BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRACTICO

DEVANADOS DE GENERADORES Y MOTORES ELECTRICOS

9

ESPASA-CALPE, S. A.

DEVANADOS DE GENERADORES Y MOTORES ELÉCTRICOS


ESPASA
CALPE S.A.

BIBLIOTECA DEL ELECTRICISTA PRÁCTICO

SERIE PRIMERA (Volúmenes 1 a 30)

PUBLICADA BAJO LA DIRECCIÓN
DE
D. RICARDO CARO Y ANCHÍA
Licenciado en Ciencias físicomatemáticas, oficial de Telégrafos
y profesor de Electrotecnia
y Telegrafía en la Escuela Industrial de Tarrasa

TOMO IX

DEVANADOS DE GENERADORES Y MOTORES ELÉCTRICOS

POR
D. RICARDO CARO Y ANCHÍA
Profesor en la Escuela Industrial de Tarrasa

SEGUNDA EDICIÓN, REVISADA Y AMPLIADA

POR
F. F. SINTES OLIVES
Profesor en la Escuela Industrial de Barcelona

ESPASA-CALPE, S. A.
BILBAO
MADRID
Ríos Rosas, 24
BARCELONA
Cortes, 579
1931

TALLERES ESPASA-CALPE, S. A., RÍOS ROSAS, 24.—MADRID

PRIMERA PARTE

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

CAPÍTULO PRIMERO

NÚCLEOS INDUCIDOS

Generalidades. En el tomo IV de esta Biblioteca, al estudiar la dínamo de corriente continua, hemos visto que estas máquinas se componen de dos partes esenciales, llamadas *inductor* e *inducido*. La primera es la encargada de crear un campo magnético, esto es, un flujo de fuerza tanto más potente cuanto mayor sea el voltaje que se va a pedir a la dínamo. La segunda parte, el inducido, es un conjunto de espiras formadas por conductores de cobre, que han de ser atravesadas por el flujo, de un modo variable, para que en ellas nazca una fuerza electromotriz. (Véase tomo I, cap. IX.)

La creación del flujo en la parte inductora, se consigue casi siempre mediante electroimanes, y sólo como caso excepcional, mediante imanes permanentes.

El *devanado* de los carretes para construir los electroimanes inductores, nada tiene de particular. El cálculo del número de vueltas, elección del diámetro de cobre, disposición, etc., se indicó ya en el capítulo VIII del tomo I, y se insistirá nuevamente todavía, cuando dediquemos un tomo especial al cálculo y construcción de máquinas eléctricas.

La variación de flujo en la parte inducida, se consigue mediante un movimiento relativo de inductor e inducido. Unas veces se mueve el inducido, que es el caso general en las máquinas de corriente continua; otras se mueve solamente el inductor, como sucede casi siempre en los alternadores; algunas veces se mueven a la vez en sentidos contrarios el campo inductor y el circuito inducido, como en algunas excitatrices de alternadores; finalmente, existe un tipo de alternadores, empleados en el sistema Telefunken de radiotelegrafía de campaña, en los cuales permanecen fijos el inductor y el inducido, consiguiéndose la variación de flujo mediante variaciones de reluctancia en el circuito magnético.

De todas maneras, en reposo o en movimiento, el devanado inducido, es decir, constituyendo el estator o el *rotor* de la máquina, siempre necesita un apoyo o un vehículo que lo sostenga o lo arrastre, y a este órgano se le llama *núcleo de inducido* o *armadura*.

La armadura va a formar parte del circuito magnético, luego deberá construirse de un material permeable a las líneas de fuerza y, efectivamente, se construye de acero o hierro muy dulce.

Corrientes de Foucault. Recordemos (tomo I, capítulo IX) que *siempre que una masa metálica se mueve en un campo magnético, se producen en su in-*

terior corrientes inducidas, llamadas de Foucault, que consumen energía, transformándola en calor. Este efecto de inducción ha obligado a formar los núcleos para las armaduras, por superposición de piezas, dispuestas de manera que corten el circuito a las corrientes que nacen en su masa, del mismo modo que se forman los núcleos para los electroimanes recorridos por corrientes alternas (tomo II, cap. II).

El circuito recorrido por las corrientes de Foucault es siempre perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético inductor, y, por tanto, en el caso particular de las dínamos de corriente continua, las corrientes tienden a marchar paralelamente al eje de rotación.

En virtud de lo anterior, se constituyen las armaduras o núcleos de inducidos superponiendo hojas de palastro o formando un cuerpo anular mediante un rollo de hilos de hierro dulce.

Núcleos formados por hilos. Los núcleos de hilos fueron empleados por Gramme y construídos durante mucho tiempo, hasta que el perfeccionamiento de la maquinaria facilitó el uso de las hojas. Dicho está, que antes de formar el rodete de hilo de hierro, se aislaba la superficie de éste, barnizándolo o simplemente oxidando su superficie. De otro modo, las sucesivas vueltas de hilo se tocarían y permitirían el paso de las corrientes que queremos evitar.

Es un inconveniente de los núcleos de hilos el mucho espacio vacío que queda entre sus espiras, ya que el hilo es cilíndrico y el contacto entre vuelta y vuelta tiene lugar sólo mediante una línea. Esto hace que el volumen útil de la armadura sea muy

inferior al volumen total, con perjuicio del tamaño resultante para la máquina.

Si la velocidad de rotación del inducido es elevada, los efectos de fuerza centrífuga tienden a dislocar los hilos. Este efecto sería muy notable en los modernos turboalternadores que, como el de *Tranvías de Barcelona*, funcionan a 3,000 y más revoluciones por minuto.

Finalmente, los núcleos formados por hilos es difícil que resulten homogéneos en toda su masa y con el centro de gravedad situado en su eje de figura, y si así no resultan, los efectos de fuerza centrífuga no se compensan y en las grandes velocidades angulares llega a doblarse el eje con todas sus enormes consecuencias mecánicas.

Puede juzgarse de lo exigente que es la construcción moderna en cuanto al centrado del inducido, recordando lo dicho respecto a velocidades de rotación y sabiendo que actualmente se construyen alternomotores en los cuales se reduce el entrehierro a algunas décimas de milímetro solamente.

Se intentó mejorar las condiciones de estos inducidos empleando alambre de sección rectangular o cuadrada, en lugar de alambre cilíndrico.

De todas maneras, el inducido de hilos ha decaído por completo, y actualmente no se construyen.

Núcleos formados por hojas. El procedimiento más empleado ahora para cortar el circuito a las corrientes de Foucault es el de construir los inducidos por superposición de hojas de hierro dulce, que tienen generalmente un espesor de 0'35 a 0'5 milímetros, y se aislan unas de otras con papel, barniz, o simplemente óxido formado en sus caras.

Cuando el núcleo tiene un diámetro inferior a 75 centímetros, se cortan los discos de una sola pieza. Cuando el diámetro es mayor, se cortan segmentos iguales, que se reúnen luego para formar el disco, y al apilar los discos, se cuida que no correspondan las juntas de uno con las de otro, de manera que en el borde del núcleo los cantos de los segmentos se presenten como se presentan los ladrillos en la construcción de una pared, es decir, cayendo cada junta en el centro del ladrillo que tiene debajo.

Las máquinas destinadas a cortar discos deben hacerlo con perfecta limpieza en los bordes. Si dejan rebaba, hay peligro de que se toquen dos chapas consecutivas, resultando perfectamente inútiles los aislantes. Para evitarlo, deben repasarse a la lima los cantos de los discos, lo cual supone no poco trabajo.

Cuando los discos se reúnen mediante pasadores y remaches, los pasadores deben alojarse en tubos aisladores. De otro modo, ponen en corto circuito las hojas y favorecen la formación de corrientes de Foucault.

Formas de inducidos. Los inducidos más usados hoy son los *lisos*, los *dentados* y los *horadados*.

El liso tiene la superficie exterior perfectamente cilíndrica y su masa completamente maciza.

El inducido liso exige entrehierro grande, puesto que entre la pieza polar y la armadura, han de situarse los conductores inducidos. El entrehierro grande exige a su vez aumento de amperiovueltas en la excitación de la máquina, con perjuicio de su rendimiento.

Otro inconveniente del inducido liso es que re-

sulta difícil la sujeción de los conductores en su superficie.

Tienen utilidad los inducidos lisos en las máquinas especiales que conviene no hagan ruido, tales como en pianos eléctricos, gramófonos, etc.

El inducido dentado presenta exteriormente el as-

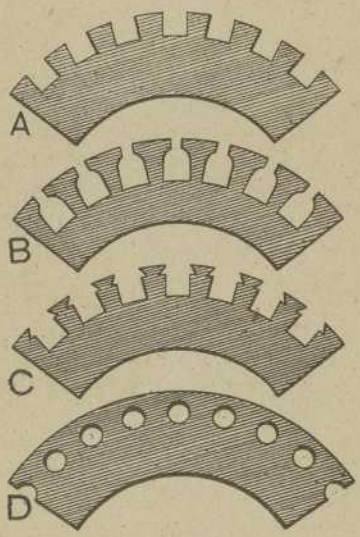

Fig. 1

pecto de un cilindro acanalado; los conductores inducidos se alojan en los *canales* o *ranuras*, quedando separados unos de otros mediante los *salientes o dientes*.

El inducido dentado salva fácilmente todos los inconvenientes del liso, y hoy día es el empleado casi exclusivamente por las casas constructoras.

Las ranuras del inducido dentado pueden ser de paredes paralelas hasta la periferia (fig. 1, *A*), o bien presentar una entrada estrecha en la periferia, ensanchándose luego y conservándose sus paredes paralelas hasta el fondo de la ranura (*B*). En el primer caso, los conductores inducidos pueden ponerse todos de una vez en la ranura, lo cual es una ventaja para el montaje. En el segundo caso los conductores se han de colocar uno a uno, y el devanado es más costoso. En cambio, con la ranura de paredes paralelas, los conductores quedan expuestos a los efectos de la fuerza centrífuga y deben sujetarse con cinchos envolviendo el inducido, mientras con la ranura de entrada estrecha se coloca después de los conductores una cuña tan larga como la ranura, que los sujeta perfectamente sin ningún otro recurso.

Otra forma de ranuras es la representada en la figura (*C*), con cuyo perfil se reúnen las ventajas de los dos anteriores. Pueden colocarse todos los conductores de una vez y pueden sujetarse con cuña.

El inducido horadado (*D*) tiene la ventaja de uniformar el flujo cortado por los conductores inducidos, evitando las corrientes parásitas. En cambio, aumenta la autoinducción del devanado porque favorece la circulación del flujo de reacción del inducido, perjudicando la conmutación.

Otro inconveniente del inducido horadado es la dificultad de su montaje. Sin embargo, se emplea mucho este tipo en motores pequeños de corriente continua y en algunos alternomotores.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES SOBRE DEVANADOS

Devanado elemental. El devanado de inducido, en el caso más sencillo, puede reducirse a una sola madeja, *M* (fig. 2), que gire alrededor de un eje, *A C*,

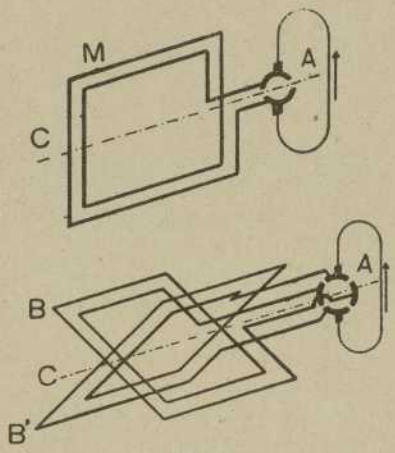

Fig. 2

en un campo magnético inductor. Si la corriente se recoge tal como se produce, obtendremos una corriente senoidal, según sabemos (tomo II, capítu-

lo II), cuya intensidad variará como las ordenadas de la curva *A* (fig. 3); pero si se rectifica mediante el funcionamiento de un colector de delgas, las variaciones de corriente corresponderán a las ordenadas de la curva *B* (fig. 3). Para aminorar las ondulaciones de la corriente, formemos el inducido de dos

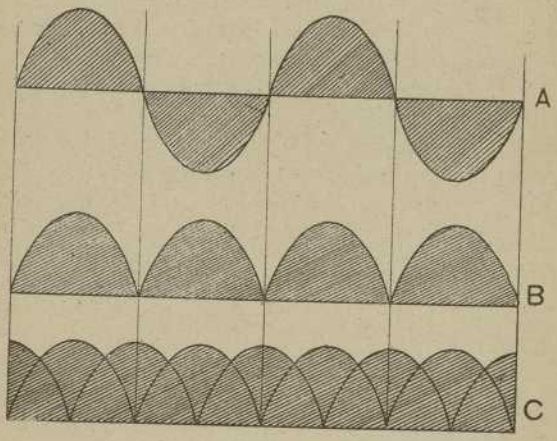

Fig. 3

madejas, *B* y *B'* (fig. 2), cada una de las cuales dará corriente a los frotadores durante dos cuartos de vuelta. La corriente obtenida variará como indica la curva *C* de la figura 3.

Se ve fácilmente que multiplicando el número de madejas inducidas, y, por consiguiente, el número de delgas del colector, se conseguirá aminorar las ondulaciones de la corriente hasta poderla tomar como sensiblemente continua.

Las diferentes madejas que forman el devanado,

pueden ser, como hemos supuesto, independientes entre sí, y el devanado se llama entonces *abierto*, o pueden estar unidas en serie, sacando derivaciones de los puntos de unión, para comunicar con el colector, resultando entonces el *devanado cerrado*.

Los devanados abiertos se emplean solamente en casos muy especiales y no trataremos de ellos.

Con las diferentes formas de devanados que vamos a estudiar, se persiguen los objetos siguientes:

1.° *Acercarse en lo posible a la forma de corriente absolutamente continua.*

2.° *Procurar que todos los conductores inducidos corten el mismo flujo en su movimiento de rotación.*

De otro modo, en el conductor que más flujo corte nacerá mayor tensión inducida y aparecerán *corrientes parásitas* circulando de los conductores de mayor tensión a los de menor. Esas corrientes parásitas no se utilizan en el circuito exterior, y, por tanto, se dedican a calentar inútilmente el inducido.

3.° *Reducir cuanto se pueda las resistencias inútiles*, para lo cual deben estudiarse los devanados de manera que se obtenga la mayor longitud de conductor útil con la menor longitud total.

Clasificación de los inducidos por el devanado. El conjunto de los conductores sometidos a la acción del campo magnético, en los cuales nace la fuerza electromotriz de inducción, forma el devanado inducido de la dínamo.

Estos conductores pueden situarse sobre los núcleos inducidos de cuatro maneras típicas, que dan origen a cuatro clases de inducidos:

1.° INDUCIDOS DE ANILLO, en los cuales los conductores están devanados sobre el núcleo anular,

apoyándose en sus superficies exterior e interior. La figura 4, *A*, representa una madeja correspondiente a un devanado de este tipo.

2.° INDUCIDOS DE TAMBOR, en los cuales los conductores están sobre el núcleo, apoyándose solamente en la cara exterior, sin penetrar nunca en la parte interior del anillo. En *B* se representa una madeja inducida perteneciente a un devanado de tambor.

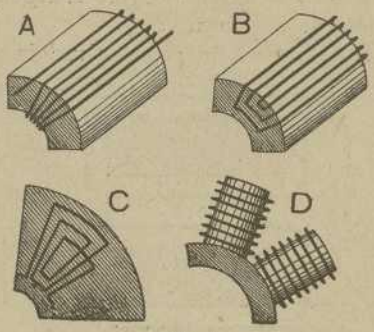

Fig. 4

3.° INDUCIDOS DE DISCO, los cuales contienen todos los conductores inducidos, en una base del cilindro que forma la armadura. No utilizándose ninguna de las superficies cilíndricas, ni exterior ni interior, se construyen dos núcleos cilíndricos de muy poca altura, es decir, en forma de discos, lo cual da nombre a este tipo de inducidos. En *C* se representa una madeja perteneciente a un devanado de esta clase.

4.° INDUCIDOS POLARES, en los cuales las madejas, influídas por el campo magnético, se disponen sobre núcleos análogos a los de electroimanes, for-

mando el conjunto de núcleos una estrella o corona, según se ve en la figura *D*.

Los dos últimos tipos se emplean muy poco.

Elección de anillos o tambores. Construído ya el núcleo del inducido o armadura, puede dudarse entre devanar en anillo o devanar en tambor, limitándonos a estos dos tipos, que son los más empleados.

Siempre debemos decidirnos por el tipo que menor longitud de hilo consuma.

Es evidente que con menor longitud de conductor,

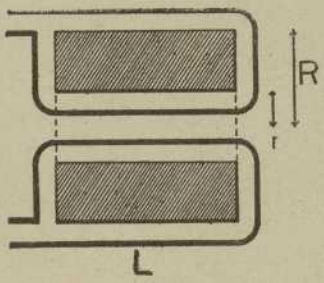

Fig. 5

tendremos menor gasto de cobre, lo cual es ahorrar dinero y disminuir peso de la máquina. Tendremos menor resistencia en el hilo, por tanto, menor caída interior de potencial, y, finalmente, reduciendo la longitud de conductor, disminuiremos el número de vueltas y, con ello, el efecto de autoinducción, consiguiendo más fácilmente la *conmutación sin chispas.*

Comparemos, pues, las longitudes de conductor en anillos y tambores, según sean las máquinas bipolares o multipolares.

1.° MÁQUINAS BIPOLARES. — La figura 5 representa la sección de una armadura, según su eje. Llamemos R y r a los radios de sus superficies cilíndricas exterior e interior, respectivamente, y L a la longitud de la armadura o altura del cilindro.

Devanando en tambor, todos los conductores son periféricos y, por tanto, activos; pero devanando en anillo, los conductores situados en el interior de la armadura no cortan flujo alguno al moverse, porque el campo magnético no llega hasta ellos; no son conductores activos, y su oficio se reduce sencillamente a dar continuidad al devanado.

Para tener dos conductores activos se emplearán en el anillo dos vueltas, como representa la figura 5, con una longitud de hilo

$$A = 4\,L + 4\,(R - r)$$

y para conseguir el mismo efecto en el tambor, bastará dar una vuelta siguiendo el exterior del cilindro y en la cual emplearemos una longitud

$$T = 2\,L + 4\,R$$

Restando miembro a miembro las dos igualdades anteriores, se obtiene

$$A - T = 2\,L - 4\,r = 2\,(L - 2\,r)$$

Si esta diferencia es positiva, nos indicará que A es mayor que T, y deberemos decidirnos por el tambor. Este será el caso más frecuente, ya que generalmente $L > 2\,r$, es decir, la longitud de inducido es mayor que el diámetro interior en máquinas bipolares, que suelen ser pequeñas.

Si la longitud de inducido es igual a su diámetro interior, $L = 2\,r$, la diferencia $A - T$ será nula y, por tanto, será indiferente devanar en anillo o devanar en tambor.

Finalmente, si la longitud de inducido fuese menor que su diámetro interior, la diferencia sería negativa y, por tanto, $A < T$, debiendo decidirnos por el anillo.

2.° MÁQUINAS MULTIPOLARES. — Representando por C la longitud de una *conexión*, es decir, la longitud de hilo apoyado en la base del cilindro para unir dos conductores activos, expresaremos el total de conductor empleado en anillo y tambores, respectivamente, por las igualdades.

$$A = 4\,L + 2\,(R - r) + C \qquad\qquad T = 2\,L + 2\,C,$$

y la diferencia

$$A - T = 2\,L + 2\,(R - r) - C$$

nos indicará con su signo por cuál de los dos devanados debemos decidirnos.

El caso más frecuente será que convenga el tambor, porque para ser negativa la diferencia $A - T$ sería preciso que

$$2\,L + 2\,R < 2\,r + C$$

lo cual no es probable que se verifique nunca.

En vista de estos resultados, estudiaremos como caso general de devanado el tambor, y luego veremos la manera de estudiar los anillos y los discos como tambores.

Sección inducida. Llamaremos sección inducida al conjunto de conductores dispuestos entre dos barras del colector.

La sección inducida más sencilla comprenderá solamente dos conductores.

Al estudiar los devanados, nos referiremos siempre, como caso general, al tambor dentado, con un solo conductor por ranura. De este caso general se pasa muy fácilmente a los casos prácticos en que hay más de un conductor por ranura.

Representación gráfica de un devanado. Dos clases de representaciones esquemáticas se emplean para el estudio y proyecto de los devanados, que son: *el esquema circular* y *el esquema rectangular.*

Para dibujar y entender el esquema circular, supondremos el inducido visto por su *cara anterior*, es decir, por la que lleva el colector, con lo cual se verán en verdadera magnitud, forma y posición el colector, las escobillas y las conexiones apoyadas en la cara anterior. Supondremos también que los conductores activos situados en la superficie cilíndrica exterior se abren como las varillas de un paraguas, hasta colocarse en el plano de la cara anterior (figura 6).

Las generatrices del cilindro siguen a los conductores en su movimiento de giro hacia la cara anterior, de manera que los campos polares, que eran rectángulos apoyados en la superficie cilíndrica, aparecerán en el esquema como trapecios circulares, según se ve en la figura.

Por fin, para tener también a la vista en el dibujo la cara posterior, supondremos que sus radios y conexiones se mueven hasta colocarse en prolongación

de los conductores activos, y siguiendo a éstos en su movimiento, vendrán a colocarse en el plano de la cara anterior.

Con este convenio de representación tendremos a la vista las caras del cilindro, y su superficie late-

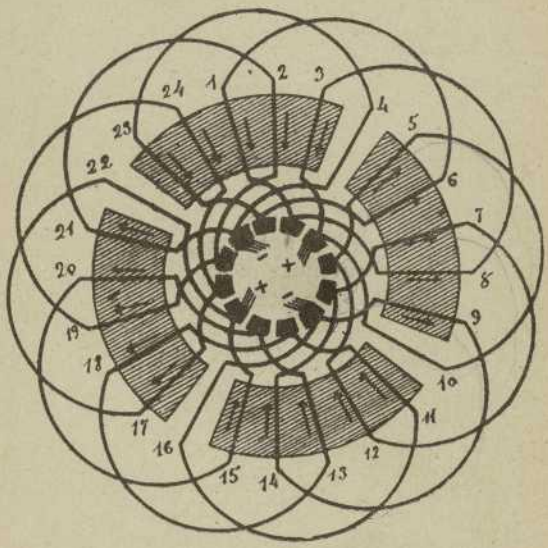

Fig. 6

ral. Será cara anterior lo que hay dentro de los campos polares; será superficie lateral lo que hay sobre los campos polares; será cara posterior lo que hay fuera de los campos polares. Las dos últimas partes están deformadas en el dibujo.

Para dibujar y entender el esquema rectangular

supondremos que el colector aumenta de diámetro hasta alcanzar el del inducido, con lo cual sus barras y las conexiones de la cara anterior quedarán apoyadas en la superficie cilíndrica de la armadura. Supondremos también que las conexiones de la cara posterior se abren hasta colocarse en prolongación de los conductores activos, de manera que vengan a apoyarse en su misma superficie cilíndrica. Imaginemos, por fin, que el cilindro, donde tenemos todos

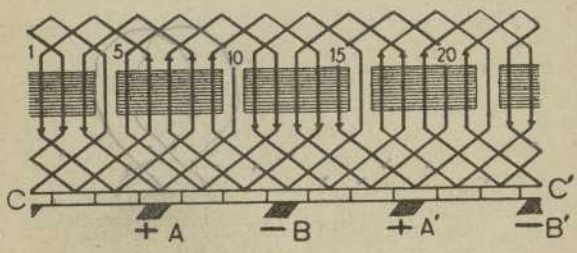

Fig. 7

los elementos del devanado, se corta a lo largo de una generatriz y se abre para extender en un plano toda su superficie. Obtendremos así el esquema rectangular representado en la figura 7, que corresponde al mismo devanado de la figura 6.

Las partes rayadas del dibujo representan los campos polares. *C C'* son barras del colector y *A B* las escobillas de la máquina. Tendremos, como antes, a la vista todos los elementos del devanado, siendo cara anterior todo lo que hay bajo los campos polares; superficie lateral lo que hay en los campos polares, y cara posterior lo que está encima de los campos polares.

Los dos esquemas, circular y rectangular, son igualmente útiles y claros. El circular es seguramente el más difícil de dibujar; pero, en cambio, el rectangular deja cortadas las conexiones extremas, y resulta por ello más molesto el seguir la marcha de las corrientes.

Indicación de conductores. Cualquiera que sea el sistema de esquema empleado, supondremos siempre los conductores equidistantes, y los numeraremos a partir de uno cualquiera de ellos, para nombrarlos fácilmente.

Marcaremos en todos una flecha indicando el sentido de la fuerza electromotriz que nace en cada uno, dejando sin flecha los conductores que coincidan en una línea neutra, como sucede a los 4, 10, 16 y 22 de las figuras 6 y 7. Es evidente que la fuerza electromotriz que nace en los conductores tendrá un mismo sentido en todos los situados bajo una misma pieza polar, como se ve en los conductores 5, 6, 7, 8 y 9 de las figuras citadas. En cambio, es evidente que al cambiar de pieza polar, cambiará el sentido de las corrientes inducidas. Por eso los conductores 11, 12, 13, 14 y 15 tienen las flechas perfectamente invertidas respecto a los 5, 6, 7, 8 y 9.

