor.- cada conductor individual que se encuentre dentro del campo magnético se le denomina “conductor” y puede estar formado por uno o más hilos en paralelo
- ❖ Espira.- Cuando dos conductores que se encuentren dentro de un campo magnético se conectan en serie, de manera que la fuerza electromotriz inducida en cada uno o la FEM. resultante es el doble de la de uno de los conductores se dice que forma una “espira”
- ❖ Bobina.- Cuando una o más espiras están conectadas en serie y sus dos extremos se conectan a segmentos adyacentes del conmutador (en los devanados en paralelo o capas), se les denomina o se dice que se tiene una “bobina”. Figura 3.1
- ❖ Grupo de Bobinas.- Un grupo de bobinas puede tener una o más bobinas sencillas
- ❖ Devanado.- El numero de bobinas arreglado por grupos de bobinas constituyen lo que se conoce como el “devanado”

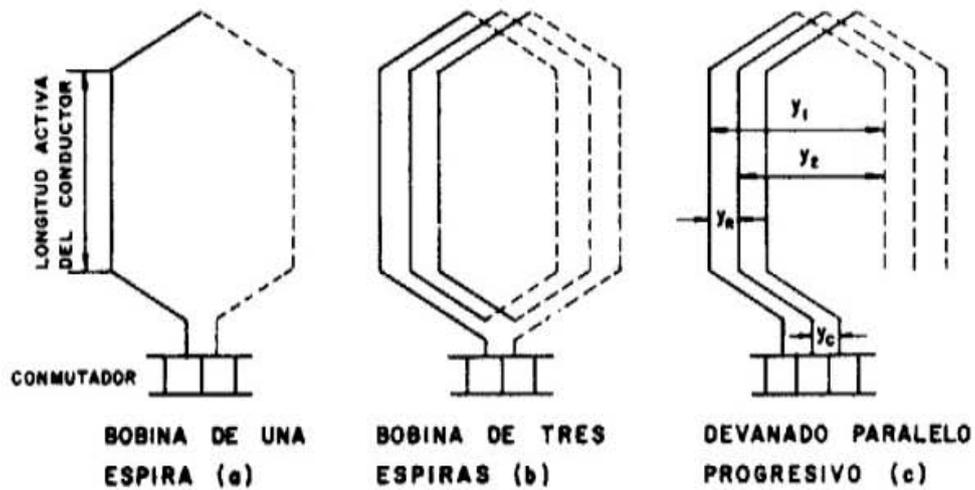


Fig. 3.1: Algunos tipos de bobina

Devanado de CA

En un devanado de corriente alterna o polifásica se presenta no solamente el problema de conectar los conductores en serie para obtener una tensión que un solo conductor no puede producir, sino una serie de problemas originados por diversos requisitos, entre los cuales se mencionan las siguientes:

- ❖ La forma de onda de la corriente debe ser aceptable
- ❖ El aprovechamiento de la maquina debe ser tan completo como se pueda
- ❖ La disipación de calor debe ser distribuida de manera uniforme
- ❖ El cambio de bobinas debe ser realizable con cierta facilidad
- ❖ Los circuitos cortos en la línea no deben producir daños de origen mecánico en los devanados
- ❖ El cumplimiento de dichos requisitos impone respectivamente
- ❖ El uso de varias ranuras por polo y por fase, y particularmente la división de conductores en dos capas
- ❖ El empleo del mayor numero de fases que sea practicable
- ❖ Cabezales dispuestos y separados convenientemente
- ❖ Bobinas hechas en maquina; ranuras de boca ancha
- ❖ Suficiente reactancia en los devanados mismos, o disposición de las bobinas a prueba de esfuerzos cualesquiera

El devanado tiene que satisfacer a veces otra condición: la de facilitar la división de la armadura en dos partes iguales durante el transporte, sin complicaciones posteriores respecto a deterioro de bobinas o de conexiones entre ellas en el caso de maquinas grandes. Si la maquina es de dos o tres fases es imprescindible que las diferentes fases sean equivalentes en materia de tensión generada, resistencia ohmica y reactancia local y que los argumentos de dichas tensiones tengan diferencias precisas entre si. El devanado más sencillo es el preferido, siempre que llene las condiciones de cada caso.

Devanados de doble capa

Toda bobina tiene dos lados o haces activos: el de “ida” y el de “vuelta”. En los devanados de simple capa (Fig. 3.2), cualquier ranura esta ocupada por un haz activo correspondiente a una sola bobina. En los devanados de doble capa las ranuras alojan dos haces correspondientes a dos bobinas diferentes.

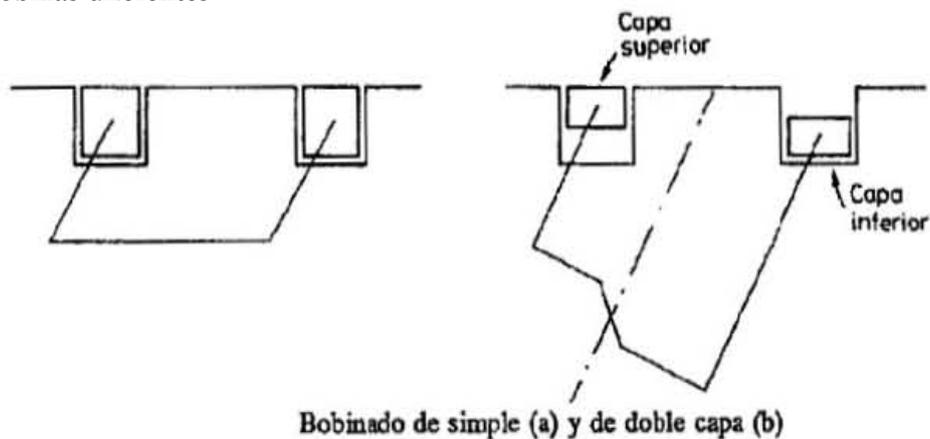


Fig. 3.2

En las maquinas trifásicas industriales, de constitución simétrica, la extensión (“el paso”) de las espiras o bobinas pertenecientes a una fase, en el caso de bobinado de simple capa, es siempre igual, en promedio, al paso polar, puesto que en caso contrario los lados de vuelta de las espiras ocuparían ranuras correspondientes a otra fase. En otras palabras, no pueden construirse devanados trifásicos simétricos de paso acortado en ejecución de simple capa. Para eliminar el anterior inconveniente se utiliza con gran frecuencia el devanado de doble capa. Puesto que al colocar un lado de bobina en una

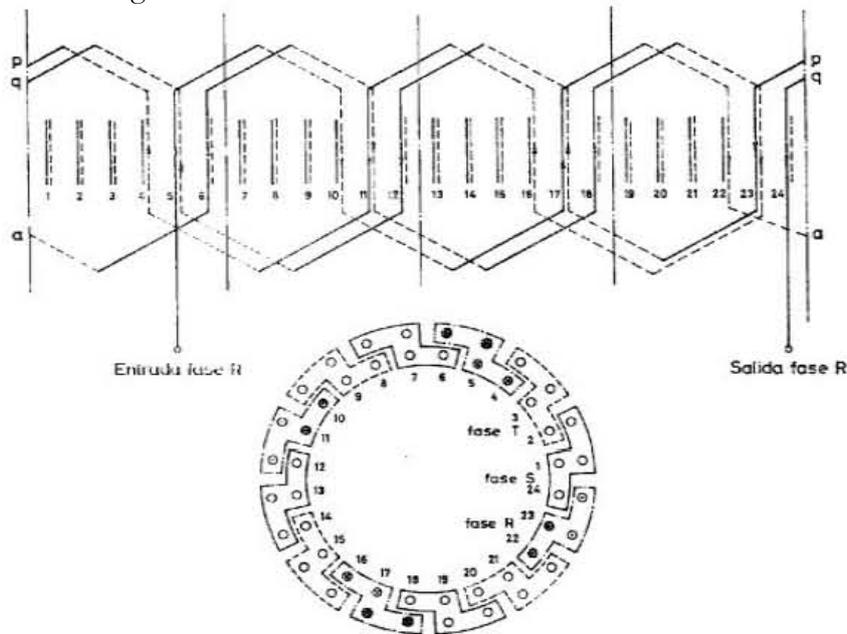
ranura ya no se impide que en esa misma ranura se aloje otro lado de bobina, desaparece el problema anterior.

La forma práctica de distribuir en ranuras un devanado trifásico de doble capa se va a mostrar mediante un ejemplo. Sea el caso de una máquina trifásica de doble capa, tetrapolar, con 24 ranuras y devanado de doble capa acortado en $1/6$, cuya disposición se trata de conocer.

A tal fin tengamos en cuenta primero las siguientes consideraciones:

- ❖ Para que todas las bobinas elementales, a efectos de flujo abarcado durante el giro de la máquina, sean equivalentes, a cada lado de bobina situado en la parte superior (o inferior) corresponde otro lado de bobina (que la completa) situado en la parte inferior o superior, respectivamente.
- ❖ Toda bobina de paso acortado debe tener su homóloga en la forma que ya ha sido explicada, de manera que la onda de tensión magnética resultante sea simétrica en π (eliminación de armónicos pares).

Por otro lado, puesto que lo realmente determinante es la distribución periférica de corrientes, empezaremos por fijar dicha distribución en la parte inferior de la Fig. 3.3



Situación en las ranuras estatóricas de los conductores correspondientes a la fase R de una máquina simétrica trifásica, tetrapolar con 24 ranuras en el estator y devanado acortado en $1/6$.

Fig. 3.3

A cada fase le corresponden dos ranuras por polo ($q=2$). Asignemos en la Fig. 3.3 la parte superior de las ranuras 5 y 6 a bobinas de la fase R. El número de ranuras por polo es 6. Puesto que las bobinas elementales están acortadas en $1/6$, los lados de vuelta de dichas bobinas estarán situados cinco ranuras más allá y alojados en la parte inferior, es decir, en las ranuras 10 y 11. Naturalmente, el sentido de la corriente en estos dos lados de bobina será opuesto al que presenta en los lados colocados en las ranuras 5 y 6. Lo hecho con el primer par de polos se repite exactamente igual (desplazando todo el conjunto 2π grados eléctricos, es decir, doce ranuras) para el segundo par de polos (parte superior, ranuras 17 y 18, parte inferior, ranuras 22 y 23) y con ello se tiene dibujada la primera mitad del devanado correspondiente a la fase R, mostrada a trazo grueso en la parte inferior de la Fig. 3.3

Falta ahora la otra mitad, cuya función principal, de acuerdo con la observación segunda, es complementar cada bobina de paso acortado con otra del mismo acortamiento, pero polarmente simétrica respecto a ella. A tal fin, volviendo a la Fig. 3.3 (parte inferior) se procede a asignar a todo conductor de los dibujados en la primera etapa, otro conductor distanciado 180° eléctricos de él (6 ranuras en este caso) y recorrido por una corriente de sentido opuesto. Con ello se tiene la otra mitad del devanado, que se muestra con trazo fino en la parte inferior de la Fig.. Las fases S y T (no dibujadas) son repeticiones de la R desplazando todo el conjunto 120° y 240° respectivamente.

En la parte superior de la Fig. 3.3 se muestra el devanado (fase R) en la llamada representación rectangular, que consiste en suponer el estator (o rotor) cortado a lo largo de una generatriz y extendido sobre un plano del dibujo. Los haces activos alojados en las ranuras se representan mediante trazos cortos, verticales, paralelos todos entre sí. En devanados de doble capa, los haces que constituyen la capa inferior de la ranura y la parte inferior de cabeza de bobina que va unida a ellos (fig. 3.2) se dibujan a trazos.

Desde el punto de vista electromagnético, lo importante es respetar los sentidos de las flechas en cada haz, que es lo que determina la distribución periférica de corrientes. Por ello es útil marcar primero dichas flechas, que pueden dibujarse directamente a partir de las corrientes en la parte inferior del gráfico.

Queda ahora la forma material de interconectar los distintos haces. Esa forma puede adoptar diferentes variantes para un mismo devanado y en la práctica viene fijada, básicamente, por condicionantes de fabricación, de montaje y de costos (el esquema en la parte superior de la Fig. 3.3 muestra una

de las posibles maneras de interconectar los haces del devanado). A este respecto se tendrán en cuenta las siguientes reglas útiles:

- ❖ Conviene, por razones constructivas, que todas las bobinas correspondan al mismo patrón. En ocasiones, sin embargo, por motivos económicos (gran ahorro de conductor) pueden aconsejar una solución diferente.
- ❖ En estatores se debe elegir la combinación de extremos de fases que den lugar a cables de salida lo mas corto posible; es decir, la combinación cuyas ranuras estén más próximas a la salida de los cables a través de la carcasa.
- ❖ En rotores, y para conseguir el mejor equilibrado dinámico de los mismo, los extremos de fase deben estar sobre ranuras distanciadas entre sí 120° geométricos (eso no es posible en los motores trifásicos con un numero de polos múltiplos de tres, ya que dichas ranuras son todas de la misma fase; en tal caso, hay que buscar ranuras cuya situación sea lo más próxima a la condición ideal).

Obsérvese, por ultimo, que en los devanados de simple capa el numero de bobinas elementales por cada par de polos y fase (b), coincide con el numero de ranuras por polo y fase (q). Es decir:

$$b=q \quad (\text{simple capa})$$

Sin embargo, en los devanados de doble capa se cumple:

$$b=2q \quad (\text{doble capa})$$

Devanados de CD

En particular los devanados de armadura para las maquinas de corriente continua, difieren notablemente de los de las maquinas de corriente alterna y tienen las siguientes características:

1. Son devanados “cerrados”, es decir que si se recorriera todo el devanado, se regresa siempre al punto de partida, cualquiera que este sea.
2. Cada devanado esta formado por un cierto numero de secciones, toda iguales conectadas entre si, cada sección esta formada de mas espiras en serie entre si, cada espira esta formada de dos lados activos (que son las partes de conductor que se alojan en las ranuras) y dos conexiones frontales conectando los lados activos entre si, cada sección tiene por lo tanto, dos caras o lados activos. El numero total de caras es por lo

tanto siempre el doble del número de secciones y e siempre un número par.

3. Cada sección tiene un lado activo en una ranura y el otro en una ranura diferente convenientemente distanciada (un lado bajo un polo inductor y el otro bajo otro de polaridad opuesta).
4. En cada segmento del colector terminan o hacen cabecera los lados de dos secciones conectadas entre sí, debido a que el número total de segmentos del colector es igual al número total de las secciones.
5. En cada ranura está contenido un número par de lados activos (generalmente 2 aunque pueden ser 4 o 6). Se les denomina zona o madeja al conjunto de las secciones contenidas en la misma ranura.
6. Los devanados de las máquinas de corriente continua son casi siempre de doble capa, es decir cada ranura contiene en la parte inferior un lado de la sección o madeja y en la parte superior un lado de otra madeja. En los devanados en serie se tienen solo dos filas de escobillas, mientras que en los devanados en paralelo se tienen tantas filas de escobillas como polos tenga la máquina, de manera que resultan tantos devanados en paralelo o trayectorias internas como número de polos se tenga.

Los devanados en serie se adoptan cuando se requieren tensiones elevadas y corrientes relativamente pequeñas, en tanto que los devanados en paralelo se usan cuando las máquinas trabajan con tensiones bajas y corrientes elevadas.

Criterios Para La Selección Del Tipo De Devanado De Armadura En Las Máquinas De Corriente Continua

El tipo de devanado a usar en la armadura de una máquina de corriente continua (es decir imbricado o bien el ondulado) se decide en base a las siguientes consideraciones:

1. Cuando la corriente de armadura no es alta se prefiere el uso de los devanados ondulados, pero para corrientes de armadura con un valor elevado, el número de trayectorias o ranuras en paralelo debe ser mayor y como resultado de esto se prefiere el uso del devanado imbricado. Por lo tanto para máquinas con potencia alrededor de 40 Kw. con voltaje y velocidad normal, se usa principalmente el devanado del tipo ondulado. Arriba de esta capacidad se prefiere el uso del devanado imbricado.

2. El tipo de devanado a ser usado para maquinas de corriente continua de gran capacidad depende también del numero de polos y de la velocidad de la maquina. Normalmente la corriente por circuito paralelo no debe exceder a 250 A.
3. La corriente de armadura que puede conducir una escobilla no debe exceder de 400 amperes, de acuerdo con el tipo de devanado que se seleccione, se debe tener en cuidado de no violar esta condición.
4. El paso de los segmentos del colector debe quedar del rango de 5 a 10 mm

Elementos Característicos De Los Devanados De Corriente Continua

- ❖ Paso polar.- Se designa comúnmente con la letra griega tau (τ), es el arco correspondiente a la distancia angular entre los ejes de los polos consecutivos. Prácticamente el paso polar se puede medir también en numero de ranuras o en numero de lados de bobina, Fig. 3.4

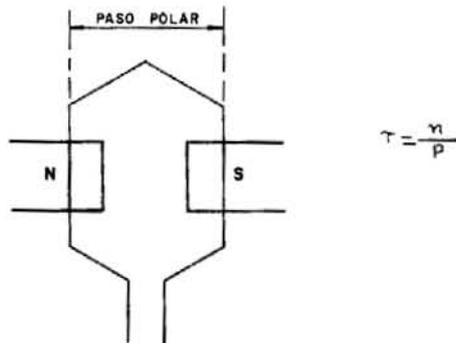


Fig. 3.4

- ❖ Paso posterior (Y_1).- Es el numero de caras o lados de bobina por conectar sobre el lado o punto del colector
- ❖ Paso anterior (Y_2).- Es el de lados de la bobina o caras entre un lado y aquellos por conectar del lado del colector. Al paso anterior también se le conoce como paso elemental
- ❖ Paso resultante (Y).- Es la suma algebraica de los pasos posterior y anterior, es decir: $Y=Y_1+Y_2$ y representa cuanto avanza el devanado

Si Y es positivo el devanado se dice que es progresivo y avanza en el sentido de las manecillas del reloj. Si Y es negativo el devanado se dice que es regresivo y avanza en el sentido opuestos a las manecillas del reloj. De los dos tipos de devanados interesan solamente los efectos del sentido de rotación de la maquina en cuanto se invierte el sentido de rotación de la maquina, al ser invertida la corriente en el rotor. Fig. 3.5

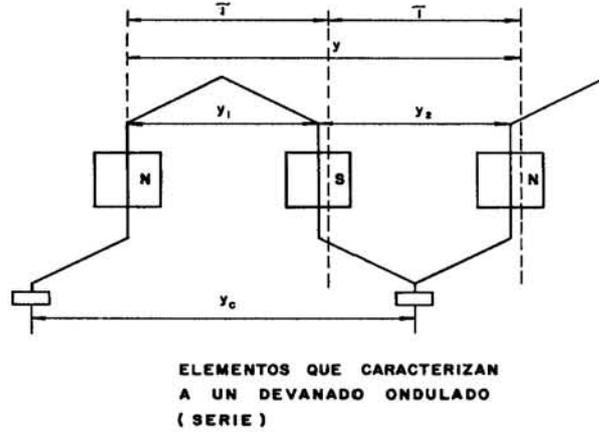


Fig. 3.5: Devanado ondulado

- ❖ Paso del colector (Y_c).- Es la distancia entre el numero de ranuras del colector a la que se conectan los dos lados de la misma sección, Fig. 3.6

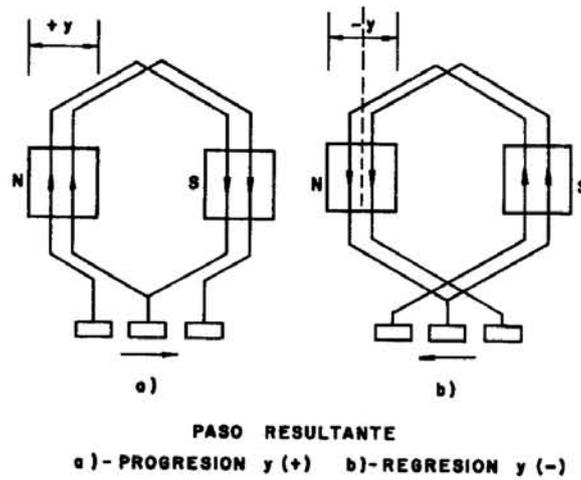


Fig. 3.6

- ❖ Paso de ranura (Y_n).- Es la distancia en numero de ranuras entre las ranuras que contienen los dos lados de la misma sección; el paso en anuras debe resultar de tal manera que no se desajuste la zona, que como se ha dicho es le elemento constitutivo del devanado

Devanado serie paralelo u ondulado doble o duplex para el rotor

Si en el caso del devanado ondulado se aumenta el desplazamiento total del campo, se obtiene un numero de ramas mayor que dos en el inducido. El desplazamiento de campo por elemento de devanado del devanado ondulado simple ($a=2$) es $1/(p/2)$ pasos del colector, y esto da lugar a dos ramas en paralelo. Si el desplazamiento de campo se hace de $2 \cdot 1/(p/2)$ pasos del colector, el numero de ramas será 2 veces mayor, es decir, 4. Esto significa que si el paso resultante y se escoge de tal manera que, después de avanzar a través de $p/2$ elementos del devanado, el devanado llegue, no a una delga adyacente a la de partida, sino a una delga que este distante x pasos del colector del punto de partida, el devanado ondulado tiene $2x$ ramas de inducido. Las figuras 3.7 y 3.8 muestran un arrollamiento ondulado de 4 polos de este tipo con 4 ramas de inducido en lugar de 2.

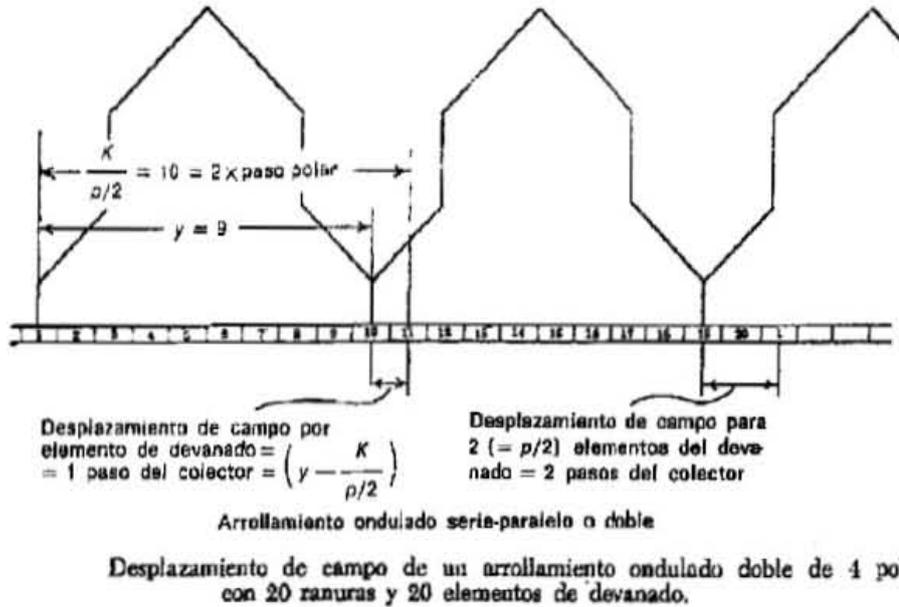


Fig. 3.7

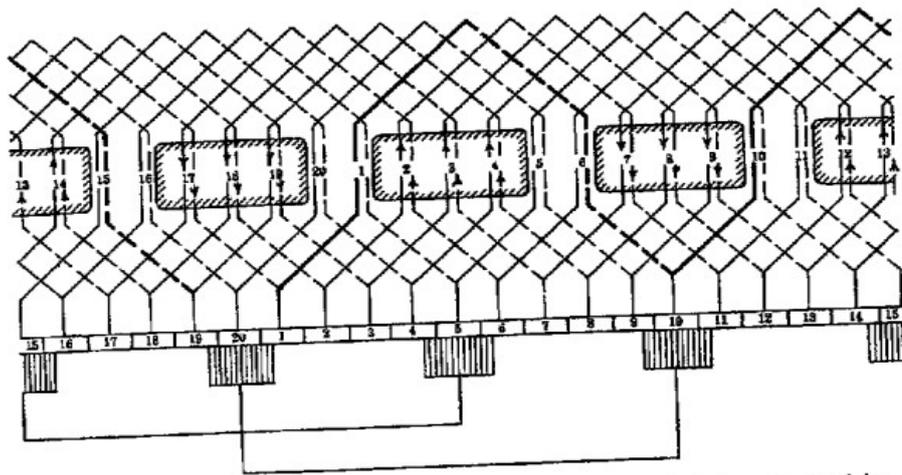


Diagrama desarrollado de un arrollamiento ondulado serie-paralelo o dúplex de 4 polos y 2 capas, con 20 ranuras y 1 conductor por capa.

Fig. 3.8

En los devanados se usan veinte delgas de colector (elementos de devanado). Este devanado, empezando en la delga 1 del colector y avanzando a través de $p/2=2$ elementos del devanado, el devanado no alcanza la delga adyacente 20, sino por el contrario la delga 19. El desplazamiento total de campo es 2 veces mayor que en el caso del acostumbrado devanado serie, y en consecuencia existen 4 ramas de inducido.

Contrariamente al devanado ondulado con $a=2$, consta de 2 círculos que coinciden entre si como en el caso de un devanado imbricado de 4 polos. Esto significa que a es igual a 4. un devanado ondulado con mas de 2 ramas de inducido se denomina devanado serie paralelo o devanado ondulado doble cuando el numero de ramas es 4.