Conexiones. Suponiendo todos los conductores situados sobre la superficie lateral del tambor o, mejor aún, en las ranuras del cilindro, cuando se trate de inducidos dentados, falta sólo unirlos uno con otro alternativamente en las caras anterior y posterior, para formar un circuito cerrado, que es lo que constituye el devanado. Si las tensiones que nacen en los conductores se han de sumar en serie, es evi-

dente que *dos conductores directamente unidos no pueden en general pertenecer a campos polares del mismo signo*, porque sus fuerzas electromotrices concurrirían en la conexión y, siendo opuestas, se anularían una con otra. Esto sucedería si empalmásemos el conductor 1 con el 3 o con el 11; pero no sucederá empalmando el 1 con el 6 o con el 8.

Las conexiones en una cara, generalmente, son todas de igual extensión, para lo cual los números de los conductores directamente unidos deben tener una diferencia constante. En las figuras 6 y 7 esta diferencia es 7 en la cara anterior y 5 en la posterior.

Devanados simples y múltiples. Recorriendo un devanado cualquiera a partir de uno de sus conductores, puede suceder que volvamos al de partida después de haber recorrido todos los conductores, o bien que volvamos al de partida habiendo recorrido sólo una fracción de los conductores del devanado. En el primer caso, todos los conductores forman un sólo devanado, que se llama *simple*. En el segundo caso, los conductores recorridos forman un devanado, pero los no recorridos pueden formar otro u otros devanados; el conjunto se llama *devanado múltiple*.

Es simple el de la figura 6 y es múltiple el de la figura 9 (lámina 1.ª), que tiene un devanado formado por los conductores 1, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 16, 17, ... y otro por los 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, ...

Circuitos derivados y escobillas. Las conexiones de los conductores inducidos se efectúan de manera que las fuerzas electromotrices nacidas en ellos se sumen en serie para formar la tensión total. Terminado el devaneo según la ley escogida entre las

que daremos luego, hay conexiones en las cuales resultan opuestas las fuerzas electromotrices de los conductores contiguos, como sucede en la unión de los 1 y 4 de la figura 9 (lámina 1.ª), y ambas fuerzas electromotrices se anulan, por ser iguales y opuestas. Pero si en la barra del colector unida a esta conexión se apoya un frotador que comunique con el circuito exterior, ambas fuerzas electromotrices resultarían sumadas en cantidad.

Aun cuando esto es de fácil comprensión, puede verse más claro con un sencillo ejemplo.

Supongamos que en los conductores *A B* y *C D*

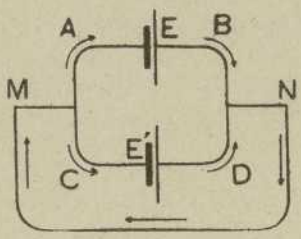

Fig. 8

(fig. 8) existen unos elementos de pila, dispuestos, de manera que originan fuerzas electromotrices dirigidas en los sentidos marcados por las flechas. Si prescindimos del conductor *M N*, las fuerzas electromotrices resultan opuestas, y en el circuito *A B D C* no tendremos corriente; pero si añadimos el conductor *M N*, las pilas resultarán sumadas en paralelo y tendremos una corriente en el sentido de las flechas.

Se ve, pues, que en el caso de los devanados que estudiamos, deberán buscarse en la figura de representación las conexiones donde ambas fuerzas elec-

LÁMINA 1.ª

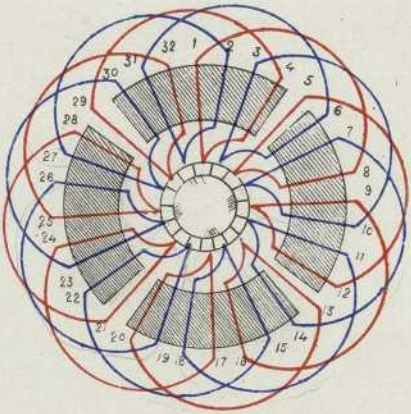

FIG.ª 9

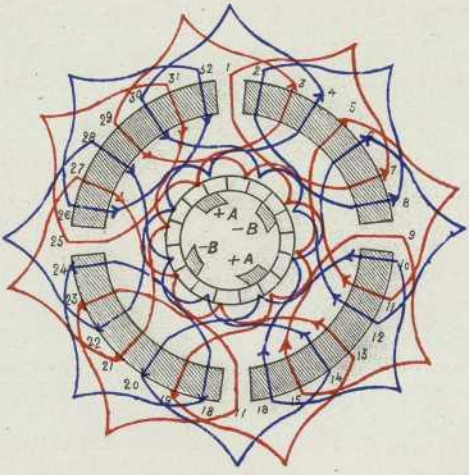

FIG.ª 18

tromotrices sean concurrentes o divergentes, apoyando en las primeras las *escobillas positivas*, y en las segundas las *negativas*. En la figura 9 (lámina 1.ª) la escobilla apoyada en la conexión 7-10 será

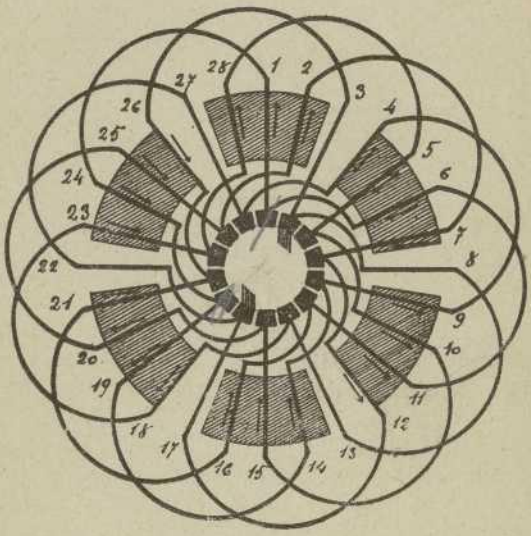

Fig. 10

positiva y la apoyada en la conexión 31-2 será negativa.

Dos escobillas unen en paralelo dos circuitos, luego el número *de circuitos derivados en un devanado cualquiera es igual al número de escobillas*. Este número, que siempre es par, lo representaremos por 2 *c*.

El número de circuitos derivados es enteramente independiente del número de polos inductores. Así se

ve en la figura 10 una máquina hexapolar, con dos escobillas solamente. En cambio, la figura 6 representa una máquina con tantas escobillas como polos. En máquinas de muchos amperios y pocos voltios, puede convenir mayor número de escobillas que de polos inductores y, como veremos, es facilísimo de conseguir.

Devanados ondulados e imbricados. Recorriendo un devanado en el orden en que están empalmados los conductores, puede suceder que los números que sucesivamente vamos encontrando sean constantemente, crecientes o bien sean alternativamente crecientes y decrecientes. En el primer caso, el devanado se llama *ondulado progresivo* o *regresivo*, según que al dar una vuelta completa termine en una delga más adelantada o más atrasada de la que había salido; y en el segundo caso se llama *imbricado o en bucle.*

Será ondulado el de la figura 10, en que los números que vamos encontrando sucesivanmete al recorrerlo son: 1, 6, 11, 16 y 21..., es decir, crecientes. Será imbricado el devanado que se representa en la figura 6.ª, ya que los números que se van encontrando son: 1, 8, 3, 10, 5 ..., es decir, alternativamente crecientes y decrecientes.

Pasos en las ranuras. *Se llama paso en las ranuras al número de ranuras que se avanzan para empalmar un conductor con otro, es decir, el número de ranuras que abraza una conexión.*

Si la conexión considerada es de la cara anterior, se llama *paso anterior*, o *paso de conexión*, y si de la cara posterior, se llama *paso posterior*, o *paso de madeja.*

Es evidente que en un devanado ondulado, ambos pasos deben ser positivos, para que los números de los conductores unidos sean siempre crecientes; mientras en un devanado imbricado los pasos anterior y posterior deben ser de signo contrario.

A los pasos anterior y posterior se les llama también *pasos componentes.*

Llamaremos *paso resultante* a la suma algebraica de los dos pasos, anterior y posterior. Es claro que el paso resultante es el número de ranuras que se

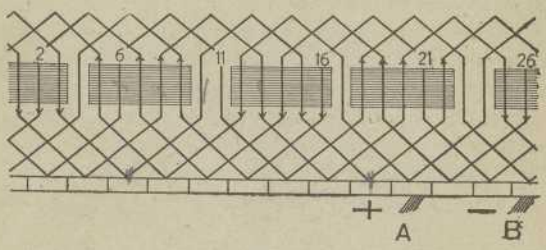

Fig. 11

avanzan para pasar del principio de una sección del devanado al principio de la siguiente, o para pasar de una o otra barra del colector.

Representaremos siempre el paso anterior por y_1, el posterior por y_2 y el resultante o total por y. Tendremos, por lo tanto,

$$y = y_1 + y_2 \quad \text{o} \quad y = y_1 - y_2$$

según se trate de devanados ondulados o imbricados.

Los pasos componentes, anterior y posterior, de un devanado ondulado, pueden ser iguales, como en la figura 10 ($y_1 = 5$, $y_2 = 5$), o desiguales, como en

la figura 11 ($y_1 = 7$, $y_2 = 5$). Pero los pasos componentes de un devanado imbricado han de ser forzosamente desiguales, ya que de otro modo el paso resultante sería nulo. En la figura 6, que representa un devanado imbricado, los pasos componentes son

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = -5$$

Paso polar. *Llamaremos paso polar de un devanado al número de pares de polos que caben en su paso resultante.* Se representa por m.

Generalmente, se tiene para los devanados imbricados $m = 0$, y para los ondulados, $m = 1$; pero bien pudieran ser mayores ambos valores.

En el devanado de la figura 6 se tiene $y = 2$, y un par de polos comprende 12 ranuras, luego $m = 0$.

En la figura 10 se tiene $y = 10$, correspondiendo al par de polos 9'33 ranuras, luego $m = 1$.

Caso de más conductores que ranuras. Hasta aquí hemos supuesto que en cada ranura va un solo conductor, pero si el cálculo del inducido exige un número de conductores mayor que el de ranuras, será preciso que el primer número sea múltiplo exacto del segundo, y la colocación se hará atendiendo a las indicaciones siguientes:

Supongamos que en un inducido conviene un número de conductores cuádruplo del de ranuras, con lo cual deberán colocarse cuatro conductores en cada ranura. Estudiaremos el devanado como si fuese del caso general, esto es, como si no tuviera más que un conductor por ranura; y si fijamos los pasos, por ejemplo, en

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 3$$

al entrar en una ranura por delante, en la 8 de la figura 12, saldremos por la cara posterior e iremos a la ranura 11, como corresponde al valor de y_2. Al salir de la 11 por la anterior, volveremos a la 8, y por la cara posterior, de la 8 a la 11, y así reiterando hasta tener cuatro conductores en cada una de las ranuras 8 y 11. El hilo que salga por la 11 le llevaremos por la cara anterior a la ranura 16, como corresponde al valor de y_1, y entre las ranuras 16 y

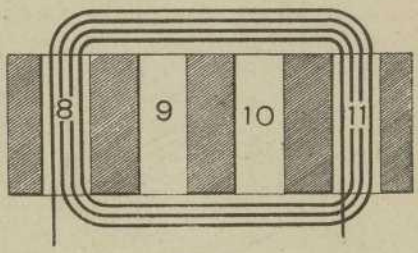

Fig. 12

19 devanaremos otra madeja de cuatro conductores, como la del dibujo.

Devanando de este modo, se ve que el paso posterior marca la magnitud de la madeja, y el anterior determina la longitud de la conexión, lo cual justifica los nombres de *paso de madeja* y *paso de conexión.*

Cuando los pasos componentes sean desiguales, tomaremos siempre el menor como paso posterior, y de este modo gastaremos menos cobre en las madejas.

En estos devanados, llamaremos *haz activo* al conjunto de conductores que forman el lado de una madeja. En el ejemplo de la figura 12 formarán un

haz activo los cuatro conductores alojados en la ranura 8 y otro haz activo los cuatro alojados en la ranura 11.

Secciones de más de dos ranuras. Cuando el número de conductores inducidos que han de formar

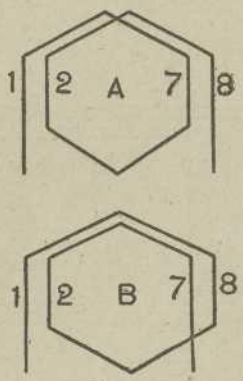

Fig. 13

una sección es demasiado grande para alojarlos en dos ranuras solamente, se reparten en cuatro, seis o más ranuras.

En la figura 13 se ven secciones alojadas en cuatro ranuras. La *A* está compuesta de dos madejas iguales, 1-7 y 2-8, y la *B* lo está de dos madejas desiguales, 1-8 y 2-7.

Es claro que estos devanados tienen cuatro pasos componentes, siendo, como siempre, el paso resultante igual a la suma algebraica de los cuatro.

Para el devanado *A* tendríamos

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 6 \qquad y_3 = -5 \qquad y_4 = 6$$

y para el B

$$y_1 = 6 \qquad y_2 = 7 \qquad y_3 = -6 \qquad y_4 = 5$$

siendo para ambos

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = 12$$

Condiciones de posibilidad de un devanado. Para que un devanado sea posible se deben cumplir las condiciones siguientes:

1.ª *El número de conductores inducidos en cada circuito derivado, debe ser par.*

En efecto, un circuito derivado empieza y termina en la cara anterior, ya que sus extremos deben apoyarse en escobillas; pero cada vez que vamos a la cara posterior y volvemos a la anterior, recorremos dos conductores; luego, para terminar en la anterior, deberemos recorrer un número par de conductores en cada circuito derivado.

Esta condición es común a todos los devanados, sean simples o múltiples.

2.ª *Si todos los circuitos derivados han de ser iguales, el número total de conductores inducidos deberá ser múltiplo de cuatro.* Siendo N el número total de conductores inducidos y $2\,c$ el número de circuitos derivados, a cada circuito le corresponderán

$$N : 2\,c$$

conductores; pero este número debe ser par, según la primera condición, luego podremos poner

$$\frac{N}{2\,c} = 2\,k$$

de donde se deduce

$$N = 4\,kc = \text{múlt. de } 4$$

Hay devanados que no cumplen esta condición. Por ejemplo, el representado en la figura 11 tiene sus dos circuitos derivados constituídos de este modo:

$$A\left\{\begin{array}{l} 24\text{-}3\text{-}10\text{-}15\text{-}22\text{-}1\text{-}8\text{-}13\text{-}20\text{-}25\text{-}6\text{-}11\text{-}18\text{-}23 \\ 17\text{-}12\text{-}5\text{-}26\text{-}19\text{-}14\text{-}7\text{-}2\text{-}21\text{-}16\text{-}9\text{-}4 \end{array}\right\}B$$

Más adelante veremos otros ejemplos que están en este mismo caso.

3.ª *En devanados múltiples, con* d *arrollamientos independientes, el número total de conductores inducidos debe ser múltiplo de* 2d.

Si todos los arrollamientos independientes han de ser iguales, a cada uno corresponderán

$$N : d$$

conductores; pero en todos los devanados componentes debe cumplirse la condición 1.ª, luego podremos escribir

$$\frac{N}{d} = 2\,kc$$

de donde se deduce

$$N = 2\,kcd = \text{múlt. de } 2\,d$$

4.ª *En devanados simples, el paso resultante debe ser siempre número par.*

Consideremos el caso sencillo de un devanado simple y supongamos que cada sección inducida está

alojada en dos ranuras solamente, con lo cual el devanado tendré solamente dos pasos componentes

$$y_1 \quad \text{e} \quad y_2$$

Cuando se ha cerrado el conductor, es decir, cuando volvemos al de partida, hemos hecho $\frac{N}{2}$ conexiones por delante y $\frac{N}{2}$ por detrás. En cada conexión por delante saltamos y_1 ranuras, luego en total habremos saltado por la cara enterior $\frac{N}{2}\ y_1$ ranuras. En cada conexión por detrás saltamos y_2 ranuras, y en total por la cara posterior $\frac{N}{2}\, y_2$.

Luego, después de haber recorrido todos los conductores, hemos saltado

$$\frac{N}{2}\, y_1 + \frac{N}{2}\, y_2 = \frac{N}{2}\left(y_1 + y_2\right) = \frac{N}{2}\, y$$

Pero como volvemos a la ranura inicial, el número de las saltadas será múltiplo de N, es decir,

$$\frac{N}{2}\, y = kN$$

de donde

$$y = 2\,k$$

como se quería demostrar.

5.ª *En devanados múltiples, con* d *secciones independientes, el paso resultante debe ser múltiplo de* 2d.

Consideremos el caso más general de devanado

múltiple, correspondiente a cada uno de los independientes, un número de conductores

$$\frac{N}{d} = N'$$

y supongamos también que cada sección se aloja en $2r$ ranuras, con lo cual el devanado tendrá, según sabemos, $2r$ pasos componentes, siendo y_1 y_3 y_5 ... los de la cara anterior, e y_2 y_4 y_6 ... los de la posterior.

Cuando se haya cerrado uno de los circuitos independientes, es decir, cuando volvamos al conductor de partida, habremos hecho $\frac{N'}{2}$ conexiones por delante y $\frac{N'}{2}$ conexiones por detrás. En las conexiones por delante saltamos $y_1 + y_3 + y_5 + \ldots$ ranuras por paso, luego en total habremos saltado

$$\frac{N'}{2}(y_1 + y_3 + y_5 + \ldots)$$

En las conexiones por detrás saltamos

$$y_2 + y_4 + y_6 + \ldots$$

ranuras por paso, y en total

$$\frac{N'}{2}(y_2 + y_4 + y_6 + \ldots)$$

luego al cerrarse el devanado, habremos recorrido en total

$$\frac{N'}{2}(y_1 + y_2 + y_3 + \ldots) = \frac{N'}{2}\, y$$

pero como volvemos a la ranura inicial, el número de las saltadas debe ser múltiplo de las existentes, luego podremos poner:

$$\frac{N'}{2} y = kN$$

y recordando que

$$\frac{N}{d} = N' \qquad \text{o} \qquad N = N'd$$

resulta

$$\frac{N'}{2} y = kN'd$$

y despejando y

$$y = 2kd = \text{múlt. de } 2d.$$

6.ª *En devanados simples, con dos pasos, los pasos componentes deben ser impares.*

Según la propiedad 4.ª, se debe tener

$$y_1 + y_2 = 2k$$

luego los pasos componentes deben ser ambos pares o ambos impares. Si fuesen pares, partiendo del conductor número 1 y sumando números pares, tendríamos siempre números impares; luego no habría manera de ir a parar a los conductores 2, 4, 6, 8, ..., es decir, no formarían parte del devanado más que la mitad de los conductores. Por tanto, deben ser impares los pasos componentes.

7.ª *En devanados múltiples con más de dos pasos componentes debe haber entre éstos un número par de pasos impares.*

Esta propiedad es una consecuencia de la 5.ª

8.ª *En devanados múltiples el número de secciones independientes es igual al máximo común divisor de los números* $\frac{N}{2}$ e $\frac{y}{2}$.

Recordemos que en devanados múltiples, según la condición 3.ª

N debe ser múltiplo de $2d$

y según la 5.ª

y debe ser múltiplo de $2d$;

luego

$N : 2$ e $y : 2$ deben ser múltiplos de d,

siendo este número el de devanados independientes.

Un devanado cumple las condiciones anteriores y, por tanto, resulta con d arrollamientos, si N e y se escogen de manera que sus mitades tengan por máximo común divisor el número de devanados distintos.

9.ª *Para que un devanado sea simple se necesita que los números* $\frac{N}{2}$ e $\frac{y}{2}$ *sean primos.*

Es una consecuencia de la condición 8.ª

Si el devanado tiene $2r$ pasos, es decir, si cada sección ocupa $2r$ ranuras, será simple cuando los números

$$\frac{N}{2} \qquad \frac{y}{2r}$$

sean primos.

Condiciones de simetría de un devanado. 1.ª Para conseguir igual fuerza electromotriz e igual resistencia óhmica las vías han de ser iguales dos a dos, es decir, que cada circuito derivado de corriente halle

otra igual y simétrica. Estos circuitos o vías han de comprender cada una de ellas igual número de secciones y éstas han de ser del mismo número de espiras con hilo de igual sección y resistividad.

Si todas las derivaciones han de ser eléctricamente iguales debe cumplirse la siguiente ley:

$$\frac{s}{c} = \frac{K}{c} = \text{número entero}$$

siendo

c = número de pares de vías o circuitos derivados
s = número de secciones.
K = número de delgas.

Por la definición de sección, enrollamiento devanado entre dos delgas, resulta $s = K$.

Esta primera condición no exige que el número de secciones que corresponden a cada vía sean iguales entre sí, mientras sea igual al número de secciones de la vía simétrica y de manera que en cada bifurcación concurra la corriente de tal forma que sea igual en todas las bifurcaciones.

2.ª Se necesita encontrar una barra (o conductor en general) simétrica a otra para ser simétrico cada par de vías. En efecto: fijémonos en una barra del enrollamiento colocada en una ranura que se encuentra en un determinado campo magnético y cuya barra pertenece a un cierto par de vías. Si todos los pares de vías son iguales entre sí, en cada uno de ellos encontraremos una barra colocada en una ranura que se hallará en un campo magnético homólogo al primero que hemos considerado, es decir, habremos formado un grupo de c ranuras situadas

en campos homólogos. Procediendo de la misma manera podremos ir formando grupos de c ranuras hasta agotar las R que tiene el inducido, de donde resultará que R es un múltiplo de c, o sea que

$$\frac{R}{c} = \text{número entero}$$

3.ª Hemos dicho que las c ranuras de cada grupo han de hallarse en campos magnéticos de igual intensidad. Ahora bien; el número máximo de puntos de la periferia del inducido que tienen una misma intensidad de campo, bajo cualquier estado de carga de la máquina, es igual al número de polos de ésta $2\,p$, y, por consiguiente, es necesario que se tenga como mínimo

$$2\,p = c$$

pero, siendo

p = número de pares de polos
c = número de pares de vías.

$$\frac{2\,p}{c} = \text{número entero}$$

En los devanados modernos se cumplen siempre estas condiciones de simetría.

CAPÍTULO III

DEVANADOS IMBRICADOS

Fórmula general de devanados. Recordemos las notaciones establecidas en el capítulo precedente.

N = número total de conductores.
m = paso polar del devanado.
$y_1, y_3, y_5 \ldots$ = pasos anteriores o de conexión.
$y_2, y_4, y_6 \ldots$ = pasos posteriores o de madeja.
y = paso resultante.
$2p$ = número de polos inductores.
$2c$ = número de circuitos derivados.
$2r$ = número de ranuras por sección.
s = número de secciones.

Adoptemos, como empírica, aunque puede demostrarse, la fórmula general de devanados

$$y = y_1 \pm y_2 \pm y_3 \pm y_4 \pm \ldots = \frac{mN \pm 2cr}{p} \qquad [1]$$

Devanados imbricados. Para el caso particular de los devanados imbricados, el paso polar m es cero, con lo cual la fórmula general se reduce a

$$y = \frac{\pm 2rc}{p} \qquad [2]$$

y si se trata de devanados en que las secciones ocupen solamente dos ranuras, es decir, que tengan solamente dos pasos componentes, tendremos

$$y_1 \pm y_2 = \pm \frac{2\,c}{p} \qquad [3]$$

Para escoger los valores de y_1 e y_2 tendremos en cuenta que dos conductores directamente unidos deben estar bajo piezas polares de signo contrario para que sus fuerzas electromotrices se sumen, de manera que las conexiones deben ser algo mayores que la distancia de polo a polo.

Siendo N el número de ranuras y $2p$ el de polos, a cada distancia polar le corresponden $\frac{N}{2\,p}$ ranuras y los valores de y_1 e y_2 deben tener aproximadamente este valor.

Para que se cumpla esta condición y la ecuación [3], pueden calcularse los valores absolutos de los pasos componentes mediante las fórmulas

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2\,p} \pm \frac{c}{p} \qquad y_2 = \frac{N \pm q}{2\,p} \mp \frac{c}{p} \qquad [4]$$

en las cuales q es un número cualquiera, que haga entero el primer quebrado. Generalmente se toma lo menor posible.

La diferencia de las dos fórmulas anteriores es, efectivamente,

$$y_1 - y_2 = \frac{2\,c}{p}$$

según exige la ecuación [3].

Las fórmulas [4] han de dar valores enteros para y_1 e y_2. El primer término se consigue que sea entero mediante valores apropiados de q. Si ha de ser

también entero el cociente $\frac{c}{p}$, deberá ser siempre c igual a p o a un múltiplo de p.

Cuando c es igual a p, el devanado se llama *simple en cantidad*, y cuando c es un múltiplo de p, se obtiene el *múltiple en cantidad*.

Las fórmulas se satisfacen también con valores de c que no sean múltiplos de p.

Devanado simple en cantidad. Si en las fórmulas [4] suponemos $c = p$, es decir, si queremos que la máquina tenga tantos circuitos como polos, las fórmulas se reducirán a

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2p} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N \pm q}{2p} \mp 1 \qquad [5]$$

y, por lo tanto, el paso resultante será

$$y = y_1 - y_2 = 2$$

Cualquiera que sea el número de conductores que deba tener el inducido, serán siempre primos entre sí los números

$$\frac{y}{2} = 1 \qquad \frac{N}{2}$$

luego el devanado será simple y se llama *imbricado simple en cantidad.*

EJEMPLO 1.° *Consideremos una máquina tetrapolar* (fig. 6) *con 24 ranuras en el inducido y proyectemos un devanado imbricado simple en cantidad.*

Las fórmulas [5] nos darán

$$y_1 = \frac{24 \pm q}{4} + 1 \qquad y_2 = \frac{24 \pm q}{4} - 1$$

y para que sean exactos los cocientes bastará tomar $q = 0$, con lo cual tendremos

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5$$

y las conexiones de los conductores se harán tomando un paso anterior 7, y un paso posterior — 5, según es fácil comprobar en la figura 6.

Tabla de conexión. Para que el obrero devanador haga cómodamente las conexiones, es muy conveniente formar la llamada tabla de conexión, que consiste sencillamente en dos columnas de pares de números, con los cuales se indican los conductores que deben unirse. La primera columna indica las conexiones en la cara anterior, y la segunda, las conexiones en la cara posterior.

En el ejemplo anterior la tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	8	8	con	3
3	»	10	10	»	5
5	»	12	12	»	7
7	»	14	14	»	9
9	»	16	16	»	11
11	»	18	18	»	13
13	»	20	20	»	15
15	»	22	22	»	17
17	»	24	24	»	19
19	»	2	2	»	21
21	»	4	4	»	23
23	»	6	6	»	1

Situación de las escobillas. Para determinar dónde deben estar situadas las escobillas, observaremos, en la figura, las conexiones, buscando aquéllas en que las fuerzas electromotrices de los conductores unidos,

sean ambas convergentes o ambas divergentes. Estas conexiones son las que deben tocar las escobillas.

En el ejemplo de la figura 6 son concurrentes las fuerzas electromotrices en las conexiones 3 - 10 y 15 - 22, y son divergentes en las conexiones 9 - 16 y 21 - 4. Las dos primeras conexiones determinan escobillas positivas, y las dos últimas, escobillas negativas.

Cuando se tiene dibujado el devanado, es conveniente comprobarlo. Para ello, partiendo de una escobilla, se recorren los conductores conexionados y se observa si todas las flechas que se van encontrando se presentan del mismo modo, de punta o de base, hasta llegar a la otra escobilla.

Otro estudio, relacionado con las escobillas, debe hacerse en el esquema.

Para comodidad en el manejo de la máquina es muy conveniente que las escobillas estén situadas entre las piezas polares y no bajo las piezas polares. En el esquema de la figura 6, la situación de las escobillas se ha determinado dislocando convenientemente las conexiones, para que la barra tocada por la escobilla sea la situada entre piezas polares. El efecto será el mismo que si sujetando el inducido, retorciéramos el colector estirando las conexiones hasta que la barra de la escobilla quede donde nos convenga.

Ejemplo 2.° *Consideremos todavía la máquina tetrapolar con* 24 *ranuras; pero proyectemos ahora un devanado con* 4 *pasos.*

Para este caso, la fórmula [2] conserva su forma

$$y = \pm \frac{2\,cr}{p}$$

y si el devanado ha de ser simple en cantidad ($c = p$), tendremos

$$y = \pm 2r$$

que en nuestro ejemplo será

$$y_1 = 3 \qquad y_2 = -6 \qquad y_3 = 5 \qquad y_4 = -6$$

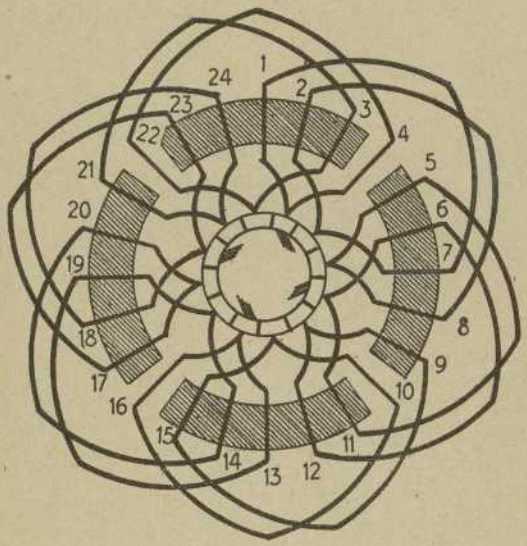

Fig. 14

La tabla de conexión será:

Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
1 con 4	4 con 22	22 con 3	3 con 21
21 » 24	24 » 18	18 » 23	23 » 17
17 » 20	20 » 14	14 » 19	19 » 13
13 » 16	16 » 10	10 » 15	15 » 9
9 » 12	12 » 6	6 » 11	11 » 5
5 » 8	8 » 2	2 » 7	7 » 1

La figura 14 representa el esquema circular de este devanado con sus escobillas apoyadas en las conexiones.

1-4, 6-11, 13-16 y 18-23

Devanados bipolares con pasos naturales. Las fórmulas [5] aplicadas al caso de máquinas bipolares nos dan

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N \pm q}{2} \mp 1$$

Las fracciones contenidas en estas fórmulas se reducen a enteros, sin más que suponer en ellas $q = 0$, con lo cual

$$y_1 = \frac{N}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N}{2} \mp 1$$

Los pasos obtenidos se llaman naturales y las conexiones son casi diámetros de las bases del cilindro.

EJEMPLO 3.° *Supongamos que el mismo inducido del ejemplo primero, con sus 24 ranuras, hubiese de servir para una máquina bipolar* (fig. 15).

Las fórmulas anteriores nos darán ahora

$$y_1 = \frac{24}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{24}{2} \mp 1$$

Adoptemos los valores

$$y_1 = 13 \qquad y_2 = -11$$

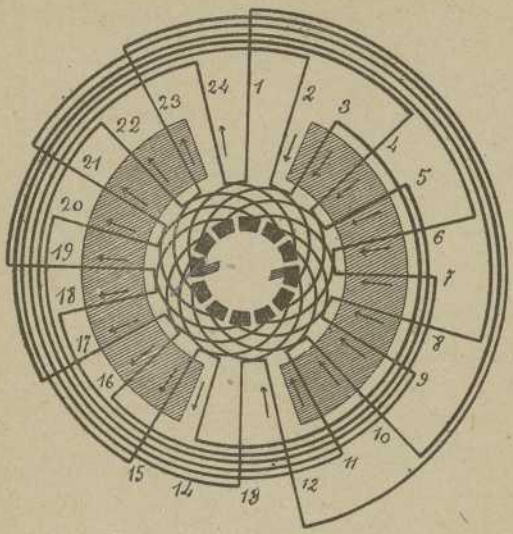

Fig. 15

La tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	14	14	con	3
3	»	16	16	»	5
5	»	18	18	»	7
7	»	20	20	»	9
9	»	22	22	»	11
11	»	24	24	»	13
13	»	2	2	»	15
15	»	4	4	»	17
17	»	6	6	»	19
19	»	8	8	»	21
21	»	10	10	»	23
23	»	12	12	»	1

En este devanado particular uno de los pasos, $y_1 = 13$, es mayor que la mitad de los conductores $N : 2 = 12$, y el camino más corto para la conexión anterior 1-14 se obtiene en sentido contrario al de la numeración. De esta manera las conexiones anterior y posterior tienen el mismo sentido y el devanado parece ondulado.

Devanados bipolares con pasos recortados. Cuando la máquina es sencillamente bipolar, las fórmulas

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N \pm q}{2} \mp 1$$

dan valores enteros para los pasos, sin más que dar a q el valor cero, ya que N es siempre un número par. Pero para $q = 0$, los pasos componentes son siempre demasiado grandes, como ha sucedido en el ejemplo anterior, y para evitarlo *se recortan los pasos componentes,* dando a q un valor negativo.

Devanados Hefner-Alteneck. En este tipo de devanado, se hace siempre $q = -4$, con lo cual las fórmulas anteriores se convierten en

$$y_1 = \frac{N - 4}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N - 4}{2} \mp 1$$

tomando para paso de madeja el mayor de estos valores (contra lo dicho en el capítulo II), con objeto de que la madeja gane superficie y corte mayor flujo. Tendremos, por tanto,

$$y_1 = \frac{N - 4}{2} - 1 = \frac{N}{2} - 3$$

$$y_2 = \frac{N - 4}{2} + 1 = \frac{N}{2} - 1$$

Observemos que con este valor de y_2 una sección que empiece en el conductor número 1, terminará en el número

$$1 + y_2 = 1 + \frac{N}{2} - 1 = \frac{N}{2}$$

luego con dos secciones se abraza todo el devanado. Constituye esto un inconveniente, según veremos con mayor claridad en el ejemplo numérico que sigue.

EJEMPLO 4.° *Devanado Hefner-Alteneck de pasos recortados, para una máquina bipolar con 16 conductores.*

Las fórmulas anteriores, con estos datos numéricos, nos darán para pasos, los valores siguientes:

$$y_1 = \frac{16}{2} - 3 = 5 \qquad y_2 = \frac{16}{2} - 1 = 7$$

Tomaremos definitivamente

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = -7 \quad \text{o} \quad y_2 = 16 - 7 = 9$$

La figura 16 representa este devanado en esquema circular, siendo su tabla de conexión la siguiente:

Anterior			Posterior		
1	con	6	6	con	15
15	»	4	4	»	13
13	»	2	2	»	11
11	»	16	16	»	9
9	»	14	14	»	7
7	»	12	12	»	5
5	»	10	10	»	3
3	»	8	8	»	1

Las conexiones que exigen escobillas son las 15 - 4 y 7 - 12.

El inconveniente señalado al devanado Hefner-Alteneck, es el siguiente:

Cuando las escobillas ocupen la posición indicada

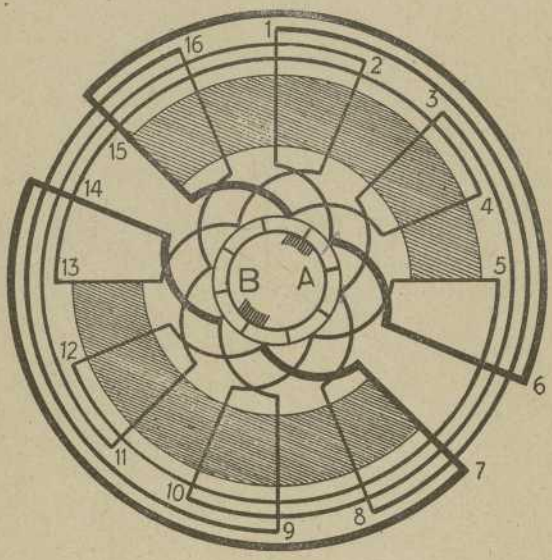

Fig. 16

en la figura, pondrán en corto circuito las secciones 6 - 15 y 14 - 7, señaladas con trazo más grueso. Estas secciones tienen, como se ve, sus costados en ranuras contiguas, luego *entre dos conductores contiguos existe la mayor diferencia de potencial que puede existir entre conductores inducidos.*

A evitar este inconveniente tiende el siguiente tipo.

Devanados Swinburne. Para que las madejas no resulten tan anchas, se recortan aún más los pasos, dando a q el valor 8, con lo cual las fórmulas generales se reducen a

$$y_1 = \frac{N-8}{2} \pm 1 \qquad y_2 = \frac{N-8}{2} \mp 1$$

También en este tipo se adopta para paso posterior el mayor de estos valores, fijándose definitivamente las fórmulas

$$y_1 = \frac{N-8}{2} - 1 = \frac{N}{2} - 5$$

$$y_2 = \frac{N-8}{2} + 1 = \frac{N}{2} - 3$$

Con esto, una sección comprende desde el conductor número 1 hasta el conductor número

$$1 + y_2 = 1 + \frac{N}{2} - 3 = \frac{N}{2} - 2$$

dos secciones comprenderán

$$2\left(\frac{N}{2} - 2\right) = N - 4$$

conductores, y, por tanto, entre los conductores que mayor diferencia de potencial presenten, pueden existir 2 intermedios, como veremos en el ejemplo numérico.

Ejemplo 5.° *Devanado Swinburne de pasos recortados para una máquina bipolar de 16 conductores.*

Las fórmulas anteriores nos darán los pasos

$$y_1 = \frac{16}{2} - 5 = 3 \qquad y_2 = \frac{16}{2} - 3 = 5$$

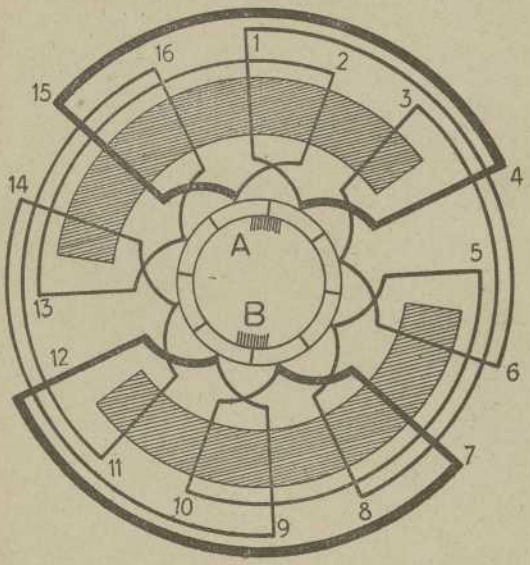

Fig. 17

La figura 17 representa este devanado en esquema circular, siendo su tabla de conexión la siguiente:

Anterior			Posterior		
1	con	4	4	con	15
15	»	2	2	»	13
13	»	16	16	»	11
11	»	14	14	»	9
9	»	12	12	»	7
7	»	10	10	»	5
5	»	8	8	»	3
3	»	6	6	»	1

Las conexiones que exigen escobillas son las 15 - 2 y 7 - 10.

Cuando las escobillas ocupen la posición indicada en la figura, pondrán en corto circuito las secciones 4 - 15 y 12 - 7, señaladas con trazo más grueso. Los costados próximos de estas secciones no están tan inmediatos como en el devanado Hefner-Alteneck, sino que, entre ellos, 4 y 7, por ejemplo, existen aún dos conductores intermedios, los 5 y 6. Esto es precisamente lo que se buscaba.

Devanado múltiple en cantidad. Consideremos un enrollamiento imbricado, en el cual sea $c = p\,d$, de manera que el paso resultante, dado por la fórmula [2], sea ahora

$$y = \pm \frac{2\,pd}{p} = 2\,d \qquad [6]$$

Si d es divisor de $\frac{N}{2}$, los números

$$\frac{y}{2} = d \qquad \frac{N}{2}$$

tendrán como máximo común divisor d. El devanado será compuesto de d enrollamientos independientes, y se llama *imbricado múltiple en cantidad.*

Los pasos componentes se hallarán también, mediante las fórmulas [4] que con la condición $c = p\,d$, se convierten en

$$y_1 = \frac{N \pm q}{2\,p} + d \qquad y_2 = \frac{N \pm q}{2\,p} - d \qquad [7]$$

No hay inconveniente en que sean pares.

En estos devanados deberán construirse tantas ta-

blas de conexión como arrollamientos independientes existan.

Conexiones equipotenciales. A fin de obtener una buena repartición de potenciales en el colector se

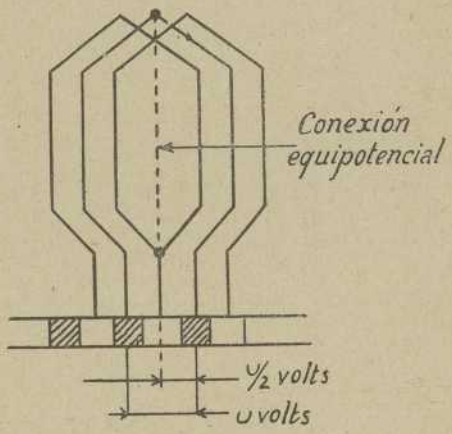

Fig. 17 *a*

hace uso de las conexiones equipotenciales (fig. 17 *a*). Se hacen por el interior del inducido para evitar que se induzcan en las mismas fuerzas electromotrices.

Cuando el devanado corresponde a una máquina de varios polos, estas conexiones pueden hacerse entre delgas unidas a conductores de igual potencial. Las figuras 17 *b* y 17 *c* ilustran como ejemplos de esta clase de conexiones.

Ejemplo 6.° *Proyectar un devanado doble para una máquina tetrapolar cuyo inducido tenga 32 ranuras* (capítulo II, condición 3.ª).

Cada uno de los devanados independientes, exigirá cuatro escobillas y en total la máquina tendrá ocho ($2\,c = 8$).

La fórmula [6] nos dará ahora

$$y = 2 \times 2 = 4$$

y los números

$$\frac{y}{2} = 2 \qquad \frac{N}{2} = 16$$

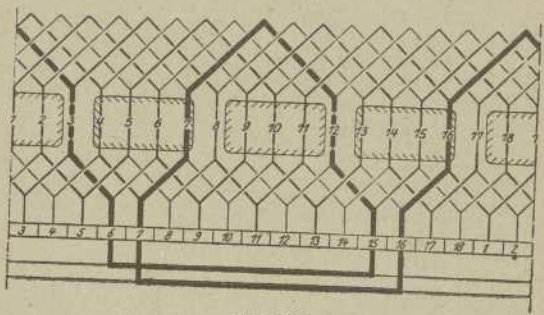

Fig. 17 *b*

tienen un máximo común divisor $d = 2$ que nos comprueba el número de devanados independientes.

Los pasos componentes pueden calcularse mediante las fórmulas [7] que con los actuales valores numéricos nos dan

$$y_1 = \frac{32 \pm q}{4} + 2 \qquad y_2 = \frac{32 \pm q}{4} - 2$$

Haciendo $q = 0$ se reducen a

$$y_1 = 10 \qquad y_2 = 6$$

de manera que se formará un circuito con todos los conductores de orden par, y otro con todos los de orden impar, según se ve en la figura 18 (lámina 1.ª)

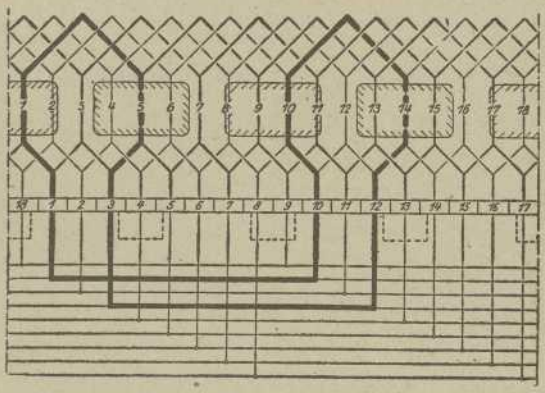

Fig. 17 *c*

Las tablas de conexión serán:

1.er DEVANADO		2.° DEVANADO	
Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
1 con 11	11 con 5	2 con 12	12 con 6
5 » 15	15 » 9	6 » 16	16 » 10
9 » 19	19 » 13	10 » 20	20 » 14
13 » 23	23 » 17	14 » 24	24 » 18
17 » 27	27 » 21	18 » 28	28 » 22
21 » 31	31 » 25	22 » 32	32 » 26
25 » 3	3 » 29	26 » 4	4 » 30
29 » 7	7 » 1	30 » 8	8 » 2

El primer devanado exige escobillas en las conexiones 25 - 3, 1 - 11, 9 - 19, 17 - 27.

El segundo exige escobillas en las conexiones inmediatas a éstas.

Como en las conexiones de ambos devanados, que exigen escobillas, están unidas a barras consecutivas del colector, se ponen solamente cuatro escobillas tocando cada una dos barras, y los circuitos de los dos devanados quedarán así sumados en cantidad.

EJEMPLO 7.° *Proyectar un devanado triple para una dínamo bipolar cuyo inducido tenga 36 ranuras* (capítulo II, condición 3.ª).

Cada uno de los devanados independientes exigirá dos escobillas, y en total la máquina tendrá 6 escobillas.

La fórmula [6] nos dará

$$y = 2 \times 3 = 6$$

y los números

$$\frac{y}{2} = 3 \qquad \frac{N}{2} = 18$$

tienen por máximo común divisor $d = 3$, que nos indica el número de devanados independientes (capítulo II, condición 8.ª)

Los pasos componentes serán (fórmula 7)

$$y_1 = \frac{36 \pm q}{2} + 3 \qquad y_2 = \frac{36 \pm q}{2} - 3$$

que haciendo $q = 0$ se reducen a

$$y_1 = 21 \qquad y_2 = 15$$

LÁMINA 2.ª

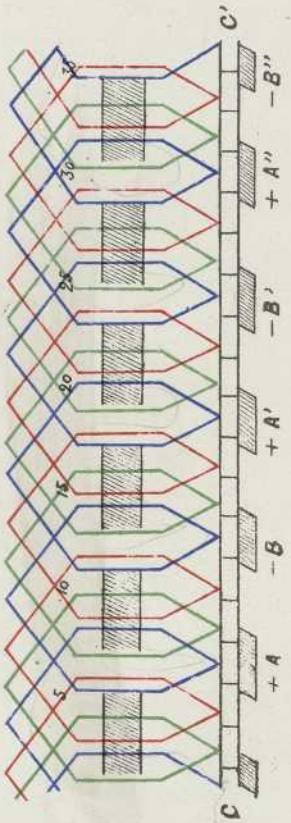

FIG.ª 19

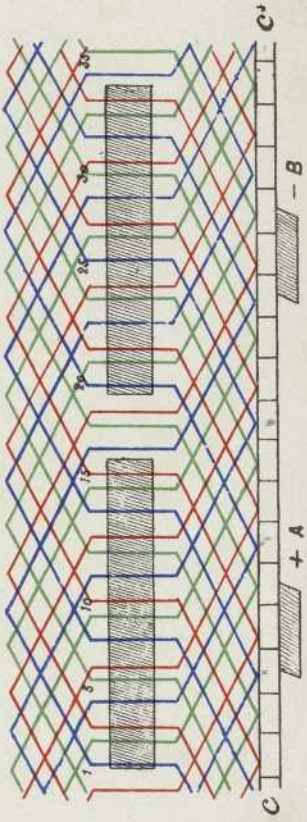

FIG.ª 20

Las tablas de conexión son las siguientes:

1.er DEVANADO		2.° DEVANADO	
Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
1 con 22	22 con 7	3 con 24	24 con 9
7 » 28	28 » 13	9 » 30	30 » 15
13 » 34	34 » 19	15 » 36	36 » 21
19 » 4	4 » 25	21 » 6	6 » 27
25 » 10	10 » 31	27 » 12	12 » 33
31 » 16	16 » 1	33 » 18	18 » 3

3.er DEVANADO

Anterior	Posterior
5 con 26	26 con 11
11 » 32	32 » 17
17 » 2	2 » 23
23 » 8	8 » 29
29 » 14	14 » 35
35 » 20	20 » 5

El primer devanado, figura 20, lámina 2.ª, exige escobillas en las conexiones 14 - 35 y 32 - 17; el segundo, en las 16 - 1 y 34 - 19; el tercero, en las 18 - 3 y 36 - 21, poniendo una escobilla de ancho suficiente para tocar simultáneamente tres barras del colector, tendremos sumados en cantidad los tres devanados independientes.

Los pasos componentes son excesivamente largos por tratarse de una máquina con dos polos solamente. Aumentando el número de polos se conseguiría reducirlos muy notablemente, según se ve en el siguiente ejemplo:

EJEMPLO 8.° *En el mismo inducido anterior, con sus 36 ranuras, proyectar un devanado triple, pero suponiendo que la máquina sea hexapolar.*

Cada uno de los devanados independientes tendrá seis escobillas, y la máquina en total deberá tener 18 escobillas.

La fórmula [6] nos dará

$$y = 2 \times 3 = 6$$

y los números

$$\frac{y}{2} = 3 \qquad \frac{N}{2} = 18$$

tienen por máximo común divisor $d = 3$, que nos comprueba el número de devanados independientes.

Los pasos componentes serán

$$y_1 = \frac{36 \pm q}{6} - 3 \qquad y_2 = \frac{36 \pm q}{6} + 3$$

que haciendo $q = 0$ se reducen a

$$y_1 = 3 \qquad y_2 = 9$$

La figura 19 (lámina 2.ª), representa esquemáticamente este devanado, cuyas tablas de conexión son las siguientes:

1.er DEVANADO		2.° DEVANADO	
Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
1 con 4	4 con 31	3 con 6	6 con 33
31 » 34	34 » 25	33 » 36	36 » 27
25 » 28	28 » 19	27 » 30	30 » 21
19 » 22	22 » 13	21 » 24	24 » 15
13 » 16	16 » 7	15 » 18	18 » 9
7 » 10	10 » 1	9 » 12	12 » 3

3.er DEVANADO

Anterior			Posterior		
5	con	8	8	con	35
35	»	2	2	»	29
29	»	32	32	»	23
23	»	26	26	»	17
17	»	20	20	»	11
11	»	14	14	»	5

El primer devanado exige escobillas en las conexiones 1 - 4, 7 - 10, 13 - 16, 19 - 22, 25 - 28 y 31 - 34.