El paso de devanado resultante y del devanado serie-paralelo es, de acuerdo con el desplazamiento por elemento de devanado

$$y - \frac{K}{p/2} = \mp \frac{a/2}{p/2} \quad 3.1$$

o

$$y = \frac{K \mp a/2}{p/2} \quad 3.2$$

El arrollamiento ondulado normal ($a=2$) se cierra sobre si mismo después de avanzar a través de muchos circuitos, cada $p/2$ elementos de devanado, que están contenidos en y pasos de colector. Por ejemplo,

empezando con la delga 1 del colector, el devanado se cierra después de que las 9 delgas del colector vecinas números 19, 18, 17, 16, 15, 14, 13, 12 y 11 hayan sido recorridas en el trayecto a través del devanado. Si, en el devanado serie-paralelo, y es divisible por $a/2$, el devanado termina sobre si mismo después de avanzar a través de $y/(a/2)$ ramas, cada una con $p/2$ elementos de devanado, sin atravesar todos los elementos de devanado del inducido. Para que el devanado serie-paralelo formara un camino cerrado único, entonces y y $a/2$ no deberían tener ningún divisor común. Respecto a mejorar la conmutación en las maquinas con colector de CA, a veces se emplean devanados doblemente cerrados.

El numero máximo de ramas en paralelo para el devanado imbricado, así como para el devanado ondulado múltiple, es p . Disponiendo una bobina de devanado imbricado y otra de devanado ondulado múltiple con p caminos en las mismas ranuras y conectando ambos devanados al mismo colector, pueden obtenerse $2p$ ramas en paralelo. Como ambos devanados se conectan en paralelo, deben tener la misma posición en el campo magnético para conseguir corrientes circulatorias, o sea los pasos posterior y anterior de los dos devanados deben ser respectivamente iguales. Cada uno de los dos devanados separados se conecta cruzado con el devanado de manera que las conexiones equipotenciales no sean necesarias.

Después de repasar los tipos de embobinados de las maquinas eléctricas, empezaremos a describir el diseño del estator y el rotor del M2A.

3.3. -DISEÑO DEL ESTATOR

El estator, al igual que el inducido de las maquinas de corriente continua, esta formado por laminas o chapas de hierro, aisladas entre sí y agrupadas en paquetes de 60 a 100 mm, entre las cuales quedan huecos de ventilación de 8 a 15 mm. Cuando la longitud del estator es muy grande, se disponen láminas de papel especial, presspan o de cualquier otro aislante adecuado, distanciadas entre si 10 a 20 mm, al objeto de localizar a esa longitud los eventuales corto circuitos entre las chapas. El paquete de chapas, fuertemente prensado, va sujeto por medio de discos o placas de presión fijadas por cuñas o bien por pernos roscados que atraviesan a los paquetes. Nervios de chapas entre los paquetes, y en ciertos casos dispuestos también entre las chapas y placas de presión, mantienen los canales de ventilación. Aquellas llegan hasta dentro de los dientes, evitando así un alabeo de las

chapas. Para evitar el alabeo de las chapas, junto a las placas de presión, se emplean chapas que se cortan escalonadas soldadas unas con otras, las que antes del apriete actúan como muelles hacia adentro, o bien se aplican dedos de presión de material no magnético.

Las laminas de hasta 1 m. De diámetro exterior se cortan de una plancha, para luego apilarlas entre las nervaduras dispuestas al efecto en la carcasa. Para laminas de diámetro mayor se emplean planchas cortadas en segmentos que son fijadas en la carcasa por medio de reglas de sección trapecial. Al objeto de que las juntas se recubran, el número de ranuras de un segmento ha de ser par, el paso de las colas de milano ha de ser igual a medio paso de los segmentos.

La carcasa se procura que sea poco pesada y que tenga la resistencia mecánica suficiente; además se le da una forma adecuada para que existan las mejores posibilidades de una refrigeración eficaz. Por regla general, la rueda polar lleva unas aletas que, en forma análoga a la de un ventilador helicoidal o centrífugo inyectan parte del aire aspirado hacia las cabezas de las bobinas, pasando después a través de aberturas practicadas en la carcasa, encima de las chapas, y otra parte por las hendiduras o canales de ventilación. En máquinas grandes se emplean también canales axiales que atraviesan transversalmente la corona de chapas. En vez de las carcasas de fundición se emplean también estructuras de hierro soldado. Generalmente, las ranuras semicerradas van revestidas interiormente de tubos de material aislante como presspan o mica. Los conductores aislados se introducen en las ranuras por los lados, a menos que se puedan introducir por la abertura de la ranura en caso de estar abierto el revestimiento de la misma.

En la construcción de una máquina es, naturalmente, muy ventajoso que las bobinas se ejecuten separadamente de la máquina, dándoles en plantillas una forma determinada para luego colocarlas en aquella. Tales bobinas se representan, por ejemplo, en dos tipos, los que, combinados, dan lugar a dos planos para las cabezas de bobinas. La introducción de las bobinas en ranuras semicerradas puede hacerse cortando las espiras en una cabeza de bobina e introduciendo luego la bobina por un lado; una vez hecho esto, se soldaran las distintas espiras antes cortadas. Si la abertura de las ranuras es suficientemente ancha, se podrán introducir en ellas por un lado las bobinas, doblando previamente una de las cabezas. El modo más sencillo para colocar

las bobinas ejecutadas separadamente consiste en el empleo de ranuras completamente abiertas, Estas bobinas se mantienen en su posición mediante cuñas de madera. Pero en ranuras abiertas ocurre que se producen con mucho mayor intensidad las oscilaciones armónicas de ranuras, si bien se reducen dando a los cantos de las piezas polares una forma oblicua o acortando el ancho de las bobinas. Con ranuras abiertas, las piezas polares deben ser forzosamente de planchas, porque el calentamiento excesivo que determinan las oscilaciones de flujo en las piezas macizas resulta inadmisibles.

Las bobinas están hechas de conductor redondo, plano, o bien de tipo de cordón. El aislamiento de los distintos conductores es de algodón, de papel o de amianto. El espesor de la capa aislante de conductores redondos está fijado en las normas DIN, VDE 6436; para conductores planos y del tipo de cordón se puede contar de 0.4 a 0.6 mm a cada lado. A menudo se separan las distintas capas de conductor mediante papel o presspan fino. El espesor de las vainas o envolturas de material aislante puede tomarse de la tabla siguiente. Espesor del aislamiento en las ranuras y separaciones entre cabezas de bobinas y entre estas y la carcasa, Tabla IV

Tensión (V)	Espesor del aislamiento en las ranuras	Separación (mm)
500	1 mm papel	10
1000	1.2 mm papel	15
3000	2 mm micanita	25
6000	3 mm mica	30
10000	3.5 mm mica	40

Tabla IV

El material aislante de un arrollamiento casi siempre se impregna de aceite o de barniz, siendo expulsado el aire de las fibras por el líquido (clase A). Durante este proceso pueden quedar capas de aire entre los conductores aislados, o bien entre estos y la envoltura, las que en tensiones elevadas son peligrosas, ya que con ellas pueden originarse descargas de efluvios. Estos, al aumentar la temperatura, se forma ozono y ácido nítrico que destruye el material aislante.

Por tal razón se ponen las bobinas dentro de una estufa, donde se hace el vacío, aspirándose todo lo posible el aire que aquellas puedan contener, calentándolas al propio tiempo. Seguidamente se sumergen dentro de un baño de barniz, muy caliente y a presión, de modo que el barniz penetre dentro de todos los huecos de las bobinas. Las bobinas así elaboradas se aíslan con mica

en las porciones que, una vez montadas, quedaran en el paquete de hierro. Fuera del hierro se cubren con cinta aislante. Los materiales de impregnación que se empleen, además de ser buenos aislantes, deben ser buenos conductores de calor, y han de penetrar bien en las bobinas, llenando sus huecos sin que formen burbujas; a la temperatura máxima admisible para maquinas eléctricas no deben ablandarse, ni gotear, y por ultimo, bajo calentamiento constante, no deben variar sus propiedades.

Si como aislantes se emplean solo materiales minerales, como amianto y mica, se admite, según la calificación *B*, que su calentamiento máximo llegue hasta 20° mas que el de las fibras orgánicas con impregnación. Modernamente, cada vez se ocupan mas los arrollamientos de dos capas. Para las corrientes elevadas, las barras se componen de varios conductores aislados entre si, por ejemplo, mediante papel especial, y los cuales recorren sucesivamente todas las capas de una ranura. Los cabos o extremos de estas barras de varios conductores se sueldan y van provistos de una caperuza de plancha de cobre. Las piezas de empalme, también de plancha de cobre, suelen estar atornilladas y soldadas. Con tensiones de mas de 6000 V, en los sitios donde la vaina de mica *v* se separa del hierro del estator, debido a la distribución desfavorable del campo en estos sitios se producen descargas de efluvios que deterioran dicha vaina. La vaina va cubierta con una hoja de metal *m* que penetra en el hierro del estator y además lleva una envoltura de papel *p*. El espesor de esta envoltura de papel es tal que la intensidad del campo eléctrico fuera de ella queda lo suficientemente limitada para que no se produzcan efluvios. En la industria no es lo mas frecuente tener que calcular íntegramente las maquinas nuevas sino que se deducen estas de las ya construidas mediante la transformación de algunas dimensiones. Veremos como varían las características de las maquinas en función de sus dimensiones, pero ya desde ahora diremos que estas características son más significativas

La primera parte que diseñaremos del motor de 2 armaduras será la correspondiente al estator de la maquina, la cual como se ha mencionado se trata de un estator de una maquina de corriente alterna. Las dimensiones dependen, de las características de la maquina y de los coeficientes de trabajo electromagnético que se adopten y estos a su vez determinan muchas de las características que se derivan en funcionamiento normal o en condiciones excepcionales.

Factores ambientales

Existen diversos factores que deben tomarse en cuenta para poder lograr un buen diseño, uno de los principales son lo referente a la temperatura ambiente, dentro de este punto s puede considerar la elección de una maquina abierta y una cerrada, donde cada estilo tiene subcategorías que especifican la tolerancia del motor al ambiente hostil. Desde el punto de vista del diseño, las maquinas totalmente cerradas deben tener un mecanismo intermediario de intercambio de calor, en lugar de rechazar las perdidas al aire ambiente. Como consecuencia directa, la maquina totalmente cerrada debe diseñarse para tener menos perdidas por unidad de volumen que las maquinas abiertas. En esta ocasión consideráremos solo el diseño de maquina abierta.

Factores Mecánicos

Como un primer paso en el proceso de diseño esta la elección del armazón y sus dimensiones, para lo cual nos basamos en la norma NEMA standard MG-1 con el fin de facilitar los cálculos y también para simplificar el proceso de análisis de costos y disposición de materiales que realizaríamos después, en este caso elegimos un armazón NEMA 284T. Para el presente trabajo tomaremos las designaciones de La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de Estados Unidos, en su norma NEMA Standard MG - 1 donde presenta los lineamientos para el etiquetado, clasificación y empaque de los motores de CD y CA, Fig. 3.9. Las designaciones NEMA de los armazones estandarizan las dimensiones de las carcasas y monturas. A continuación mostramos las dimensiones básicas de los armazones NEMA.

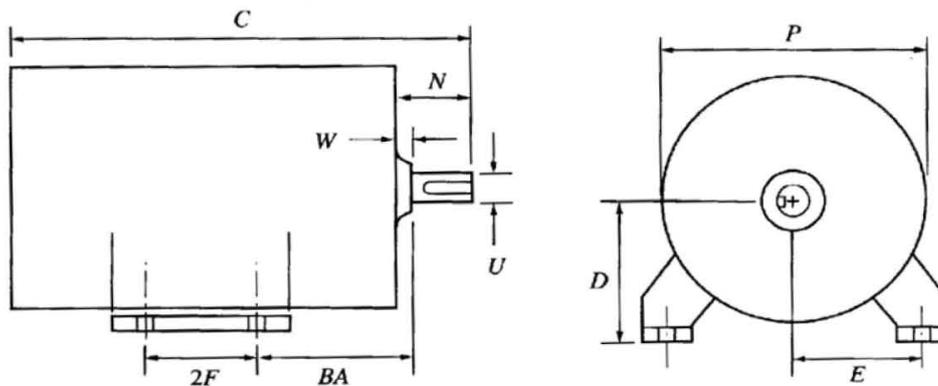


Fig. 3.9

Los valores específicos de las dimensiones para un grupo selecto de armazones que son empleados en motores de CA a lo largo se encuentran en la siguiente Tabla V

Designación de armazón	C	N-W	U	2F	BA	P	D	E
145T	11.69	2.25	0.875	5.00	2.25	6.88	3.50	2.75
184T	13.56	2.75	1.125	5.50	2.75	8.00	4.50	3.75
215T	17.19	3.38	1.375	7.00	3.50	9.38	5.25	4.25
256T	22.25	4.00	1.625	10.00	4.25	10.78	6.25	5.00
284T	23.38	4.62	1.875	9.50	4.75	14.12	7.00	5.50
326T	27.50	5.25	2.125	10.50	5.25	16.12	8.00	6.25
365T	29.62	5.88	2.375	11.25	5.88	18.62	9.00	7.00
404T	32.38	7.25	2.875	12.25	6.62	21.12	10.00	8.00
445T	39.56	8.50	3.375	16.50	7.50	23.62	11.00	9.00

TABLA V Dimensiones de armazones NEMA (en in)

Procedemos al diseño del estator de acuerdo al diagrama de flujo. Fig 3.10

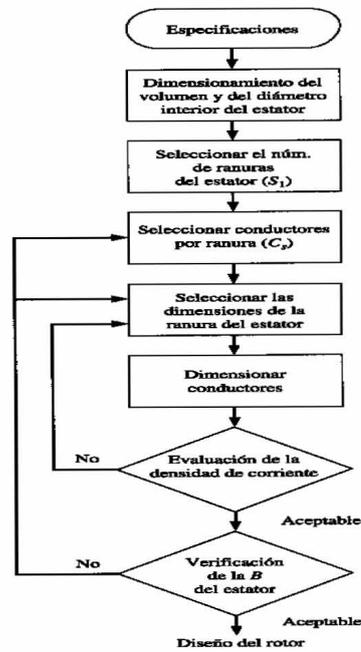


Diagrama lógico de flujo para el diseño del estator.

Fig. 3.10

Dimensionamiento del volumen y del diámetro interior

Después procedimos al dimensionamiento de volumen y diámetro interior, para minimizar el tamaño, los valores de la densidad de corriente y la densidad de flujo se mantienen respectivamente en los límites permitidos por la capacidad de enfriamiento y por los límites de saturación impuestos por el material ferromagnético. El ángulo α está directamente relacionado con el factor de potencia del rotor y, por tanto, tiende a caer dentro de un rango típicamente reducido. E consecuencia, para una clase de motores de inducción, se puede concluir que

$$\frac{D^2 l_a}{T} \cong \text{constante} \equiv v_T \quad 3.3$$

Para el tipo abierto, los motores con diseño NEMA B con potencia nominal de 10 Hp o más, un valor razonable para la constante de volumen normalizado de la ecuación es $v_T=5$ a $6 \text{ in}^3/\text{ft}^*\text{lb}$. Para motores de menos de 10 Hp, el aislamiento con respecto a tierra entre capas y la cuña de la ranura se convierten en un porcentaje mayor de la sección transversal de la ranura, forzando un aumento de la constante de volumen normalizado para lograr un diseño aceptable. Al decrecer la potencia nominal a 1 Hp, el volumen v_T deberá aumentar a un valor de 9 a $10 \text{ in}^3/\text{ft}^*\text{lb}$. Los ingenieros de diseño comúnmente desarrollan valores de v_T con base a una historia de diseño exitosa dentro de su organización.

Como el siguiente paso en el dimensionamiento inicial de la envolvente de material ferromagnético, el diámetro exterior del apilamiento de laminaciones del estator (D_o) es el que debe seleccionarse. El diámetro exterior objetivo del armazón (D_f) se supone conocido. En el caso de una designación NEMA de armazón, $D_f=P$. Seleccionando un espesor de pared (t_f) que de integridad estructural adecuada al armazón, el diámetro exterior de las laminaciones del estator es

$$D_o = D_f - 2t_f \quad 3.4$$

Con el valor tentativo de D_o seleccionado, la especificación del diámetro interior del estator debe conciliar con el número de polos magnéticos. Para máquinas con una cantidad menor de polos, el camino circunferencial del flujo a lo largo del núcleo magnético del estator entre el fondo de las ranuras del estator y el diámetro exterior de la laminación del estator es más largo. Para evitar un requerimiento excesivo de fmm de magnetización, la densidad de flujo en el núcleo del estator para máquinas con un número menor de polos

debe ser menor que para máquinas con números mayores de polos. Una fórmula empírica de la referencia 1 es útil para el dimensionamiento tentativo del diámetro interior del estator:

$$D = \frac{D_0 - 0.647}{1.175 + \frac{1.03}{p}} \quad 3.5$$

La longitud de apilamiento de laminaciones del estator que se deduce entonces de la ecuación (3.3) es

$$\ell_a = \frac{v_T}{D^2} \quad 3.6$$

Aunque los valores específicos para D y para ℓ_a han sido establecidos, algún ajuste de la dimensión ℓ_a puede ser necesario al refinarse el diseño.

El anterior dimensionamiento del volumen del diámetro interior del estator obviamente generó el inicio del diseño del estator. Hasta donde sea posible, sin embargo, las selecciones dimensionales que fueron hechas se mantienen fuera del proceso iterativo principal del diseño del estator para la determinación del número de ranuras, dimensiones de las ranuras y dimensionamiento del conductor que se señalan en el diagrama lógico de flujo de la Fig.3.11

El devanado de doble capa estándar utilizado en la industria requiere necesariamente que el número de conductores por ranura (C_s) sea un número entero par. El rango estrecho de un múltiplo entero de tres ranuras por polo limita la selección del número de ranuras del estator (S_1) a su selección desde la Tabla VI

Selección de ranura del estator												
Polos (p)	Núm. de ranuras del estator (S_1)											
2	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
4		12		24		36		48		60		
6			18			36			54			
8				24				48				

Tabla VI

El paso de ranura del estator es el espacio del estator que abarca un diente y una ranura del estator medidos sobre el diámetro interior del estator D , o

$$\lambda_1 = \frac{\pi D}{S_1} \quad 3.7$$

Un buen diseño practico sugiere un valor del paso de la ranura del estator ubicado en el rango de 0.75 a 1.5 in. Por tanto la selección de S_1 de la tabla deberá ser tal que

$$0.75 \leq \frac{\pi D}{S_1} \leq 1.5 \quad 3.8$$

Conductores por ranura

Los conductores por ranura del estator pueden determinarse por la siguiente ecuación

$$C_s = \frac{0.97 a V_1}{2.22 k_{w1} p N_{s1} f \Phi'_m} \quad 3.9$$

Para decidir el numero de conductores por ranura deben hacerse una estimación del valor máximo del flujo del entrehierro, para lo cual se puede utilizar una formula empírica

$$\Phi'_m = \left(0.00145 + \frac{0.00300}{p} \right) \left[\frac{60}{f} P_s \right]^{1/2} \quad 3.10$$

Diseño de la ranura

Para una buena practica de diseño, el ancho de la ranura del estator (b_{s1}) debe elegirse de tal manera que

$$0.5 \lambda_1 \leq b_{s1} \leq 0.6 \lambda_1 \quad 3.11$$

La profundidad de la ranura (d_{s1}) usualmente cae en el rango

$$2 b_{s1} \leq d_{s1} \leq 4 b_{s1} \quad 3.12$$

Además de contener a los dos lados del devanado, la ranura debe suministrar aislamiento a tierra (forro de la ranura), asegurar aislamiento adecuado entre los lados del devanado (separador de devanados) y aceptar un medio de retener los lados del devanado (cuña de la ranura) como se ilustra en la figura 3.11

Sugerimos los siguientes grosores de material:

- ❖ Utilizar forro de ranura y separador de devanados de 0.015 in.
- ❖ Utilizar cuña de ranura de 0.060 in.

También, es practica común envolver los lados del devanado con una capa de cinta de fibra de vidrio de 0.005 in de espesor para evitar el daño al conductor durante el manejo y para suministrar espacio para la impregnación con barniz del devanado terminado del estator

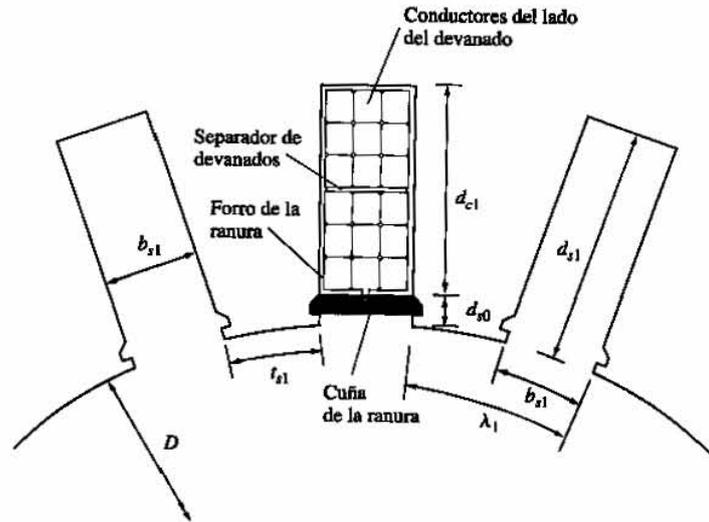


Fig. 3.11

Guiados por las anteriores sugerencias en la dimensión del aislamiento y por los valores tentativos de ancho de la ranura y profundidad de la ranura determinados, se inicia la especificación del tamaño del conductor. La densidad de corriente permisible en el conductor para un enfriamiento exitoso depende del flujo de aire alrededor de los devanados y de la impedancia térmica desde el punto de generación de calor del conductor hasta el aire de enfriamiento. Los apilamientos de laminaciones más cortos son más fácilmente enfriados que los largos. Para máquinas enfriadas con aire, los valores típicos de densidad permisible de corriente en el estator (Δ_1) están en el rango

$$3200 \leq \Delta_1 \leq 5120 \text{ A/in}^2$$

Inicialmente, los tamaños estándar de alambre cuadrado de la Tabla VII deben ser considerados para la elección del conductor.

Sin embargo, las dimensiones de la ranura pueden no ser compatibles con estos valores para permitir el arreglo deseado de apilamiento de los conductores. En tal caso, los fabricantes de alambre magneto pueden suministrar conductores rectangulares trefilados con las especificaciones deseadas relativas a dimensiones aunque eso aumentaría el costo de producción.

Alambre magneto cuadrado aislado con película			
Tamaño AWG	Ancho desnudo (in)	Ancho total (in)	Área (in²)
0	0.3249	0.3329	0.10420
1	0.2893	0.2972	0.08232
2	0.2576	0.2652	0.06498
3	0.2294	0.2367	0.05125
4	0.2043	0.2113	0.04037
5	0.1819	0.1887	0.03171
6	0.1620	0.1686	0.02536
7	0.1443	0.1507	0.01994
8	0.1285	0.1348	0.01563
9	0.1144	0.1205	0.01251
10	0.1019	0.1079	0.00980
11	0.0907	0.0967	0.00788
12	0.0808	0.0868	0.00619
13	0.0720	0.0780	0.00496
14	0.0641	0.0701	0.00389

Tabla VII

El valor de la corriente a plena carga es necesario para dimensionar el área de la sección transversal del conductor A_1 . Aunque no se conoce exactamente hasta que no se complete el diseño, un valor ligeramente conservador de la corriente a plena carga puede calcularse suponiendo un factor de potencia a plena carga de 0.85 y una eficiencia a plena carga (η) de acuerdo con la tabla. La corriente estimada a plena carga es entonces

$$I_1 = \frac{P_s(746)}{\sqrt{3}V_L(0.85)\eta} \quad 3.13$$

Donde P_s es la potencia de salida a plena carga en caballos de potencia y V_L es la tensión nominal de línea. El valor requerido para el área de la sección transversal del conductor sigue como

$$S_{a1} = \frac{I_1}{a\Delta_1} \quad 3.14$$

Si no hay un conductor con el área transversal adecuada para caber bien en la ranura (si es muy grande o muy pequeño), el proceso iterativo indicado deberá llevarse a cabo hasta que se logre un diseño satisfactorio de la ranura
Verificación de densidad de flujo

Antes de comenzar con el diseño del motor debe verificarse las densidades críticas de flujo. La densidad máxima de flujo aparente en el diente del estator se encuentra como

$$B_{stm} = \frac{\frac{\pi}{2} \Phi_m}{\frac{S_1}{p} t_{s1} \ell_a FA} = \frac{\pi p \Phi_m}{2 S_1 t_{s1} \ell_a FA} \quad 3.15$$

Donde FA es un factor de apilamiento con valores de $0.94 \leq FA \leq 0.97$ dependiendo del grosor de las laminaciones y de la presión axial de ensamble. Para un buen diseño, $90 \leq B_{stm} \leq 120$ kilolneas/in² ($1.4 \leq B_{stm} \leq 1.9$ T).

El valor máximo de la densidad de flujo del núcleo del estator es dado por

$$B_{scm} = \frac{\Phi/2}{\left(\frac{D_o - D}{2} - d_{s1}\right) \ell_a FA} = \frac{\Phi_m}{(D_o - D - 2d_{s1}) \ell_a FA} \quad 3.16$$

Para maquinas con números pequeños de polos, el camino en el núcleo del estator es largo. En consecuencia, B_{scm} debe ser lo suficiente mente pequeña para evitar un requerimiento de fmm que resulte en una corriente de magnetización excesiva. Un buen diseño coloca a $50 \leq B_{scm} \leq 95$ kilolneas/in² ($0.5 \leq B_{scm} \leq 0.95$ T), donde el limite inferior del rango se aplica a maquinas de dos polos.

Si las verificaciones de densidad de flujo muestran que B_{stm} o que B_{scm} es alto mientras que el otro es bajo, puede ser posible una acción correctiva redistribuyendo las dimensiones de la ranura b_{s1} y d_{s1} . De otra manera, será necesario ajustar los conductores por ranura.