El segundo en las 35 - 2, 5 - 8, 11 - 14, 17 - 20, 23 - 26 y 29 - 32.

El tercero en las 3 - 6, 9 - 12, 15 - 18, 21 - 24, 27 - 30 y 33 - 36.

Las seis escobillas *A*, *A'*, *A''* y *B*, *B'*, *B''*, reúnen en cantidad a los seis circuitos derivados de cada devanado distinto.

CAPÍTULO IV

DEVANADOS ONDULADOS EN SERIE

Fórmulas. Recordemos (capítulo II) que en los devanados ondulados los números de los conductores directamente unidos son siempre crecientes, por ser sus dos pasos componentes, positivos. Esto hace que el paso resultante comprenda un par de polos inductores, es decir, que el paso polar sea $m = 1$ para estos devanados.

Con ello, la fórmula general [1] establecida al empezar el capítulo III, será para los devanados ondulados

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots = \frac{N \pm 2\,cr}{p}$$

El devanado se llama *en serie* cuando tiene solamente dos escobillas, cualquiera que sea el número de polos inductores, con lo cual la fórmula anterior se convierte en

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots = \frac{N \pm 2\,r}{p} \qquad [8]$$

Si el devanado tuviera solamente dos pasos, que es el caso más frecuente, y si éstos fuesen iguales, la fórmula nos daría

$$y_1 = y_2 = \frac{N \pm 2}{2\,p} \qquad [9]$$

Devanados bipolares ondulados. Como caso más particular tendremos para los devanados bipolares con pasos desiguales

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{1} \qquad [10]$$

y con pasos iguales

$$y_1 = y_2 = \frac{N \pm 2}{2} \qquad [11]$$

EJEMPLO 1.° *Proyectar el devanado para una máquina bipolar de 16 ranuras.*

Si queremos emplear la fórmula [11] para tener pasos iguales, hallaremos

$$y_1 = y_2 = \frac{16 \pm 2}{2} = \begin{cases} 9 \\ 7 \end{cases}$$

Ambas soluciones son aceptables, puesto que ambas son impares. Quedémonos con $y_1 = y_2 = 7$ y devanaremos como indica el esquema de la figura 21.

La tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	8	8	con	15
15	»	6	6	»	13
13	»	4	4	»	11
11	»	2	2	»	9
9	»	16	16	»	7
7	»	14	14	»	5
5	»	12	12	»	3
3	»	10	10	»	1

Las conexiones que exigen escobillas son las 5 - 12 y 13 - 4.

Adoptando los pasos $y_1 = y_2 = 9$, hubiéramos obtenido el mismo devanado; pero en lugar de avanzar a partir del 1 hacia la derecha, hubiéramos avan-

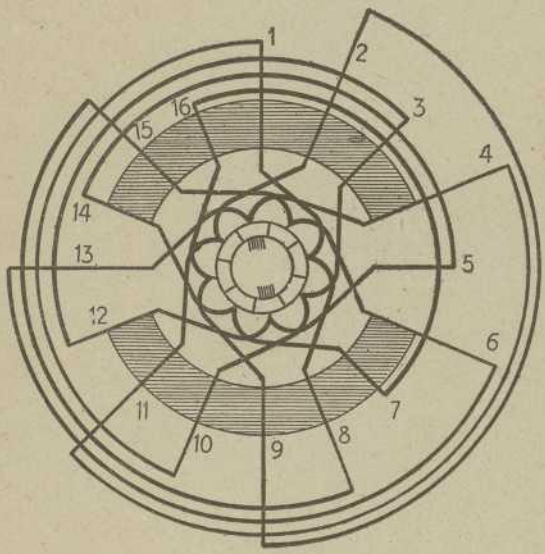

Fig. 21

zado hacia la izquierda, ya que las dos soluciones 7 y 9 son complementarias respecto a 16:

$$7 + 9 = 16$$

Devanados bipolares con un número impar de secciones. En los devanados bipolares, principalmente en los dedicados a motores, se prescinde alguna vez

de las condiciones 1.ª y 2.ª estudiadas en el capítulo II, y se toma un número de conductores que sea múltiplo de 2 sin serlo de 4, con lo cual, el número de secciones inducidas, y, por tanto, el de barras del colector, resulta impar.

Colocando las escobillas diametralmente opuestas, cuando una de ellas esté en el centro de una barra, la otra estará en el de un aislante, de manera que en este caso nunca hay más que una sección en corto circuito, y cada una de las derivaciones entre escobilla y escobilla contendrá

$$\frac{N-2}{2}$$

conductores activos.

EJEMPLO 2.° *Proyectar un devanado bipolar con 18 conductores.*

Si calculásemos los pasos mediante la fórmula [9] hallaríamos

$$y_1 = y_2 = \frac{18 \pm 2}{2} = \begin{cases} 10 \\ 8 \end{cases}$$

y no sería aceptable ninguna solución por ser pares (capítulo II, condición 6.ª).

Calculemos mediante la fórmula [10]

$$y_1 + y_2 = \frac{18 \pm 2}{1} = \begin{cases} 20 \\ 16 \end{cases}$$

quedémonos con la solución menor, y para que los pasos componentes sean impares fijémoslos en

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 9$$

La tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	8	8	con	17
17	»	6	6	»	15
15	»	4	4	»	13
13	»	2	2	»	11
11	»	18	18	»	9
9	»	16	16	»	7
7	»	14	14	»	5
5	»	12	12	»	3
3	»	10	10	»	1

y el esquema de conexiones, el representado en la figura 22.

La conexión que se ve claramente que exige escobilla es la 7 - 14; y para que la otra escobilla esté diametralmente opuesta, deberá apoyarse en dos barras, poniendo en corto circuito la sección 6 - 15.

En este devanado particular, tenemos uno de los pasos $y_2 = 9$ igual a la mitad de los conductores $N : 2 = 9$; luego al pasar del conductor 8 al conductor 17, lo mismo puede decirse que se avanza o que se retrocede. Resulta, por tanto, que este devanado particular lo mismo puede llamarse imbricado que ondulado.

Si lo tratamos como imbricado, podremos emplear las fórmulas [4] del capítulo anterior

$$y_1 = \frac{18 \pm q}{2} + 1 \qquad y_2 = \frac{18 \pm q}{2} - 1$$

y conseguiremos un paso más corto dando a la arbitraria q el valor 6, por ejemplo,

$$y_1 = \frac{18 - 6}{2} + 1 = 7 \qquad y_2 = \frac{18 - 6}{2} - 1 = 5$$

Con pasos cortos disminuyen los cruces de conductores sobre las caras del tambor.

Devanado en dos capas. En los devanados anteriores hemos supuesto que cada ranura del inducido

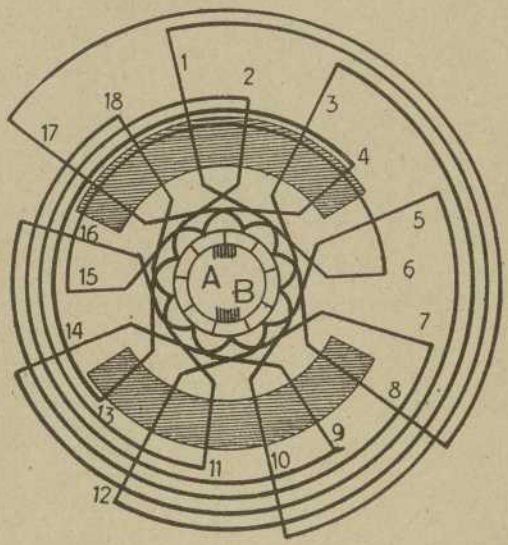

Fig. 22

aloja un solo conductor, o, por lo menos, un solo haz activo. Pero muchas veces, con esta disposición, resultan los dientes extremadamente débiles y conviene reducir su número a la mitad, alojando en cada ranura dos conductores o dos haces activos. Se dice entonces que se devana en dos capas.

Para proyectar un devanado de esta clase, debe

precisarse ante todo, si se va a hacer directamente sobre el inducido o se van a devanar las secciones sobre moldes para colocarlas luego sobre la armadura. Si se devana directamente sobre el núcleo del inducido, los dos costados de una misma sección, deberán ir ambos en el fondo o ambos en la superficie de las ranuras donde se alojan. En cambio, si se devanan en moldes especiales para colocarlas luego en la armadura, todas las secciones deberán tener un costado en el fondo y otro en la superficie de las respectivas llanuras.

Con el primer procedimiento puede suceder que los circuitos derivados que van de escobilla a escobilla sean desiguales desde el punto de vista de la inducción, ya que las secciones cuyos lados ocupan fondos de ranuras tendrán menor superficie, quizá reciban menor flujo y tienen menor velocidad periférica. Todo esto puede ser causa de chispas en el colector y de corrientes parásitas que calienten el inducido.

Para proyectar un devanado en dos capas basta dar a cada ranura dos números y proceder como en el caso general.

EJEMPLO 3.° *Devanar en dos capas un inducido de 14 ranuras.*

Lo trataremos como de 28 conductores y calcularemos los pasos mediante la fórmula [10]:

$$y_1 + y_2 = \frac{28 \pm 2}{1} = \begin{cases} 30 \\ 26 \end{cases}$$

quedémonos con la segunda solución y escojamos los valores

$$y_1 = 11 \qquad y_2 = 15$$

La tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	12	12	con	27
27	»	10	10	»	25
25	»	8	8	»	23
23	»	6	6	»	21
21	»	4	4	»	19
19	»	2	2	»	17
17	»	28	28	»	15
15	»	26	26	»	13
13	»	24	24	»	11
11	»	22	22	»	9
9	»	20	10	»	7
7	»	18	18	»	5
5	»	16	16	»	3
3	»	14	14	»	1

El esquema de devanado se representa en la figura 23.

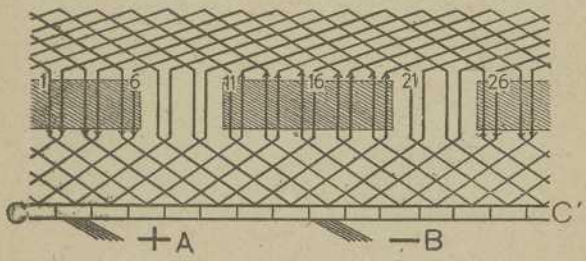

Fig. 23

Devanado multipolar en serie. Los devanados ondulados para inducidos multipolares con

dos ranuras por sección, obedecen a la fórmula

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2c}{p}$$

y se clasifican por el número de circuitos derivados $2c$, comparado con el número de polos.

Si el número de circuitos es 2, cualquiera que sea el de polos, el devanado se llama *simple en serie.*

Si el número de circuitos es igual al de polos, se llama *simple en paralela.*

Si el número de circuitos es cualquiera con independencia del de polos, puede ser el devanado múltiple, y se llama *en series paralelas o de Arnold.*

Estudiemos el primero, es decir, el simple en serie. Sus fórmulas especiales son:

$$y = y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p} \qquad y_1 = y_2 = \frac{N \pm 2}{2p}$$

según que se deseen pasos desiguales o iguales.

Para que el devanado sea simple, se necesita que sean primos los números.

$$\frac{y}{2} \qquad \frac{N}{2}$$

y que y_1 y_2 sean números impares.

Número de conductores. La fórmula general

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p}$$

debe darnos siempre un valor entero y par, es decir,

$$\frac{N \pm 2}{p} = 2k$$

luego *para devanados de dos pasos, el número de conductores debe ser de la forma*

$$N = 2pk \pm 2$$

con lo cual tendremos

$$y_1 + y_2 = 2k$$

Si k es un número par, los pasos componentes no podrán ser iguales, porque cada uno de ellos ha de ser impar. Si k es impar, los pasos componentes podrán ser iguales.

Así, por ejemplo, en una máquina tetrapolar, tendremos $p = 2$, y

$$\text{para } k = 15 \left\{ \begin{array}{l} N = 58 \\ N = 62 \end{array} \right\} \quad y_1 = y_2 = 15,$$

$$\text{para } k = 16 \left\{ \begin{array}{l} N = 62 \\ N = 66 \end{array} \right\} \quad y_1 = 15,\ y_2 = 17$$

$$\text{para } k = 17 \left\{ \begin{array}{l} N = 60 \\ N = 70 \end{array} \right\} \quad y_1 = y_2 = 17,$$

$$\text{para } k = 18 \left\{ \begin{array}{l} N = 70 \\ N = 74 \end{array} \right\} \quad y_1 = 17,\ y_2 = 19$$

. . . . . .

En máquinas hexapolares es $p = 3$ y tendremos

$$\text{para } k = 15 \left\{ \begin{array}{c} N = 80 \\ N = 92 \end{array} \right\} y_1 = y_2 = 15,$$

$$\text{para } k = 16 \left\{ \begin{array}{c} N = 94 \\ N = 98 \end{array} \right\} y_1 = 15,\ y_2 = 17$$

$$\text{para } k = 17 \left\{ \begin{array}{c} N = 100 \\ N = 104 \end{array} \right\} y_1 = y_2 = 17$$

$$\text{para } k = 18 \left\{ \begin{array}{c} N = 106 \\ N = 110 \end{array} \right\} y_1 = 17,\ y_2 = 19$$

. . . . . .

y del mismo modo se calcularía para máquinas de 8, 10, 12, ... polos.

Observemos también que cuando se trata de máquinas tetrapolares, la fórmula general establecida para el número de conductores se convierte en

$$N = 4k \pm 2$$

número que nunca será múltiplo de 4, luego *en máquinas tetrapolares devanadas en serie, no se cumplen las condiciones 1.ª y 2.ª del capítulo II y los circuitos derivados tendrán un número impar de conductores cada uno.*

Esta conclusión obliga a que las conexiones que exigen escobillas contengan un conductor situado en línea neutra. De otro modo la escobilla tendría que situarse en la cara posterior. En el ejemplo numérico insistiremos en esta afirmación.

EJEMPLO 4.° *Devanado ondulado simple en serie para una máquina tetrapolar con 26 conductores.*

El paso resultante es

$$y_1 + y_2 = \frac{26 \pm 2}{2} = \begin{cases} 14 \\ 12 \end{cases}$$

Aceptando la segunda solución, 12, los pasos componentes no podrán ser iguales, porque la mitad de 12 es un número par. Fijaremos los pasos en

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5$$

y la tabla de conexión será

Anterior			Posterior		
1	con	8	8	con	13
13	»	20	20	»	25
25	»	6	6	»	11
11	»	18	18	»	23
23	»	4	4	»	9
9	»	16	16	»	21
21	»	2	2	»	7
7	»	14	14	»	19
19	»	26	26	»	5
5	»	12	12	»	17
17	»	24	24	»	3
3	»	10	10	»	15
15	»	22	22	»	1

La figura 11 representa el esquema rectangular de este devanado.

Se ve que las conexiones sobre las cuales deben apoyarse las escobillas son las 23 - 4 y 17 - 24.

Observemos que son conductores situados en regiones neutras los 4 y 17; en ellos no nace corriente alguna, y su papel se reduce simplemente a traer hasta la escobilla el circuito que termina en la cara posterior.

Las escobillas están separadas por un ángulo de 90°. En general, en estos devanados la separación de las escobillas forma un ángulo de

$$\frac{180°}{p}$$

o un múltiplo impar de esta graduación.

EJEMPLO 5.° *Devanado ondulado simple en serie para una máquina hexapolar con 28 conductores.*

El paso resultante es

$$y_1 + y_2 = \frac{28 \pm 2}{3} = 10$$

y siendo 10 el doble de un impar, pueden ser iguales los pasos componentes. Adoptaremos definitivamente

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 5$$

La tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
1	con	6	6	con	11
11	»	16	16	»	21
21	»	26	26	»	3
3	»	8	8	»	13
13	»	18	18	»	23
23	»	28	28	»	5
5	»	10	10	»	15
15	»	20	20	»	25
25	»	2	2	»	7
7	»	12	12	»	17
17	»	22	22	»	27
27	»	4	4	»	9
9	»	14	14	»	19
19	»	24	24	»	1

La figura 10 representa el esquema circular de este devanado. Las conexiones que exigen escobilla son las 3 - 8 y 17 - 22.

En este ejemplo, las líneas de escobillas forman un ángulo de

$$3\,\frac{180}{p} = 180°$$

Devanados semiondulados semiimbricados. Cuando el número N de conductores inducidos no satisface a la fórmula

$$N = 2\,pk \pm 2$$

se divide por un número r escogido con la condición de ser exacto el cociente $\frac{N}{r}$ y satisfacer la fórmula anterior. Se numeran los conductores dando el mismo número a cada r consecutivos y se estudian los pasos mediante la fórmula

$$y_1 + y_2 = \frac{\frac{N}{r} \pm 2}{p}$$

Cada sección inducida se formará en $2r$ ranuras, del mismo modo que se dijo en el capítulo II cuando se estudió el devanado con un número de conductores múltiplo de ranuras.

Es claro que para formar la sección entre las $2r$ ranuras, se debe avanzar y retroceder en el devanado, lo cual le da aspecto de imbricado, y a esto deben su nombre estos devanados.

También pueden asignarse números diferentes a todas las ranuras y estudiar el devanado con $2r$ pasos.

EJEMPLO 6.° *Devanado ondulado simple en serie para máquina tetrapolar con 36 conductores.*

El número 36 no es de la forma $2pk \pm 2$; pero sí lo es el cociente $\frac{36}{2} = 18$; luego daremos iguales números a cada dos ranuras consecutivas, y estudiaremos

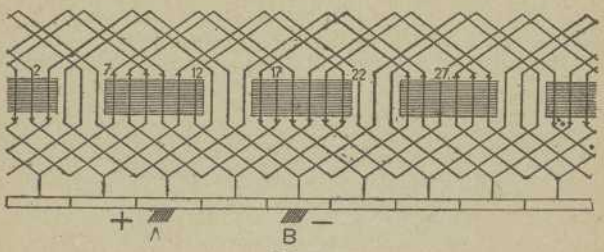

Fig. 24

el devanado como si fuese de 18 conductores solamente.

Los pasos serán

$$y_1 + y_2 = \frac{18 \pm 2}{2} = \begin{cases} 10 \\ 8 \end{cases}$$

Aceptando la primera solución pueden ser iguales los pasos componentes

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 5$$

Para formar una sección entre cuatro ranuras, colocaremos el conductor como se indica en las figura 13, bien sea en la forma *A* o bien en la *B*. La forma *A* tiene la ventaja de que la sección total está constituída por madejas iguales.

Si las madejas son desiguales, como sucede en *B*, los flujos cortados son desiguales y puede temerse una desigualdad de tensión que produzca corrientes parásitas de un elemento a otro.

La figura 24 representa el mismo devanado del ejemplo anterior, dando números diferentes a todas las ranuras y estableciendo las conexiones con arreglo a los cuatro pasos

$$y_1 = 9 \quad y_2 = 10 \quad y_3 = -9 \quad y_4 = 10$$

La tabla de conexión será:

Anterior	Posterior	Anterior	Posterior
2 con 11	11 con 21	21 con 12	12 con 22
22 » 31	31 » 5	5 » 32	32 » 6
6 » 15	15 » 25	25 » 16	16 » 26
26 » 35	35 » 9	9 » 36	36 » 10
10 » 19	19 » 29	29 » 20	20 » 30
30 » 3	3 » 13	13 » 4	4 » 14
14 » 23	23 » 33	33 » 24	24 » 34
34 » 7	7 » 17	17 » 8	8 » 18
18 » 27	27 » 1	1 » 28	28 » 2

Las conexiones correspondientes al paso negativo, no se unen al colector.

Las escobillas se apoyan en las conexiones 6 - 15 y 14 - 23.

Colectores con mayor número de delgas. Los devanados en serie están indicados especialmente para máquinas de mucha tensión, ya que cada uno de sus dos circuitos derivados se compone de $\frac{N}{2}$ conductores, que suman en serie sus fuerzas electromotrices.

En cambio, tienen el inconveniente de poner en

corto circuito muchos conductores en los momentos en que cada escobilla se apoya simultáneamente en dos delgas consecutivas del colector.

La figura 25 representa el esquema rectangular del mismo devanado de la figura 10, y en éste se ven con trazo más grueso los conductores puestos en corto circuito en el momento de la conmutación.

La escobilla positiva, en la figura 25 toca simultáneamente las conexiones 3 - 8 y 5 - 10, lo cual equivale a poner en corto circuito los conductores 8 y 5.

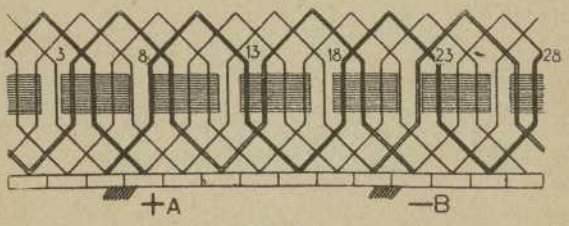

Fig. 25

En la figura o en la tabla de conexión se ve fácilmente que entre los conductores 8 y 5 existe un circuito formado por los hilos

[8 - 13 - 18 - 23 - 28 - 5

La escobilla negativa, en el momento de la conmutación, toca simultáneamente las conexiones 17 - 22 y 19 - 24, lo cual equivale a poner en corto circuito los conductores 22 y 19, entre los cuales existe un circuito formado por los

22 - 27 - 4 - 9 - 14 - 19

Tenemos, pues, en el momento de la conmutación, anulados seis conductores en cada circuito derivado, de manera que la tensión corresponderá a nueve conductores activos unidos en serie, en lugar de corresponder a 14, como debía esperarse de un devanado compuesto de 28 conductores.

En general, *en los devanados serie durante el momento de la conmutación, se ponen en corto circuito 2 p conductores en cada una de sus derivaciones, o sea en total*

$$4\,p$$

conductores, anulados para la producción de fuerza electromotriz.

Al cesar el corto circuito, se producen fuertes efectos de autoinducción, y viene, como consecuencia, la formación de chispas en el colector.

Para evitar este inconveniente, se aumenta el número de delgas del colector al doble, triple, cuádruple ... de su número normal $\frac{N}{2}$, es decir,

$$l = q\,\frac{N}{2}$$

siendo q un entero cualquiera, y una conexión del devanado se une simultáneamente a q delgas *simétricamente colocadas respecto al cambio inductor.*

Para conseguir esta simetría, la separación entre delgas directamente unidas, debe ser aproximadamente

$$\frac{l}{p}.$$

El conjunto de conexiones del devanado y uniones de las barras del colector vienen a formar dos devanados unidos por puntos de sus conexiones, según veremos en los casos numéricos.

Si el número de barras del colector se multiplica por q, *el número de conductores inducidos, puestos en corto circuito entre ambas derivaciones, se reduce a*

$$\frac{4p}{q}$$

Como comprobación de esta regla, resolvamos algún caso numérico.

EJEMPLO 7.° *Duplicar el número de delgas en el colector del devanado hexapolar con 28 conductores, representado en la figura 25 y estudiado en el ejemplo 5.°*

El nuevo número de delgas del colector será

$$l = 2\frac{28}{2} = 28$$

y la separación entre delgas unidas, debe ser aproximadamente

$$\frac{28}{3}$$

que para que sea entero, lo fijaremos en 9, de manera que uniremos la delga 1 con la 10, la 3 con la 12, y así sucesivamente.

Combinando estas uniones con el devanado, po-

dremos escribir la tabla de conexión del modo siguiente:

CONDUCTORES Anterior			CONDUCTORES Posterior			DELGAS DEL COLECTOR		
1	con	6	6	con	11	27	con	8
11	»	16	16	»	21	9	»	18
21	»	26	26	»	3	19	»	28
3	»	8	8	»	13	1	»	10
13	»	18	18	»	23	11	»	20
23	»	28	28	»	5	21	»	2
5	»	10	10	»	15	3	»	12
15	»	20	20	»	25	13	»	22
25	»	2	2	»	7	23	»	4
7	»	12	12	»	17	5	»	14
17	»	22	22	»	27	15	»	24
27	»	4	4	»	9	25	»	6
9	»	14	14	»	19	7	»	16
19	»	24	24	»	1	17	»	26

La figura 26 representa este devanado en esquema rectangular. Las conexiones que exigen esco-

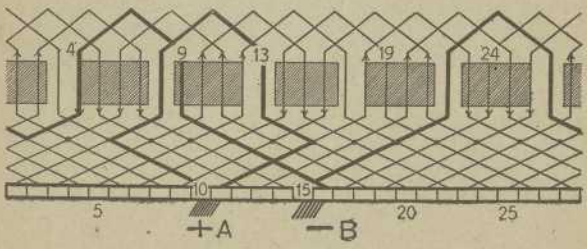

Fig. 26

billas son las 3 - 8 y 17 - 22, como en la figura 25. Cuando las escobillas toquen dos barras consecutivas, como se representa en el dibujo, la positiva pone

en corto circuito los conductores 8 y 13 y la negativa une los conductores 22, 27, 4 y 9.

El número de conductores unidos en corto circuito se ha reducido a seis entre las dos escobillas, en lugar de seis por escobilla, como era antes de duplicar las delgas del colector.