3.4. -DISEÑO DEL ROTOR

El rotor o inducido de una maquina de cc consta de un eje fresado de una barra de acero, con un núcleo construido sobre el. El núcleo se compone de varias laminas troqueladas en una plancha de acero, con ranuras a lo largo de su superficie exterior para sostener los embobinados del inducido o armadura. El colector se construye sobre el eje del rotor en un extremo del núcleo. Las bobinas del inducido se colocan en las ranuras del núcleo, y sus extremos se conectan a los segmentos colectores.

En las maquinas reales hay varias maneras para que las espiras en el rotor (también llamado inducido) puedan conectarse a sus segmentos colectores. Estas conexiones afectan el numero de trayectos de corrientes paralelas dentro del rotor, la tensión de salida del rotor y el numero y posición de las escobillas que van sobre los segmentos colectores. La mayor parte de las bobinas del rotor, consisten en bobinas prefabricadas, en forma de diamante, que se insertan en las ranuras del inducido como una unidad. Cada bobina consta de un numero de vueltas (espiras) de alambre, encintadas y aisladas de las demás y de la ranura del rotor. Cada lado de una vuelta o espira se denomina conductor. El numero de conductores en el inducido de una maquina, se obtiene mediante

$$Z \equiv 2CN_c \quad 3.17$$

en donde Z = numero de conductores en el rotor
 C = numero de bobinas en el rotor
 N_c = numero de espiras por bobina

Normalmente, una bobina abarca 180 grados eléctricos. Esto significa que cuando un lado esta bajo el centro de un polo dado, el otro lado esta bajo el centro de un polo de polaridad contraria. Los polos físicos pueden no estar localizados a una distancia de 180 grados mecánicos, pero el campo magnético tendrá completamente invertida su polaridad para circular de un polo al siguiente. La relación entre un ángulo eléctrico y un ángulo mecánico en una maquina dada, se expresa así

$$\theta_e \equiv \frac{P}{2} \theta_m \quad 3.18$$

en donde θ_e = ángulo eléctrico, en grados eléctricos
 θ_m = ángulo mecánico, en grados geométricos
 P = cantidad de polos en la maquina

Si una bobina abarca 180 grados eléctricos, los tensiones de los conductores en cualquiera de los dos lados de la bobina serán exactamente de la misma magnitud y en dirección contraria en todo momento. Tal bobina se denomina *bobina de paso diametral*.

Algunas veces se hacen bobinas de menos de 180 grados eléctricos que se denominan *bobinas de paso fraccionario* y el embobinado del rotor con este tipo de bobina se denomina *embobinado de cuerda*. La cantidad de encordado en un embobinado se describe por medio de un factor de paso p , que se define por la ecuación

$$p \equiv \frac{\text{angulo} - \text{electrico} - \text{de} - \text{la} - \text{bobina}}{180^\circ} \times 100\% \quad 3.19$$

Con frecuencia se usara una pequeña cantidad de encordado en los embobinados de rotor de cc, par mejora la conmutación.

La mayor parte de los embobinados de rotor son de dos capas, lo cual significa que los lados de dos bobinas diferentes se insertan en una misma ranura. Uno de los lados de cada bobina se colocara en el fondo de su ranura y el otro estará en la parte superior de ella. Tal sistema de construcción requiere que las bobinas se coloquen individualmente, por medio de un procedimiento bastante dispendioso. Uno de los lados de cada bobina se coloca en el fondo de su ranura y luego, cuando todos los fondos estén en su sitio, el otro lado se coloca en la parte superior de su ranura. De esta manera, todos los embobinados se entretrejen, mejorando su fortaleza mecánica y la uniformidad de la estructura final.

Conexiones a los segmentos colectores

Una vez que se han instalado las bobinas en las ranuras del rotor, deben conectarse a los segmentos colectores. Hay varias maneras como se pueden hacer estas conexiones y según el resultado de los diferentes arreglos que se pueden hacer con las bobinas, se obtendrán diferentes ventajas y desventajas.

La distancia (en numero de segmentos) entre los segmentos colectores, a los cuales se conectan los dos extremos de una bobina, se llama paso de colector Y_c . Si el extremo de una bobina (o el juego de un numero de bobinas, para construcción ondulada) se conecta a un segmento colector delante del que esta conectado a su extremo inicial, el embobinado se denomina embobinado progresivo. Si el extremo de una bobina se conecta a un segmento colector detrás del que esta conectado en su comienzo, el embobinado se denomina embobinado regresivo. Si todo lo demás es idéntico, la dirección de la rotación

de un rotor de embobinado progresivo, será contraria a la dirección de la rotación de un embobinado regresivo.

Los embobinados de un rotor (inducido) se clasifican mas delante de acuerdo con la retícula de sus embobinados. Un embobinado de rotor sencillo es un embobinado de una sola bobina, completo, de devanado cerrado en el rotor. Un rotor con dos juegos completos e independientes de embobinados se denomina rotor de embobinado doble. Si un rotor tiene un embobinado doble, entonces cada uno de los embobinados estará asociado con cada uno de los segmentos colectores: un embobinado estará conectado a los segmentos 1, 3,5,etc. Y el otro embobinado estará conectado a los segmentos 2,4,6,etc. En forma análoga, un embobinado triple tendrá tres juegos completos e independientes de embobinados, cada uno de los cuales se conecta con cada tercer segmento colector del inducido. Colectivamente, todos los inducidos con mas de un juego de embobinados se dice que son embobinados múltiples.

Finalmente, los embobinados del inducido se clasifican de acuerdo con la secuencia de sus conexiones con los segmentos colectores. Hay dos secuencias básicas de conexiones para embobinados de inducido; embobinado imbricado y embobinado ondulado. Además, hay un tercer tipo de embobinado, llamado embobinado pata de rana, que combina los imbricados con los ondulados en un solo rotor.

Cojinetes de rodamiento

La siguiente cuestión sobre la que vamos a tratar se refiere a los cojinetes de rodamiento. Los cojinetes de rodamiento se emplean frecuentemente y son muy seguros. Para trabajos pesados se utilizan cojinetes de rodillos. Una combinación de estos dos tipos de cojinetes que se utiliza corrientemente consiste en poner un cojinete de rodillos en el extremo del eje en donde va la polea y un cojinete de bolas en el extremo opuesto. Algunos tipos de cojinetes de rodillos pueden soportar un determinado empuje axial, como el producido por el peso del rotor cuando la maquina es de eje vertical. Los fabricantes de este tipo de cojinetes los hacen ya de tipos normalizados. Para empujes grandes es necesario construir cojinetes de rodillo especial.

Cojinetes de fricción.-

Para maquinas que deben funcionar silenciosamente es indicado poner cojinetes de fricción. Estos cojinetes son mucho más silenciosos que los cojinetes de rodamiento. Los motores de una potencia igual a una fracción de

CV llevan con frecuencia esta clase de cojinetes de un tamaño demasiado grande, con lo que se consigue reducir el desgaste del cojinete.

El manguito del cojinete se fábrica algunas veces de polvo metálico; Este polvo se calienta y se somete a grandes presiones. El resultado que se obtiene es un manguito con superficies semiporosas que pueden ser impregnadas con lubricante; Así permanecen durante mucho tiempo autolubricadas. Es esencial suministrar al cojinete los elementos necesarios para asegurar que el lubricante no se salga del mismo y llegue por el eje hasta los arrollamientos. Por esto es necesario poner en el cojinete anillos y garganta para el aceite.

Colector

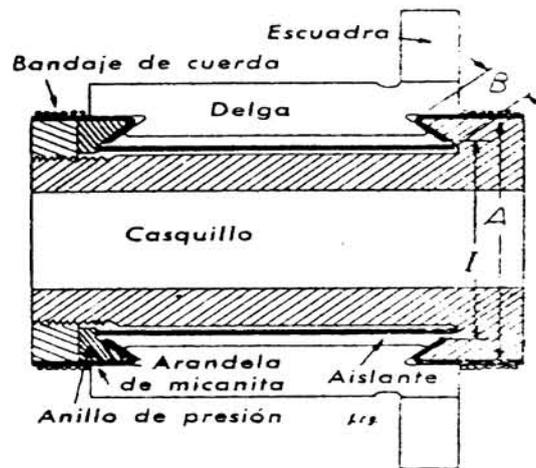


Fig. 3.12

El funcionamiento correcto de las maquinas de corriente continua depende muy principalmente de las buenas condiciones del colector. La mayor parte de las averías proceden del mismo. Ya al soldar los terminales de las bobinas hay que tomar ciertas precauciones. Si se emplea, por ejemplo, un fundente ácido, acaba este corroyendo el aislamiento entre las delgas, lo que ocasiona corto circuitos entre las mismas y, finalmente, la carbonización de las bobinas. Como fundente se empleara colofonia carbonizada y como soldadura estaño poco fusible, pues un servicio prolongado con sobrecarga calienta mucho el colector y se desprenderían las soldaduras o los apéndices en

escuadra de las delgas. Por esta razón estas escuadras irán, además de soldadas, remachadas. El colector consta de cierto número de laminas de cobre (delgas) que van aisladas entre sí y del núcleo del inducido. En el eje del inducido se asienta el casquillo del colector con un reborde circular a cola de milano, que viene de fundición.

Las delgas quedan encajadas en este reborde y en el anillo de apriete con tuerca de fijación. El aislante consiste en una capa cilíndrica y en dos arandelas de mica. Este producto es una mica artificial que puede doblarse en caliente. En este lugar de la tuerca, algunos colectores llevan un anillo de apriete por tornillo; otros llevan un zuncho colocado en caliente. La tuerca o el anillo de apriete se pueden desmontar fácilmente para sacar las delgas; el zuncho no hay más remedio que romperlo, rebajándolo con el torno, y poner luego un zuncho nuevo. Fig. 3.12

Las delgas son generalmente de cobre laminado duro. El aislamiento entre delgas es de un material similar a la mica y tiene un grueso de 0.5 a 0.8 mm; las arandelas de aislamiento son de 1.5 a 2.5 mm de grueso. Al renovar el aislamiento hay que prestar atención especial al espesor del mismo. Un aislamiento de delgas excesivamente delgado acaba provocando la colocación oblicua, más o menos pronunciada, de las delgas. Las máquinas pequeñas llevan una corona de conexiones para los empalmes al colector de los terminales de las bobinas. En las grandes máquinas se llevan los principios y los finales de las bobinas del inducido a las escuadras de apéndice de las delgas. En la Fig. 3.13 se representan algunos tipos de delgas, unas en bruto y otras afinadas y con escuadras colocadas.

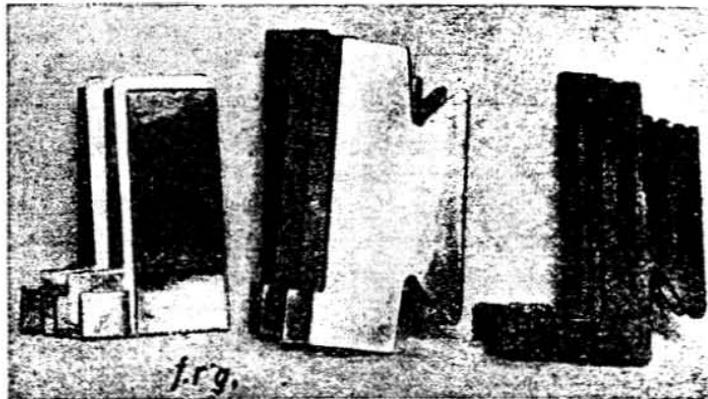


Fig. 3.13

Las laminas de cobre se hacen lo suficientemente gruesas como para permitirles tener un desgaste normal durante la vida del motor. El aislamiento de mica entre los segmentos colectores es mas duro que el material de los colectores en si, de manera que cuando la maquina envejece, a menudo se necesita remover el aislamiento del colector para asegurarnos que no va a sobrepasar el nivel de las laminas de cobre de que esta hecho.

Ante todo hay que procurar que el eje quede perfectamente centrado. La colocación de las escobillas con respecto al colector es generalmente radial. La experiencia a demostrado, sin embargo, que los colectores con aislamiento rebajado entre las delgas las escobillas radiales son propensas a vibrar, Para eliminar la vibración se colocan las escobillas con inclinación contraria al sentido de rotación. El ángulo de inclinación es de 5 a 15°. Las escobillas inclinadas a favor del sentido de rotación tienen una inclinación de 20 a 30°, esto con el fin de evitar que las escobillas se atoren con el conmutador y se produzca un accidente. Figura 3.14

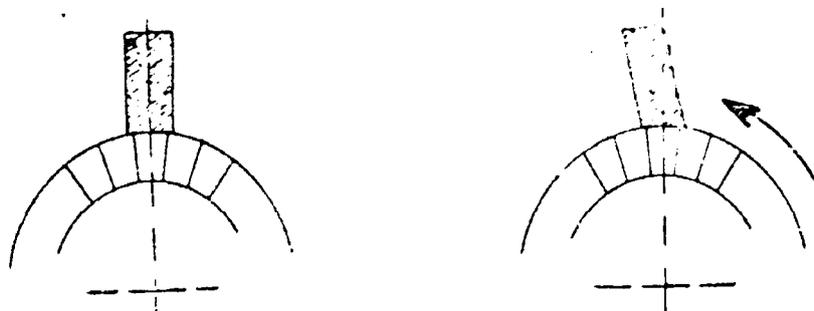


Fig. 3.14: Distintas inclinaciones de las escobillas

La distancia entre colector y las cajas de guía de las escobillas es de 1 a 3 milímetros. Así se consigue una buena refrigeración de las cabezas de las escobillas. Igualmente puede mejorarse la ventilación en los anillos de toma empleando escobillas hendidas o provistas de conductos de refrigeración. La presión de apoyo debe ser la misma en todas las escobillas para conseguir la distribución uniforme de la corriente. Los motores expuestos a fuerte vibración (grúas, tranvías) necesitan mayor presión en las escobillas que los motores corrientes. Asimismo los carbones duros requieren presión mayor que los blandos. Por el desgaste progresivo de las escobillas conviene comprobar de vez en cuando la presión de los muelles.

Escobillas

Las escobillas de la maquina se hacen de carbón, grafito, grafito metálico o una mezcla de carbón y grafito. Tienen una alta conductividad para reducir las perdidas eléctricas y un bajo coeficiente de fricción para reducir el desgaste excesivo. Deliberadamente se fabrican de un material mas blando que el de los segmentos colectores, de modo que la superficie del colector no sufra mayor desgaste. La escogencia de la dureza es asunto de lograr un termino medio: si las escobillas son demasiado suaves, se debe estar cambiándolas con mucha frecuencia; si son muy duras, la superficie del colector se desgastara excesivamente durante la vida de la maquina.

Todo desgaste que se produzca en la superficie del colector es el resultado directo de la fricción permanente de las escobillas sobre ella, para convertir la tensión de CA de los conductores del rotor en la tensión de cc en las terminales de la maquina. Si la presión de las escobillas es demasiada, tanto las escobillas como las laminas del colector se desgastaran en exceso. Sin embargo, si la presión de las escobillas es demasiado pequeña, estas tienden a saltar ligeramente y se produce un gran chisporroteo en la superficie de contacto del segmento escobilla-colector. Este chisporroteo es malo tanto para las escobillas como para la superficie del colector, por consiguiente, la presión sobre esta debe ajustarse cuidadosamente para una larga duración.

Otro factor que afecta el desgaste de las escobillas y segmentos en el colector de una maquina de cc es la cantidad de corriente que circula por la maquina. Las escobillas, normalmente, se deslizan sobre la superficie del colector, en una capa delgada de oxido que lubrica el movimiento de la escobilla contra los segmentos. Sin embargo, si la corriente es muy pequeña, dicha capa falla y la fricción entre las escobillas y el colector se incrementa enormemente. Este aumento de fricción contribuye a un rápido desgaste. Para una máxima duración de las escobillas, una maquina debe, por lo menos, estar parcialmente cargada en todo momento.

La buena marcha de un motor o de un dinamo depende en gran parte de la calidad de las escobillas. Si al cambiar los carbones de un motor se producen chipas abundantes o el colector, o bien los anillos de toma, se ennegrecen o se ensucian, es señal de que no se ha elegido un material adecuado para escobillas.

El contacto entre colector y las escobillas es un contacto deslizando. El paso de la corriente no puede ser tan uniforme como en un contacto fijo. En los conductores metálicos (líneas) e indica la densidad de corriente de Amp/mm²; en las escobillas suele indicarse, en cambio, en Amp/cm², o sea la relación transversal de intensidad de la corriente en amperios y la sección transversal de la escobilla (superficie de contacto) en centímetros cuadrados. Además de la densidad de la corriente, en la elección del material de las escobillas influye también la velocidad periférica o lineal del colector o de los anillos de toma. Esta velocidad lineal se obtiene por la fórmula:

$$v \equiv \frac{\pi * D * n}{60} m / seg. \quad 3.20$$

siendo

n = número de revoluciones por minuto

D = diámetro del colector, en metros

$\pi = 3.14$

En las máquinas pequeñas se emplean escobillas duras de carbón electrografítico. La densidad admisible en estas escobillas es de 4 a 7 Amp/cm², con una velocidad periférica de unos 15 m/seg. Estos carbones poseen elevada resistencia mecánica y mantienen en buen estado las superficies rozantes. Su precio, relativamente reducido, representa otra ventaja.

Las máquinas de tamaño medio y las lentas de gran tamaño se equipan con carbones electrografíticos de dureza media. Se consigue una conmutación especialmente buena en las modernas máquinas de corriente continua con polos auxiliares. Densidad admisible 7 a 10 Amp/cm², con una velocidad de 20 m/seg. Este tipo de carbones está indicado principalmente para las máquinas de 110 y 220 voltios.

Los carbones electrografitados, también llamados “carbones nobles”, pertenecen a la categoría de los carbones de dureza media. Estos carbones poseen una extraordinaria resistencia mecánica y ocasionan escaso rozamiento. Tienen aplicación en las grandes máquinas de todos los tipos, en los convertidores de tracción, en los motores de reversión, en los trifásicos con colector, en los universales de gran número de revoluciones y en los dinamos de alumbrado para automóviles. Admiten una densidad de 12 Amp/cm², con una velocidad lineal de 50 m/seg.

En las máquinas sometidas a carga eléctrica considerable, se emplean las escobillas de grafito puro. La densidad admisible es de 10 Amp/cm² y la velocidad periférica, según el tipo, de 25 a 50 m/seg. Con estas escobillas de grafito se consigue una marcha exenta de chispas, aunque el servicio sea con carga variable y a golpes. Se aplica en todas las máquinas grandes de gran velocidad (turbogeneradores).

Cuando se exigen conductibilidades especialmente elevadas (grandes densidades de corriente) se emplean las escobillas de carbón-bronce y de carbón-cobre. El carbón-bronce se emplea en los dinamos de baja tensión, en anillos de toma y en los electromotores de arranque de los automóviles. El carbón-cobre se emplea para contactos en la construcción de aparatos eléctricos y en los anillos de toma de los pequeños motores trifásicos. La carga admisible de los carbones cobre y bronce, según el tipo, importa de 15 a 20 Amp/cm², con velocidad periférica hasta 35m/seg.

Al colocar los carbones se procurara que todos los porta escobillas queden a la misma distancia del colector. Interponiendo una tablilla se consigue esto fácilmente. A fin de evitar la formación de estrías en el colector, todos los portaescobillas de un mismo pasador irán algo corridos con respecto a los del pasador siguiente. Las escobillas deberán poder mover fácilmente dentro de las cajas guía. No deben, por lo tanto agarrarse, pero tampoco tendrán excesivo juego. Las trenzas de conducción de la corriente entre los carbones y los porta escobillas no impedirán el movimiento de aquellos. La rotura de las trenzas ocasiona el ensuciamiento de las cajas de guía, cuya consecuencia es el agarrotamiento de los carbones. Las trenzas rebajan la densidad de corriente en los portaescobillas.

Se cuida siempre que los carbones nuevos sean de la calidad correspondiente a la máquina. Los carbones de circunstancias, limados o arreglados por uno mismo, traen como consecuencia el rápido ensuciamiento del colector. Unos carbones defectuosos pueden incluso a la no-excitación de la dinamo. Nunca se colocaran en el mismo portaescobillas carbones duros de escasa conductibilidad y carbones blandos de gran conductibilidad, pues estos últimos absorberían casi toda la corriente y trabajarían sobrecargados, con gran producción de chispas y fuerte ennegrecimiento del colector.

Zunchado

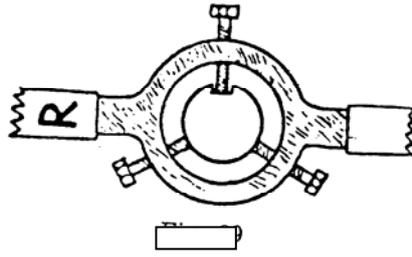


Fig. 3.15

Puede efectuarse al torno o en caballetes. En este último caso se da vueltas al inducido con una palanca atornillada. Esta palanca consiste en un ojo con tres robustos tornillos y en dos tubos roscados R. Figura 3.15

En este caso necesario puede también emplearse un perrillo con tubo enchufado, sujeto en el lado de la polea. El frenado o tracción sobre el alambre de acero del zunchado puede ejercerse dando a aquel varias vueltas alrededor de una cuerda de cáñamo, la cual es la que aguanta, o bien sujetándola con unas entenallas de mordazas guarnecidas con hojalata entre las que resbale el alambre. La cuerda de cáñamo se fija directamente al suelo y las entenallas por medio de un cable.

Los bandajes del núcleo van, por lo general, alojados en muescas del inducido, no debiendo sobre salir los zunchos de la superficie del núcleo. Los inducidos con núcleo. Los inducidos con núcleo de superficie lisa constituyen una excepción. Para ellos se emplea el zunchado con alambre fino de acero. El espacio sobre las cabezas de las bobinas es, por lo general, más amplio, por lo que estos puntos suelen zuncharse con alambre más grueso. Como aislante entre los bandajes y el arrollamiento se emplea fibra y, si el espacio es reducido, también mica. Las juntas del aislante se efectúan por adelgazamiento y superposición. Las tiras de fibra se sujetan con alambre. Para cierre de los bandajes se utiliza la hojalata. En los inducidos de tamaño medio son suficientes seis tiras de hojalata colocadas paralelamente y distribuidas con uniformidad en el perímetro del inducido. El rollo de alambre de acero debe girar con dificultad para que no se desenrolle por sí mismo y se enrede. Primero se enrollan los bandajes del núcleo, y después, sin cortar el alambre, se

pasan los bandajes sobre las cabezas de las bobinas, con algunas vueltas de mayor paso sobre el arrollamiento, con lo cual las bobinas quedan fuertemente apretadas y el bandaje es más sólido. Antes de cortar el alambre de estos trozos de transición hay que soldar el zunchado. En la Fig. 3.16 se representa un inducido de corriente continua en la que los dos bandajes exteriores del núcleo van unidos por tiras de hojalata a los bandajes de las cabezas de las bobinas. Nunca deben unirse entre si los bandajes de la superficie del núcleo. En la Fig. 3.17 se representa un inducido trifásico zunchado.

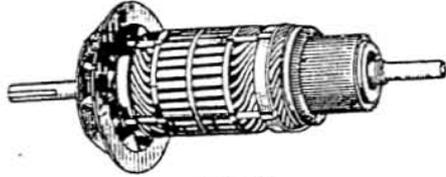


Fig. 3.16

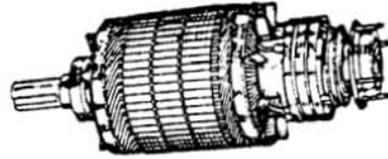


Fig. 3.17

Barnizado de los arrollamientos

Fuera de los colectores, la parte más crítica del diseño de un motor de cc es el aislamiento de sus embobinados. Si el aislamiento de estos falla, el motor se daña. La reparación de una máquina con el aislamiento en corto circuito es bastante costosa en el caso de que se pueda reparar, lo cual no siempre es posible. Para evitar que el aislamiento de los embobinados se dañe, como consecuencia de un recalentamiento, es necesario limitarles la temperatura. Esto puede lograrse parcialmente, suministrándoles ventilación por medio de circulación de aire, aunque en últimas, la máxima temperatura soportable por los embobinados es la que limita la máxima potencia que la máquina puede suministrar continuamente.

El aislamiento raras veces se daña en forma repentina por algunas temperaturas críticas; más bien, el aumento en la temperatura produce una degradación paulatina del aislamiento, haciéndolo vulnerable a otras causas, como el golpe, la vibración o el esfuerzo eléctrico. Hay una antigua regla empírica que dice que las expectativas de vida de un motor con un aislamiento dado se reducen a la mitad por cada 10 % de incremento en la temperatura de los embobinados. Hasta cierto punto, esta regla aun se aplica hoy en día.

Para normalizar los límites de temperatura del aislamiento de las máquinas, la National Electrical Manufacturers Association (NEMA), en los Estados Unidos, ha definido una serie de clases de sistemas de aislamientos. Cada clase de sistemas de aislamientos. Especifica el alza de temperatura máxima permitida para cada tipo. Hay cuatro clases de aislamientos en las normas NEMA para motores de cc, de caballos de fuerza integrales: A, B, F y H. Cada clase representa un mayor aumento de la temperatura permisible para los embobinados, que la clase anterior. Por ejemplo, si la temperatura, medida por termómetro, del embobinado del inducido se eleva por encima de la temperatura ambiente en un tipo de motor de cc de funcionamiento continuo, esta diferencia de temperatura se debe limitar a 70° C para clase A, 100° C para clase B, 130° C para clase F y 155° C para clase H de aislamiento.

Estas especificaciones de temperatura se describen con gran detalle en NEMA Standard MGI-1987, Motors and Generators. Normas similares han sido definidas por la International Electrotechnical Comisión (IEC) y por varias otras organizaciones nacionales sobre normas en otros países.

Como protección contra la humedad y el polvo se impregnan las bobinas con un buen barniz aislante. La impregnación debe ser lo suficientemente íntima para que el barniz penetre en todos los poros y ranuras. En la primera impregnación de las bobinas se utilizara el barniz aislante diluido al 30 por 100. Los grandes inducidos se impregnan con barniz diluido al 50 por 100. La disolución debe verificarse con un diluyente especial. La segunda impregnación se hace con barniz sin diluir. Después de cada impregnación se secan las bobinas perfectamente. También antes de impregnar es conveniente el secado de las bobinas, pues un arrollamiento seco y caliente absorbe mejor el barniz. Para que este penetre bien por las ranuras se colocan inducido y estator de modo que las ranuras queden verticales. Las bobinas moldeadas y las de los inductores se impregnan antes de colocarlas. Para ello se las deja algún tiempo sumergida en el barniz hasta que se saturen. Al sacarlas se elimina con un pincel el exceso de barniz. Durante la desecación se ventilara la estufa de vez en cuando para expulsar el aire húmedo. Siempre será preferible la desecación larga a la corta.

Todo buen barniz aislante debe ser fluido y antihigroscópico. El barniz no debe contener sustancia alguna que ataque al hilo o a su aislamiento y, especialmente para los arrollamientos de los transformadores, ha de ser insensible al aceite. El disolvente del barniz debe volatizarse por completo a

temperatura de 60 a 80°. Después de la desecación no se resquebrajara el barniz y las bobinas conservaran su flexibilidad. El barniz seco será insoluble en agua.

Si debe emplearse barniz negro o claro, es indiferente. El barnizado secado al aire se aplica solo en reparaciones pequeñas, cuando no se dispone de estufas de desecación. Para las bobinas de hilo esmaltado se empleara un barniz que no ataca al esmalte.

Equilibrado del inducido

Uno de los requisitos mecánicos más importantes que una maquina debe satisfacer es que sus partes rotativas estén equilibradas. Todas las partes giratorias deben estar equilibradas dinámicamente. Si se desea eliminar las vibraciones, el proceso de equilibrado debe ser hecho con extraordinaria precisión. El equilibrio estático que se puede obtener apoyando el rotor en dos ejes es completamente insuficiente.

Las fuertes vibraciones que se producen en una maquina son siempre fuente de molestias y de ruidos. En las maquinas de CC pueden ser también causa de una mala conmutación. El método frecuentemente usado de hacer agujeros en el anillo del devanado del rotor de un motor de jaula de ardilla, con el propósito de equilibrarlo, no es aconsejable. Una forma mejor de conseguir el equilibrado consiste en proyectara los dispositivos adecuados para añadir pesos donde se requiera.

Por muy cuidadosa que haya sido la ejecución de un bobinado, nunca se conseguirá que el centro de gravedad coincida exactamente con el centro de la Fig. Como para mejorar el rendimiento se tiende a trabajar con gran numero de revoluciones, es preciso que los arrollamientos estén equilibrados para evitar vibraciones y chispas en el colector. En los dinamos pequeños se corrige el desequilibrio barrenando o limando el paquete de chapas del inducido. Los inducidos de tamaño medio pueden equilibrarse introduciendo cuñas de latón en las ranuras, mas como el desequilibrio no suelen encontrarse en las ranuras, sin en las cabezas de las bobinas, no es muy recomendable este procedimiento. En los grandes inducidos se disponen anillos de compensación o aplicaciones de estaño sobre los bandajes. También se introduce entre las bobinas una masa plástica que al poco tiempo se endurece y no se disgrega por la elevada velocidad de rotación.

3.3.- cálculos de diseño del Motor 2A

Desarrollo De Los Cálculos Del Estator

El estator que va diseñarse se especifica como sigue:

Tensión $V=440$ V Frecuencia $f=60$ Hz Potencia
 $P=15$ hp Velocidad $n_m=1800$ rpm Diseño NEMA B
 Armazón 284T

De la Tabla V, obtenemos que $P=D_f=14.12$ in. Considerando un grosor del armazón de 0.50 in, el diámetro exterior del apilamiento de laminaciones es

$$D_o = D_f - 2t_f = 14.12 - 2(0.50) = 13.12 \text{ in}$$

El par nominal para el motor se determina como

$$T_s = \frac{5250(P_s)}{n_m} = \frac{5250(15)}{1800} = 43.75 \text{ ft} \cdot \text{lb}$$

Utilizando $v_T = 5 \text{ in}^3 / \text{ft} \cdot \text{lb}$ en la ecuación 3.3

$$D^2 \ell_a = v_T T_s = (5)(43.75) = 218.75 \text{ in}^3$$

de la ecuación 3.5

$$D = \frac{D_o - 0.647}{1.175 + 1.03/p} = \frac{13.12 - 0.647}{1.175 + 1.03/4} = 8.7072 \text{ in}$$

Por tanto

$$\ell_a = \frac{D^2 \ell_a}{D^2} = \frac{218.75}{(8.7072)^2} = 2.8853 \cong 3 \text{ in}$$

Seleccionando $S_1=24$ de la Tabla VI

$$\lambda_1 = \frac{\pi D}{S_1} = \frac{\pi(8.7072)}{24} = 1.1398 \text{ in}$$

Este valor de paso de ranura del estator esta dentro del rango por lo que se considera aceptable.

El valor máximo del flujo por polo se estima por medio de la ecuación

$$\Phi'_m = \left(0.00145 + \frac{0.00300}{p} \right) \left[\frac{60}{f} P_s \right]^{1/2} = \left(0.00145 + \frac{0.00300}{4} \right) \left[\frac{60}{60} (15) \right]^{1/2}$$

$$= 0.0085 \text{ Wb}$$

Los factores de devanado se determinan por las formulas

$$N_{s1} = \frac{S_1}{pm} = \frac{24}{(4)(3)} = 2 \text{ ranuras por polo por fase}$$

Hay $S_1/p=24/4=6$ ranuras por polo. Se elige un paso de 5 ranuras del estator

$$\rho = \frac{5}{6}(180^\circ) = 150^\circ$$

$$k_p = \text{sen}(\rho/2) = \text{sen}(150^\circ/2) = 0.9659$$

$$\gamma_1 = \frac{p180^\circ}{S_1} = \frac{4(180^\circ)}{24} = 30^\circ \text{ por ranura}$$

$$k_d = \frac{\text{sen}(N_{s1}\gamma_1/2)}{N_{s1}\text{sen}(\gamma_1/2)} = \frac{\text{sen}(2*30^\circ/2)}{2\text{sen}(30^\circ/2)} = 0.9659$$

$$k_{w1} = k_p k_d = (0.9659)(0.9659) = 0.9330$$

con base en la ecuación 3.9 y eligiendo un solo devanado de circuito, de acuerdo al procedimiento descrito en el libro ("Maquinas Eléctricas, análisis y diseño aplicando Matlab" de Jimmie J. Cathey, pagina 397)

$$C_s = \frac{0.97aV_1}{2.22k_{w1}pN_{s1}f\Phi'_m} = \frac{0.97(1)(440/\sqrt{3})}{2.22(0.9330)(4)(2)(60)(0.0085)} = 29.1588 \approx 30$$

conductores por ranura

Ya que los conductores por ranura deben ser un entero par, el valor a elegir debería ser $C_s=30$. El valor real del flujo máximo por polo puede calcularse ahora a partir de la siguiente ecuación

$$\Phi_m = \frac{0.97aV_1 * 10^8}{2.22k_{w1}pN_{s1}fC_s} = \frac{0.97(1)(440/\sqrt{3}) * 10^8}{2.22(0.9330)(4)(2)(60)(30)} = 0.8261 * 10^6 \text{ líneas}$$

la corriente a plena carga puede estimarse de la ecuación 3.13

$$I_1 = \frac{P_s(746)}{\sqrt{3}V_l(0.85)\eta} = \frac{(15)(746)}{\sqrt{3}(440)(0.85)(0.85)} = 20.3226 \text{ A}$$

Para una densidad de corriente de 4000 A/in^2 , el tamaño del conductor del estator es dado por ecuación 3.14

$$s_{a1} = \frac{I_1}{a\Delta_1} = \frac{20.322640.6452}{(1)(4000)} = 0.0051 \text{ in}^2$$

De la tabla puede verse que el alambre magneto cuadrado núm. 12 es una elección aceptable para los conductores del estator. Una distribución del detalle de la ranura elegida se muestra a continuación. Permitiendo una variación del 10% de tolerancia en las dimensiones del conductor con el fin de considerar las desviaciones de planicidad, se determinan el ancho y profundidad de la ranura.

Profundidad de la ranura

(10)(1.1)(0.0868)	conductor
(4)(0.005)	cinta de vidrio
(2)(0.015)	forro de ranura
0.015	separador de espira
0.060	cuña de ranura
0.060	pestaña de cuña

$$\overline{d_{s1}} = 1.1398 \text{ in}$$

$$d_{s0} = 0.060 + 0.060 = 0.12 \text{ in}$$

Ancho de ranura

(3)(1.1)(0.0868)	conductor
(2)(0.005)	cinta de vidrio
(2)(0.015)	forro de ranura

$$\overline{b_{s1}} = 0.3264 \text{ in}$$

lo que da $d_{s1}/b_{s1} = 1.1398/0.3264 = 3.4920$

en la figura 3.18 se muestra a detalle la ranura del estator

Ahora se hacen las verificaciones de densidad de flujo utilizando las ecuaciones

$$t_{s1} = \lambda_1 - b_{s1} = 1.1398 - 0.3264 = 0.8134 \text{ in}$$

$$B_{stm} = \frac{\pi p \Phi_m}{2 S_1 t_{s1} \ell_a F A} = \frac{\pi (4) (0.82616 * 10^6)}{2 (24) (0.8134) (3) (0.96)} = 92.3282 \text{ kilolneas/in}^2$$

$$B_{scm} = \frac{\Phi_m}{(D_o - D - 2d_{s1}) \ell_a F A} = \frac{0.82616 * 10^6}{(13.12 - 8.7072 - 2 * 1.1398) (3) (0.96)} = 134.4745 \text{ kilolneas/in}^2$$

Ya que ambos valores están dentro del rango aceptable, los cambios iterativos no son necesarios.

El entrehierro de la maquina se calcula mediante la siguiente formula:

$$\delta = 0.0016D + 0.001\ell_a + 0.0072 = (0.0016 * 8.7072) + (0.001 * 3) + 0.0072$$

$$= 0.0241 \text{ in}$$

ahora podemos calcular el diámetro del rotor:

$$d_r = D - 2\delta = 8.7072 - (2 * 0.0241) = 8.659 \text{ in}$$

El desarrollo del embobinado del estator se puede observar en la figura 3.3. Una vez con estos datos podemos proceder al calculo del rotor.

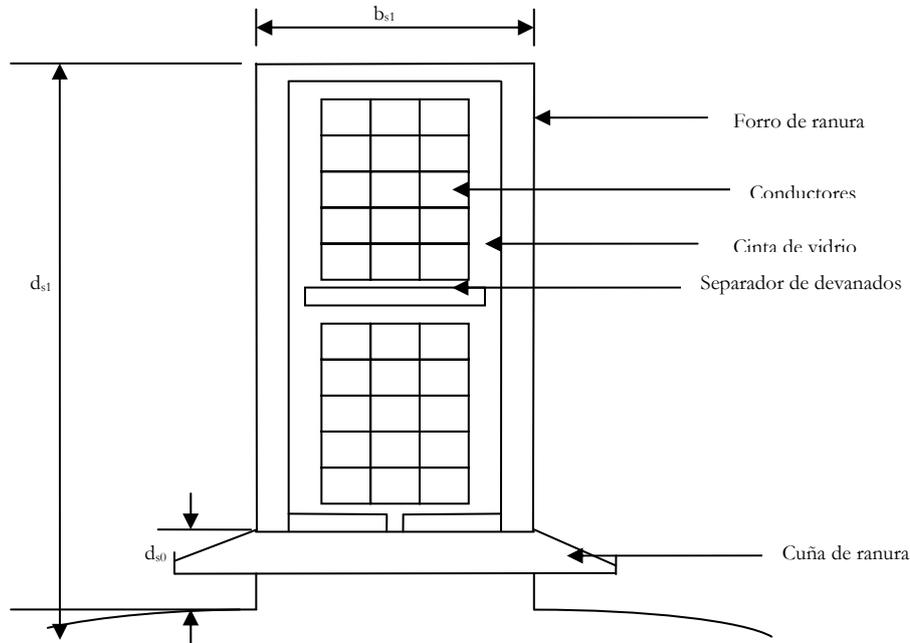


Fig. 3.18

Desarrollo De Los Cálculos De Rotor

Para continuar con el diseño del motor debemos calcular el rotor por lo que seguiremos el siguiente diagrama de flujo de la figura 3.19. Para realizar los cálculos utilizaremos algunos datos ya obtenidos durante el proceso del estator

d_r = diámetro del rotor = 8.659 in

ϕ_m = Flujo del entrehierro = 0.82616×10^6 líneas

T_{par} = 43.75 Lb*ft

ℓ_a = longitud de apilamiento = 3 in

p = potencia = 15 Hp
 Velocidad: 1800 rpm
 Eficiencia: $\eta = 0.85$

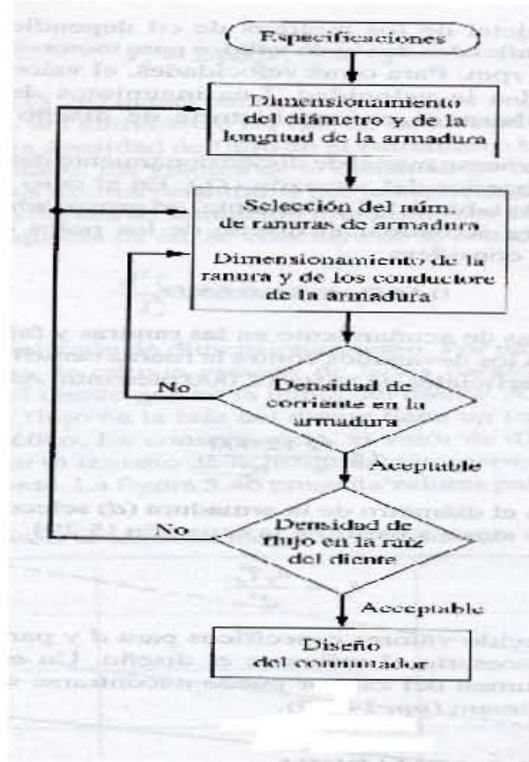


Fig. 3.19

SELECCIÓN DEL NUMERO DE RANURAS DE ARMADURA

Es buena práctica de diseño seleccionar el numero de ranuras de armadura (N) como un entero que caiga dentro del rango de

$$11.5 p \leq N \leq 15.5 p \quad 3.21$$

Donde p es el numero de polos: 4

N : numero de ranuras

$$11.5 (4) \leq N \leq 15.5 (4)$$

$$46 \leq N \leq 62$$

Como vemos en el intervalo necesitamos conocer N para conocer esta incógnita procedemos a conocer el paso de ranura de la armadura (λ)

El paso de las ranuras de la armadura (λ) debe estar en el rango

$$1 \leq \lambda = \frac{\pi d}{N} \leq 1.5 \quad 3.22$$

d: diámetro de la armadura

N: numero de ranuras

Si el paso de ranuras es $\lambda = 1$ podemos conocer el número de ranuras

$$N = \frac{\pi d}{\lambda} = \frac{\pi(8.6592)}{1} = 27.20 \quad 3.23$$

por lo tanto $N = 27$ ranuras

Como vemos las 27 ranuras cumple con parte del intervalo

$$46 \leq 27 \leq 62$$

Calculemos el paso de las ranuras λ

$$\lambda = \frac{\pi d}{N} = \frac{8.6592 * \pi}{27} = 1.0075 \text{ in} \quad 3.24$$

Como si se cumple procedemos a calcular las ranuras por polo.

$$\frac{\text{Ranuras}}{\text{polo}} = \frac{27}{4} = 6.75 \approx 7 \text{ ranuras por polo} \quad 3.25$$

Para diseñar una máquina de cuatro polos se hace con base de la siguiente ecuación

$$45Hz \leq \frac{pn_{mR}}{120} \leq 70Hz \quad 3.26$$

p: numero de polos, para nuestro diseño hemos seleccionado un motor de cuatro polos

n_{mR} : velocidad seleccionada para el diseño: 1800 RPM

Realizamos el siguiente cálculo:

$$\frac{pn_{mR}}{120} = \frac{4(1800)}{120} = \frac{7200}{120} = 60Hz$$

La frecuencia cíclica es de 60 Hz que esta dentro del rango para la operación a la velocidad nominal

$$45Hz \leq 60 \leq 70Hz$$

Los conductores totales para el devanado de armadura esta dado por la siguiente ecuación

$$Z = 2 n_c N \quad 3.27$$

n_c : devanados múltiples por ranura

N: Numero de ranuras.

Hemos optado por un arrollamiento ondulado doble (serie – paralelo)

Si consideramos $n_c = 2$, dos capas múltiples por ranura

$$Z = (2)(2)(27) = 108 \text{ conductores.}$$

Calcularemos las constantes de tensión y de par

$$\text{Constante de tensión } k_E = \frac{pZ}{(a)(60)(10^8)} \quad 3.28$$

p: numero de polos

Z: numero de conductores

a: numero de trayectorias

a=4 para un arrollamiento serie paralelo o ondulado doble

Constante de tensión

$$k_E = \frac{pZ}{(a)(60)(10^8)} = \frac{(4)(108)}{(4)(60)(10^8)} = 1.8 \times 10^{-8} \frac{V}{\text{linea} \cdot \text{rpm}}$$

Constante de par

$$k_T = \frac{pZ}{(a)(8.525)(10^8)} = \frac{(4)(108)}{(4)(8.525)(10^8)} = 1.2668 \times 10^{-7} \frac{\text{ft} \cdot \text{lb}}{\text{linea} \cdot A} \quad 3.29$$

Calculo de corriente y flujo nominales por polo. Con la potencia y velocidad nominales conocido, el par en el eje para la condición nominal para un motor de CD. A continuación desarrollaremos el calculo del valor de la corriente que alimentara al rotor en base a la conexión eléctrica para la armadura (rotor)

CALCULO DE LA ALIMENTACION DEL ROTOR DEL M2A

El rotor se alimenta mediante las escobillas las cuales reciben la tensión desde el conmutador que a su vez son alimentadas por el estator. El estator esta alimentado por una tensión trifásica de 440 V. El estator esta conectado en estrella mientras que el rotor esta conectado en delta, así que debemos hacer un análisis para saber la tensión que se le suministra al rotor, para lo cual nos basaremos en la Fig. 3.20, donde podemos ver que las terminales A, B y C pertenecen al estator y las terminales A', B' y C' son del rotor, entre las terminales del estator tenemos 440 V, para empezar debemos imaginar que transformamos la delta del rotor en estrella por lo que obtenemos un punto "N", así que viendo la Fig. 3.21 y aplicando las formulas de sistemas trifásico y sabiendo que entre A y B tenemos 440 V obtenemos que la tensión entre A y

N es igual a $V_{AN} = \frac{440}{\sqrt{3}} = 254 \text{ V}$, Después suponemos que la tensión entre AN

se divide entre dos por lo que $V_{AA'}=V_{A'N}=254/2=127$. Ahora transformamos la estrella del rotor otra vez a delta para obtener la tensión del rotor, aplicamos la formula de conversión estrella delta y tenemos:

$$V_{AC} = 127 * \sqrt{3} = 220 \quad [V] \quad 3.30$$

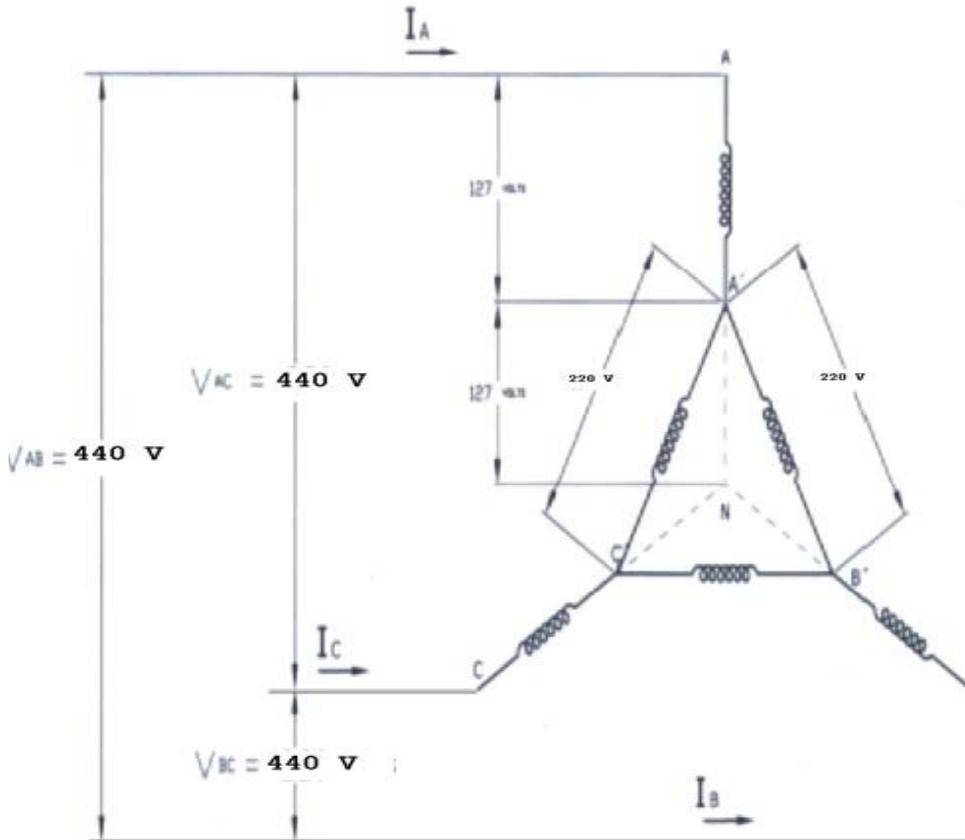


Fig. 3.20

Aquí cabe hacer un paréntesis para aclarar un detalle respecto a la construcción del motor, el rotor que se utiliza para el motor 2A es el de un motor de CD alimentado por 2 escobillas separadas 180° eléctricos, por tratarse de un devanado ondulado, Al modificar el tipo de alimentación de corriente directa a corriente alterna, es necesario agregar una tercer escobilla y reducir la separación angular a 120° , de modo que quedarán equidistantes. En consecuencia, el numero de espiras existentes entre cualquiera de dos escobillas se vera reducido a dos tercios del valor original.

Ahora, este es el valor para nuestro rotor alimentado por tres escobillas como esta planeado en el M2A, sin embargo para poder realizar los cálculos debemos hacerlo tomando en cuenta que nos basaremos en un rotor de CD alimentado por dos escobillas (separadas 180° eléctricos entre si por tratarse de un devanado ondulado), al modificar el tipo de alimentación de corriente directa a corriente alterna, fue necesario agregar una tercera escobilla y reducir la separación angular a 120°, de modo que quedaran equidistantes. (Figura 3.21) En consecuencia, el numero de espiras existente entre cualesquiera dos escobillas se vera reducido a dos tercios del valor original, por lo que debemos multiplicar el ultimo valor obtenido por 3/2 resultando:

$$V_r = 220 * \frac{3}{2} = 330 \text{ [V]} \quad 3.31$$

Este es el valor de la tensión del rotor y con el cual realizaremos los cálculos del rotor de CD para nuestro motor

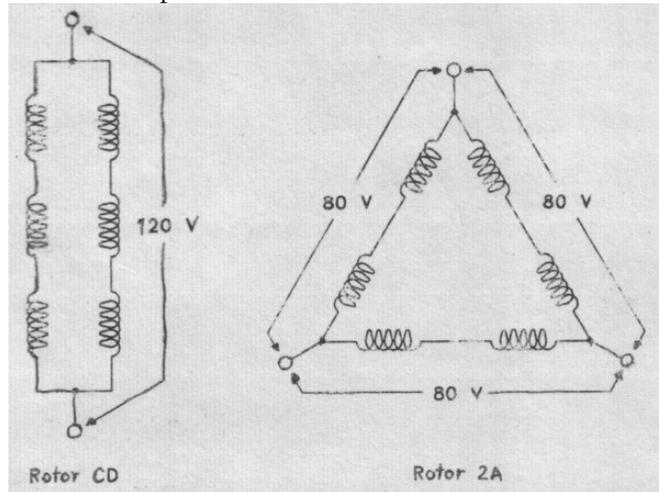


Fig. 3.21

Del diagrama obtenemos que la tensión en la armadura del rotor es de 330 V La corriente esta dada por la siguiente ecuación

$$I_a = \frac{746P_R}{\eta_r v_t} = \frac{(746)(15)}{(0.85)(330)} = 39.893 \text{ A} \quad 3.32$$

El flujo por polo nominal en nuestro caso es el flujo del entrehierro obtenido en los calculos del estator o sea

$$\Phi_m = 0.8261 * 10^6 \text{ lineas} \quad 3.33$$

Proyectando el uso de conductos radiales de enfriamiento para el apilamiento de la armadura, la densidad de corriente se seleccionara en auto ventilación. Proseguimos con el calculo del área del conductor. La densidad de corriente esta dado por el siguiente intervalo:

$$3200 \frac{A}{in^2} \leq \Delta_a \leq 5200 \frac{A}{in^2} \quad 3.34$$

Seleccionamos para nuestro cálculo.

$$s_a = 4000 \text{ A/in}^2$$

$$s_a = \frac{I_{aR}}{a\Delta_a} = \frac{39.893}{(4)(4000)} = 0.002493 \approx 0.0025 \text{ in}^2 \quad 3.35$$

s_a : Área transversal del conductor

I_{aR} : corriente en la armadura (rotor)

Δ_a : densidad de corriente

esto nos sugiere un calibre de conductor de 14 AWG

para calcular la altura del conductor utilizamos la siguiente formula:

$$d_c = \frac{s_a}{w_c} = \frac{0.0025}{0.0651} = 0.03840 \text{ in} \quad 3.36$$

w_c = ancho del conductor

En la figura 3.22 vemos un detalle de las ranuras del rotor

λ = Paso de la ranura.

w_{rR} = distancia entre

ranuras.

b_s = Ancho de la ranura

w_t = ancho de diente

d_s = Profundidad de la ranura

d_{s_0} = Ancho de la cuña

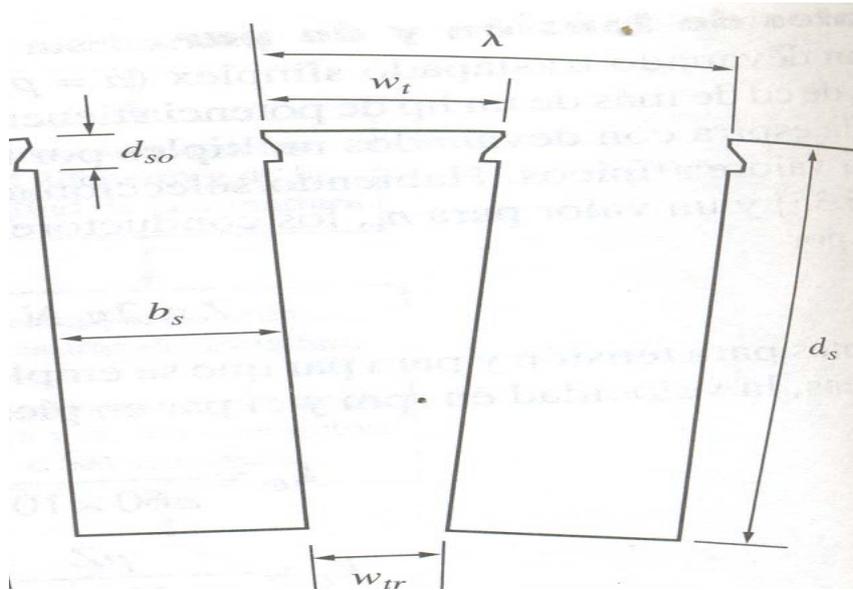


Fig. 3.22: vista seccional de la ranura del rotor

Consideramos los datos obtenidos:

Número de conductores por ranura; $\frac{Z}{Ranuras} = \frac{108}{27} = 4$ conductores por ranura

$$\frac{Ranuras}{polo} = \frac{27}{4} = 6.75 \approx 7 \text{ ranuras por polo}$$

3.37

ANCHO DE LA RANURA

Con esta información obtenemos el ancho (b_s) de las ranuras de la siguiente forma:

- 2 (0.0651), conductor
- 4 (0.003), película del conductor
- 2 (0.007), cinta de vidrio
- 2 (0.030), forro de la ranura

$$b_s = 0.2162 = 0.22 \text{ in}$$

Con esta información obtenemos la profundidad (d_s) de las ranuras de la siguiente forma.