Esta reducción está conforme con lo dicho anteriormente, ya que el número de conductores puestos en corto circuito viene dado por la fórmula

$$\frac{4\,p}{q} = \frac{4 \times 3}{2} = 6$$

El número de conductores puestos en corto circuito por una escobilla debe ser par, ya que su conjunto debe empezar en la cara anterior y terminar igualmente en esta cara.

De aquí se deduce que el total de conductores anulados

$$\frac{4\,p}{q}$$

se ha de repartir en dos números pares, aun cuando no sean iguales, y, en efecto, en el ejemplo anterior, de los seis conductores anulados corresponden cuatro a una derivación y dos a otra.

Los circuitos derivados de escobilla a escobilla, son en el momento de la figura

$$+\left\{\begin{matrix} 18 - 23 - 28 - 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 2 - 7 - 12 - 17 \\ 3 - 26 - 21 - 16 - 11 - 6 - 1 - 24 - 19 - 14 \end{matrix}\right\}-$$

formado el primero por 12 conductores y formado el segundo por 10 solamente. En el siguiente momento de conmutación, el primero tendrá 10 y el segundo

12, y así irán sucesivamente alternando sus composiciones relativas.

Esta desigualdad de circuitos se corrige cuando el número normal de barras del colector se multiplica por un divisor de p, *que puede ser el mismo* p. En efecto, si q divide exactamente a p, el total de conductores puestos en corto circuito

$$4\frac{p}{q}$$

será un múltiplo de 4 que podrá partirse en dos números pares iguales.

Como caso particular, si $q = p$, el total de conductores puestos en corto circuito será

$$\frac{4p}{p} = 4$$

correspondiendo exactamente dos conductores a cada derivación.

De manera que *se conservará la igualdad de circuitos derivados cuando el número de polos y el número de barras o delgas del colector sean*

Para 4 polos ..... $\frac{N}{2}$ o $2\frac{N}{2}$ delgas.

» 6 » ..... $\frac{N}{2}$ o $3\frac{N}{2}$ »

» 8 » ..... $\frac{N}{2}$ o $2\frac{N}{2}$ o $4\frac{N}{2}$ delgas.

» 10 » ..... $\frac{N}{2}$ o $5\frac{N}{2}$ delgas.

» 12 » ..... $\frac{N}{2}$ o $2\frac{N}{2}$ o $3\frac{N}{2}$ o $6\frac{N}{2}$ delgas.

y así sucesivamente.

Comprobémoslo con un caso numérico.

EJEMPLO 8.° *Triplicar el número de delgas en el colector del devanado extrapolar con 28 conductores representados en la figura 25 y estudiado en los ejemplos 5.° y 7.° de este capítulo.*

El nuevo número de delgas del colector será

$$l = 3\frac{28}{2} = 42$$

y la separación entre delgas unidas debe ser aproximadamente

$$\frac{42}{3} = 14$$

de manera que uniremos entre sí las 1, 15, 29, las 2, 16, 30, etc.

Combinando estas uniones con las conexiones del devanado, podemos escribir la tabla de conexión del modo siguiente:

CONDUCTORES Anterior	CONDUCTORES Posterior	DELGAS DEL COLECTOR
1 con 6	6 con 11	33 con 5 y con 19
11 » 16	16 » 21	6 » 20 » 34
21 » 26	26 » 3	21 » 35 » 7
3 » 8	8 » 13	36 » 8 » 22
13 » 18	18 » 23	9 » 23 » 37
23 » 28	28 » 5	24 » 38 » 10
5 » 10	10 » 15	39 » 11 » 25
15 » 20	20 » 25	12 » 26 » 40
25 » 2	2 » 7	27 » 41 » 13
7 » 12	12 » 17	42 » 14 » 28
17 » 22	22 » 27	15 » 29 » 1
27 » 4	4 » 9	30 » 2 » 16
9 » 14	14 » 19	3 » 17 » 31
19 » 24	24 » 1	18 » 32 » 4

La figura 27 representa este devanado en esquema rectangular. Las conexiones que exigen escobillas son, como siempre, las 3 - 8 y 17 - 22.

Cada conexión del devanado está unida a tres barras del colector mediante conductores que se representan por dos líneas oblicuas de puntos y una línea llena, próximamente normal al colector.

En el momento de conmutación, que es el representado en la figura, la escobilla positiva toca si-

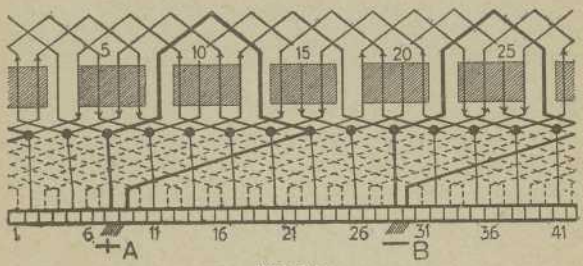

Fig. 27

multáneamente las conexiones 3 - 8 y 13 - 18 formando un corto circuito con los conductores 8 y 13, que se representa en el dibujo mediante trazo más grueso.

Del mismo modo, la escobilla negativa toca simultáneamente las conexiones 17 - 22 y 27 - 4, formando un corto circuito con los conductores 22 y 27.

Como se ve, el número total de conductores puestos en corto circuito, es solamente 4, cual corresponde a la fórmula

$$\frac{4\,p}{p} = 4$$

y los circuitos derivados entre escobilla y escobilla conservan su igualdad en todos los momentos.

Devanados en serie cuando N es múltiplo de $2\ p$. El número de conductores inducidos en los devanados multipolares en serie, hemos dicho que debe obedecer a la fórmula

$$N = \text{múlt. } 2\ p \pm 2$$

Cuando esta condición no se cumple, *puede todavía devanarse en serie si* N *es un múltiplo impar de* 2p, es decir, si

$$\frac{N}{2\ p}$$

es exactamente un número impar; pero empleando $2\ p$ pasos.

De estos pasos, $2p - 1$ de ellos son iguales a

$$y_2 = \frac{N}{2\ p}$$

y el primero, que es paso anterior, vale

$$y_1 = \text{múlt. } 2\ p + y_2.$$

Es claro que y_1 queda indeterminado y debe escogerse con la condición de que dos conductores directamente unidos deben estar situados bajo piezas polares de signo contrario.

Muchas veces conviene tomar para y_1 un valor mayor que $\frac{N}{2}$ y en este caso la conexión correspondiente, hecha por el arco más corto, retrocede en lugar de avanzar, dando al devanado el aspecto de *ondulado-imbricado.*

Esto sucede en el ejemplo que resolveremos luego. Conviene tomar para y_1 el valor de 19 teniendo 28 conductores el devanado, y es evidente que $y_1 = 19$ equivale a $y_1 = -(28 - 19) = -9$, valor negativo que corresponde a conexiones de imbricado.

El número de barras del colector puede ser

$$l = \frac{N}{2\,p}$$

y se unen a ellas sólo las conexiones correspondientes al paso y_1.

Con esta disposición quedan en corto circuito durante el instante de la conmutación $4p$ conductores. Para reducir este número, se recurre al artificio estudiado anteriormente, multiplicando el número de barras del colector por p, con lo cual el número total será

$$l = p\,\frac{N}{2\,p} = \frac{N}{2}$$

Comprobemos todo lo dicho con un caso numérico.

EJEMPLO 9.° *Devanado serie para una máquina tetrapolar con 28 conductores.*

El número de conductores es múltiplo del de polos. Emplearemos las fórmulas anteriores.

El devanado tendrá cuatro pasos. Los tres últimos serán

$$y_2 = y_3 = y_4 = \frac{28}{4} = 7$$

y el primero, que será anterior,

$$y_1 = \text{múlt. } 4 + 7$$

Después de algunos tanteos sencillos, se fija el primer paso en

$$y_1 = 19$$

lo cual, según hemos dicho, equivale a

$$y_1 = -9$$

El número normal de delgas del colector sería

$$l = \frac{28}{2 \times 2} = 7$$

pero para reducir el número de conductores puestos en corto circuito durante la conmutación, las duplicaremos, teniendo en total

$$l = \frac{28}{2} = 14$$

La tabla de conexión, comprendiendo las conexiones entre conductores y las uniones al colector, es la siguiente:

CONDUCTORES Anterior	CONDUCTORES Posterior	DELGAS DEL COLECTOR
1 con 20	20 con 27	9 con 2
27 » 6	6 » 13	
13 » 4	4 » 11	1 » 8
11 » 18	18 » 25	
25 » 16	16 » 23	7 » 14
23 » 2	2 » 9	
9 » 28	28 » 7	13 » 6
7 » 14	14 » 21	
21 » 12	12 » 19	5 » 12
19 » 26	26 » 5	
5 » 24	24 » 3	11 » 4
3 » 10	10 » 17	
17 » 8	8 » 15	3 » 10
15 » 22	22 » 1	

La figura 28 representa esquemáticamente este devanado:

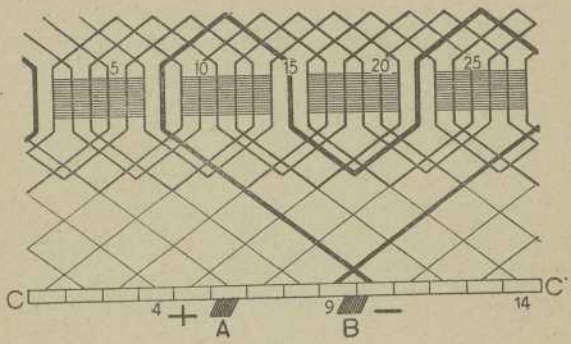

Fig. 28

La distancia entre escobillas debe ser

$$\frac{l}{2p} = \frac{14}{4} = 3'5 \text{ delgas}$$

luego en el instante representado en la figura, una escobilla, la positiva, por ejemplo, se apoyará en la barra 6 y la otra entre las 9 y 10.

Es fácil ver que en este instante, la escobilla negativa pone en corto circuito los conductores inducidos

8 - 15 - 22 - 1

señalados con trazo més grueso.

Los dos circuitos derivados entre escobilla y escobilla quedan constituídos por los conductores siguientes:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} 9\text{-}2\text{-}23\text{-}16\text{-}25\text{-}18\text{-}11\text{-}4\text{-}13\text{-}6\text{-}27\text{-}20 \\ 28\text{-}7\text{-}14\text{-}21\text{-}12\text{-}19\text{-}26\text{-}5\text{-}24\text{-}3\text{-}10\text{-}17 \end{array} \right\} -$$

En el momento siguiente de la conmutación, el corto circuito de cuatro conductores sería establecido por la escobilla positiva; pero siempre serán completamente iguales los dos circuitos derivados entre escobillas.

EJEMPLO 10. *Devanado serie para una máquina exapolar con* 30 *conductores.*

El número de conductores es múltiplo del de polos, y, por tanto, deberemos emplear las fórmulas especiales correspondientes a este caso.

El devanado tendrá seis pasos, siendo los cinco últimos

$$y_2 = y_3 = y_4 = y_5 = y_6 = \frac{30}{6} = 5$$

y el primero, para la cara anterior,

$$y_1 = \text{múlt. } 6 + 5.$$

Tanteando convenientemente, lo fijaremos en

$$y_1 = 3 \times 6 + 5 = 23$$

que equivale a

$$y_1 = -7$$

y nos producirá un devanado ondulado imbricado.

El número normal de barras del colector sería

$$l = \frac{30}{6} = 5$$

pero para reducir el número de conductores puestos en corto circuito durante la conmutación, las triplicaremos teniendo en total

$$l = 3 \times 5 = 15$$

La tabla de conexión, comprendiendo las conexiones entre conductores y las uniones al colector, es la siguiente:

CONDUCTORES Anterior	CONDUCTORES Posterior	DELGAS DEL COLECTOR
1 con 24	24 con 29	9 con 14 y con 4
29 » 4	4 » 9	
9 » 14	14 » 19	
19 » 12	12 » 17	3 » 8 » 13
17 » 22	22 » 27	
27 » 2	2 » 7	
7 » 30	30 » 5	12 » 2 » 7
5 » 10	10 » 15	
15 » 20	20 » 25	
25 » 18	18 » 23	6 » 11 » 1
23 » 28	28 » 3	
3 » 8	8 » 13	
13 » 6	6 » 11	15 » 5 » 10
11 » 16	16 » 21	
21 » 26	26 » 1	

La figura 29 representa esquemáticamente este devanado.

La distancia entre escobillas debe ser

$$\frac{15}{6} = 2'5 \text{ delgas}$$

luego en el instante representado en la figura, una escobilla, la positiva, se apoyará en la delga 7 y la negativa entre las 9 y 10.

Es fácil ver que en este instante la escobilla negativa pone en corto circuito los conductores inducidos

6 - 11 - 16 - 21 - 26 - 1

señalados con trazo más grueso.

Los dos circuitos derivados entre escobilla y es-

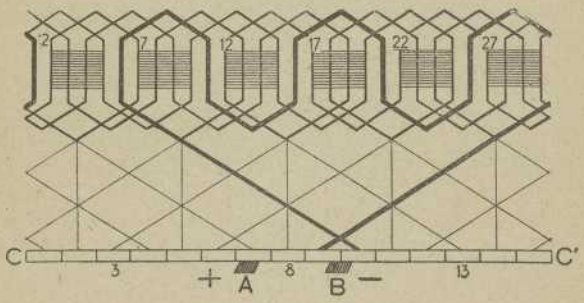

Fig. 29

cobilla quedan constituídos por los conductores siguientes:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} 7\text{-}2\text{-}27\text{-}22\text{-}17\text{-}12\text{-}19\text{-}14\text{-}9\text{-}4\text{-}29\text{-}24 \\ 30\text{-}5\text{-}10\text{-}15\text{-}20\text{-}25\text{-}18\text{-}23\text{-}28\text{-}3\text{-}8\text{-}13 \end{array} \right\} -$$

resultando los dos de igual longitud.

Devanados Alioth. La casa Alioth, de Basilea, emplea unos devanados multipolares en serie, combinando los *semiondulados semiimbricados,* que hemos estudiado en la página 73 con los de colectores *con mayor número de delgas,* estudiados también en la página 75.

Si cada sección inducida ha de formarse en $2r$

ranuras de la armadura, se escoge el número de ranuras total N, de manera que sea *múltiplo de* 2r, *sin serlo de* 4r, con lo cual el número de secciones

$$b = \frac{N}{2r}$$

será impar.

El número de polos inductores $2p$ se escoge con la condición de satisfacer la fórmula de paso, que emplearemos luego,

$$y = \frac{b \pm 1}{p}$$

en la cual y debe ser entero, pero puede ser par o impar.

El doble signo del numerador permite muchas veces dos soluciones, según veremos en los ejemplos numéricos.

Las $2r$ ranuras correspondientes a una sección se han de escoger de manera que sus costados opuestos caigan bajo piezas polares de signo contrario, con objeto de que las fuerzas electromotrices que nacen en ellos se sumen en tensión. Esto se consigue en $b - 1$ secciones, quedando una en que los conductores de sus costados oponen sus fuerzas electromotrices. Esta sección debe quedar en corto circuito en el momento de la conmutación, por el juego del colector.

Colocadas las secciones, se numeran

$$1, 2, 3, \ldots b$$

y se empalman la salida de una con la entrada de otra, escogidas mediante el valor del paso

$$y = \frac{b \pm 1}{p}$$

Las conexiones de sección a sección son las únicas que deben comunicar con las delgas del colector, luego el número normal de éstas sería

$$l = b = \frac{N}{2\,r}$$

y durante la conmutación quedarían en corto circuito p secciones.

Para reducir el corto circuito se multiplica por p el número de delgas, obteniéndose

$$l = pb = \frac{pN}{2\,r}$$

con lo cual el corto circuito se reduce a una sola sección, que será, según hemos dicho anteriormente, aquella que tenga en oposición las fuerzas electromotrices nacidas en sus costados.

Entre las dos escobillas debe haber un número de barras del colector o delgas dado por la fórmula

$$\frac{l}{2\,p} = \frac{pb}{2\,p} = \frac{b}{2}$$

que será siempre fraccionario, ya que b es siempre impar. De este modo se tendrá en todas las posiciones del colector una escobilla tocando dos delgas consecutivas para el corto circuito de la sección correspondiente.

Cada uno de los circuitos derivados de escobilla a escobilla se compondrá de

$$\frac{b-1}{2}$$

secciones inducidas montadas en serie, o sea, de un número de conductores

$$\left(\frac{N}{2r} - 1\right) : 2 = \frac{N - 2r}{4r}$$

EJEMPLO 11. *Devanado Alioth para una máquina octopolar con 28 conductores.*

El número 28 es divisible por 4 sin serlo por 8, luego proyectaremos secciones que se alojen en 4 ranuras, obteniendo 7 secciones; número impar según debe ser.

El número de polos, 8, satisface a la fórmula de paso

$$y = \frac{7 \pm 1}{4}$$

de la cual podremos tomar sólo el valor 2, correspondiente al signo +, ya que el correspondiente al signo — no es entero. No hay inconveniente en que sea par.

La figura 30 representa, en esquema rectangular, este devanado.

Para formar una sección cualquiera, la 4, por ejemplo, se han escogido los conductores o ranuras 9-10 y 19-20. Las dos primeras caen bajo pieza polar de un signo y las dos últimas bajo pieza polar de signo contrario.

Las ranuras que caen bajo regiones neutras se unen indistintamente con las de polos de cualquier signo.

Hemos conseguido formar seis secciones de ma-

nera que sumen las fuerzas electromotrices nacidas en sus costados; pero no lo hemos conseguido en la 1, cuyas ranuras 7 y 26 oponen sus tensiones. La sección 1 debera quedar en corto circuito durante la conmutación.

El número normal de delgas del colector debería ser 7, como el de secciones; pero según hemos dicho,

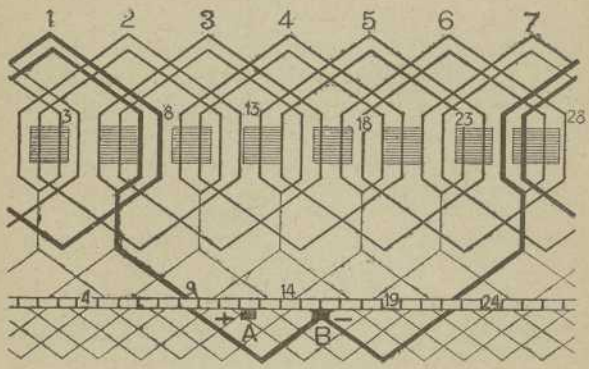

Fig. 30

se multiplica por el número de pares de polos, obteniéndose en nuestro ejemplo

$$l = pb = 4 \times 7 = 28$$

Estas 28 barras estarán comunicándose entre sí cada cuatro de ellas y cada grupo comunicará con una conexión del devanado.

Estudiadas las secciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, conocido el valor del paso $y = 2$ para unir una con otra, y

cuadruplicado el número de barras del colector, tendremos la siguiente tabla de conexiones:

Secciones	Delgas del colector			
1 con 3	23 con	2 con	9 y con	16
3 » 5	3 »	10 »	17 »	24
5 » 7	11 »	18 »	25 »	4
7 » 2	19 »	26 »	5 »	12
2 » 4	27 »	6 »	13 »	20
4 » 6	7 »	14 »	21 »	28
6 » 1	15 »	22 »	1 »	8

La posición de una escobilla se determina en seguida, ya que ha de poner en corto circuito la sección de fuerzas electromotrices en oposición.

En nuestro ejemplo, esta sección debe ser la 1; luego una escobilla, la negativa de la figura, debe apoyarse en las barras 5 y 16 simultáneamente. El corto circuito se verifica a través de los conductores señalados con trazo más grueso.

La segunda escobilla debe estar separada de la primera mediante un número de delgas

$$\frac{l}{2p} = \frac{b}{2} = \frac{2}{7} = 3'5$$

luego deberá apoyarse sobre la

$$15'5 \pm 3'5 = \begin{cases} 19 \\ 12 \end{cases}$$

En la figura está dibujada sobre la 12, pero lo mismo pudiera estarlo sobre la 19.

Los dos circuitos derivados entre escobillas se forman así:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{secciones } 3,\ 5 \text{ y } 7 \\ \text{secciones } 6,\ 4 \text{ y } 2 \end{array} \right\} -$$

Otro método. Al definir los devanados Alioth hemos dicho que son del tipo semiondulado semiimbricado, multiplicando el número de delgas del colector con objeto de reducir el corto circuito durante la conmutación. En prueba de ello vamos a resolver nuevamente el ejemplo anterior, pero tratándolo por la regla dada en la página 73.

La fórmula allí establecida, para $r = 2$, nos dará como paso

$$y_1 + y_2 = \frac{\frac{28}{2} \pm 2}{4} = \begin{cases} 4 \\ 3 \end{cases}$$

debiendo tomar la solución positiva

$$y_1 + y_2 = 4$$

Cumplamos esta condición mediante los valores

$$y_1 = -1 \qquad y_2 = 5$$

y tendremos el mismo devanado Alioth representado en la figura 30, dando números iguales a cada dos conductores consecutivos y formando las secciones entre cuatro ranuras, según la siguiente tabla de conexión.

Anterior	Posterior
2 con 1	1 con 6
6 » 5	5 » 10
10 » 9	9 » 14
14 » 13	13 » 4
4 » 3	3 » 8
8 » 7	7 » 12
12 » 11	11 » 2

EJEMPLO 12. *Devanado Alioth para una máquina tetrapolar con 30 conductores.*

El número 30 es divisible por 6 sin serlo por 12, luego proyectaremos secciones que se alojen en seis ranuras y obtendremos cinco secciones.

Para formar las secciones hemos tomado conductores que caigan bajo piezas polares de signo contrario. Así, por ejemplo, la sección 2 está formada por los conductores 7, 8, 9 y 16, 17, 18, que cumplen aquella condición. En la sección 3 no se ha conseguido que se sumen las fuerzas electromotrices que nacen en sus conductores, y, por tanto, ésta será la que deba quedar en corto circuito durante la conmutación.

El número normal de delgas del colector debía ser cinco, pero lo elevaremos hasta

$$l = pb = 2 \times 5 = 10$$

uniendo entre sí las opuestas.

El paso para empalmar entre sí las cinco secciones es

$$y = \frac{5 \pm 1}{2} = \begin{cases} 3 \\ 2 \end{cases}$$

La figura 31 representa este devanado en esquema rectangular aceptando el paso $y = 2$.

La tabla de conexiones será:

Secciones	Delgas del colector
1 con 3	2 con 7
3 » 5	6 » 1
5 » 2	10 » 5
2 » 4	4 » 9
4 » 1	8 » 3

Una escobilla, la postiva en la figura, debe situarse de manera que ponga en corto circuito la sección 3, según hemos dicho, luego deberá apoyarse entre las

delgas 6 y 7. La otra escobilla debe estar separada de la primera por 10 : 4 = 2'5 barras, luego deberá apoyarse en la 6'5 + 2'5 = 9 o en la 6'5 — 2'5 = 4.

Los dos circuitos derivados entre escobillas, se forman así:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{secciones 5 y 2} \\ \text{secciones 1 y 4} \end{array} \right\} -$$

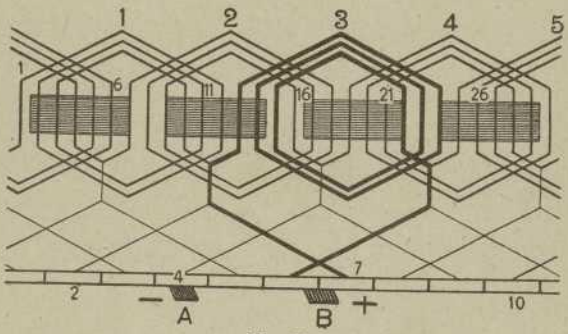

Fig. 31

La figura 32 representa el mismo devanado anterior para una máquina tetrapolar con 30 conductores; pero formando las secciones 1, 2, 3, 4, 5, de madejas iguales y además aceptando como paso de devanado para la unión de secciones el valor $y = 3$.

La tabla de conexión es:

Secciones	Delgas del colector
1 con 4	3 con 8
4 » 2	9 » 4
2 » 5	5 » 10
5 » 3	1 » 6
3 » 1	7 » 2

La escobilla positiva se apoya en la delga 4 del colector, y la negativa en las 6 y 7, poniendo en corto circuito la sección 3 señalada mediante trazos más gruesos.

También podíamos tratar este devanado como semiondulado semiimbricado, dando números iguales

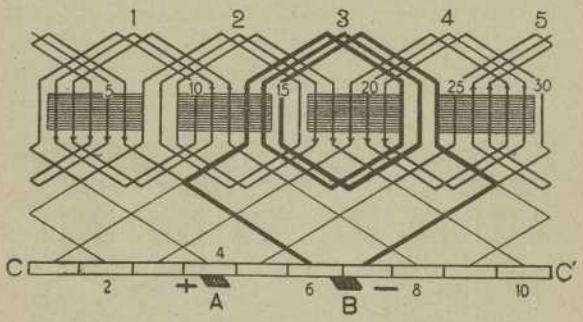

Fig. 32

a cada tres conductores consecutivos y calculando los pasos mediante la fórmula de la página 73.

$$y_1 + y_2 = \frac{\frac{N}{r} \pm 2}{2} = \frac{10 \pm 2}{2} = \begin{cases} 6 \\ 4 \end{cases}$$

La figura 31 corresponde a la solución

$$y_1 = 1 \qquad y_2 = 3 \qquad y_1 + y_2 = 4$$

y la 32 corresponde a los valores

$$y_1 = 3 \qquad y_2 = 3 \qquad y_1 + y_2 = 6$$

Número de polos no múltiplo de 4. En los ejemplos anteriores el número de polos es múltiplo de 4. Algún autor indica como condición necesaria para que estos devanados sean posibles, que el número de polos sea de aquella forma y que el número de madejas sea par.