- 2 (0.03840) conductor
- 4 (0.003) película del conductor
- 4 (0.007) cinta de vidrio
- 2 (0.03) forro de la ranura
- (0.06) separador de devanado
- (0.06) cuña de ranura
- (0.062) recuerdo de la cuña

$$d_s = 0.3288 = 0.33 \text{ in}$$

Los redondeos tanto en la profundidad como en el ancho de la ranura se deben al deseo de compensar las irregularidades de los materiales que pudieran presentarse. A continuación mostramos un dibujo detallado de la ranura. Fig. 3.23

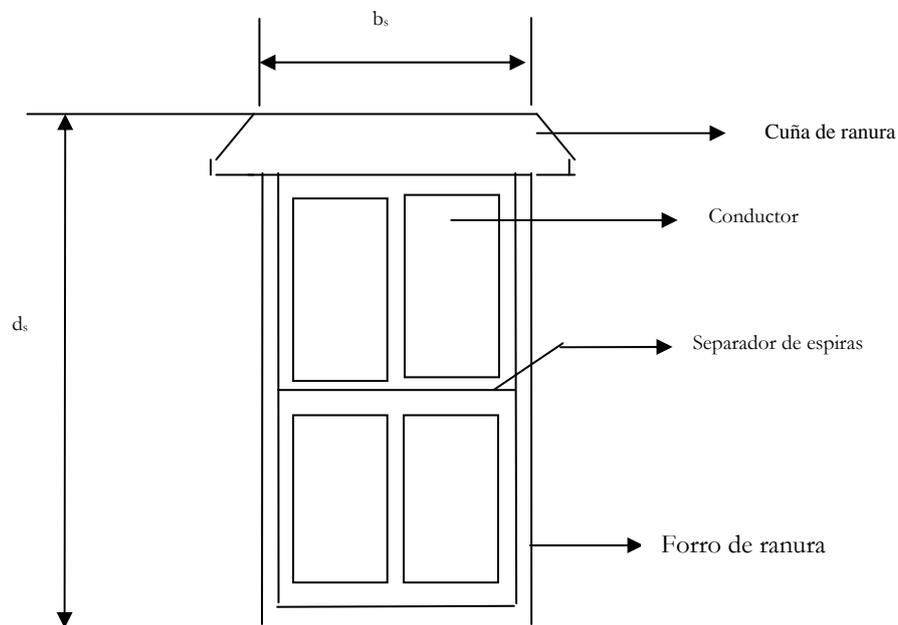


Fig. 3.23: ranura del rotor

CABEZA DEL DEVANADO DE ARMADURA

El acomodo de las últimas espiras de un devanado de armadura impacta directamente la longitud del ensamble de la armadura el cual debemos considerar las siguientes características, que nos muestra la siguiente Fig. 3.24

Para armaduras menores de aproximadamente de 24 in se han estimado valores que se han obtenido valores prácticos en el acomodo de las últimas espiras, y como nuestra armadura es de 8.659 in haremos uso de estos datos.

$$s_e = 0.125 \text{ in}$$

$$b_e = 0.5 \text{ in}$$

$$g_e = d_s = 0.33 \text{ in} \quad 3.38$$

$$d_e = s_e + b_s = 0.125 + 0.22 = 0.345 \text{ in} \quad 3.39$$

Relaciones que ocuparemos para el siguiente cálculo

$$\lambda_c = \pi \frac{(d - d_s)}{N} \quad 3.40$$

$$\tau_c = \left(\frac{N}{p}\right) \lambda_c \quad 3.41$$

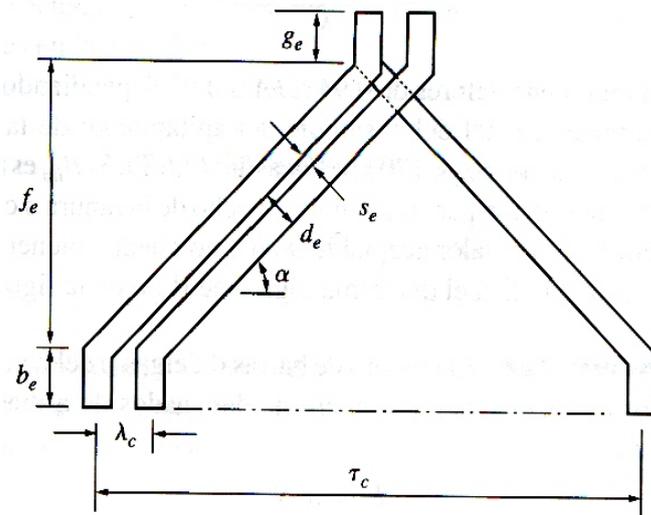


Fig. 3.24

Calcularemos para nuestra armadura con los siguientes valores

$$\lambda_c = \frac{\pi(d - d_s)}{N} = \frac{\pi(8.659 - 0.33)}{27} = 0.9691 \text{ in}$$

$$\tau_e = \left[\frac{N}{p} \right] \lambda_c = \left[\frac{27}{4} \right] (0.9691) = 6.7837 \text{ in}$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1} \left[\frac{d_e}{\lambda_c} \right] = \text{sen}^{-1} \left[\frac{0.345}{0.9691} \right] = 20.8547^\circ$$

$$\begin{aligned} OH &= b_e + \frac{\tau_c}{2} \tan \alpha + g_e = 0.5 + \left(\frac{6.7838}{2} \times \tan(20.8547) \right) + 0.33 \\ &= 2.1219 \text{ in} \end{aligned}$$

3.42

La resistencia del devanado de armadura se obtiene con la siguiente expresión.

$$R_a = \frac{\rho LMV_a Z}{2a^2 s_a}$$

3.43

A una temperatura promedio estimada para el conductor de 150° C donde la resistividad del cobre es de $\rho = 0.69 \times 10^{-6} \Omega$ in a 20° C El valor debe ajustarse a la temperatura de operación del devanado de armadura (T) por.

$$\rho = \frac{234.5 + T}{254.5} (0.69 \times 10^{-6})$$

3.44

$$\rho = \frac{234.5 + T}{254.5} (0.69 \times 10^{-6}) = \frac{234.5 + 150}{254.5} (0.69 \times 10^{-6}) = 1.04 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{in}$$

La longitud media por vuelta (LMV) de un devanado de armadura puede determinarse por.

$$\begin{aligned} LMV_a &= 2 \left[\frac{\tau_c}{\cos \alpha} \right] + 2b_e + 2g_e + l_a = 2 \left[\frac{6.7837}{\cos 20.8547^\circ} + 2(0.5) + 2(0.33) + 3 \right] \\ &= 23.8386 \text{ in} \end{aligned}$$

Por lo tanto la resistencia de la armadura va estar dada de la siguiente forma

$$R_a = \frac{\rho L M V_a Z}{2 a^2 s_a} = \frac{(1.04 \times 10^{-6})(23.8386)(108)}{2(4)^2(0.0025)} = 0.0335 \Omega$$

Nota: cuando calculemos la densidad de flujo en la raíz del diente, encontraremos la nueva longitud de apilamiento y recalcularemos LMV_a y R_a .

Esta separación entre las extremidades internas de las ranuras esta dado por la siguiente ecuación.

$$w_{ir} = \frac{\pi(d - 2d_s)}{N} - b_s \quad 3.45$$

d : diámetro promedio de la armadura

d_s : profundidad de las ranuras

N : numero de ranuras

b_s : ancho de las ranuras

Calculamos la siguiente expresión.

$$w_{ir} = \frac{\pi(d - 2d_s)}{N} - b_s = \frac{\pi(8.6592 - (2 \times 0.33))}{27} - 0.22 = 0.7108 \text{ in}$$

A través de la experiencia y práctica en la construcción de los motores se han deducido muchas relaciones empíricas y algunas de ellas son para el arco polar y la razón del arco del polo.

$$\frac{\tau_p}{\lambda} = 9.5$$

τ_p : arco, polar

λ : paso, de, la, ranura = 1.0075

$$\tau_p = (9.5)\lambda = (9.5)(1.0075) = 9.5713 \text{ in}$$

Razón del arco del polo se calcula con la siguiente relación.

$$\psi = \frac{(p)(\tau_p)}{(\pi)(d)} \quad 3.46$$

p ; número de polos de la armadura.

τ_p = arco, polar

d : diámetro de la armadura.

$$\psi = \frac{p \tau_p}{\pi d} = \left(\frac{(4)(9.5713)}{\pi(8.6592)} \right) = 1.4073$$

Para un buen diseño el flujo en el diente de la armadura del rotor se recomienda sea $B_{tra} < 170 \frac{\text{kilolíneas}}{\text{in}^2} \text{o } (2.6)T$. Si B_{tra} es inaceptable grande, debe tomarse una acción para disminuir el ancho de la ranura o cambiar el número de ranuras de la armadura. Si un valor aceptable de B_{tra} no puede obtenerse, entonces debe incrementarse l_a (longitud de armadura) como lo indica el diagrama lógico de flujo.

$$B_{tra} = \frac{p \varphi_{pR}}{\Psi N w_r l_a FA} \quad 3.47$$

Donde el significado de los siguientes parámetros es:

p : No de polos

l_a = es la longitud del apilamiento

φ_{pR} :Flujo por polo de la armadura

Ψ :es la razón del arco del polo al paso del polo FA : factor de apilamiento

w_r : Raíz del diente de laminaciones de la armadura

El factor de apilamiento esta dado por el siguiente intervalo $0.94 \leq FA \leq 0.97$

$$\text{Sacamos un promedio de } FA = \frac{0.94 + 0.97}{2} = \frac{1.91}{2} = 0.955 = 0.95$$

Calculamos el flujo en la raíz del diente de la armadura del rotor

$$B_{tra} = \frac{p \varphi_{pR}}{\Psi N w_r l_a FA} = \frac{(4)(0.82616 \times 10^6)}{(1.4073)(27)(0.7108)(3)(0.95)} = 42.9320 \times 10^{-3}$$

Lineas/in²

Ya que B_{tra} esta dentro de los limites $B_{tra} < 170$ no es necesario realizar algun proceso iterativo.

CALCULO DEL CONMUTADOR

$$\text{El numero de delgas en el conmutador es } K_c = n_c N \quad 3.48$$

n_c : devanados por ranura=2

N: número de ranuras 27

Obtención del número de delgas

$K_c = (2)(27)=54$ delgas

Los volts promedio por delga del conmutador se determina

$$e_{cav} = \frac{V_t P}{K_c} \leq 20v \quad 3.49$$

$$e_{cav} = \frac{(330)(4)}{54} = 24.4444 \text{ V}$$

lo que nos permite ver que nuestro valor esta ligeramente arriba pero no de manera exagerada. Las escobillas de carbón comúnmente ofrecen una vida aceptable de servicio si la velocidad superficial del conmutador no excede de

$9000 \frac{ft}{min}$. Por lo tanto, el diámetro de un conmutador se toma generalmente

de 60 % a 80 % de la armadura, y esta dado

por la siguiente expresión. $d_c = (\% \text{ seleccionado})(d_{arm})$. Para nuestro trabajo seleccionemos un 80 % del diámetro de la armadura procedemos a calcular.

$$d_c = 0.8(8.659)=6.9273 \text{ in}$$

Calculo del largo de las escobillas

$$t_b = \frac{\pi d_c}{K_c} \left[n_c + \frac{1}{2} \right] = \frac{\pi(6.9273)}{54} [2 + 0.5] = 1.0075 \text{ in} \quad 3.50$$

El ancho de una sola escobilla deberá estar en un rango de $1, in \leq w_b \leq 2, in$,

nosotros seleccionaremos el ancho de la siguiente forma promediando el intervalo

$$\frac{1+2}{2} = \frac{3}{2} = 1.5$$

$$w_b = 1.5, in$$

Las escobillas electrográficas modernas exhiben una aceptable expectativa de

vida con una densidad de corriente de $\Delta_b = 80 \frac{A}{in^2}$

Entonces la densidad de corriente en las escobillas la calculamos mediante la

$$\text{siguiente ecuación: } \Delta_b = \frac{2I_{ar}}{(p)(n_b)(w_b)(t_b)} \quad 3.51$$

Donde I_{ar} corriente en la armadura.

p : número de polos = 4
 n_b : número de escobillas = 3 piezas
 w_b : Ancho de las escobillas = 1.5 in
 t_b : largo de las escobillas = 0.506 in
 Cálculo de la densidad de corriente

$$\Delta_b = \frac{2(39.893)}{(4)(2)(1.5)(0.955)} = 6.9621 \text{ A/in}^2$$

La dimensión superficial del conmutador está basada por espacios de 1/2 in entre el lado contiguo y el exterior y de 1/4 in entre las escobillas, la dimensión superficial de conmutador es.

$$w_{cs} = 2(0.5) + 2(0.25) + n_b w_b = 2(0.5) + 2(0.25) + (2 \times 1.5) = 4.5 \text{ in} \quad 3.52$$

A continuación se muestra un dibujo de un conmutador. Fig. 3.25

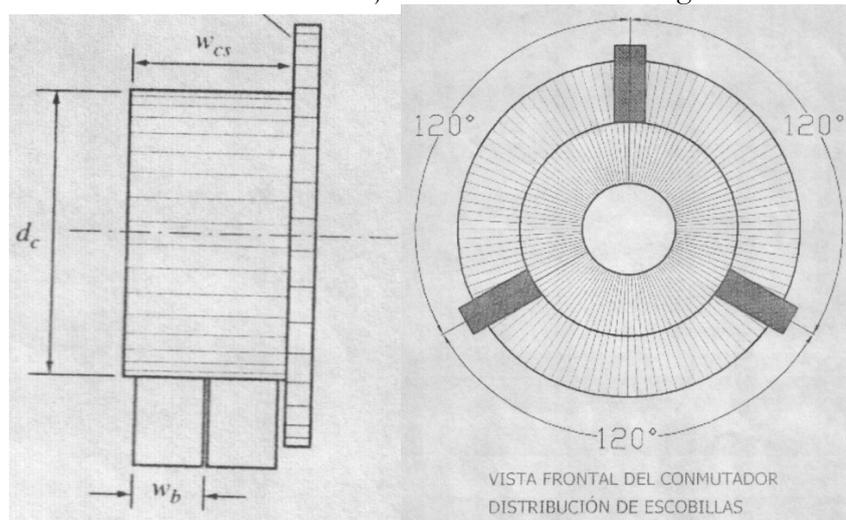


Fig. 3.25

Desarrollo del devanado del rotor

Para nuestro cálculo recitaremos los siguientes datos:

Números de polos 4

Capas por ranura 2

Pasos de un devanado. Paso posterior y paso anterior. La distancia entre las entradas de dos espiras consecutivas se denomina paso de un devanado (y). Las distancias que corresponden a los dos pasos necesarios para ir de la entrada

de una espira a la entrada siguiente espira se denominan paso posterior o paso de bobina (y_p), y paso anterior o paso de conexión (y_a). esto lo podemos ver en la siguiente Fig.

Pasos de un devanado $y = y_p + y_a$ donde.

y : paso de un devanado.

y_p : se denomina paso posterior o paso de bobina

y_a =se denomina paso anterior o paso de conexión.

La siguiente relación define un arrollamiento ondulado serie paralelo

$$y = \frac{k \pm \frac{a}{2}}{\frac{p}{2}} \quad 3.53$$

Un arrollamiento ondulado con mas de dos ramas de inducido se denominan arrollamientos ondulado doble cuando el número de ramas es 4, y arrollamiento ondulado triple cuando el número de tres ramas es 6, para nuestro caso optaremos por el de 4 ramas (trayectorias)

que será la que utilizaremos para calcular los pasos de las bobinas

k : Numero de delgas del conmutador : 54

a : Numero de trayectorias : 4

p : Numero de polos : 4

Procedemos a calcular

$$y = \frac{54 \pm \frac{4}{2}}{\frac{4}{2}} = \frac{54 \pm 2}{2} \quad y_1 = \frac{56}{2} = 28 \quad y_2 = \frac{52}{2} = 26$$

Seleccionamos el valor máximo $y_1 = \frac{56}{2} = 28$ distancia entre la entrada de dos devanados en diferentes ranuras.

Calculo del paso posterior o paso de bobina

$$y_p = \frac{k}{p} = \frac{\text{numerodedelgas}}{\text{Nodopolos}} = \frac{54}{4} = 13.5 \quad 3.54$$

$y_p = 13$ Significa que el ancho del devanado estará dado por 13 ranuras

Calculo del paso anterior o paso de conexión

$$y_a = y - y_p \quad ; \quad y_a = 28 - 13 = 15$$

$Y_a = 15$ significa que salida del devanado de una ranura a la entrada de la otra existe una separación de 15 ranuras. Esto lo apreciamos en la Fig. 3.26.

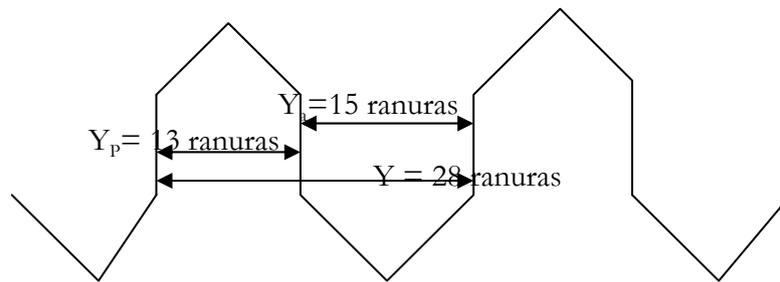


Fig. 3.26

A continuación se muestra el devanado ondulado duplex para el rotor, Fig. 3.27

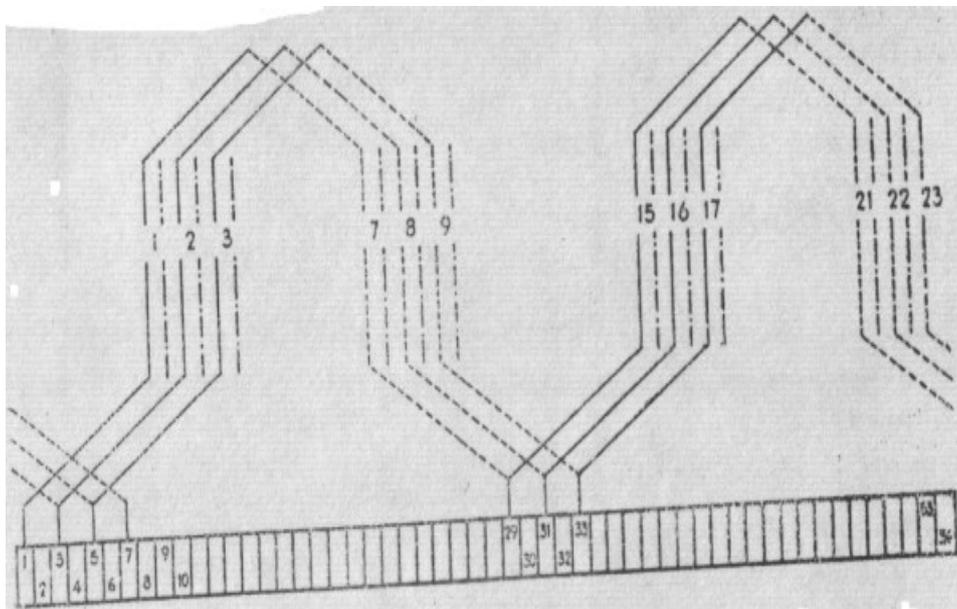


Fig. 3.27

En la figura 3.28 se observa el desarrollo del acomodo de las bobinas en las ranuras del rotor.

Delgas del conmutador	Ranura	Ranura	Delgas del conmutador	Ranura	Ranura	Delgas del conmutador
1	1I	7I	9	15I	21I	3
2	1D	7D	10	15D	21D	4
3	2I	8I	11	16I	22I	5
4	2D	8D	12	16D	22D	6
5	3I	9I	13	17I	23I	7
6	3D	9D	14	17D	23D	8
7	4I	10I	15	18I	24I	9
8	4D	10D	16	18D	24D	10
9	5I	11I	17	19I	25I	11
10	5D	11D	18	19D	25D	12
11	6I	12I	19	20I	26I	13
12	6D	12D	20	20D	26D	14
13	7I	13I	21	21I	27I	15
14	7D	13D	22	21D	27D	16
15	8I	14I	23	22I	11	17
16	8D	14D	24	22D	1D	18
17	9I	15I	25	23I	2I	19
18	9D	15D	26	23D	2D	20
19	10I	16I	27	24I	3I	21
20	10D	16D	28	24D	3D	22
21	11I	17I	1	25I	4I	23
22	11D	17D	2	25D	4D	24
23	12I	18I	3	26I	5I	25
24	12D	18D	4	26D	5D	26
25	13I	19I	5	27I	6I	27
26	13D	19D	6	27D	6D	28
27	14I	20I	7			
28	14D	20D	8			

Fig. 3.28

Calculo del peso de los embobinados

A continuación se calcula el peso de los embobinados tanto del rotor como del estator, esto con el fin de darnos una idea del peso total de la maquina

El peso del cobre desnudo en la armadura del rotor se calcula de acuerdo a la siguiente formula

$$G_{ar} = L_{ar} N S_a * 8.9 * 10^{-5} \quad [\text{Kg}] \quad 3.55$$

siendo:

- G_a = Peso del cobre desnudo para la armadura
- L_a = Longitud de la espira media de una bobina
- N = numero de conductores
- S_a = sección del conductor

Para utilizar la formula anterior debemos utilizar las unidades del sistema métrico para obtener el resultado en Kg. Así que procedemos a hacer

el cambio de unidades de los resultados obtenidos en los cálculos del rotor y los aplicamos en la formula 3.55:

$$G_{ar} = (60.55)(108)(2.7096) \cdot 8.9 \cdot 10^{-5} = 1.5770 \text{ Kg}$$

Ahora obtendremos el peso del cobre en el estator. Para lo cual utilizaremos la siguiente formula

$$G_{ae} = L_{ae} N m S_a \cdot 8.9 \times 10^{-5} \text{ Kg} \quad 3.56$$

donde:

L_a = longitud de la espira media de una bobina

N = numero de conductores

a = numero de trayectorias paralelas de un circuito

m = numero de fases

S_a = área transversal del conductor

Debemos calcular L_a por lo que usamos la siguiente formula

$$L_{ae} = \left[\frac{\pi(D + d_s)}{p \cos \alpha} \rho + 2b + d_s + \ell \right] \quad 3.57$$

donde:

ℓ = longitud de la armadura del estator

D = diámetro de la armadura del estator

d_s = profundidad de la ranura

el valor de $2b$ es la parte que sobresale de las bobinas en el estator como se observa en la figura 3.29 y se obtiene de la Tabla VIII

aplicando los valores obtenidos anteriormente tenemos

$$L_{ae} = \left[\frac{\pi(22.1163 + 2.8951_s)}{4 \cos(16.6405)} (0.8333) + 4.45 + 2.8951 + 7362 \right] = 32.0499 \text{ cm}$$

ahora con este valor podemos calcular el valor del peso del cobre en el embobinado del estator

$$G_{ae} = (32.0499)(30)(2)(3)(3.9935) \cdot 8.9 \times 10^{-5} = 2.05 \text{ Kg}$$

Esto no da un total del peso de los dos embobinados de 3.627 Kg

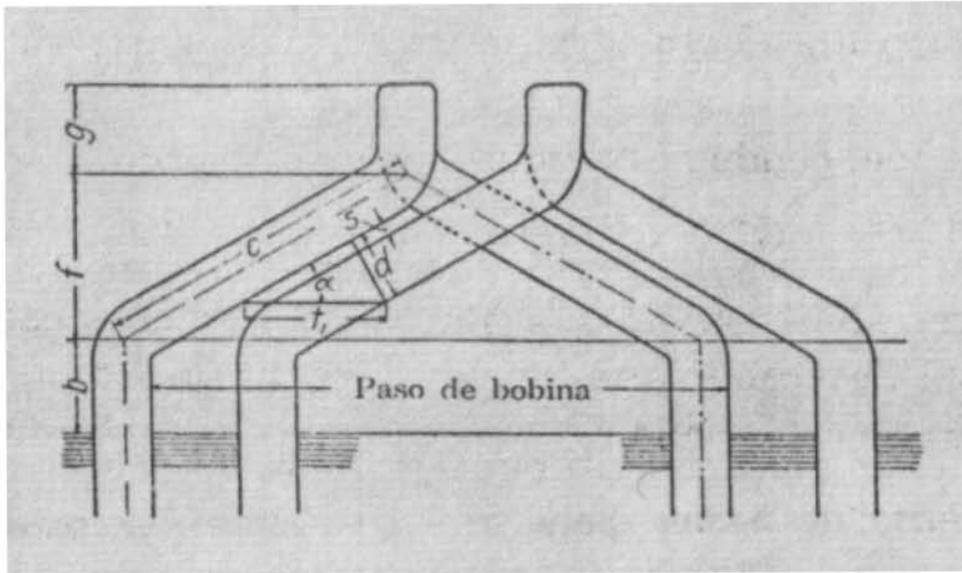


Fig. 3.29

CLAROS PARA AISLAMIENTO EN LAS RANURAS EN DEVANADOS DE ARMADURA PARA MÁQUINAS SÍNCRONAS, CON RANURAS DE TIPO ABIERTO

Volts	s cm	2b cm	Profundidad de Ranura			Ancho de Ranura		
			Diámetro en el entrehierro			Diámetro en el entrehierro		
			25 cm o menos	50 cm	100 cm o más	25 cm o menos	50 cm	100 cm o más
0— 300	0.254	3.80	0.61	0.635	0.785	0.152	0.165	0.203
300— 600	0.305	4.45	0.71	0.735	0.862	0.191	0.216	0.241
600— 1 500	0.355	5.08	0.76	0.785	0.940	0.228	0.241	0.280
1 500— 3 000	0.405	5.70	0.86	0.915	1.140	0.279	0.305	0.380
3 000— 5 000	0.455	6.32		1.065	1.290		0.380	0.457
5 000— 8 000	0.508	7.60		1.320	1.650		0.508	0.635
8 000— 12 000	0.635	8.90			2.020			0.812
12 000— 15 000	0.760	10.20			2.540			1.068

Tabla VIII

Resumen de resultados

A continuación se colocaran los valores obtenidos en el diseño del motor de 2 armaduras

Datos del estator

Diámetro Exterior del apilamiento de laminaciones	$D_0=13.12 \text{ in}=35.86 \text{ cm}$
Par Nominal	$T_s=43.75 \text{ Lb*ft}=59.3140 \text{ N*m}$
Diámetro interior de laminaciones	$D=8.7072 \text{ in}=22.1162 \text{ cm}$
Longitud de apilamiento de laminaciones	$l_a=3 \text{ in}=7.62 \text{ cm}$
Paso de ranura	$\lambda=1.1398 \text{ in}=2.8951 \text{ cm}$
Ranuras	$S_1=24$
Corriente	$I=20.3226 \text{ A}$
30 conductores por ranura	
Alambre # 12	
Profundidad de la ranura	$d_{s1}=1.1398 \text{ in}=2.8951 \text{ cm}$
Ancho de ranura	$b_{s1}=0.3264=0.8290 \text{ cm}$
Entrehierro	$\delta=0.0241 \text{ in}=0.0612 \text{ cm}$
Peso del embobinado	$G_{ae}=1.5770 \text{ Kg}$

Datos del Rotor

Diámetro exterior	$d_r=8.659 \text{ in}=21.9939 \text{ cm}$
Longitud de apilamiento	$l_{ar}=8 \text{ in}=20.32 \text{ cm}$
Paso de ranura	$\lambda=1.0075 \text{ in}=2.5590 \text{ cm}$
Ranuras	$N=27$
Corriente	$I_r=39.893 \text{ A}$
Alambre # 14	
Profundidad de ranura	$d_s=0.33 \text{ in}=0.8382 \text{ cm}$
Ancho de ranura	$b_s=0.2162 \text{ in}=0.5495 \text{ cm}$
Diámetro del conmutador	$d_c=6.9273 \text{ in}=17.59 \text{ cm}$
Ancho del conmutador	$w_{cs}=4.5 \text{ in}=11.43 \text{ cm}$
Largo de las escobillas	$t_b=0.955 \text{ in}=2.4257 \text{ cm}$
Ancho de las escobillas	$w_b=1.5 \text{ in}=3.81 \text{ cm}$
Peso del embobinado del rotor	$G_{ar}=2.05 \text{ Kg}$

A continuación se observa la figura con las dimensiones del estator y rotor (Fig. 3.30), así como una figura de las laminaciones del estator (Fig. 3.31)

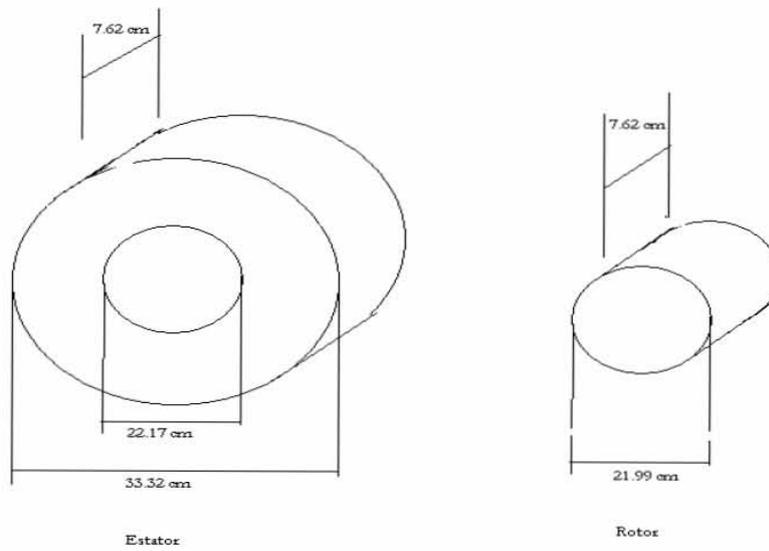


Fig.3.30 Dimensiones del Estator y el rotor

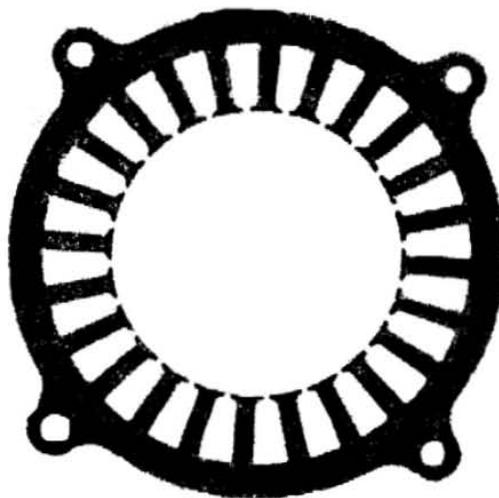


Fig. 3.31 Laminación del estator

IV.- PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR TRIFÁSICO DE DOS ARMADURAS

4.1.- Selección Y Disponibilidad De Materiales

La selección de los materiales a utilizarse debe realizarse en base a sus características, las cuales deben cubrir los requerimientos específicos de la maquina a construir. Otro punto a considerar es la disponibilidad de dichos materiales de preferencia se elegirán los que se puedan localizar en el mercado nacional ya que si se eligen materiales de importación el precio se elevara bastante. El precio de los materiales es una de las razones por las que se puede terminar eligiendo entre uno u otro material a utilizar, por eso, el diseñador debe buscar un equilibrio entre estos aspectos para poder tomar una buena decisión.

En el presente capitulo se exponen las bases principales de origen técnico que provee de información económica al preparador de proyecto. Muchas decisiones se basan en la experiencia de las personas mas que en el desarrollo de complejos métodos de estudio. La combinación de ambos parece lo más recomendable. Esto con el fin de determinar la función optima para la utilización eficiente y eficaz de los recursos disponibles para la producción del bien deseado. Para ello, deberán analizarse las distintas alternativas y condiciones en que se pueden combinar los factores productivos.

El calculo de los costos de mano de obra se obtendrá directamente del estudio del proceso productivo seleccionado. El proceso de producción se define como la forma en que una serie de insumos se transforman en productos mediante la participación de una determinada tecnología (combinación de mano de obra, maquinaria, métodos y procedimientos de operación, etc.). Los distintos tipos de procesos productivos pueden clasificarse en función de su flujo productivo o del tipo de producto, teniendo cada caso efectos distintos sobre el flujo de fondos del proyecto.

Según el flujo, el proceso puede ser en serie, por pedido o por proyecto. El proceso de producción es en serie cuando ciertos productos, cuyo diseño básico es relativamente estable en el tiempo y que están destinados a un gran mercado, permite su producción para existencias. Las economías de escala obtenidas por alto grado de especialización que la producción en serie permite,

van normalmente asociadas a bajos precios unitarios. En un proceso por pedido, la producción sigue secuencias diferentes, que hacen necesaria su flexibilización, a través de mano de obra y equipos suficientemente dúctiles para adaptarse a las características del pedido. Este proceso afectara a los flujos económicos por la mayor especialidad del recurso humano y por las mayores existencias que será precisó mantener. Un proceso de producción por proyecto corresponde a un producto complejo de carácter único que, con tareas bien definidas en términos de recursos y plazos, da origen, normalmente, a un estudio de factibilidad completo.

La alternativa tecnológica que se seleccione afectara directamente a la rentabilidad del proyecto. Por ello, mas que la tecnología mas avanzada, se deberá elegir aquella que optimice los resultados. El proceso productivo y la tecnología que se seleccionen influirán directamente sobre la cuantía de los costos e ingresos del proyecto. Los principales aspectos a determinar dentro del rubro de costos de un proyecto son:

- ❖ Mano de obra directa: es aquella que se aplica para lograr la transformación de la materia prima en el producto final
- ❖ Materiales disponibles en el lugar: aquellos que son fácilmente identificables y casi siempre cuantificables en el producto final
- ❖ Instalaciones
- ❖ taller
- ❖ Costos indirectos de transformación: que a su vez, podemos agrupar en los siguientes conceptos
- ❖ Materiales indirectos: aquellos que resultan necesarios para lograr el producto final, pero no resultan fácilmente identificables
- ❖ Mano de obra indirecta: Es aquella que también resulta necesaria para obtener el producto final, pero que no modifica de manera directa las propiedades ni características de los materiales empleados
- ❖ Tendencias del costo: Se puede decir que tanto los costos como los gastos necesarios en la producción de un bien a un servicio se comportan de acuerdo con dos tendencias básicas.
- ❖ Comportarse de una manera fija, es decir, como costo fijo cuando la erogación correspondiente no depende del numero de piezas o unidades de servicio que la empresa produzca

- ❖ Cuando las erogaciones necesarias para la obtención o producción de bienes o servicios depende directamente del número de unidades a producir, se dice que estamos hablando o en presencia de un costo variable
- ❖ El costo de mano de obra constituye uno de los principales ítem de los costos de operación de un proyecto. La importancia relativa que tenga dentro de estos dependerá, entre otros aspectos, del grado de automatización del proceso productivo, de la especialización del personal requerido, de la situación del mercado laboral, etc.
- ❖ El estudio del proyecto requiere de la identificación y cuantificación del personal que se necesitara en la operación, para determinar el costo de remuneraciones por periodo. El cálculo de remuneración deberá basarse en los precios del mercado laboral vigentes y en consideraciones sobre variaciones futuras en los costos de la mano de obra. Para su cálculo deberá considerarse no el ingreso que percibirá el trabajador, sino el egreso para la empresa que se creara con el proyecto, que incluye, además del sueldo o salario, las leyes sociales, los bonos de *colación* o de alimentación y movilización, gratificaciones, bonos de producción, etc.
- ❖ La elaboración de un balance de personal permite sistematizar la información referida a la mano de obra y calcular el monto de la remuneración del periodo.
- ❖ El cálculo de los materiales se realiza a partir de un programa de producción que define en primer término el tipo, calidad y cantidad de materiales requeridos para operar a los niveles de producción esperados. Es importante considerar que los materiales que se deben estudiar no son solo aquellos directos (elementos de conversión en el proceso), sino también los indirectos o complementarios del proceso, que van desde útiles de aseo hasta lubricantes de mantenimiento o envases para el producto terminado.
- ❖ Estimando los costos de materiales, es posible determinar su costo para distintos volúmenes de producción y así obtener el costo total de materiales por lote.

A pesar de uno de los objetivos de esta Tesis fue la cotización de la construcción del motor diseñado, esto no fue posible debido a la falta de información acerca de los precios y procesos requeridos para llevar a cabo el proceso de construcción, en la mayoría de los casos las empresas no acceden a dar información al respecto y en otras cuando realizan cotizaciones solo las realizan a empresas, no a particulares, Cabe mencionar que son pocas las empresas que dan información técnica acerca de los materiales que ocupan y

resulta mas fácil obtener esa información de empresas extranjeras que de las nacionales. A continuación mencionaremos algunos de los materiales utilizados en la fabricación del M2A

Materiales Utilizados

Lámina Fría Recocida

La lámina rolada en frío se fabrica en espesores desde calibre 10 hasta calibre 29 con un ancho máximo de 50". Este producto satisface la demanda del mercado de transformación, ya que puede ser relaminado hasta lograr espesores más delgados y con acabado superficial brillante. Se pueden garantizar tolerancias cerradas en variables dimensionales, así como elevada resistencia mecánica, alta dureza y elevada troquelabilidad. Los principales usos de la lámina rolada en frío son:

- Partes expuestas y no expuestas para artículos de línea blanca.
- Aplicaciones en maquinaria y equipo.
- Perfiles y tubería.
- Tambores y envases.
- Insumo para procesos de galvanizado.
- Laminación de motor.

En la Tabla IX se muestra la clasificación de la lamina fría recocida según su calidad y su uso siendo la mostrada la que nos interesa para nuestro trabajo.

Especificación	Calidad	Principales Aplicaciones
ASTM A 726	Acero Eléctrico	Laminación para motores

Tabla IX

A su vez, el acero eléctrico tiene varios grados dependiendo de su porcentaje de carbono y manganeso, su dureza así como de su permeabilidad, para nuestro motor decidimos utilizar un tipo de acero eléctrico con permeabilidad de 2000 como se muestra en la Tabla X

Referencia	Dureza HRb máx.	Perdida en el Nucleo	Permeabilidad	%Carbono	%Manganeso
ASTM A-726	60-85	2.1 típico	2000	0.008	0.60

Tabla X

La confusión generada en la industria eléctrica por la existencia de una gran variedad de materiales de escobillas es entendible en base de nuestros conocimientos actuales, Cuando nosotros realizamos, después de considerar la discusión sobre la disminución de contacto, conmutación, y los aspectos mecánicos de la aplicación de la escobilla, que es solamente la más simplificada forma de la teoría de escobillas es aplicada en el diseño de maquinas, nosotros podemos entender que los transitorios, ambos mecánicos y eléctricos, los cuales estas presentes en todo equipo de rotación, puede y radicalmente influye en la operación de la escobilla. Como resultado, porque esos transitorios son diferentes en todos los diseños diferentes, y porque hay mayores diferencias en la mayoría de todos los tipos de transitorios en las diferentes clases de maquinas, nosotros podemos ve el por que los diferentes tipos de escobillas son necesarios, Es afortunado que el carbón sea tan versátil que nosotros podemos desarrollar y hacer materiales específicos con un extremadamente gran rango de propiedades.

La pregunta del numero de grados de escobillas ha recientemente sido discutido en la literatura técnica rusa. En un esfuerzo por los diseñadores de maquinas rusos para eliminar todos menos 3 grados esta mas allá de consideración, eso hizo no tomarlos dentro del gran rango de requerimientos que las maquinas establecen sobre las escobillas.

Las propiedades básicas del carbón y grafito han sido discutidas en considerable detenimiento. Es suficiente para establecer aquí que por que todos los materiales de carbón y grafito han alguna vez en su historia atravesado el ciclo de vida orgánico, y igual porque el carbón no puede normalmente ser disuelto o eliminado en su historia pasada, algún carbón formado de un trabajo retiene ciertos aspectos de la estructura de la molécula orgánica originadle la cual fue derivada. El proceso de carbonizado, o el calentamiento de componentes orgánicos para remover agua, varios hidrocarburos, hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono no es solamente muy complejo para algún químico en particular, porque la proporción de temperatura asciende y la atmósfera influye el resultado, pero es igual mas complicado por el hecho que la mayoría de las materias primas usadas están mezcladas de muchos diferentes componentes.

El proceso de Grafitacion, que es, calentado para temperaturas en el orden de 2500° C, es una muy importante desde el punto de vista de las propiedades de las escobillas. Muchas de los diferentes tipos de materias

primas reaccionan diferente a la grafitación, así que no hay reglas generales que puedan ser aplicadas para caracterizar los resultados, Los materiales grafiticos pueden ser caracterizados por las dimensiones del enrejado del cristal, pero ese puede ser el mismo en materiales que tienen ampliamente diferentes propiedades geológicas tamaño particular y forma, La cantidad y el tipo de atado, y la fuente del polvo inicial del carbón son solamente unos pocos de los factores que influyen en las propiedades importantes en las escobillas. Esta divergencia en los resultados finales, sin embargo, es una ventaja distinta en el campo de las aplicaciones de escobillas, como una gran variedad de combinaciones de las varias propiedades son así hechas posible.

En defensa del secreto que existe en ciertas áreas de manufactura de materiales de escobillas, debería ser apuntado que el costo de desarrollar un grado particular para una aplicación dada puede ser de varios cientos de miles de dólares. Esto suma incluso no solamente el costo de manufactura de muchos diferentes materiales, pero también aquellos por pruebas en laboratorio y campo, La clave para el éxito de un grado particular muy a menudo miente en el uso de alguna materia prima específica, o en un detalle del proceso que no puede ser identificada o protegida por patente. Es por consiguiente entendible que los fabricantes de escobillas defiendan por secreto, sus intereses en cada material y procesos.

De este casi infinita variedad de posibles materiales de escobillas, aquí han emergido muchas clases, Cada uno a encontrado un particular campo de aplicación, por razones que pueden ser descritas solamente por quien se adentra a los detalles de cada aplicación. Los principios que parecen gobiernan los tipos de materiales en cada uno de las clases generales de aplicación son ciertamente no encontradas en alguna simple teoría científica en el tiempo presente. Sobre la otra mano, hay suficiente consistencia en la conducta de las escobillas en muchas aplicaciones que los diseñadores de escobillas tienen reglas ciertas de pulgadas las cuales ellos pueden aplicar en alguna nueva situación o en algún caso de problema. Las aplicaciones generales de cada una de las clases de materiales de escobillas están listadas en la tabla 4.3. Las razones por que un particular tipo de escobilla trabaja mejor en cada tipo de maquina seria discutida en la sección de aplicaciones.

Aunque ciertas propiedades físicas de materiales de escobillas semejantes en dureza y fuerza son probadas para propósitos de control de calidad en manufactura, es bien conocido por todos los que han trabajado en este campo que los complicados efectos de fricción, desgaste, y conmutación no han

estado relacionadas lógicamente con algunas de las propiedades físicas medidas. Hay así algunas excepciones para algunas generalizaciones que ninguna de ellas es completamente válida. Dentro de algunos límites, sin embargo, si la materia prima de una serie de grados carbón o grafito son las mismas, por ejemplo, y si sus propiedades son variadas por cambios en procesos solamente, hay algunos como son

- ❖ La habilidad de conmutación incrementa cuando el módulo de elasticidad decrece
- ❖ La habilidad de conmutación decrece con el incremento de fuerza y dureza
- ❖ Se piensa que la fricción interna alta o humedad mejora la conmutación y el recorrido de la escobilla, pero esto no ha sido probado
- ❖ La habilidad, otra cosa que inicia igual, es alta con la más alta resistividad eléctrica
- ❖ La densidad de el grado base antes de la impregnación es frecuente en relación inversa a la habilidad de conmutación, pero cierta impregnaciones frecuentemente mejoran la conmutación, aun aunque ellos igual incrementa la densidad

Conmutador

Las delgas son generalmente de cobre laminado duro. Las características de este material se observan en las tablas XI y XII

Cobre laminado duro					
	Marca de aleación	Grosor, mm	anchura, mm	Longitud, mm	estado
Bandas de cobre para aplicación en electrotecnia	M1,M2	5,0 - 15,0	80 - 300	1500 - 3100	laminado en caliente
		16,0 - 25,0		1000 - 2000	

Tabla XI

en %											
Marca de cobre	Cobre, no menos de	Impurezas, no más de									
		Bismuto	Antimonio	Arsénico	Hierro	Níquel	Plomo	Estaño	azufre	Oxigeno	Cinc
M1	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,004	0,05	0,004
M2	99,70	0,002	0,005	0,01	0,05	0,02	0,01	0,05	0,01	0,07	-

Tabla XII

Mica

La mica es uno de los materiales aislantes minerales más importantes. Posee propiedades extraordinariamente valiosas como alta rigidez dieléctrica, gran resistencia al calor y a la humedad, flexibilidad y resistencia mecánica. Por todo ello, la mica se utiliza en aplicaciones de alta responsabilidad como aislamiento de máquinas de alta tensión y gran potencia, turbogeneradores, motores eléctricos, y algunos tipos de condensadores. La mica se encuentra en la naturaleza en forma de cristales cuya característica principal es la de poder esfoliarse con gran facilidad en láminas muy finas.

De acuerdo con su composición química (principalmente silicatos de aluminio hidratados), la mica puede dividirse en dos grandes grupos: mica moscovita, cuya composición puede aproximarse por la fórmula $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ y la mica flogopita de fórmula $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. En cualquiera de los dos tipos es posible encontrar también compuestos de Fe, Na, K y otros. La mica moscovita puede ser incolora, rojiza o verdosa, la flogopita suele ser más oscura con tonos ámbar, dorados, pardos y, a veces, hasta casi negra. El color depende mucho del grado de pureza de las micas. La mica moscovita, por sus propiedades, es mejor que la flogopita. Presenta mejores propiedades eléctricas, más resistencia mecánica, es más dura, flexible y elástica.

La mica moscovita es más resistente al desgaste que la mica flogopita. Este detalle es importante y debe ser tenido muy en cuenta cuando se utilizan productos derivados de la mica (como las micanitas) para colectores de motores. Si estas micanitas se fabricasen a partir de mica moscovita, se desgastarían menos que el cobre del colector al rozar con las escobillas de la máquina por lo que la superficie del colector dejaría de ser lisa y habría que rebajarla durante la vida de la máquina. Por contra, la micanita de mica flogopita se desgasta igual que el cobre evitándose los rebajes. Por esta razón este tipo de mica es la que se utilizara en el colector del M2A.

Debido a que la mica mantiene sus propiedades eléctricas cuando se calienta hasta varios centenares de grados, se le considera un material de la clase térmica alta (clase C según las normas). A temperaturas muy altas, la mica pierde el agua que contiene y pierde transparencia, su espesor aumenta y sus propiedades mecánica y eléctricas empeoran. La temperatura a la que la mica

comienza a perder el agua oscila entre 500 - 600°C para la mica moscovita y 800 - 900°C en la mica moscovita. La mica solo se funde a 1145 - 1400°C. La mica se encuentra en la naturaleza junto con otros minerales (cuarzo, feldespato) formando vetas dentro de rocas, generalmente, duras. Es necesario realizar voladuras de las rocas para después eliminar los minerales extraños y obtener así la llamada mica en bruto. El rendimiento de esta explotación es muy bajo. Normalmente se cifra en un 1% a un 2%, raramente se llega al 10%. La mica en bruto es posteriormente esfoliada, recortada y esfoliada de nuevo para pasar a ser clasificada de acuerdo con el tamaño de los cuadrados obtenidos. Posteriormente, es clasificada de nuevo atendiendo a la transparencia, contenido de minerales extraños, lisura de la superficie, etc. El aislante entre delgas tiene un grueso de 0.5 a 0.8 mm

Materiales aislantes

Existe una gran diversidad en orígenes y propiedades, muchos son de origen natural como por ejemplo el papel, el algodón, parafinas, etc., otros naturales, pero de origen inorgánico, como por ejemplo el vidrio, la porcelana y las cerámicas. Existen también materiales sintéticos como el silicón o compuestos a base de silicones.