Vamos a probar con un caso numérico que es posible realizar un devanado Alioth, aun cuando el número de polos no sea múltiplo de 4, ni el de madejas sea par.

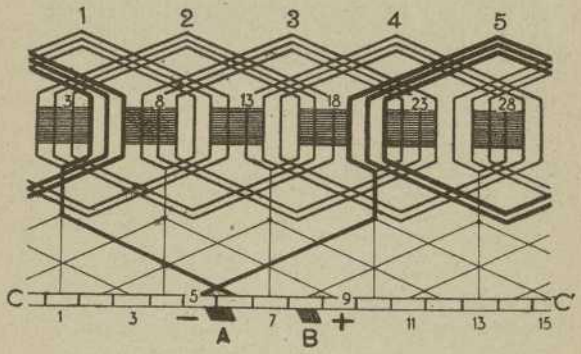

Fig. 33

EJEMPLO 13. *Devanado Alioth para una máquina exapolar con 30 conductores.*

El número 30 es divisible por 6 sin serlo por 12, luego proyectaremos secciones que se alojen en seis ranuras, es decir, compuestas de tres madejas, y obtendremos cinco secciones.

Las secciones 1, 2, 3, 4 (fig. 33) tienen sus conexiones bien dispuestas para que se sumen las fuer-

zas electromotrices nacidas en sus costados; pero la 5 no cumple esta condición, y será, por tanto, la que deba quedar en corto circuito durante el momento de la conmutación.

El paso de devanado para unir una con otra las secciones, vendrá dado por la fórmula

$$y = \frac{5 \pm 1}{3}$$

de los cuales tomaremos el valor $y = 2$, que es entero.

El número de delgas del colector será

$$l = pb = 3 \times 5 = 15$$

debiendo conexionarse en grupos de tres.

Con todos estos datos podremos formar la tabla de conexión entre secciones y barras, que será la siguiente:

Secciones	Delgas del colector
1 con 3	14 con 4 y con 9
3 » 5	5 » 10 » 15
5 » 2	11 » 1 » 6
2 » 4	2 » 7 » 12
4 » 1	8 » 13 » 3

La escobilla negativa se apoya en las barras 5 y 6, poniendo en corto circuito la sección 5. La escobilla positiva se apoya en la 8, o en la 3.

Los dos circuitos derivados entre escobillas son:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{secciones 1 y 3} \\ \text{secciones 4 y 2} \end{array} \right\} -$$

CAPÍTULO V

DEVANADOS ONDULADOS EN SERIES PARALELAS

Fórmulas. Al empezar el estudio de los devanados ondulados en el capítulo IV, establecidos como fórmula general

$$y_1 + y_2 + y_3 + \ldots = \frac{N \pm 2\,cr}{p} \qquad [1]$$

Si los devanados fuesen de dos pasos solamente

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2\,c}{p} \qquad [2]$$

y, como caso particular, si los dos pasos pudieran ser iguales

$$y_1 = y_2 = \frac{N \pm 2\,c}{2\,p} \qquad [3]$$

El paso resultante $y_1 + y_2$ debe ser siempre un número par, de la forma

$$y_1 + y_2 = 2\,k$$

con lo cual la fórmula [2] nos dice que el número de conductores inducidos debe cumplir la condición

$$N = 2\,pk \pm 2\,c \qquad [4]$$

Estos devanados se clasifican atendiendo al número 2c de circuitos derivados que presentan al paso de la corriente, pudiendo ser

$$c < p \qquad c = p \quad \text{y} \quad c > p$$

Es claro que dada la significación de c, forzosamente debe ser siempre positivo y entero.

En algún devanado de éstos, durante la conmutación, se ponen en corto circuito $2n$ conductores. Además, un circuito cualquiera, de escobilla a escobilla, debe contener un número par de conductores y si son iguales y el total de circuitos es 2c, el número de conductores activos será múltiplo de 4c. Vemos, pues, que el número de conductores debe satisfacer también a la condición

$$N = 4\,k'c + 2\,n \qquad [5]$$

Para que las condiciones [4] y [5] sean compatibles, se necesita que

$$2\,pk \pm 2\,c = 4\,k'c + 2\,n$$

que se transforma con facilidad en

$$k' = \frac{pk - n \pm c}{2\,c} \qquad [6]$$

Las fórmulas [4], [5] y [6] nos permiten proyectar con acierto los devanados de esta clase, que son debidos a Arnold.

Devanados serie paralela con $c < p$.

Ejemplo 1.° *Devanado Arnold para una máquina hexapolar, con cuatro circuitos derivados entre esco-*

billas, siendo el número de conductores inducidos 40 aproximadamente.

Con 40 conductores, corresponden a cada pieza polar 7 aproximadamente. Fijando los pasos componentes en $y_1 = 7$, $y_2 = 9$, tendremos $y_1 + y_2 = 16$, y, por tanto, $k = 8$. Para este valor de k la fórmula [6] no nos da valores enteros para k'.

Fijemos $y_1 = y_2 = 7$, con lo cual tendremos

$$y_1 + y_2 = 14 \qquad k = 7$$

Admitamos que se ponen en corto circuito durante la conmutación seis conductores, y la fórmula [6] nos dará

$$k' = \frac{3 \times 7 - 3 \pm 2}{4} = \begin{cases} 5 \\ 4 \end{cases}$$

Estos dos valores de k', llevados a la fórmula [5] nos darán las dos soluciones

$$N = 4 \times 5 \times 2 + 2 \times 3 = 46$$
$$N = 4 \times 4 \times 2 + 2 \times 3 = 38$$

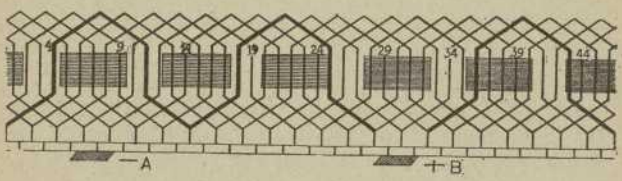

Fig. 34

Primera solución. Con 46 conductores, y siendo $y_1 = y_2 = 7$, se obtiene el devanado representado en la figura 34.

Para reunir en cantidad cuatro circuitos, una escobilla, la negativa de la figura, debe apoyarse simultáneamente en dos barras del colector; pero siendo impar el número total de barras, mientras una escobilla toca dos de éstas, la obra debe tocar tres, con lo cual se tienen en corto circuito los seis conductores que hemos contado para el momento de la conmutación y que la posición de la figura son los

36 - 43 - 4 - 11 - 18 - 25

Los cuatro circuitos derivados entre escobillas son:

$$+\left(\begin{array}{l} 32 - 29 - 46 - 7 - 14 - 21 - 28 - 35 - 42 - 3 \\ 27 - 20 - 13 - 6 - 45 - 38 - 31 - 24 - 17 - 10 \\ 34 - 41 - 2 - 9 - 16 - 23 - 30 - 37 - 44 - 5 \\ 29 - 22 - 15 - 8 - 1 - 40 - 33 - 26 - 19 - 12 \end{array}\right)-$$

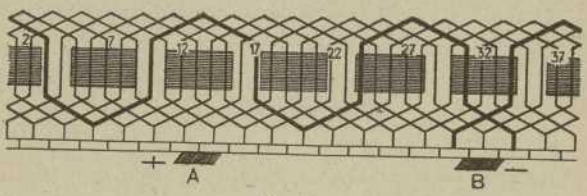

Fig. 35

Segunda solución. Con 38 conductores, y siendo $y_1 = y_2 = 7$, se obtiene el devanado representado en la figura 35.

El número total de barras del colector es impar, y, por tanto, tendremos siempre una escobilla apoyándose simultáneamente en tres barras.

En nuestra figura es la escobilla negativa la que reúne tres delgas y forma el corto circuito de con-

mutación señalado con trazo más grueso, que corresponde a los conductores

34 - 3 - 10 - 17 - 24 - 31

Los cuatro circuitos derivados entre escobillas se constituyen del modo siguiente:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} 9 - 2 - 33 - 26 - 19 - 12 - 5 - 36 \\ 16 - 23 - 30 - 37 - 6 - 13 - 20 - 27 \\ 11 - 4 - 35 - 28 - 21 - 14 - 7 - 38 \\ 18 - 25 - 32 - 1 - 8 - 15 - 22 - 29 \end{array} \right\} -$$

EJEMPLO 2.° *Devanado doble Arnold para una máquina hexapolar, con cuatro circuitos derivados, siendo el número de conductores inducidos 40 aproximadamente.*

Si han de resultar dos devanados independientes, es preciso que los números

$$\frac{y_1 + y_2}{2} \qquad \frac{N}{2}$$

tengan un máximo común divisor igual a 2. Fijemos

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = k = 6$$

y la fórmula [4] nos dará

$$N = 6 \times 6 \pm 4 = \left\{ \begin{array}{l} 40 \\ 32 \end{array} \right.$$

Con cualquiera de las dos soluciones se cumple la condición de ser 2 el máximo común divisor de

es-

se

ia
os,
o-

es,

os

le
de

LÁMINA 3.ª

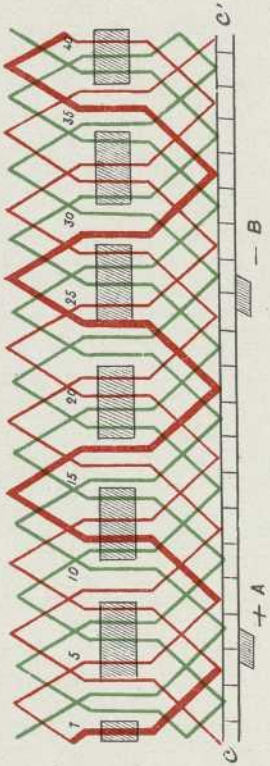

FIG.ª 36

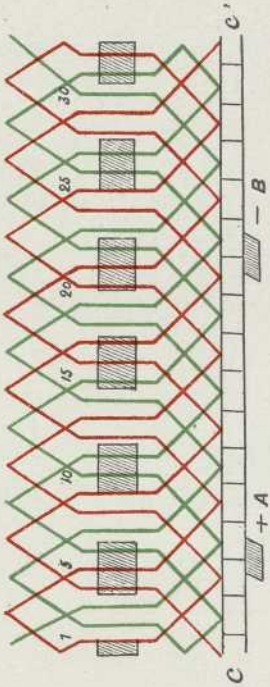

FIG.ª 37

$\frac{N}{2}$ y k, luego tendremos efectivamente dos devanados independientes.

El número de delgas del colector será 20 ó 16, par en ambos casos, y, por tanto, ninguna de las escobillas formará el corto circuito que se formaba en el ejemplo anterior.

PRIMERA SOLUCIÓN. Con 40 conductores y siendo $y_1 + y_2 = 12$, podemos hacer

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5.$$

La figura 36 (lámina 3.ª) representa este devanado, viéndose cada uno con distinto color.

Los cuatro circuitos derivados entre escobillas, que se ofrecen al paso de la corriente están constituídos de este modo:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} 1 - 36 - 29 - 24 - 17 - 12 - 5 - 40 - 33 - 28 \\ 8 - 13 - 20 - 25 - 32 - 37 - 4 - 9 - 16 - 21 \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} 3 - 38 - 31 - 26 - 19 - 14 - 7 - 2 - 35 - 30 \\ 10 - 15 - 22 - 27 - 34 - 39 - 6 - 11 - 18 - 23 \end{array} \right\} \end{array} \right\} -$$

Si la escobilla tiene exactamente la anchura de dos delgas del colector, no habrá conductores en corto circuito. Si las escobillas tocasen también a las delgas siguientes de la derecha del dibujo, tendríamos un corto circuito formado por los conductores

12 - 17 - 24 - 29 - 36 - 1

y otro por los

32 - 37 - 4 - 9 - 16 - 21.

SEGUNDA SOLUCIÓN. Con 32 conductores y haciendo, como antes,

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5$$

se obtiene el devanado representado en la figura 37 (lámina 3.ª) formado por dos devanados independientes, que señalamos con colores distintos.

Los cuatro circuitos derivados de escobilla a escobilla se forman del modo siguiente:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{r} 1 - 28 - 21 - 16 - 9 - 4 - 29 - 24 \\ 8 - 13 - 20 - 25 - 32 - 5 - 12 - 17 \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{r} 3 - 30 - 23 - 18 - 11 - 6 - 31 - 25 \\ 10 - 15 - 22 - 27 - 2 - 7 - 14 - 19 \end{array} \right\} \end{array} \right\} -$$

Devanado serie paralela con $c = p$. Cuando la máquina tiene igual número de polos que de circuitos derivados, $c = p$, las fórmulas [2] y [3] se reducen a

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2p}{p} = \frac{N}{p} \pm 2 \qquad [7]$$

$$y_1 = y_2 = \frac{N \pm 2p}{2p} = \frac{N}{2p} \pm 1 \qquad [8]$$

El número de conductores inducidos debe cumplir la condición

$$N = 2p\,(k \pm 1) \qquad [9]$$

EJEMPLO 3.° *Devanado en series paralelas para una máquina tetrapolar que tenga cuatro circuitos derivados y de 20 a 30 conductores.*

Fijemos los pasos componentes en

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 5,$$

con lo cual tendremos $2k = y_1 + y_2 = 10$, $k = 5$. La fórmula [9] nos dará

$$N = 4\,(5 \pm 1) = \begin{cases} 24 \\ 16 \end{cases}$$

Adoptemos el primer valor $N = 24$.

La figura 38 representa este devanado en esquema

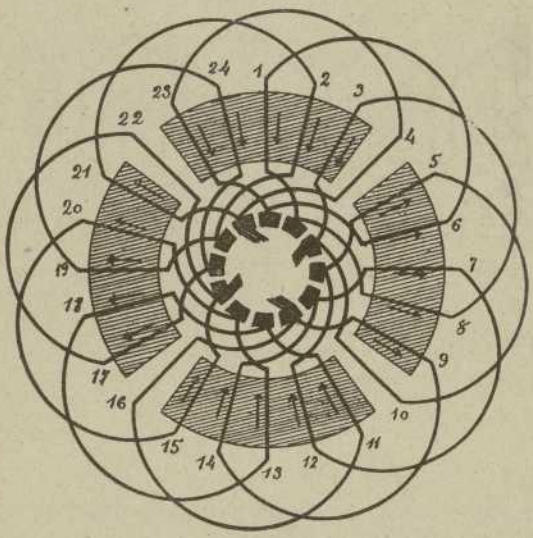

Fig. 38

circular. En ella se ve que las escobillas deben apoyarse en las conexiones 4 - 9, 10 - 15, 16 - 21 y 22 - 3.

Mientras las escobillas estén, como en la figura, apoyándose en una sola barra del colector, no hay

ningún corto circuito y los caminos ofrecidos a la corriente, se constituyen del modo siguiente:

$$+\left\{\begin{array}{l} \ldots\ 3 - 8 - 13 - 18 - 23 - 4 \\ +\left\{\begin{array}{l} 10 - 5 - 24 - 9 - 14 - 9 \\ 15 - 20 - 1 - 6 - 11 - 16 \end{array}\right. \\ \ldots 12 - 17 - 12 - 7 - 2 - 21 \end{array}\right\} -$$

En el momento de la conmutación, las escobillas tocan dos delgas cada una, según se ve en el esque-

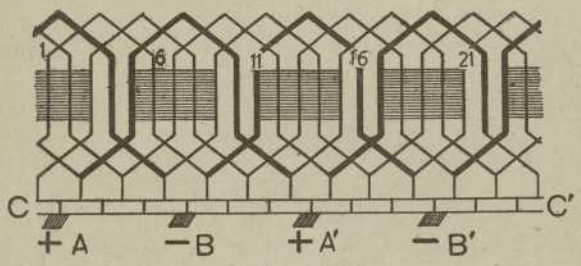

Fig. 39

ma de la figura 39, originándose dos cortos circuitos formados por los conductores

$$-\ 11 - 16 - 23 - 4\ -$$
$$+\ 17 - 22 + 5 - 10\ +$$

y los caminos seguidos por la corriente se forman así:

$$+\left\{\begin{array}{l} \ldots\ 3 - 8 - 13 - 18 \\ +\left\{\begin{array}{l} 12 - 7 - 2 - 21 \\ 15 - 20 - 1 - 6 \end{array}\right. \\ \ldots\ 24 - 19 - 14 - 9 \end{array}\right\} -$$

EJEMPLO 4.° *Devanado Arnold para una máquina hexapolar, con seis circuitos derivados formados por tres*

LÁMINA 4.ª

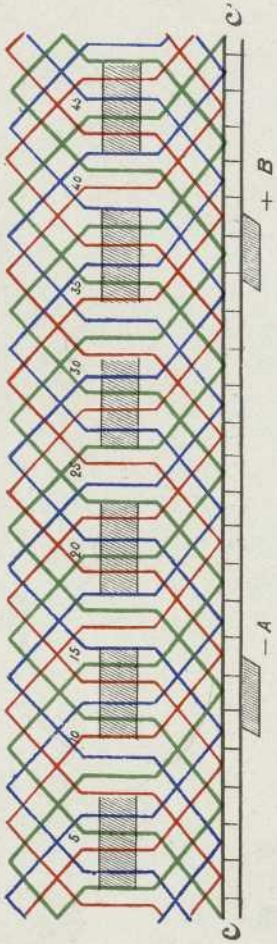

FIG.ª 40

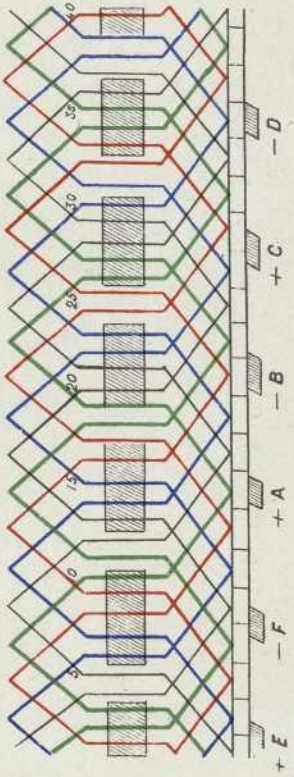

FIG.ª 42

devanados independientes, siendo el número de sus conductores inducidos 50 aproximadamente.

Para que resulten tres secciones independientes, es preciso que k sea múltiplo de 3. Tomémoslo $k = 9$ y la fórmula [9] nos dará

$$N = 6\,(9 \pm 1) = \begin{cases} 48 \\ 60 \end{cases}$$

Cualquiera de las soluciones es buena y aceptaremos la primera $N = 48$ con

$$y_1 = y_2 = 9$$

La figura 40 (lámina 4.ª), representa este devanado en esquema rectangular, correspondiendo un color diferente a cada uno de los devanados independientes.

Los seis caminos recorridos por la corriente son los siguientes:

$$+\left\{\begin{array}{l} 6 - 45 - 36 - 27 - 18 - 9 - 48 - 36 \\ 15 - 24 - 33 - 42 - 3 - 12 - 21 - 30 \\ 8 - 47 - 38 - 29 - 20 - 11 - 2 - 41 \\ 17 - 26 - 35 - 44 - 5 - 14 - 23 - 32 \\ 10 - 1 - 40 - 31 - 22 - 13 - 4 - 43 \\ 19 - 28 - 37 - 46 - 7 - 16 - 25 - 34 \end{array}\right\}-$$

Si las escobillas tienen la anchura exacta de dos delgas del colector, no habrá conductores en corto circuito; pero si la escobilla fuese bastante ancha para tocar también la delga siguiente, quedarían en corto circuito los conductores

15 - 24 - 33 - 42 - 3 - 12

y los

39 - 48 - 9 - 18 - 27 - 36

Devanados serie paralelas con $c > p$. Estos devanados se proyectarán atendiendo a las mismas fórmulas [2], [3] y [4] establecidas al empezar este capítulo.

EJEMPLO 5.° *Devanado simple Arnold para una máquina tetrapolar, con seis circuitos derivados, siendo el número de sus conductores inducidos 40 aproximadamente.*

Con 40 conductores y cuatro polos podemos fijar el valor del paso en

$$k = y_1 = y_2 = 11$$

y la fórmula [4] nos fijará el número de conductores

$$N = 4 \times 11 \pm 6 = \begin{cases} 50 \\ 38 \end{cases}$$

Quedémonos con la segunda solución $N = 38$.

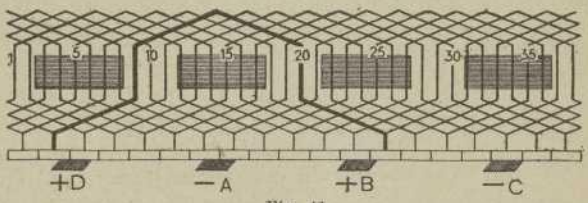

Fig. 41

La figura 41 representa este devanado en esquema rectangular.

Se supone que las escobillas tienen exactamente el ancho de una barra del colector, de manera que situada la A con su centro entre dos barras del co-

lector, del centro de la A al de la B, habrá una distancia correspondiente a 4'75 barras del colector y así las demás, es decir,

$$\begin{aligned} A\ B &= 4{,}75 \\ A\ B\ C &= 2 \times 4'75 = 9'50 \\ A\ B\ C\ D &= 3 \times 4'75 = 13'25 \\ A\ B\ C\ D\ A &= 4 \times 4'75 = 18 \end{aligned}$$

Los caminos ofrecidos a la corriente serán los seis siguientes:

$$\begin{aligned} &-A - 8 - 35 - 24 - 13 - 2 - 29 + B \\ &-A - 19 - 30 - 3 - 14 - 25 - 36 + D \\ &-A - 10 - 37 - 26 - 15 - 4 - 31 + B \\ &-A - 21 - 32 - 5 - 16 - 27 - 38 + D \\ &-C - 28 - 17 - 6 - 33 - 22 - 11 + D \\ &-C - 1 - 12 - 23 - 34 - 7 - 18 + B \end{aligned}$$

y además hay un corto circuito formado por

$$+ D - 9 - 20 + B.$$

EJEMPLO 6.° *Devanado cuádruple Arnold para una máquina hexapolar con ocho circuitos derivados, siendo el número de sus conductores inducidos 40 aproximadamente.*

Con 40 conductores y seis polos, el paso ha de ser 7 aproximadamente; pero deseando cuatro devanados independientes, ha de ser divisible por 4 el número

$$k = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

Fijemos, pues, definitivamente

$$y_1 = 9 \qquad y_2 = 7$$

y la fórmula [4] nos dará

$$N = 6 \times 8 \pm 8 = \begin{cases} 40 \\ 56 \end{cases}$$

Aceptemos la primera solución $N = 40$ y los números

$$\frac{N}{2} = 20 \qquad \text{e} \qquad \frac{y_1 + y_2}{2} = 8$$

tienen como máximo común divisor 4, según deseábamos.

La figura 42 (lámina 4.ª) representa este devanado en esquema rectangular, siendo de colores distintos los cuatro devanados independientes.

Se supone que la escobilla tiene exactamente la anchura de una barra del colector. Situando la A sobre una barra, las distancias de centro a centro de escobilla corresponderán a

$A\ B =$	$3 + {}^1/_3$	delgas
$A\ B\ C =$	$6 + {}^2/_3$	»
$A\ B\ C\ D =$	10	»
$A\ B\ C\ D\ E =$	$13 + {}^1/_3$	»
$A\ B\ C\ D\ E\ F =$	$16 + {}^2/_3$	»
$A\ B\ C\ D\ E\ F\ A =$	20	»

Los caminos ofrecidos al paso de la corriente serán los ocho siguientes:

$+ A$ - 10 - 3 - 34 - 27 — B
$+ A$ - 19 - 26 - 35 - 2 — F
$+ C$ - 33 - 40 - 9 - 16 — B
$+ C$ - 22 - 15 - 6 - 39 — D
$+ C$ - 24 - 17 - 8 - 1 — D
$+ E$ - 36 - 29 - 20 - 13 — F
$+ E$ - 7 - 14 - 23 - 30 — D
$+ E$ - 5 - 12 - 21 - 28 - 37 - 4 — F

El último circuito es el único de seis conductores. Además hay tres cortos circuitos en el momento de la conmutación:

$$\begin{array}{c} -B - 25 - 32 - D \\ -B - 18 - 11 - F \\ +C - 31 - 38 + E \end{array}$$

Conexiones igualadoras. En vez de impedir la producción de corrientes de circulación, por la acción de las irregularidades del campo, empleando

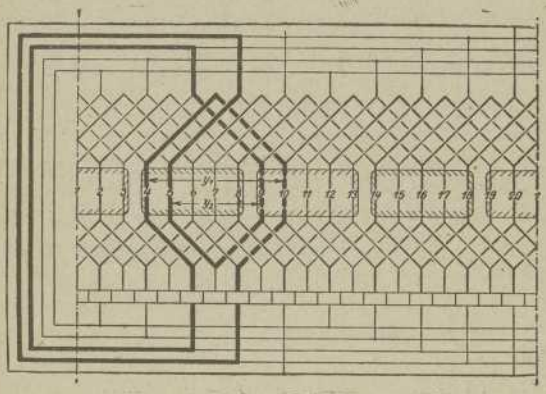

Fig. 42

enrollamientos serie-paralelas, se pueden disminuir sus efectos perniciosos impidiendo que pasen por las escobillas.