Las principales propiedades que determinan la factibilidad de uso de un material aislante son:

1. La resistividad o resistencia específica
2. La tensión disruptiva
3. La permitividad
4. La histéresis dieléctrica
5. Las propiedades mecánicas
6. Capacidad para soportar la acción de agentes químicos, el calor y otros elementos presentes durante su operación

Uno de los factores que afectan la vida de los aislamientos, es la temperatura de operación de la maquina eléctrica, esta temperatura esta producida principalmente por las perdidas, Durante su operación estas perdidas están localizadas en los siguientes elementos principales:

El estator y el rotor que constituyen el circuito magnético, aquí las perdidas son producidas por el efecto de Histéresis y las corrientes circulantes en las laminaciones, son dependientes de la inducción, es decir que influye la tensión de operación.

Los devanados, aquí las pérdidas se deben principalmente al efecto Joule (RI^2) y en menor medida por corrientes de Foucault.

Se presentan también pérdidas en las uniones o conexiones, que se conocen también como “puntos calientes”.

Generalmente como temperatura ambiente máxima suele usarse 40°C . La temperatura de un motor debe limitarse ya que alta las temperaturas estropean el aislamiento orgánico y alteran las propiedades de los lubricantes. Además aumenta la resistividad del cobre incrementando las pérdidas con la consiguiente baja de eficiencia. Además se producen esfuerzos térmicos que pueden llegar a producir fallas mecánicas.

Los aislamientos usados en motores se dividen en tres clases principales: A, B y H para los cuales las máximas temperaturas de trabajo se han fijado en 105°C , 130°C y 180°C .

Los motores pueden estar diseñado para servicio continuo o intermitente.

Para motores de servicio continuo aislados con materiales de la clase A se han fijado para motores abiertos una elevación de temperatura sobre un ambiente máximo de 40° a 50°C . Para motores cerrados la elevación es mayor y se fija en 55°C .

Con objeto de que el motor pueda soportar un cierto grado de sobrecarga al diseñar un motor hay que hacerlo para una potencia mayor a la nominal de acuerdo con los valores que fija la siguiente tabla para los valores de servicio.

Para motores cerrados este factor es en general 1.

La elevación de temperatura es válida para lugares a una altura no mayor de 1000 metros sobre el nivel del mar. A mayores alturas debido a la disminución de la densidad del aire la disipación de calor es menos efectiva y la elevación de temperatura será mayor.

Un motor debe operar satisfactoriamente si las fluctuaciones en la tensión de alimentación no exceden a un 10% y las de la frecuencia no son mayores de un 5%.

La principal función de los aislamientos utilizados en un dispositivo eléctrico es separar aquellas partes que se encuentren a potenciales diferentes, interponiéndose físicamente entre ellas. A este respecto en las máquinas rotativas hay que prestar especial atención a la separación entre los conductores de dos fases diferentes así como al aislamiento de todos ellos respecto a otras partes de la máquina con una conductividad eléctrica no despreciable, tales como las chapas magnéticas, la carcasa y el eje.

El espesor del aislante debe ser suficiente para poder soportar, sin que se produzca la ruptura dieléctrica (“perforación del aislante”), la diferencia de potencial que aparece entre sus caras extremas puestas en contacto directo con las dos partes a separar. Dicho espesor ha de ser el estrictamente necesario, no solo por razones de costo del material sino también (lo que a menudo es más importante) con el fin de reducir el gradiente térmico necesario para transmitir a su través un determinado flujo de energía calorífica, disminuyendo así la temperatura máxima alcanzada por el aislante. De lo anterior podría deducirse que su dimensionamiento viene determinado por la máxima sollicitación dieléctrica que ha de soportar. Esto sin embargo solo es cierto para las maquinas de mediana y alta tensión. Para las maquinas de baja tensión, el espesor del aislante viene fijado por consideraciones de rigidez mecánica, las cuales imponen un limite inferior que, en casos, proporciona coeficientes de seguridad superiores a cinco desde un punto de vista exclusivamente dieléctrico.

La elección de un buen aislamiento tiene una importancia capital para el buen funcionamiento de la maquina, puesto que es la calidad del aislamiento lo que determina esencialmente la fiabilidad de servicio de una maquina eléctrica. De ahí la importancia que se atribuye a su acertada elección y elaboración. Esa tarea, sin embargo, no suele resultar fácil, debido a la multiplicidad de aislantes que ofrece el mercado, al desarrollo acelerado de la técnica de materiales aislantes (su tasa de innovación es solo comparable a la que se tiene en la química de los plásticos, a cuyo desarrollo esta íntimamente ligada), pero sobre todo debido a la diversidad de requisitos que se debe satisfacer un buen aislante.

Así sin pretensiones de exhaustividad, pueden citarse los siguientes:

Requisitos eléctricos

- ❖ Elevada rigidez dieléctrica. Merece la pena señalarse, a este respecto, que los aislantes deben soportar no solo las tensiones en condiciones nominales de servicio, sino también las de ensayo previstas por las normas, que son claramente superiores a las nominales
- ❖ Alta resistividad
- ❖ Bajas pérdidas dieléctricas

Requisitos mecánicos

- ❖ Los aislantes deben soportar los esfuerzos a que son sometidos durante el proceso de fabricación de la maquina y durante su funcionamiento posterior (por ejemplo, fuerzas centrífugas, tensiones mecánicas de dilatación y contracción, vibraciones, sollicitaciones durante los cortocircuitos, etc.)
- ❖ Requisitos térmicos
- ❖ Alta conductividad térmica (permite la evacuación del calor con un gradiente térmico bajo)
- ❖ Termoestabilidad a altas temperaturas
- ❖ Elevado calor específico (permite eventuales sobrecargas transitorias en la maquina con una reducida elevación de temperatura).

Requisitos fisicoquímicos

- ❖ Antihigroscopicidad (la humedad disminuye mucho la rigidez dieléctrica y la resistividad). En casos especiales puede dotarse a la maquina de aislamientos particularmente resistentes a la humedad (aislamiento tropical).
- ❖ Capacidad para conservar la superficie elasticidad en todo el margen de temperaturas usuales durante el funcionamiento, parada y almacenamiento de la maquina.
- ❖ Oleorresistencia
- ❖ Resistencia frente a posibles lubricantes disolventes.

Requisitos de resistencia frente a agresiones ambientales

- ❖ Las agresiones del medio ambiente pueden ser muy diversas según la aplicación y el emplazamiento de la maquina. Pueden citarse entre otras:
- ❖ Polución atmosférica. Polvo. Suciedad.
- ❖ Agentes químicos corrosivos (utilización en petroquímicas, ambientes marinos, etc.).
- ❖ Agua

Requisitos económicos

Precio reducido, tanto de las materias primas, como del proceso tecnológico de fabricación.

Esta notable multiplicidad y diversidad de requisitos determina que no exista un aislante óptimo desde todos los puntos de vista y que sea necesario llegar a compromisos satisfactorios. (Así, por ejemplo, obsérvese que se exige a la vez buena conductividad térmica y mala conductividad eléctrica, cuando ambas cualidades suelen ir juntas en los materiales).

Dada la gran variedad de materiales aislantes utilizados en los dispositivos eléctricos se ha procedido a su clasificación. Dicha clasificación se reproduce a continuación en la tabla adjunta en la que se detalla la designación, así como la temperatura máxima correspondiente a cada clase:

Merece señalarse que la temperatura máxima de los devanados debe estar, entre 5° y 15°C por debajo de la temperatura límite que asigna la norma a la clase de aislamiento utilizado.

Respecto al comportamiento de los aislantes con la temperatura, conviene decir que, puesto que se trata, en gran medida al menos, de materiales orgánicos, resulta fácil predecir que, bajo la acción de la temperatura, combinada o no con otros factores (por ejemplo) humedad, oxígeno, etc.) tendrán lugar reacciones de descomposición específicas para cada aislante y más o menos lentas, que irán degradando progresivamente las características del producto inicial. Dicho proceso de degradación se aprecia, entre otras, por las siguientes secuelas:

- ❖ Disminución de la resistencia a la penetración de la humedad, debido a la modificación química de las superficies y a la aparición de grietas.
- ❖ Disminución progresiva de las características mecánicas (por ejemplo, pérdidas de la flexibilidad necesaria para seguir las deformaciones asociadas a los cambios de temperatura y adaptarse así a la superficie del conductor; aumento de la fragilidad, etc.). Ello constituye, en general, el anuncio de una próxima caída, más o menos rápida, de la rigidez dieléctrica.
- ❖ Aumento de las pérdidas dieléctricas
- ❖ Reducción del espesor del aislante

Todos estos procesos, si la máquina trabaja en las condiciones usuales de funcionamiento sin que sus aislantes superen las temperaturas fijadas por las normas, tiene lugar de una forma relativamente lenta. Por tiempo aceptable

debe entenderse, 40 años para las maquinas grandes, 30 años para las medianas y 20 para las pequeñas, orientativamente.

Conductores eléctricos

Los conductores en los motores al igual que los usados en otras maquinas eléctricas deben ser de alta conductividad, ya que con ellos se fabrican las bobinas, los requisitos fundamentales que deben cumplir los materiales conductores son los siguientes:

- ❖ La más alta conductividad posible
- ❖ El menor coeficiente posible de temperatura por resistencia eléctrica
- ❖ Una adecuada resistencia mecánica
- ❖ Deben ser dúctiles y maleables
- ❖ Tener una adecuada resistencia a la corrosión

Los materiales mas comúnmente usados como conductores son el cobre y el aluminio. En nuestro caso utilizaremos cobre tanto por ser fácil de adquirir como por razones de costo

Las especificaciones que hemos seleccionado para el alambre magneto son las siguientes:

Alambre magneto 180°C.

Sus características Térmicas permiten obtener excelentes resultados en aplicaciones que requieren operación a altas temperaturas, es químicamente resistente a solventes común y refrigerante y tiene excelentes propiedades mecánicas.

Aislamiento Tipo clase "H" (180°C)

Este posee la principal propiedad de ser un material que resiste u opera hasta temperaturas 180°C, sin perder sus propiedades optimas tanto dieléctricas, como mecánicas siendo bastante resistente a trabajos en condiciones de humedad excesivas, consiste de materiales como el silicón, elastómeros y combinaciones de materiales como la mica, la fibra de vidrio, asbestos, etc con sustancias aglutinantes como las resinas y silicones apropiados, sus propiedades:

Gran flexibilidad, resistente al calor, resistente al mal trato, mecánico y a la humedad. Facilita su instalación debido a su flexibilidad. Barniz de impregnación tipo poliéster para operación de equipos eléctricos clase térmica para 180°C. Proporciona una alta penetración al devanado que se aplique

formando una película termofija continua, con un alto esfuerzo de pegado excelentes característica dieléctricas y resistencia química a ácidos, y humedad. Se define como un excelente aislante, ya que de acuerdo a su espesor tiene una excelente resistencia mecánica así como su punto de ruptura oscila entre los 500 y 20000 volts.

El aislamiento entre el embobinado y el núcleo queda sujeto a esfuerzos mecánicos y deberá, por lo tanto, ser más que lo necesario por razones eléctricas solamente. Las reglas de normalización de A.I.E.E., exigen que el aislamiento entre el núcleo de armadura y embobinados debe soportar durante un minuto una tensión aplicado a 60 ciclos igual a 2 veces la tensión Terminal más 1000 volts. La prueba de tensión deberá aplicarse a todo el embobinado, después de la prueba de temperatura, cuando los embobinados se encuentran a temperatura normal de operación.

4.2.- Programa de actividades para la construcción del motor de dos armaduras

En esta parte de la tesis proponemos un plan de actividades para la construcción del motor de dos armaduras que hemos diseñado, al ser una propuesta nos basamos en los procesos de fabricación y los tiempos estimados por lo que al final la programación de actividades y los tiempos de las mismas podrían variar cuando se lleve a cabo la realización de este motor.

El proceso de construcción puede empezar de manera simultanea para ambas parte del motor si existen los medios, o sea, el estator y el rotor, para acortar los tiempos de construcción, Dentro de esta propuesta se consideran las actividades que conciernen a la parte de manufactura, incluyen los procesos de diseño y calculo de las piezas que forman el motor de dos armaduras. Los procesos de calculo y diseño tanto del estator como del rotor ya han sido descritas en los capítulos anteriores de esta tesis, así que solo nos limitaremos a mencionar el orden posible en que se realizaran estas actividades de una manera lógica y el tiempo estimado para realizarlos, respecto de los procesos de manufactura, dependerán de la empresa elegida para realizar las piezas necesarias, por lo que solo se mencionara el tiempo estimado para su realización en base a datos obtenidos en procesos de fabricación de piezas eléctricas de otros motores. Empezaremos por describir las actividades referentes al estator:

Dimensionamiento del núcleo del estator.- Esta es la primera de las actividades para la construcción de un motor y también es la más importante, ya que se trata de la parte de diseño donde se definirán los parámetros a utilizar y que servirán de base en la construcción del motor, para comenzar y de acuerdo a las especificaciones que hayamos elegido para nuestro motor procederemos al dimensionamiento del volumen y del diámetro interior del estator, después de haber calculado el número de ranuras del estator (S_1), determinaremos los conductores por ranura (C_s), con estos datos calcularemos las dimensiones de la ranura del estator, posteriormente dimensionaremos los conductores. Una vez terminado los pasos anteriores procederemos a la evaluación de la densidad de corriente, en caso de que no sea aceptable volveremos a seleccionar las dimensiones de las ranuras del estator y a redimensionar los conductores, en caso de que la evaluación de la densidad de corriente sea aceptable, verificaremos la densidad de flujo (B) del estator, si el valor de B no es aceptable se repetirán los pasos desde la selección de los conductores por ranura y los demás pasos subsecuentes, en caso de que el valor de B sea aceptable daremos por terminado este proceso. Todo este proceso se desarrolla en el capítulo 3, La realización de estos pasos estimamos llevaran un tiempo aproximado de 4 días.

Dimensionamiento de la coraza o carcasa.- Es una parte fundamental del motor que se encuentra relacionada con el dimensionamiento del estator, por lo que su cálculo y determinación se pueden realizar una vez que se ha determinado el volumen del estator, así que proponemos que se comience con el cálculo de la coraza a partir de la segunda semana, dado que el cálculo del núcleo del estator pueden modificar las dimensiones de la coraza, determinamos que los resultados finales acerca de la misma se entreguen al mismo tiempo que los cálculos del núcleo del estator, o sea que su cálculo será de 2 días aproximadamente.(*).

Dimensionamiento de las tapas.- Una consideración importante al momento de diseñar tanto la coraza como las tapas es la facilidad de acceso, es decir, el poder inspeccionar la máquina y limpiarla, para poder reemplazar los cojinetes, y en algunos casos, poder efectuar reparaciones sin necesidad de un desmantelamiento excesivo. De la misma manera que existe una relación entre el cálculo de la coraza y el núcleo del estator, también existe una relación entre el cálculo de las tapas y el de la coraza. Por lo mismo, consideramos utilizar el mismo tiempo de cálculo para determinar ambas piezas así que, el cálculo de las tapas tomara 2 días.(*).

Calculo de las bobinas.- En este paso debemos calcular los embobinados, que como ya se vio, se calculan cuando se realizan los cálculos del dimensionamiento del núcleo del estator, por lo que se considera su inicio en la primera semana de trabajo y se propone se realice en un lapso de 4 días aproximadamente.

Adquisición del material.- Esta es una de las partes que lleva más tiempo ya que una vez terminado el diseño del estator, el material a utilizar, debemos buscarlo y cotizarlo, verificar su existencia en el mercado nacional para optimizar costo, así mismo debemos comparar precio y calidad del material, todo esto nos llevaría un tiempo aproximado de 7 días.

Dimencionamiento del portaescobillas.- Esta parte del motor se calcula cuando se tiene las dimensiones del estator y se necesita dimensionar la pieza que será la alimentación entre el estator y el rotor, para su calculo utilizaremos dos días.(*).

Generación de planos.- Una parte esencial para solicitar manufactura de las piezas que requerimos es la elaboración de los planos correspondientes que nos muestren las dimensiones de los elementos a construir, estos planos podrían ser generados por computadora mediante el software Autocad o mediante el uso de estilógrafos, Estos planos deben ser realizados cuidadosamente poniendo énfasis en la correcta indicación de las medidas exactas de las piezas, se estima tenerlos listos en un lapso de 6 días.(*).

Definir los procesos de manufactura.- Una vez que se tengan los materiales a utilizar se debe determinar cual será el mejor método de manufactura a utilizar, para esto se investigara en las empresas dedicada a la fabricación de equipos eléctricos cuales son los métodos que utilizan, sus ventajas y desventajas, por lo general se utilizan los métodos de fundición y de fabricado (construidos con acero laminado, a base de soldadura), si bien cada tipo de construcción tiene sus ventajas específicas, el factor principal que determina la elección de uno u otro es el costo y una vez que se tengan los datos necesarios, tomaremos una decisión, este ir y venir a las empresas nos llevara un lapso de 3 días.

Manufactura del núcleo.-En este proceso se cuidara que las laminaciones del núcleo y su unión sean las correctas así como que tengan las dimensiones correctas. Además debemos asegurarnos que las laminas de acero no tengan

rebabas en los bordes y que el aislamiento mutuo no se perjudique cuando se coloquen unas al lado de otras. Esto tomara aproximadamente 3 días.

Manufactura de la coraza.-La manufactura de la coraza deberá cumplir con los lineamientos que establecen las normas, por ejemplo la NEMA Standard MG-1 en cuanto a sus características eléctricas y mecánicas. Por lo general se usa el método de fundición, aunque muchos fabricantes ahora utilizan el método de fabricado. La coraza carga con los apoyos o piezas extremas donde van los cojinetes que soportan el rotor, por tanto, es necesario que estas partes estén bien alineadas y que tengan la debida resistencia mecánica

Ensamblar estator.-En esta parte deberemos observar el correcto montaje del núcleo del estator en la carcasa o coraza con el fin de que las vibraciones del motor no afecten su rigidez

Manufactura de tapas.-Estas piezas deben cumplir también con las normas NEMA, en motores pequeños son hechos de una sola pieza, se pueden hacer de tipo fabricado, pero generalmente se funden, en esta parte debemos determinar el tipo de cojinete a utilizar, los mas utilizados son los cojinetes de rodamiento, aunque los cojinetes de fricción son para funcionamiento silencioso, la fabricación de las tapas será en un tiempo de 5 días.

Manufactura de portaescobillas.-Los portaescobillas se componen de una caja mecanizada ligeramente mayor que el tamaño de las escobillas, de tal manera que estas puedan desplazarse suavemente en la caja sin girar ni ladearse, las cualidades principales que se deben exigir de un portaescobillas son las siguientes, la construcción debe ser robusta y a prueba de vibraciones, La escobilla debe deslizarse en la caja libremente sin rozamientos, el ángulo que haga la escobilla con el conmutador ha de elegirse de tal forma que se obtenga un mínimo de fricción, vibración o traqueteo, La tensión que, originada por el resorte, se aplica a la escobilla debe ser suficientemente uniforme cuando esta se desplaza longitudinalmente, la tensión del resorte ha de poder ajustarse fácilmente, incluso si es necesario hacerlo durante el periodo de funcionamiento, El sistema de presión debe pesar poco, para conseguir que se adapte fácilmente a las irregularidades que puedan tener las superficies de fricción, La escobilla debe quedar sujeta a lo largo de toda la longitud de desplazamiento, la cara de la caja en la que se apoye la escobilla ha de ser completamente plana; de lo contrario, la escobilla giraría, El ajuste que sea

necesario hacer debido al desgaste del conmutador ha de poderse realizar fácilmente, sin necesidad de desmontar ninguna parte de la maquina, Cuando sea necesario cambiar una escobilla, el resorte de presión no debe hacer contacto con el conmutador, Tanto el resorte como las superficies de deslizamiento no han de transportar corriente, Una escobilla se podrá sustituir por otra durante el funcionamiento de la maquina, En tres días estarían listas

Ensamblar portaescobillas.-Debemos colocar las escobillas elegidas y sujetarlas bien de tal manera que el roce con el conmutador no las afloje y se caigan provocando un accidente, para este proceso estimamos un día.

Embobinar.-En esta actividad deberemos tener cuidado con la colocación de las bobinas con el fin de obtener el devanado elegido para el estator, en este caso devanado ondulado de doble capa, la colocación de las bobinas deberá ser cuidadosa y sin olvidar colocar los aislamientos correspondientes en las ranuras y entre bobinas. Por esto mismo el proceso tomaría un tiempo estimado de 4 días.

Conexiones.-Una vez que las bobinas han sido colocadas en las ranuras, se encantan sus cabezales y se los coloca en la forma adecuada, se procede a conectar las bobinas de cada fase por lo que tendremos cuidado al realizar estas uniones, esto llevara un tiempo de 2 semanas aproximadamente.

Ensamblar motor.-En este punto ya tendremos todo listo para el ensamble final, es decir, el estator y el rotor estarán listos para ser unidos junto con las demás piezas del motor, debemos fijarnos bien en colocar el rotor dentro del motor así como de embonar correctamente las tapas en la flecha para permitir el libre giro del rotor además de asegurarnos un perfecto equilibrio y mantener así la dimensión del entrehierro que habíamos calculado, las tapas se sujetan a la carcasa mediante un macho o chaveta, para asegurar así un alineamiento correcto de los cojinetes, todo esto se realizara en un periodo de 2 días.

Pruebas.-En este punto realizaremos las pruebas generales que se le aplican a todos los motores y las cuales se mencionan en el inciso siguiente de este mismo capítulo, para esto utilizaremos un estimado de 3 días

A continuación procederemos a describir las actividades referentes al rotor, como se podrá observar muchas de los procesos descritos en la sección referente al estator se empalman con las que se realizan con el rotor

Dimencionamiento Del Núcleo del rotor.-Para este trabajo hemos organizado un programa de actividades donde se ha planteado los tiempos de fabricación para el rotor. Tenemos un tiempo tres de tres días donde se contemplo el calculo de las principales variables, como son el diámetro de la armadura, numero de ranuras, dimencionamiento de las ranuras, conductores, densidad de corriente, flujo magnético, longitud de la armadura y diseño del conmutador. Para este análisis nos basamos en la norma NEMA Standard MG-1 (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos de los estados Unidos)

Dimencionamiento De La Flecha.-Como sabemos la maquinaria rotatoria esta dotada por flechas de transmisión o simplemente flechas con el fin de transferir movimiento y par de torsión. Esta actividad esta planeada para dos días, en nuestro trabajo lo hemos orientado más hacia el diseño magnético y eléctrico, sobre este elemento la parte mecánica, plantearemos solamente las características básicas. La flecha es un elemento mecánico con el cual se acopla el motor, a su carga y es la que trasmite la fuerza de los núcleos a las maquinas. La flecha se diseñara de manera que tenga una rigidez adecuada para resistir el par motriz y la deformación excesiva, resultante del peso del motor, las cargas mecánicas.

Dimensionar El Conmutador.-Tiempo programado para esta pieza dos días en esta pieza intervienen dos disciplinas como la mecánica y la eléctrica, la primera en los materiales de construcción, la segunda en contacto eléctrico interno con el externo. Para poder dimensionar esta pieza tuvimos que apoyarnos con el número de devanados por ranura, el número de ranuras, para obtener los siguientes parámetros como el número de delgas, la tensión por delga, el diámetro frontal. Después dimensionamos las escobillas bajo el siguiente principio, espesor por ancho por longitud. Con estos parámetros obtuvimos el ancho del conmutador y así poder hacer una Fig. frontal del conmutador con la distribución de las escobillas y una Fig. lateral con las escobillas.

Dimensionar El Ventilador.-Pieza por naturaleza mecánica donde tenemos programadas dos días para seleccionarlo por información técnica, ya que estamos partiendo de algo ya existente de las maquinas eléctricas. El ventilador lo seleccionaremos para auto ventilación será construido de lamina acerada y soldada en un cubo (centro, alma de acero) donde llevara un diámetro con chavetero para ser fijado en la flecha.

Calculo De Los Arrollamientos.-Se tiene programada para esta actividad tres días.

Realizamos un estudio sobre los tipos de arrollamientos para designar el que llevara la armadura, tomando en cuenta que es corriente directa y los tipos a seleccionar son Imbricado y Ondulado. Hemos seleccionado por un arrollamiento serie – paralelo u ondulado doble, porque tiene las características que aumenta el desplazamiento total del campo, y se obtiene un número de dos capas o mayor, en la armadura. El arrollamiento que llevara nuestra armadura será de doble capa, es decir en cada ranura llevara dos capas una inferior y otra superior.

Adquisición De Materiales.-Lo que dure el proyecto La adquisición de materiales esta programada desde el principio donde se requisitaran los materiales de acuerdo con nuestras necesidades, como son barra de acero, laminaciones troqueladas, solera de cobre, cintas de aislamientos como de algodón, baleros, conmutadores, tornillería, tuercas de varias medidas, informaciones técnicas como catálogos de los diferentes elementos participativos en la construcción.

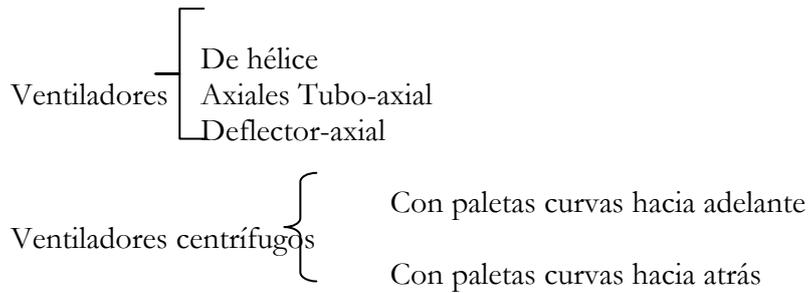
Generación De Planos.-Tiempo estimado para realizar planos doce días. Para nuestra armadura hemos realizado un diagrama eléctrico de las conexiones de estator, con la armadura y un diagrama de conexiones del arrollamiento ondulado doble para la armadura y dibujos de ranuras, escobillas, conmutador etc.

Manufactura Del Núcleo Y La Flecha.-El tiempo programado para estas piezas mecánicas es de nueve días que las repartiremos de la siguiente forma, cuatro días para formar el núcleo, y otros cuatro días para fabricar la flecha teniendo una semana para detallar cualquiera de las dos piezas. La fabricación del núcleo esta basada en el diámetro de la armadura que esta formado por laminaciones de acero que son troqueladas a grandes presiones y son barnizadas para evitar fugas de corrientes, donde se irán agrupando sobre la flecha y sometidas a presión por tornillos del mismo material hasta la longitud determinada y sostenidas por cuñas de acero a la flecha. La fabricación de la flecha es con material de acero que esta sujeto a tratamientos térmicos, uno de ellos es rolado en frío o en caliente con alta resistencia al esfuerzo de torsión que esta sometida el eje.

Este elemento es maquinado con tolerancias muy críticas en toda su longitud: para evitar vibraciones y malos ajustes con cuñeros, rodamientos, las tolerancias son de milésimas de milímetro con lo cual se tiene un ajuste perfecto y una vida de operación mayor. Al inicio será una barra uniforme con diámetro circular, se realizara una inspección visual si hay un desperfecto sobre su longitud, procedemos a meterla al torno para comenzar a realizar los siguientes diámetros, núcleo de la armadura, ventilador, sistema de enfriamiento, cabezales de la armadura, conmutador y baleros. Estos dispositivos mecánicos serán sujetos por cuñas que serán hechos por tornos y de material de acero, y los chaveteros se harán sobre la flecharon mucha precisión, no debe quedar mucha holgura entre ambos, porque produciría calentamientos en el metal. El ajuste de los baleros la tolerancia es de milésimas de milímetro con lo cual se obtiene un ajuste perfecto y una vida de operación mayor.

Manufactura Del Conmutador.-En esta actividad esta planeada para siete días. La construcción del conmutador que es la parte más delicada y vital de la maquina es como sigue: El conmutador se construye, con segmentos de cobre duro y estirado en frío, aislado entre si con mica, el espesor del aislamiento varia desde 0.5 a 1.5 mm y depende del diámetro del conmutador y dla tensión de los segmentos adyacentes; la mica utilizada para el aislamiento del conmutador debe de ser de clase suave y de tal forma que mica y cobre se gasten uniformemente. El conmutador armado se coloca en la flecha de la maquina, sobre una extensión del cubo de al armadura, para después fijar con cuñas de precisión y después conectar. Otro detalle del conmutador son las conexiones con el arrollamiento, actividad muy delicada donde se requiere visión, paciencia, habilidad, comprensión. Donde nos aplicaremos a la unión entre ambos, procediendo a marcar las puntas de conexión del arrollamiento al número de la delga para después conectar de acuerdo al diagrama realizado del arrollamiento para después soldar.

Manufactura Del Ventilador.-El ventilador lo seleccionaremos mediante la siguiente información técnica, teniendo un tiempo programado de cinco días donde trabajaremos paralelamente con varias actividades. Un ventilador esta formado por un impulsor que esta formado por hélices y su cubo como parte central de este elemento mecánico lo seleccionaremos de la siguiente información.



Seleccionamos el ventilador tipo axial por las siguientes características que el flujo de aire es esencialmente paralelo a la longitud de la armadura, es más común entre los motores su eficiencia es regulada por las inclinaciones de las hélices es económico, práctico para desmontar y dar servicio de mantenimiento. Las características son las siguientes: Las paletas de los rodets de los ventiladores axiales varían en aumento a su número de forma, ajustabilidad, ángulo con respecto al eje de giro, material y forma de construcción, así como en la relación entre el diámetro del cubo y del rodete. En nuestro trabajo, no hacemos un estudio profundo sobre este elemento, si se interesan por mayor información, pueden ver el libro ENERGIAS MEDIANTE VAPOR, AIRE O GAS de W.H.SEVERNS, J.C.DEGLER, J.C.MILES. EDITORIAL. REVERTE.

Ensamble De Núcleo Y Flecha.-Tiempo para realizar esta actividad cinco días. En esta actividad se debe tener la flecha totalmente mecanizada con sus respectivos diámetros del núcleo, ventilador, conmutador, rodamientos. Una manera práctica para realizar el ensamble entre estos dos elementos es poner la flecha en la posición vertical sobre una guía de montaje donde se empiezan a acomodar las laminas troqueladas hasta obtener la longitud de diseño, para después atornillar el volumen formado, una cierta presión de apriete, donde se estará evitando vibraciones y corrientes de fuga. Para después barnizar el núcleo y meterlo al horno de secado por un determinado tiempo, se realizará una inspección minuciosa en todo el volumen, como son ranuras y dientes para el arrollamiento.

Arrollamientos (Embobinados).-Tiempo para realizar esta actividad cinco días. Después de ensamblar el núcleo con la flecha, procedemos a poner en un banco de trabajo en posición horizontal, donde procederemos a la conformación de las bobinas en un mecanismo, para después ser montadas en

la armadura de la siguiente forma, un devanado debe ser interior y el otro superior, en cada ranura, después con cinta de algodón procederemos a formar los cabezales de todos los puntos de conexión, donde estarán enumeradas, limpias de esmalte, para ser soldadas.

Montaje Del Conmutador.-Esta actividad deberá ser en tres días. Primero se monta el cubo (base) que entra a presión en la flecha, y luego lo sujetamos con cuñas, para después poner un aislamiento sobre el cubo muy importante este detalle para evitar fallas a tierra, luego montamos el conmutador que será sujeto por un par de cuñas que estarán sujetas a un perno de apriete, y en la parte inferior tendrá un conductor vertical para que se haga la conexión entre la armadura y el conmutador, verificaremos el aislamiento de las delgas con respecto a tierra, no debe sobresalir la mica entre las delgas, si es afirmativo se tendrá que ser rebajado una profundidad de cinco mm, la pista de asentamiento de las escobillas de ser uniforme, sin ningún borde, porque esto causaría problemas de chisporroteo y rompimiento de escobillas, después de este análisis se protege con una envolvente de mica gruesa, contra el polvo otro tipo de agentes que puedan dañarlo o ser golpeado.

Montaje Del Ventilador.-El montaje de esta pieza es de un día. Antes de hacer el montaje verificamos la información técnica con la pieza donde comprobamos las medidas establecidas, como son el número de rodetes, el ángulo de los rodetes, soldaduras de los mismos, que no existan fisuras, que no estén flojos, chequeamos en cubo (centro) principalmente el diámetro, chavetero, cuña, que no existan rebabas metálicas, que este limpio de impurezas, después de este chequeo procedemos a montarlo sobre la flecha, entrara a presión hasta que llegue al escalón, deberá coincidir los chaveteros de ambos para introducir la cuña, y después verificar que quede fijo y no exista movimiento.

Balanceo Dinámico.-Esta prueba esta estimada para tres días. Para esta actividad el rotor debe de estar totalmente armado con las siguientes piezas, núcleo (armadura), conmutador, y ventilador, es montado en un torno que tiene la capacidad de medir los pesos de los elementos, se empieza a ser la prueba a diferentes velocidades y analizando los pesos en pleno movimiento, si hay variación, chequeamos los dispositivos, por algún contra peso, o deformación de los elementos, para ser corregidos en la parte afectada, sino se hace esta actividad podría haber consumos excesivos de corriente, zumbidos, vibraciones, hasta que se quemara la maquina, en caso que no exista una

variación por las pruebas ejecutadas , procederemos a bajarlo del torno, y estará listo para se armado totalmente.

Ensamblar El Motor.-Tenemos planeado tres días para el ensamble, para esto debemos tener, el estator, ya conectado a al caja de conexiones, las tapas frontal y posterior ya verificados los diámetros de ambas, el porta escobillas , habiendo previsto esto antes procedemos a poner un rodamiento de bolas de contacto radial para cargas axiales otro rodamiento será de rodillos cilíndricos para carga axial, para después meter todo el rotor, y acoplar las tapaderas en ambos rodamientos entraran a presión, después juntaremos las tapas, y juntas con el armazón del estator, para ser atornillado simultáneamente, por tapa, ajustaremos el porta escobillas sobre el conmutador, pondremos dos escobillas en la caja del mismo, después procederemos a girarlo manualmente y determinar si hay rozamiento entre el estator y el rotor, si hay rozamiento se tendrá que desarmar todo, ver donde ocurre dicha fricción, podría ser que este desalineado, alguna deformación de la armadura, del estator, etc.

En caso que no existe este rozamiento, y todo este normal, procederemos a conectarlo de la siguiente forma, el estator va a un arrancador con control de velocidad, para que trabaje en vacío y se este checando su corriente, calentamiento y ruido en los rodamientos, su sistema de enfriamiento, pasando estos chequeos. podemos decir que nuestro motor esta listo para alguna aplicación, industrial, o científica. Nuestro plan de actividades nos arroja un tiempo aproximado de 33 días (poco mas de un mes), trabajando de lunes a viernes 8 horas diarias. El plan de actividades lo vemos en el Anexo I en la pagina 166

(*) estas partes del motor no fueron calculadas en el presente trabajo, pero se mencionan por ser parte de la estructura del motor

4.3.- Pruebas A Realizar

Cuando una maquina nueva ha de ser puesta en servicio debe ser cuidadosamente examinada para evitar que tenga cualquier defecto. El objeto de las pruebas a que se somete una maquina es el siguiente.

- ❖ Determinar fallas en el diseño de las misma, en los materiales empleados y en los métodos de fabricación.

- ❖ Determinar si la maquina cumple con ciertas especificaciones impuestas por los códigos correspondientes
- ❖ Verificar las características de diseño de las maquinas e indicadas normalmente en la placa de características, Estas pruebas pueden subdividirse en:
 - I. Pruebas de prototipo (solo a maquinas que se diseñan y construyen por primera vez)
 - II. Pruebas de aceptación(para verificar que se cumplan las especificaciones hechas en una compra o pedido)
 - III. Pruebas especiales

Las pruebas de prototipo deben ser las que se efectúan a un motor de un diseño que no ha sido probado y que tiene la finalidad de que éste cumpla con los valores establecidos por la norma. Los resultados de la prueba prototipo son válidos para todos los motores que se construyen con el mismo diseño. Estas pruebas deben ser las siguientes:

- a). Potencia nominal
- b). Corriente a carga plena.
- c). Determinación del incremento de temperatura.
- d). Sobre velocidad
- e). Determinación de la eficiencia

Pruebas generales y pruebas especificas

En forma independiente del tipo de maquina, existe un grupo de pruebas que se pueden definir como de carácter general, por cuanto se refiere a los métodos de prueba, ya que pueden ser aplicadas ya sea a los transformadores o a las maquinas rotatorias (motores de inducción, maquinas sincronas y maquinas de corriente continua) tales pruebas son por ejemplo: las pruebas de aislamiento y de calentamiento.

Antes que una maquina nueva se someta a la tensión normal, es aconsejable que sus aislamientos estén completamente secos. Para conseguir esto, la maquina debe calentarse gradualmente, en tal forma que la humedad que pueda haber sido absorbida durante los diferentes procesos del montaje quede eliminada. En este caso es adecuado conectar los devanados en serie y alimentarlos con una fuente de energía a una tensión menor del normal, o bien

utilizar otros sistemas de calentamiento. Si bien es necesario tomar las medidas pertinentes para que la humedad sea eliminada, es ventajoso reducir en lo posible la ventilación, con el propósito de que la temperatura en la maquina aumente con mayor rapidez. Si inspeccionamos con cuidado el sistema de ventilación, será fácil encontrar métodos adecuados para conseguir nuestro fin. En el caso que las maquinas de tipo abierto, cabe cubrirlas por completo con una lona.

Las pruebas iniciales a desarrollar en el motor de 2 armaduras son las siguientes:

Pruebas mecánicas de verificación

Antes de someter a un motor a pruebas de tipo eléctrico se debe verificar desde el punto de vista mecánico, si la maquina no presenta defectos constructivos. En particular se debe observar:

- ❖ Si el entrehierro es regular y si el rotor al girar no tiene rozamiento. Si por casualidad existe alguna sospecha de que el rotor esta descentrado, es necesario comprobarlo por medio de calibradores en el entrehierro. El rotor debe hacerse girar con la mano para cerciorarse de que no produce ninguna fricción.
- ❖ Si las terminales y tornillos de conexión están perfectamente aislados y los contactos son seguros. Este examen incluirá la comprobación del apriete de las tuercas y los portaescobillas.
- ❖ Si los cojinetes(chumaceras) están montados correctamente y bien lubricados
- ❖ Si la maquina gira silenciosamente, sin vibraciones y sin calentamiento de los cojinetes

La prueba para la obtención de las curva par-velocidad ya fue descrita en el capitulo 2 en la sección de análisis experimental del motor de dos armaduras (Pág. 61)

Medición de resistencia ohmica de los devanados

Al someter al motor de 2 armaduras a pruebas lo primero que se determina es la resistencia de su embobinado primario. Se emplea para esto los métodos ya conocidos para la determinación de la resistencia. Suele medirse

entre dos terminales del estator. Si la conexión es estrella, que es lo más común la lectura hay que dividirla entre dos para obtener la resistencia por fase. La resistencia que se determina de esta manera es la ohmica. La medición de la resistencia de los devanados del estator y el rotor para los motores se efectúa por lo general por el método de la caída de tensión (voltímetro-amperímetro), en forma excepcional, cuando se tienen resistencias elevadas se usa el puente de Wheatstone y para devanados de muy baja resistencia se usa el doble puente de Thomson.

Pruebas de aislamiento y de calentamiento

Cuando las maquinas eléctricas se conectan a la red eléctrica a la que van a operar, se pueden presentar solicitaciones al dieléctrico superiores a las que corresponden al funcionamiento normal. Estas solicitaciones pueden ser debidas a descargas atmosféricas o de origen interno en la instalación, relacionadas con maniobras o fallas propias de la instalación. Las pruebas a los aislamientos sirven para verificar las características de los aislamientos usados en las maquinas eléctricas cuando se ven sometidas a esfuerzos dieléctricos y determinar si pueden o no sufrir daños. Las pruebas en los aislamientos se pueden clasificar para los motores eléctricos como:

- ❖ Prueba de resistencia de aislamiento
- ❖ Prueba de tensión aplicada

Medición de la resistencia de aislamiento

La medición de la resistencia de aislamiento de una maquina es una medición de tipo preliminar orientativa para que de manera interpretativa rápida se puede seguir esta regla; No debe ser menor de 1 Megohm del valor obtenido con la formula:

$$\text{Resistencia de aislamiento} = \left[\frac{\text{Tensión en terminales}}{(\text{potencia(KVA)}+100)} \right] \text{ (Megohms)}$$

La medición de la resistencia de aislamiento se efectúa con fuente de alimentación en corriente continua y con una tensión de al menos 500 Volts por medio de un aparato denominado "Megger". Estos aparatos pueden de 500, 1000 o 1500 Volts, de accionamiento manual o motorizado y con escalas de 100 – 500 – 1000 Megohms. Las indicaciones para la prueba son las siguientes:

Este método solo se usa para medir resistencias de valor elevado como es el caso de la resistencia de aislamiento. Cuando se usa megger manual, se debe girar la manivela a velocidad constante por un tiempo de la menos 1 minuto. Se debe verificar el ajuste del megger midiendo periódicamente con una resistencia de valor conocido. Al final de cada medición poner en corto circuito la resistencia en prueba para observar el regreso a cero de la aguja. Para medir la temperatura de la prueba, se debe colocar el termómetro lo más cercano posible a la resistencia por medir(en el caso de los motores, de los devanados)

Prueba de temperatura o calentamiento:

La prueba consiste en llevar a la maquina al valor de su propia carga nominal y mantenerla así hasta que alcance su temperatura nominal o de régimen, se debe tomar lecturas de la temperatura ambiente, así como de la temperatura de los devanados del estator, del rotor así como registrar la tensión y la corriente de la maquina, para tomar las lecturas de la temperatura se utiliza un termopar o un termómetro de bulbo aplicado en los puntos de la maquina donde se desee conocer la temperatura, esta prueba se realiza para determinar la temperatura de la maquina y verificar que no rebase los limites permitidos de acuerdos a su clase de aislamiento.

Por ultimo se debe mencionar que las pruebas aquí descritas pueden ser o no aplicables al motor de 2^a cuando se establezcan las pruebas normalizadas del mismo, las cuales describan mejor su funcionamiento y nos permitan estudiar mejor sus características.

V.- CONCLUSIONES

1. La realización de este trabajo nos llevo a darnos cuenta de todos los detalles que implica el diseño de un a maquina eléctrica, desde la concepción de la idea, pasando por la elección de las características que deseamos en la maquina a realizar, el calculo de sus partes así como la elección de los materiales a utilizar, en este trabajo realizamos un desarrollo básico de la creación de una maquina, sin embargo, a nivel industrial, se han implementado procedimientos para facilitar el trabajo y agilizar los cálculos como lo es el uso de tablas que nos permiten la obtención de varias incógnitas del diseño en base a los datos conocidos, además de que muchas decisiones están basadas en la experiencia que se tenga en el desarrollo de maquinas.
2. Dado que carecemos de experiencia en el ramo del diseño de maquina, nos vimos en la necesidad de tomar muchas decisiones durante la realización de este trabajo basándonos en nuestros conocimientos teóricos obtenidos de la literatura respecto al tema, pero sin apoyo practico, esto pudo provocar que nuestras decisiones no hayan sido las optimas sin que eso signifique que sean incorrectas.
3. La decisión de enfocarnos a la parte eléctrica y magnética en este trabajo no tuvo otro motivo que el de simplificar el proceso de diseño del M2A con el afán de apresurar la terminación de este trabajo además de la escasa información acerca de este tema
4. Los datos obtenidos satisfacen las condiciones propias de diseño, sin embargo, como toda maquina, es posible mejorarlo y en determinado momento obtener un diseño diferente que satisfaga alguna característica especial, como podría ser el tamaño, si se deseara un motor con un diámetro menor se puede obtener aumentando la longitud del estator y rotor y viceversa.
5. La construcción del motor aquí diseñado nos daría la respuesta a que tan eficiente es nuestro trabajo, sin embargo, por falta de recursos decidimos no construirlo en espera a que alguien pueda hacerlo usando los datos de este trabajo con el fin de comprobar la veracidad del diseño.

6. A pesar de que uno de los objetivos de este trabajo fue la cotización de la manufactura de este motor, esto no fue posible dado la falta de información obtenida acerca de los precios de manufactura y de los materiales utilizados. Esto debido a que muy pocas empresas del ámbito nacional ofrecen información acerca de los materiales que utilizan y cuando hacen cotizaciones solo las realizan a empresas previa identificación de las mismas.
7. A pesar de lo anterior podemos sugerir que para reducir los costos de fabricación se debe tratar de utilizar los materiales que se encuentren en el mercado nacional, Para obtener bajos costos de manufactura hay que diseñar el motor de manera que las operaciones de maquinado a que se someten sus partes durante la fabricación sean mínimas y sencillas, también buscar en la medida de lo posible utilizar un calibre de conductores comercial, ya que si se quiere utilizar un conductor de medida especial para maximizar el espacio de las ranuras, se tendrá que mandar a fabricar de manera especial y eso aumentara los costos de fabricación. Además hay que normalizar el diseño empleando un tipo de coraza para el mayor numero de tipos diferentes de motores posible. Los mismo puede afirmarse para tapas, flechas, laminaciones del rotor y estator, etc.

ANEXOS

		ACTIVIDAD \ SEMANA		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33				
ESTATOR	dimensionar núcleo																																							
	dimensionar coraza																																							
	dimensionar tapas																																							
	calculo de bobinas																																							
	adquisición de material																																							
	dimensionamiento del portaescobillas																																							
	generación de planos																																							
	definir procesos de manufactura																																							
	manufactura del núcleo																																							
	manufactura de la coraza																																							
	ensamblar estator																																							
	manufactura de tapas																																							
	manufactura de portaescobillas																																							
	ensamblar portaescobillas																																							
	embobinar																																							
	conexiones																																							
	ensamblar motor																																							
	pruebas																																							
	ROTOR	Dimensionar núcleo																																						
		dimensionar flecha																																						
dimensionar conmutador																																								
dimensionar ventilador																																								
calculo de bobinas																																								
adquisición de materiales																																								
generación de planos																																								
manufactura núcleo y flecha																																								
manufactura conmutador																																								
manufactura ventilador																																								
ensamble núcleo y flecha																																								
embobinado																																								
montaje conmutador																																								
montaje ventilador																																								
balanceo dinámico																																								
ensamblar motor																																								

VII.- GLOSARIO

Antihigroscopico: que no tiene la propiedad de absorber y exhalar la humedad según las circunstancias

Balero: Conjunto de esferas metálicas que se colocan dentro del cojinete y que al rodar disminuyen el rozamiento del cojinete

Bandaje: Cinta de metal para zunchar los embobinados del rotor

Chapas: Hoja o lamina de metal. Metal laminado

Chumaceras: pieza con una muesca en que descansa y gira cualquier eje de maquinaria

Cortocircuito: Contacto directo entre dos polos o dos terminales de un circuito eléctrico que se produce y corta la línea

Corriente a plena carga: Es la corriente requerida para que el motor opere en condiciones normales o bien a plena carga alcanzando la velocidad y el par normal, su valor se encuentra indicado en la placa de datos.

Corriente de arranque: Cuando un motor se energiza, la corriente eléctrica crece desde el arranque, hasta que se estabiliza su velocidad; por lo que la corriente eléctrica alcanza una magnitud de 2 a 8 veces la corriente a plena carga. Según el tipo de motor, la corriente de arranque es de corta duración y se considera normal ya que los motores están diseñados para soportarla.

Cojinete: Soporte para mantener un eje con posición correcta que le permita girar

Eficiencia: Es el cociente entre la potencia mecánica disponible en el eje del motor y la potencia que toma de la línea, ambas expresadas en las mismas unidades, generalmente expresada en por ciento.

Factor De Potencia: Es el cociente entre la potencia activa en watts y la potencia aparente en voltamperes, generalmente se expresa en por ciento.

Motor eléctrico: Es una máquina rotatoria que transforma la energía eléctrica en energía mecánica.

Perdidas eléctricas: Se componen principalmente de las pérdidas en los conductores o pérdidas en el cobre, pérdidas en las escobillas y pérdidas en el hierro

Perdidas mecánicas: Son debidas a la fricción de las chumaceras, anillos colectores (pérdidas por fricción) y a la acción del aire en la ventilación, estas últimas dependen de la velocidad de rotación

Potencia eléctrica: Es la potencia de entrada del motor y se obtiene del producto de la tensión y la corriente de la línea de alimentación

Potencia mecánica: es la potencia de salida de un motor y depende de la velocidad rotacional y del par desarrollado

Temperatura ambiente: Es la temperatura del medio que rodea el motor, generalmente aire y que esta en contacto con sus partes externas, enfriándolo.

Troquelado: que se fabrica mediante la utilización de un molde

Zuncho: Abrazadera de un material resistente que sirve para reforzar o para sostener algo

Siglas

ASA: (Advertising Standards Authority)

AWG: American Wire Gauge (Calibre de cable americano)

IEC: Internacional Electrotechnical Commission (Comisión Electrotécnica Internacional)

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Ingenieros Electrónicos y Electricistas)

ISO: International Standard of Organization (Organización Internacional de Normalización)

MG 1: Motors and Generators 1 (Motores y Generadores 1)

NEMA: National Electrical Manufacturers Association (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos)

NMX: Norma Mexicana

NOM: Norma Oficial Mexicana

VIII.- BIBLIOGRAFÍA

LIBROS:

- Corrales Martín, Juan. *Calculo Industrial de Maquinas Eléctricas, Tomo II*. Editorial Marcombo Boixareu editores. 1982
- J. Chapman, Stephen. *Maquinas eléctricas*. Editorial McGraw-Hill Hispanoamericana. Segunda edición. 1997
- H. Kuhlmann, John. *Diseño de aparatos eléctricos*. Editorial Continental. 6º edición. 1965
- J. Cathey, Jimmie. *Maquinas eléctricas, Análisis y diseño aplicando Matlab*. 1º edición
- Emery, E. T. G.; Harrabin, F.; Lee, B.C.; Nixon, J.H.R.; Rapsonn, E.T.A. *Motores y generadores eléctricos*. Editorial. Aguilar Madrid. 1961
- Enríquez Harper, Gilberto. *Curso de Maquinas de Corriente Continua*. Editorial Limusa
- Serrano Iribarnegaray, Luis. *Fundamentos de Maquinas Eléctricas Rotativas*. Editorial Marcombo, Universidad Politécnica de Valencia
- Luca M., Carlos. *Maquinas Eléctricas, Tomo I y II*. Editorial Representaciones y Servicios de Ingeniería S. A. 1968
- Erle I., Shobert II. *Carbón Bruches, The Physics and Chemistry of Sliding Contacts*. Editorial Chemical Publishing Company, Inc
- H. Trenkmann. *Teoría, Cálculo y Construcción de las Maquinas de Corriente Continua*. Editorial. Labor, S.A. 1962.

TESIS:

- Gerez Greiser, Víctor. *Teoría, diseño y pruebas del motor de inducción polifásico*. 1957
- Tapia Padilla, Ricardo; Schiavan Uriegas, Juan Carlos; Mancilla Río, Jovane Juan. *Primer estudio analítico y experimental de un nuevo motor eléctrico trifásico de dos armaduras*. 1992
- Arredondo Fernández Cano, Rafael. *Desarrollo de un modelo experimental homogéneo del motor de dos armaduras*. 1994
- León de los Santos, Gustavo. *Diseño, Puesta en Marcha, Control y Mantenimiento de Motores de Corriente Directa*. 1996
- Padilla Pineda, Julio Eduardo. *Programa de Computación para diseño de Motores de Inducción y Base de Datos de Motores*. 1998.