Para ello se unen los conductores que están aproximadamente a igual potencial, sea directamente al colector o mediante conexiones exteriores, y manteniendo el número de escobillas igual a 2 p.

De este modo, las corrientes de circulación no pasan por las escobillas, puesto que encuentran el paso menos resistente por las conexiones indicadas, ocasionando un gasto menor de energía; además, el funcionamiento de las escobillas mejora, continuando todas ellas con igual corriente a pesar de la asimetría del campo.

Cuando el colector está compuesto de muchas barras, no todas ellas llevan conexiones igualadoras, sino tan sólo cada cuatro o cinco. Puede verse un devanado con esta clase de conexiones en la figura 42 *a*. En ella se han dibujado también las conexiones equipotenciales.

Inducidos con dos colectores. Cuando los devanados se componen de otros dos independientes, como sucede en el de la figura 36, en lugar de sumar en cantidad estos dos mediante las escobillas, puede construirse el inducido con dos colectores, consiguiéndose de este modo todas las ventajas de dos máquinas independientes, que pueden sumarse en paralela, sumarse en serie o emplearse en dos circuitos de utilización, perfectamente independientes.

EJEMPLO 7.° *Devanado con dos colectores para una máquina hexapolar que tenga aproximadamente 30 conductores.*

Con 30 conductores y seis polos podemos escoger los pasos próximos a 5; pero como el devanado ha de ser doble, es preciso que el número

$$k = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

LÁMINA 5.ª

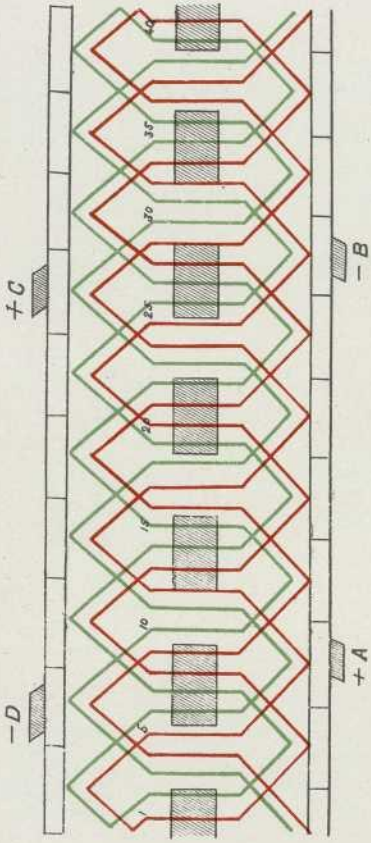

FIG.ª 43

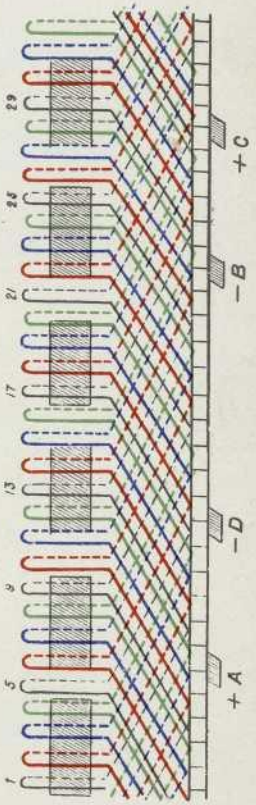

FIG.ª 59

se

co
d

te

s
l

s
p

sea divisible por 2. Fijemos definitivamente

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5 \qquad k = 6$$

Con objeto de poner sólo dos escobillas en cada colector, tomaremos $2c = 4$ y la fórmula [4] nos dará

$$N = 6 \times 6 \pm 4 = \begin{cases} 40 \\ 32 \end{cases}$$

Aceptemos la primera solución $N = 40$.

Uno de los devanados corresponderá a la siguiente tabla de conexión:

Anterior			Posterior		
1	con	8	8	con	13
13	»	20	20	»	25
25	»	32	32	»	37
37	»	4	4	»	9
9	»	16	16	»	21
21	»	28	28	»	33
33	»	40	40	»	5
5	»	12	12	»	17
17	»	24	24	»	29
29	»	36	36	»	1

siendo las escobillas correspondientes las A y B de la figura 43 (lámina 5.ª).

El segundo devanado tendrá el colector en la parte superior de la figura; por tanto, cambiaremos los pasos tomando

$$y_1 = 5 \qquad y_2 = 7$$

y la tabla de conexión será:

Anterior			Posterior		
2	con	7	7	con	14
14	»	19	19	»	26
26	»	31	31	»	38
38	»	3	3	»	10
10	»	15	15	»	22
22	»	27	27	»	34
34	»	39	39	»	6
6	»	11	11	»	18
18	»	23	23	»	30
30	»	35	35	»	2

siendo las *C* y *D* las escobillas correspondientes.

Devanado en varias capas. Si el número de ranuras fuese muy grande en relación con la circunferencia del inducido, obtendríamos un paso de dentadura muy pequeño, y, como consecuencia, deberíamos construir las ranuras muy estrechas y los dientes muy finos

Este inconveniente puede salvarse devanando en varias capas.

Se construye el inducido con un número de ranuras mitad, tercio, cuarto, ... del de haces activos, alojando en cada ranura dos, tres, cuatro, ... de ellos.

Para estudiar el devanado daremos a cada ranura tantos números consecutivos como capas haya de tener aquél, y formaremos la tabla de conexión como en el caso general.

La figura 44 representa el mismo devanado de la figura 38, pero reduciendo al tercio el número de sus ranuras, es decir, devanando en tres capas.

Si el devanado fuese múltiple y el número de

LÁMINA 6.ª

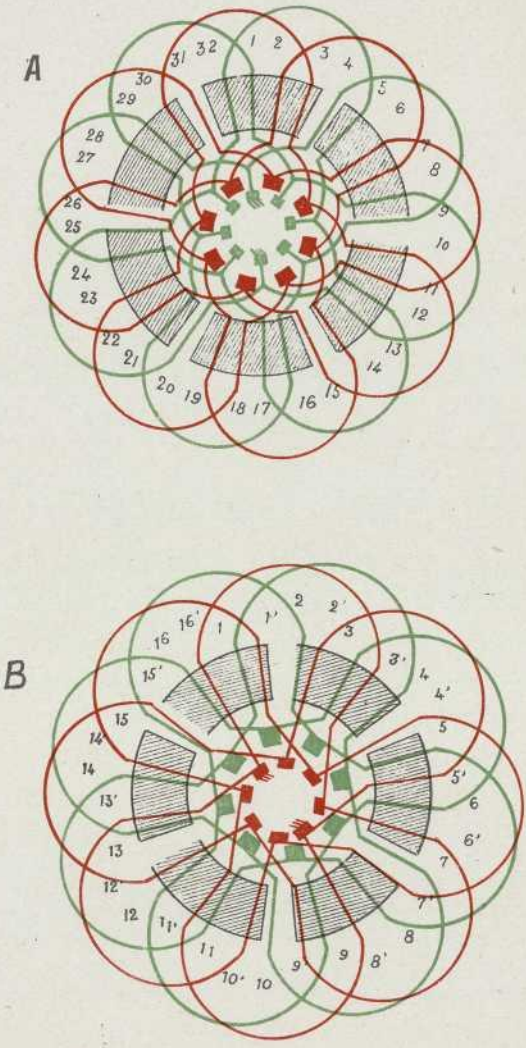

FIG.ª 45

capas fuese igual al de devanados, podríamos dar números iguales a las ranuras, empleando un número para cada sección.

Las figuras 45 *A* y *B* (lámina 6.ª) representan una misma máquina en dos colectores.

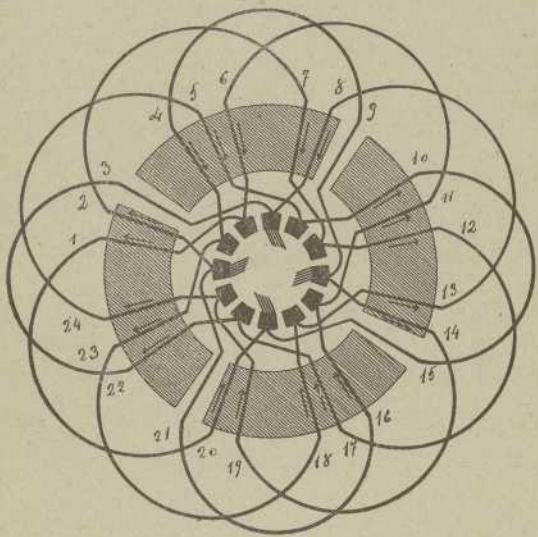

Fig. 44

En la primera se supone que hay tantas ranuras como conductores y los pasos obedecen a la fórmula

$$y_1 + y_2 = \frac{32 + 4}{3} = 12$$

fijándose

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5$$

En la segunda, el número de ranuras se ha reducido a la mitad; pero como el devanado es doble, se ha puesto un solo número a cada ranura, utilizándolos una vez para cada devanado. Los pasos obedecen a la fórmula

$$y_1 = y_2 = \frac{16 + 2}{6} = 3$$

y para evitar confusiones en la figura, hemos tomado para un devanado

$$y_1 = y_2 = 3,$$

y para el otro

$$y_1 = y_2 = -3.$$

Será muy fácil construir la tabla de conexión y estudiar sobre la figura la posición de las escobillas.

Comparación de devanados ondulados e imbricados. En un devanado imbricado, un circuito derivado de escobilla a escobilla está formado por conductores pertenecientes solamente a un doble paso polar, mientras en un devanado ondulado los conductores de un circuito derivado pertenecen a todos los campos polares. Así en el devanado imbricado doble, representado en la figura 18 (lámina 1.ª), un circuito está formado por los conductores

11 - 5 - 15 - 9

de los cuales el primero y tercero están bajo la primera pieza polar, y el segundo y cuarto bajo la segunda.

En el devanado Arnold, representado en la figu-

ra 34, un circuito derivado está formado por los conductores

32 - 39 - 46 - 7 - 14 - 21 - 28 - 35 - 42 - 3.

Los seis primeros pertenecen a los seis campos distintos de la máquina y los tres últimos coinciden con regiones neutras.

Deduzcamos consecuencias de estas distribuciones de conductores.

Si el desgaste de los cojinetes, los defectos de fundición u otras causas cualesquiera hacen que los campos inductores sean diferentes, serán también diferentes las fuerzas electromotrices inducidas en los diversos circuitos derivados de los devanados imbricados. Esto da lugar a corrientes interiores que calientan el inducido y disminuyen el rendimiento de la dínamo, y, además, es causa de que la intensidad en el circuito exterior varíe con la posición relativa del inductor e inducido.

En los devanados ondulados, los defectos que puedan presentarse en un campo inductor influyen por igual en todos los circuitos derivados, cualquiera que sea su posición respecto al inductor, y, por tanto, no son de temer los defectos señalados al devanado imbricado.

Si las tensiones en los diversos circuitos son desiguales, el efecto Joule crece proporcionalmente al cuadrado de aquella diferencia.

En efecto, sea R la resistencia de una derivación y E la tensión normal que debe tener. La pérdida por efecto Joule entre los $2c$ circuitos derivados que tiene la máquina será (tomo I, cap. VI):

$$W = \frac{E^2}{R} \times 2c$$

Si las tensiones se desigualan, y tenemos $E + x$ en c circuitos y $E - x$ en los otros c, la pérdida total por efecto Joule, será

$$W' = \frac{(E + \alpha)^2}{R} \times c + \frac{(E - \alpha)^2}{R} c$$

$$= 2\,c\,\frac{E^2}{R} + 2\,c\,\frac{x^2}{R} = W + 2\,c\,\frac{x^2}{R}$$

Como se ve, son siempre preferibles los devanados en los cuales cada uno de los circuitos derivados está influido por todos los campos inductores.

CAPÍTULO VI

DEVANADO EN DISCOS Y ANILLOS

Inducidos de disco. Los devanados para inducidos de disco se emplean menos que los tambores, por lo cual no merecen muy detenido estudio dentro de los límites impuestos a estos tomos.

Para tener idea de los devanados en disco, basta considerar los *esquemas circulares* de todos los ya estudiados no como representaciones convencionales, sino como situación efectiva de los conductores en el plano del disco.

Así, por ejemplo, la figura 14 representará un devanado imbricado en disco para máquina de cuatro campos, con 24 conductores radiales.

La 15 es el mismo disco para máquina que tenga solamente dos campos.

La figura 18 (lámina 1.ª) representa otro en disco, imbricado, doble, con 32 conductores radiales y cuatro campos.

La figura 22 representa otro ondulado en disco con 18 conductores o haces activos radiales para una máquina de dos campos.

En fin, todos los devanados estudiados en este tomo podrán utilizarse para inducidos en disco, sin

más que convertir en circulares todos los esquemas rectangulares que hemos dibujado.

Inducidos de anillo. En el capítulo II dijimos que los devanados en anillo tienen sus conductores apoyados en las caras interior y exterior de la armadura anular.

El devanado en anillo permite utilizar el inducido liso, sin ranuras, lo cual es muy difícil con los tambores. Sin embargo, para la mayor analogía entre los estudios anteriores y los siguientes, supondremos siempre el inducido dentado y hablaremos de ranuras aun cuando en la práctica no existan.

Clasificaremos los devanados de anillo en dos grupos: *en anillo con esquema de tambor* y *en anillo propiamente dicho.*

Estudiemos cada uno de estos grupos.

Anillos con esquema de tambor. PRIMERA HIPÓTESIS. Si el devando tuviera solamente un conductor por ranura, para darle el nombre de *anillo* sería preciso que por cada conductor activo situado en la periferia de la armadura hubiera un conductor inac-

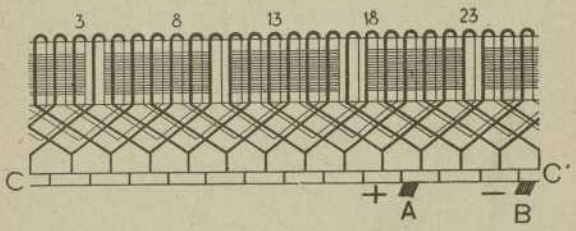

Fig. 46

tivo situado en el interior del anillo. Así considerado, *el anillo es sencillamente un tambor en el cual se han llevado a la cara anterior las conexiones de la cara posterior.*

La figura 46 representa en esquema rectangular un devanado que es exactamente el mismo indicado en la figura 11, esto es, un ondulado simple en serie para una máquina con 26 ranuras. Los pasos están dados por la fórmula

$$y_1 + y_2 = \frac{26 - 2}{2} = 12$$

y se han repartido en

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5$$

Las conexiones de línea fina son las que estarían en la cara posterior, devanando como tambor.

SEGUNDA HIPÓTESIS. Si el devanado tuviera solamente dos conductores por ranura, el inducido en

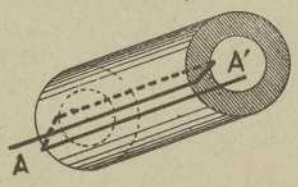

Fig. 47

anillo podría considerarse como tambor, mirando el conjunto de dos conductores $A\ A'$ (figura 47) como un solo conductor y dejando un cabo libre en la cara posterior para hacer las conexiones correspondien-

tes a los distintos devanados imbricados y ondulados que hemos estudiado en todos los capítulos anteriores.

Es evidente que a igualdad de conexiones anteriores y posteriores *el anillo tendrá doble número de conductores*, como se ve fácilmente en la figura 47. Por tanto, es evidente que en este inducido la fuerza electromotriz será doble y la resistencia triple que en un tambor del mismo número de conexiones.

Caso general. Si el devanado debiera tener cualquier número de conductores por ranura, formaremos la madeja en una sola ranura, pasando el conductor por dentro y por fuera de la armadura, alternativamente, hasta conseguir el número total de conductores que se deseen por ranura.

Los cabos para conexiones pueden dejarse los dos en la cara anterior, como se dijo en la primera hipótesis, o pueden dejarse uno en cada cara como en la segunda hipótesis.

Estas consideraciones nos relevarían de estudiar más detenidamente el anillo, si no tuveran estos devanados alguna propiedad especial que permite conexiones no permitidas por el tambor.

Anillos propiamente dichos. En la segunda hipótesis estudiada anteriormente, como en el caso general de los tambores, tenemos los principios y los fines de los conductores o de las madejas, en distinta cara de la armadura; los principios en la cara anterior y los fines en la posterior. Con tal disposición tendremos que unir siempre *principios con principios* en la cara anterior, o *fines con fines* en la cara

posterior. Así lo hemos hecho en los tambores y en los anillos con esquema de tambor.

En la primera hipótesis estudiada antes, lo mismo que en el caso general de anillos, podemos tener en la cara anterior del inducido los principios y los fines de conductores o de madejas, y, por tanto podremos unir *fines con principios*, cosa exclusiva de los anillos propiamente dichos y que permite nuevos devanados según vamos a ver.

Para los devanados en anillo propiamente dichos, convengamos en empalmar siempre el final de una madeja con el principio de otra, y es claro que podremos efectuar las conexiones sin más que conocer el número de madejas que deben saltarse al empalmar una con otra. Dicho de otro modo, en los anillos propiamente dichos se necesita solamente un paso de devanados, el de conexión, y éste viene dado por la fórmula

$$y = \frac{mb \pm c}{p}$$

siendo m el paso polar; b el número de madejas; c la mitad del número de circuitos derivados y p el número de pares de polos.

Anillo Gramme. Para el anillo Gramme se fija $m = 0$ y se igualan el número de circuitos derivados y el de polos, con lo cual se tiene

$$y = \pm 1$$

La figura 48 representa en esquema circular un anillo de 24 madejas, dos polos y dos circuitos derivados. Las madejas resultan formando una espiral

continua, rodeando al núcleo, con derivaciones para el colector en todas las conexiones de madeja a madeja.

Esta disposición es independiente del número de polos inductores, de manera que *un anillo Gramme*

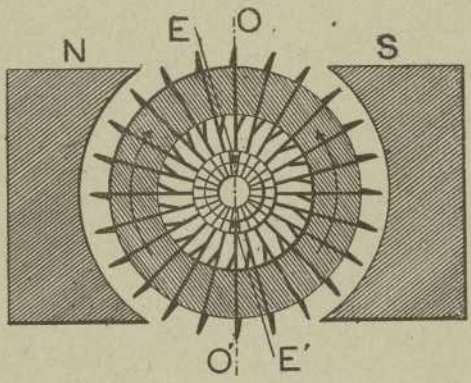

Fig. 48

puede emplearse con cualquier inductor sin más que ponerle tantas escobillas como polos.

Una consecuencia interesante se deduce de aquí. *Una máquina de 2^n polos inductores permite recoger tensiones*

$$V, \frac{V}{2}, \frac{V}{4}, \frac{V}{8} \cdots \frac{V}{2^n}$$

sin más que excitar 2, 4, 8, ... 2^n *polos, simétricamente colocados sobre la corona del inductor.*

Anillos con devanados en paralela. Para las máquinas de gran intensidad y poca tensión es conveniente dividir el devanado de manera que presente

muchos circuitos derivados y pocos conductores en cada circuito.

En la fórmula

$$y = \frac{mb \pm c}{p}$$

haremos, como antes, $m = 0$; pero $c > p$ y escogido de manera que sea entero el cociente

$$y = \pm \frac{c}{p}$$

El devanado será simple cuando y y b sean primos entre sí, y se compondrá de d devanados independientes, cuando y y b tengan un máximo común divisor d.

EJEMPLO 1.° *Devanado en paralela con seis circuitos derivados, para un anillo bipolar con 26 madejas.*

El paso de devanado será

$$y = \pm \frac{3}{1} = \pm 3$$

y como este número es primo con $b = 26$, el devanado será simple.

La tabla de conexión será

Salida de	Entrada de
1	4
4	7
7	10
10	13
13	16
..	..
..	..
..	..

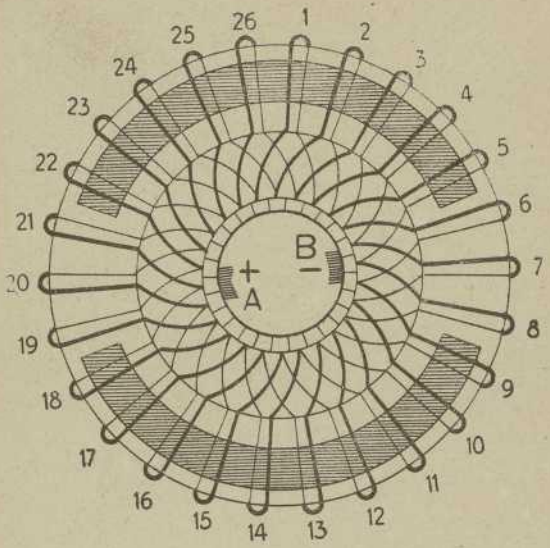

Fig. 49

La figura 49 representa este devanado en esquema circular.

Los seis circuitos derivados entre escobillas, se constituyen así:

$$+A \left\{ \begin{array}{l} 22 - 25 - 2 - 5 \\ 19 - 16 - 13 - 10 - 7 \\ 21 - 24 - 1 - 4 \\ 18 - 15 - 12 - 9 \\ 20 - 23 - 26 - 3 - 6 \\ 17 - 14 - 11 - 8 \end{array} \right\} - B$$

Obsérvese que los circuitos formados por cinco madejas, contienen una situada en región neutra, que son la 7 del segundo circuito y la 20 del quinto.

LÁMINA 7.ª

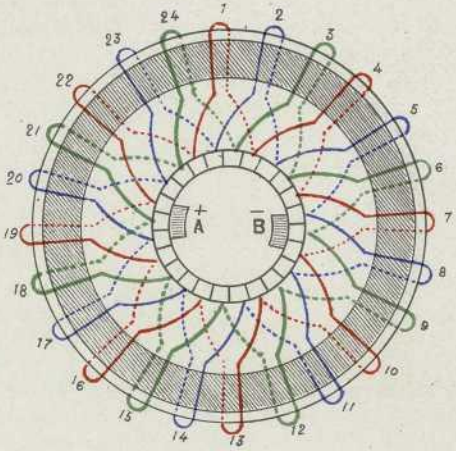

FIG.ª 50

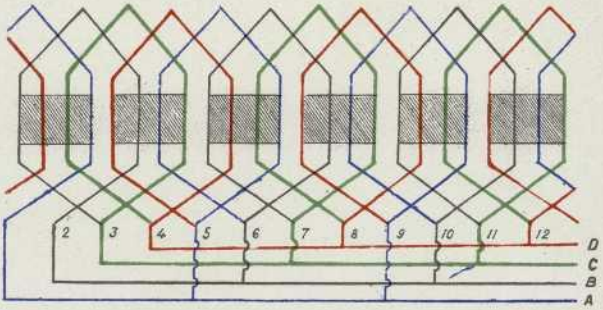

FIG.ª 79

El ancho de escobilla ha de ser igual al doble de una barra del colector.

EJEMPLO 2.° *Devanado en paralela con seis circuitos derivados, para anillo bipolar con 24 madejas.*

El paso de devanado será, como antes,

$$y = \pm \frac{3}{1} = 3$$

pero este número y el $b = 24$ tienen un máximo común divisor 3, luego el devanado se compondrá de tres independientes, que en la figura 50 (lámina 7.ª), se representan con colores distintos. La tabla de conexión para el primero será:

Salida de	Entrada de
1	4
4	7
7	10
10	13
13	16
16	19
19	22
22	1

Los seis circuitos derivados entre escobillas se constituyen así

$$+A \left\{ \begin{array}{l} 22 - 1 - 4 - 7 \\ 19 - 16 - 13 - 10 \\ 21 - 24 - 3 - 6 \\ 18 - 15 - 12 - 9 \\ 20 - 23 - 2 - 5 \\ 17 - 14 - 11 - 8 \end{array} \right\} - B$$

Anillos con devanados en serie. El devanado en serie de los anillos, lo mismo que el de los tambores, tiene solamente dos circuitos derivados, cualquiera que sea el número de polos inductores.

Para aplicar la fórmula general

$$y = \frac{mb \pm c}{p}$$

al caso particular que estudiamos, se hace $m = 1$ y $c = 1$, obteniéndose

$$y = \frac{b \times 1}{p}$$

Este valor debe ser entero y primo con b, luego el devanado en serie no siempre será posible; exige que el número de madejas sea de la forma

$$b = py \mp 1$$

EJEMPLO 3.° *Devanado serie para un anillo hexapolar con 16 madejas.*

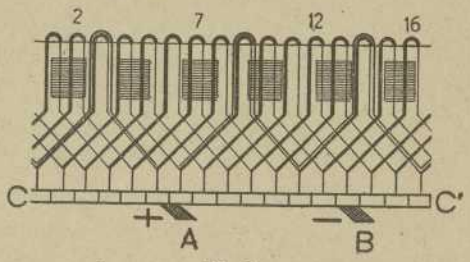

Fig. 51

El paso de devanado será

$$y = \frac{16 - 1}{3} = 5$$

que es, efectivamente, primo con $b = 16$.

La figura 51 representa este devanado en esquema rectangular, siendo $+ A$ y $- B$ sus únicas escobillas.

Devanado en serie cuando b es múltiplo de p. Cuando el número b de madejas es múltiplo del de pares de polos se puede obtener un devanado en serie, aun cuando no se satisfaga la fórmula

$$y = \frac{b \pm 1}{p}$$

Sea

$$\frac{b}{p} = r$$

Se dividen las madejas en p grupos y en cada grupo se numeran

$$1, 2, 3, \ldots \frac{b}{p}$$

se reúnen en serie todas las madejas de igual número y se reúnen luego las series, como si se tratase de madejas sencillas, mediante el paso de devanado

$$y = \pm 1$$

del mismo modo que en los anillos Gramme.

Las derivaciones para el colector se tomarán de las conexiones de serie a serie y no de las conexiones entre madejas de una misma serie, de manera que el número de delgas del colector será

$$l = \frac{b}{p} = r$$

EJEMPLO 4.° *Devanado en serie para un anillo hexapolar con 24 madejas.*

El número 24 no satisface a la fórmula de los devanados en serie, pero en cambio es múltiplo de $p = 3$.

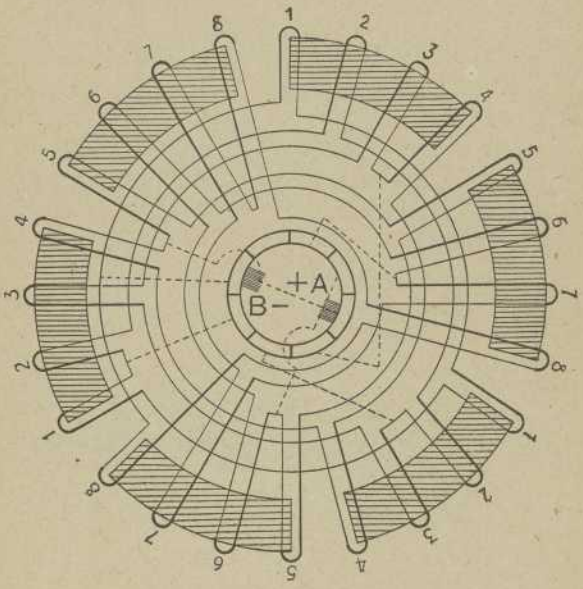

Fig. 52

Dividiremos las madejas (fig. 52) en tres grupos, ya que $p = 3$, y las numeraremos en cada grupo

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

Reuniremos en serie todas las madejas de igual número y empalmaremos las series con el paso de

devanado $y = \pm 1$ esto es, el final de la 1 con el principio de la 2, el final de la 2 con el principio de la 3, etc.

Las únicas escobillas son las $+ A$ y $- B$.

Los circuitos derivados entre escobillas están constituídos así:

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{series } 1, 2, 3 \text{ y } 4 \\ \text{series } 8, 7, 6 \text{ y } 5 \end{array} \right\} - B$$

Multiplicación del número de barras del colector. Con objeto de suavizar la curva de la corriente se

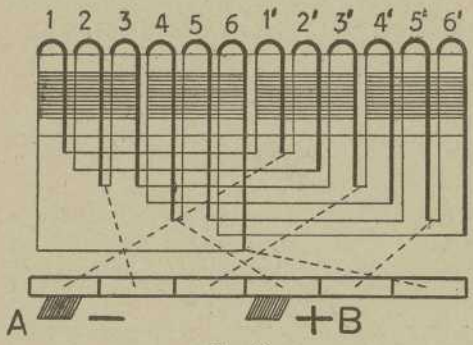

Fig. 53

multiplican las barras del colector reuniendo en corto circuito las del mismo número de orden en cada uno de los grupos formados.

La figura 53 representa el devanado serie para un anillo tetrapolar con 12 madejas.

Se reúnen en serie las madejas 1 y 1', 2 y 2' ... y luego se reúnen las series según el paso

$$y = \pm 1$$

De las conexiones de serie a serie se sacan las derivaciones para las seis barras del colector.

La figura 54 representa el mismo devanado, pero duplicando el número de barras del colector y reuniendo en corto circuito las delgas 1 y 1′, 2 y 2′ ...

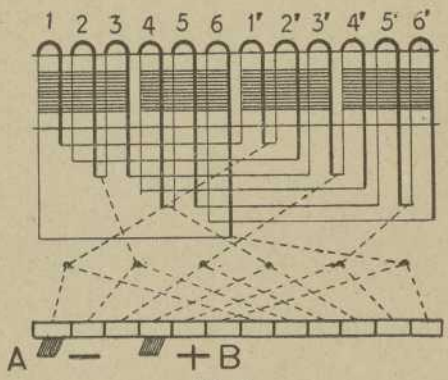

Fig. 54

Devanado en serie de Arnold. En los devanados serie estudiados hasta aquí, quedan en corto circuito durante el momento de la conmutación p madejas en cada escobilla, según es fácil ver en las figuras 51, 53 y 54.

Para aminorar el corto circuito, ideó Arnold un devanado en serie, cuyo paso se escoge mediante la fórmula conocida

$$y = \frac{b \pm 1}{p}$$

pero multiplicando por p el número de delgas del colector, con lo cual el corto circuito se reduce a una sola madeja.

El número de barras del colector será

$$l = pb$$

y se unen unas a otras mediante un paso b.

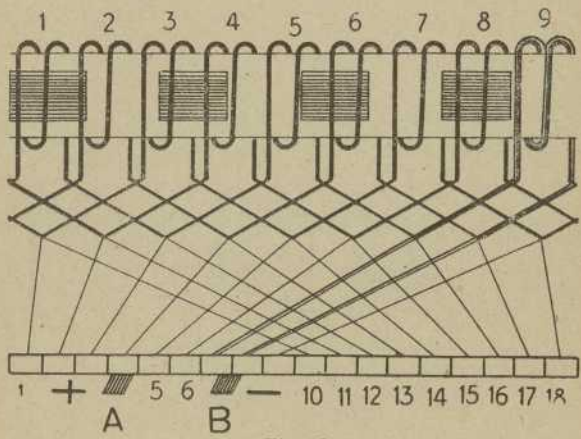

Fig. 55

La figura 55 representa un devanado de esta clase con las condiciones

$$b = 9 \qquad 2p = 4 \qquad y = \frac{9-1}{2} = 4 \qquad l = 9 \times 2 = 18$$

La tabla de conexiones es:

Madejas			Delgas		
1	con	5	3	con	12
5	»	9	7	»	16
9	»	4	2	»	11
4	»	8	6	»	15
8	»	3	1	»	10
3	»	7	5	»	14
7	»	2	9	»	18
2	»	6	4	»	13
6	»	1	8	»	17

Los circuitos derivados entre escobillas están formados así:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 - 6 - 1 - 5 \\ 7 - 3 - 8 - 4 \end{array} \right\}$$

y la madeja 9 queda en corto circuito entre las delgas 7 y 8, como se ve en la figura, mediante el trazo doble.

El mismo resultado se obtiene con la disposición de la figura 56, en la cual el principio y fin de una

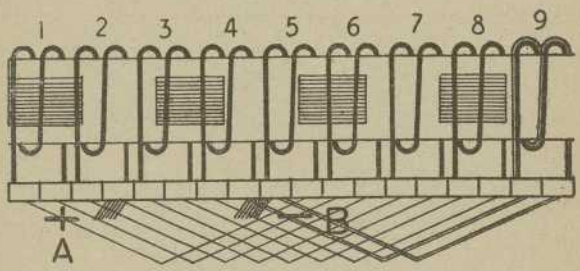

Fig. 56

madeja se unen a dos delgas consecutivas del colector, resultando las madejas aparentemente desconexionadas entre sí, pero en realidad conexionadas a través de las barras del colector.

La disposición de la figura 55 se llama de *conexiones transversales* y la de la 56 de *conexiones interiores*.

Devanados Arnold en series paralelas. Éstos obedecen a la fórmula

$$y = \frac{b \pm c}{p}$$

pudiendo ser c menor, igual o mayor que p.

El devanado resultará simple o múltiple, según que y y b sean primos o tengan un máximo común divisor d.

El número de madejas debe ser de la forma

$$b = py \pm c;$$

pero si solamente se cumple esta condición, pueden ser desiguales los circuitos derivados, dando lugar a corrientes interiores que calienten el devanado. Para que los 2c circuitos derivados tengan el mismo número k de madejas, es preciso que

$$b = 2kc,$$

con lo cual la fórmula del paso se convierte en

$$y = \frac{b \pm c}{p} = \frac{2\,kc \pm c}{p} = \frac{(2\,k \pm 1)\,c}{p}$$

Fijaremos, pues, el paso, como *cociente exacto de un múltiplo impar de* c, *dividido por* p, *y el valor, o valores, de* k, *nos determinará el total de madejas* b = 2kc.

Las fórmulas anteriores hacen ver que y y b tendrán como máximo común divisor c, por lo menos, luego serán siempre devanados múltiples.

En el caso particular de ser $c = p$, tendremos

$$y = 2\,k + 1 \qquad b = 2\,kp$$

Los números y y b serán primos y el devanado simple.

Si prescindimos de la igualdad de circuitos derivados, para el caso de $c = p$, las fórmulas generales nos darán

$$y = \frac{b}{p} \pm 1 \qquad b = p\,(y \pm 1)$$

EJEMPLO 5.° *Devanado en series paralelas para un anillo hexapolar con 23 madejas y cuatro circuitos derivados.*

El número 23 satisface la fórmula de devanado

$$y = \frac{b - c}{p} = \frac{23 - 2}{3} = 7$$

resultando y y p primos, luego el devanado será simple.

La figura 57 lo representa.

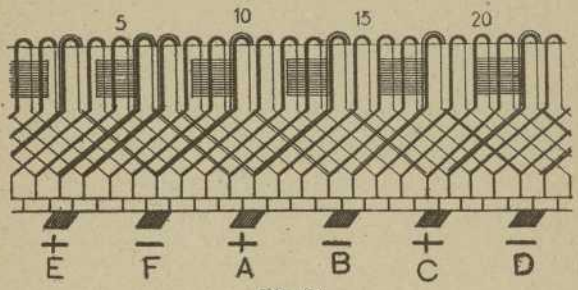

Fig. 57

En ella es fácil ver que los cuatro circuitos que se ofrecen al paso de la corriente se constituyen de este modo:

$+ A - 13 - 20 - 4 - 11 - B$
$+ C - 15 - 8 - 1 - 17 - B$
$+ C - 21 - 5 - 12 - 19 - D$
$+ E - 23 - 16 - 9 - 2 - D$

Existen, además, los cortos circuitos

$- B - 18 - D - 3 - F - 10 - B$
$+ A - 14 - 22 - 7 + A$
$+ A - 6 + E$

En este devanado, el número de circuitos derivados entre escobillas positivas y negativas es menor que el de polos, $2c < 2p$.

EJEMPLO 6.° *Devanado en series paralelas para un anillo hexapolar con seis circuitos derivados.*

Para fijar el número de madejas, que no se cita

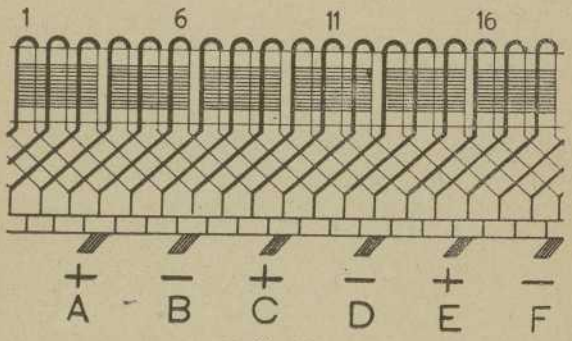

Fig. 58

en el enunciado, tomaremos las fórmulas especiales del caso $c = p$

$$y = 2k \pm 1 \qquad b = 2kp$$

y fijando, por ejemplo, $k = 3$, tendremos

$$y = 2 \times 3 \pm 1 = \begin{cases} 7 \\ 5 \end{cases} \qquad b = 2 \times 3 \times 3 = 18$$

Adoptemos el paso $y = 5$.
La figura 58 representa este devanado.

Los seis circuitos que se ofrecen a la corriente, quedan constituídos así:

$$\begin{array}{l} + A - 6 - 11 - 16 — F \\ + A - 1 - 14 - 9 — B \\ + C - 12 - 17 - 4 — B \\ + C - 7 - 2 - 15 — D \\ + E - 18 - 5 - 10 — D \\ + E - 13 - 8 - 3 — F \end{array}$$

El devanado es simple con $c = p$.

EJEMPLO 7.° *Devanado en series paralelas para un anillo hexapolar con ocho circuitos derivados.*

Tomemos las fórmulas que dan iguales circuitos derivados

$$y = \frac{(2k \pm 1)c}{p} \qquad b = 2kc$$

y fijando $k = 4$ tendremos

$$y = \frac{(8 - 1)4}{3} = 12 \qquad b = 32$$

La figura 59 (lámina 5.ª) representa este devanado en esquema rectangular.

Se ven cuatro devanados distintos, como debía esperarse, ya que $b = 32$ e $y = 12$ tienen como máximo común divisor 4.

Los ocho circuitos derivados son:

$$\begin{array}{l} + A - 12 - 24 - 4 - 16 — B \\ + A - 32 - 20 - 8 - 28 — B \\ + A - 11 - 23 - 3 - 15 — B \\ + A - 31 - 19 - 7 - 27 — B \\ + C - 1 - 13 - 25 - 5 — D \\ + C - 21 - 9 - 29 - 17 — D \\ + C - 2 - 14 - 26 - 6 — D \\ + C - 22 - 10 - 30 - 18 — D \end{array}$$

CAPÍTULO VII

DEVANADOS A MANO

En muchas aplicaciones industriales y domésticas (máquinas de coser, ventiladores, etc.) se emplean motores eléctricos de corriente continua muy pequeños, cuyos inducidos se devanan a mano. Generalmente, esos motores son de dos polos, por lo que el paso polar del enrollamiento ha de ser igual a un diámetro.

Devanado. En la figura 59 *a* se representa la disposición de los conductores en la parte posterior del inducido, que sólo se diferencia de la parte anterior o lado del colector, en que en ésta termina el enrollamiento con las conexiones al colector, como puede verse en la figura 59 *c*.

Si se devanara el hilo de un modo continuo, empezando por una ranura y continuando con las siguientes, resultaría el devanado deformado. A fin de que queden los hilos bien centrados, con un espacio mínimo y buena presentación, se devanan de tal forma que se vayan cruzando las madejas, siguiendo el orden que se indica en la figura 59 *a*.

Cuando se ha llenado la capa inferior, se devana la capa superior, cuidando de que las madejas vayan

cruzándose de igual modo, como se procedió con la capa inferior.

Conexiones. Para efectuar las conexiones del enrollamiento al colector, una vez terminada la operación de devanar, se procede del modo siguiente:

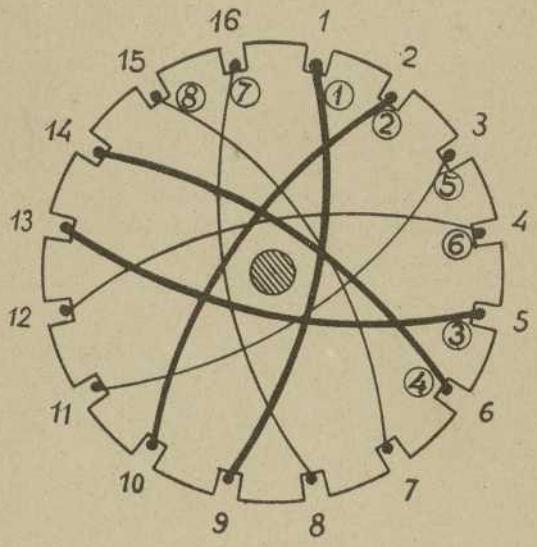

Fig. 59 *a*

Se toma el principio de una madeja, sea, por ejemplo, el extremo correspondiente a la madeja de la parte superior de la ranura 1 de la figura 59 *b*, señalado con trazo seguido grueso, y se suelda a la delga 1 del colector. En esta delga también se suelda el extremo de madeja que antecede a la que se ha toma-

do correspondiente a la parte inferior de la ranura; pero, tomando el fin de madeja con objeto de que las fuerzas electromotrices se sumen; este extremo está

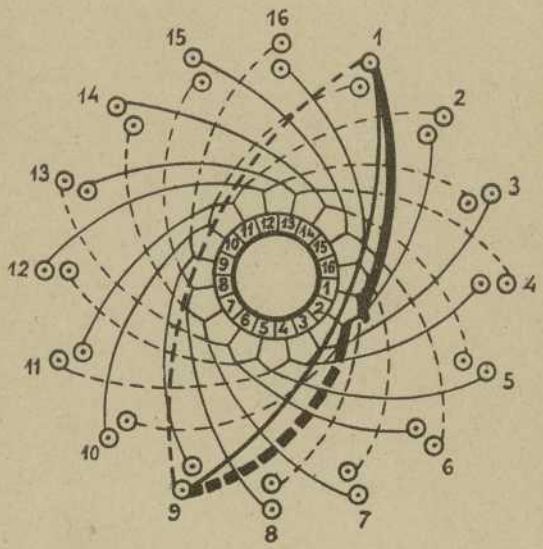

Fig. 59 *b*

en la parte inferior de la ranura 8 de la figura 59 *b*. Se continúa la operación tomando el principio de madeja inferior de la ranura 2, y junto con el fin de madeja superior situado en la ranura 9 se sueldan en la delga 2 del colector. Este fin de madeja (dibujado con trazos cortos y gruesos) es precisamente el que corresponde a la madeja cuya continuidad se indica (en rojo). Así, pues, esta madeja queda conectada entre las delgas 1 - 2. En serie con ella,

empieza la madeja situada en la parte inferior de las ranuras 2 - 10, y así, sucesivamente, se ve que van conectándose todos los extremos libres de las distintas madejas, quedando el enrollamiento cerrado sobre sí mismo. Deben procurarse tomar las

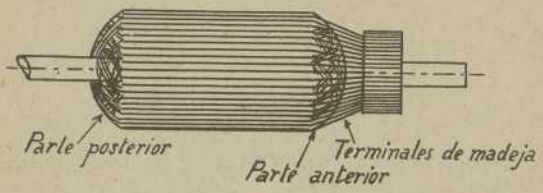

Fig. 59 *c*

conexiones de modo que haya alternativamente una de la capa superior y otra de la capa inferior, pues así queda el devanado más simétrico.

Colector. El colector va montado sobre el eje, algo distanciado del paquete de chapas, para permitir la colocación de la parte anterior del devanado, según se representa en la figura 59 *c*.

Ranuras. Las ranuras del núcleo del inducido son, por lo general, cilíndricas, con una abertura que permite la colocación de los hilos cómodamente. Dis-

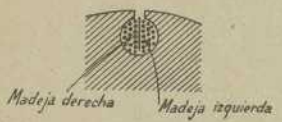

Fig. 59 *d*

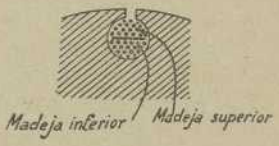

Fig. 59 *e*

poniendo el devanado en dos capas, resultan las bobinas del interior con algo más de autoinducción, razón por la cual hemos recomendado también disponerlas alternadamente en el colector. Este inconveniente se solventa devanando una madeja al lado de otra, según se representa en la figura 59 *e*, en lugar de una sobre otra, como indica la figura 59 *d*.

SEGUNDA PARTE

MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

CAPÍTULO VIII

GENERADORES

Preliminares. El devanado de las máquinas de corriente alterna es siempre más sencillo que el de las máquinas de corriente continua.

En el caso general de las máquinas generatrices o *alternadores*, el devanado se reduce a un número par de conductores, unidos todos en serie, formando madejas colocadas simétricamente respecto a los polos inductores.

En los alternadores monofásicos hay un solo devanado y solamente como casos excepcionales se ponen más de uno, agrupados en paralela. Tal disposición estará indicada para máquinas de gran intensidad y poca tensión.

El devanado de los polifásicos es sencillamente una repetición del monofásico, tantas veces cuantas fases tenga.

El devanado de los alternadores es generalmente abierto. Sólo en el caso particular de generadores

dobles de alterna y continua, o en el caso de transformadores rotatorios, se emplean devanados cerrados, en todo igual a los estudiados en la primera parte de este tomo.

En el rotor de los alternomotores se emplean devanados cerrados.

Recordemos que el inducido de los alternadores puede ser fijo, teniendo en su interior el inductor giratorio, o puede ser móvil, como en las dínamos, teniendo a su alrededor el inductor fijo. El estudio de los devanados es independiente por completo de la situación relativa de inductor e inducido, pero nos referimos siempre al tipo de inducido exterior, fijo, sin anillos colectores.

Respecto a la colocación de los conductores, pueden clasificarse los inducidos, según sabemos, en anillos y tambores. Supondremos siempre que el inducido es de tambor, con ranuras para contener las madejas o conductores.

Finalmente, para la teoría, supondremos también que cada ranura contiene un solo conductor. Ya sabemos cómo se pasa del devanado teórico con un conductor por ranura, al devanado práctico con varios conductores por ranura (página 28).

Esquemas de devanado. Como en las máquinas de corriente continua, emplearemos para los alternadores dos clases de representaciones esquemáticas, el *esquema circular* y el *esquema rectangular*.

En el esquema circular se supone el inducido visto de frente por cualquiera de sus caras, con lo cual se verán en verdadera forma y posición las conexiones de los conductores, apoyadas en esta cara. Supondremos también que los conductores activos si-

tuados en la cara anterior del inducido se doblan como para converger en el centro de la cara anterior, según se ve en la figura 60. Las generatrices de la superficie cilíndrica siguen a los conductores en su movimiento de giro hacia la cara anterior, de manera que los campos polares se reducirán a trapecios circulares dibujados en el plano del esquema. Por fin, supondremos que las conexiones de la cara posterior

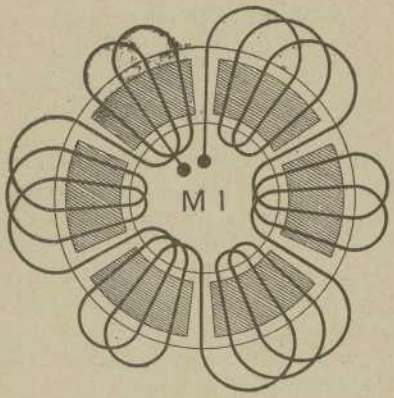

Fig. 60

giran primero hasta ponerse en prolongación de los conductores activos, y luego siguen a éstos en su movimiento hasta colocarse en la cara anterior, que es el plano del esquema.

Si en lugar de ser inducido exterior y fijo fuese inducido interior y móvil, supondríamos los giros de los conductores y conexiones iguales a los supuestos para las máquinas de corriente continua y obtendríamos la misma figura 60. Se ve, como había-

mos dicho, que el estudio del devanadó es independiente del tipo de inducido.

Para conseguir el esquema rectangular, supondremos que las conexiones de ambas caras giran hasta colocarse en prolongación de los conductores activos, y cuando alcanzan esta posición se corta el cilindro por una de sus generatrices y se abre hasta que coincida con el plano del esquema.

Conexión de las fases en los devanados polifásicos. Un alternador de q fases rara vez presenta $2q$ bornes de empalme, como correspondería a los principios y fines de sus q devanados, si éstos fuesen independientes.

Al estudiar las corrientes polifásicas en el tomo II, ya dijimos que las q fases de un alternador se empalman *en polígono* o *en estrella*. La conexión en polígono consiste en formar con las q fases un polígono cerrado, sacando las corrientes de sus q vértices. La conexión en estrella consiste en reunir los principios de las q fases en un punto, llamado *centro* o *neutro*, y sacar las corrientes de las q finales. Alguna vez se establecen comunicaciones con el punto neutro, y, en tal caso, el alternador tiene $p + 1$ bornes.

Madejas cortas y largas. Cuando el número de secciones inducidas es el mismo que el de polos inductores, como sucede en la figura 61, las madejas se llaman *cortas*, y las fuerzas electromotrices que nacen en ellas son alternativamente de sentidos contrarios, según se indica con las flechas exteriores. Las conexiones de sección a sección deben también invertirse, como se ve en la figura, entrando en las

madejas sucesivas una vez por el principio y otra por el fin del devanado Es fácil comprobar en la figura que formada así la serie de las madejas resultan sumadas todas las fuerzas electromotrices que nacen en ellas.

Cuando el número de secciones es mitad del de polos inductores, como sucede en la figura 62, las madejas se llaman *largas*, y las fuerzas electromo-

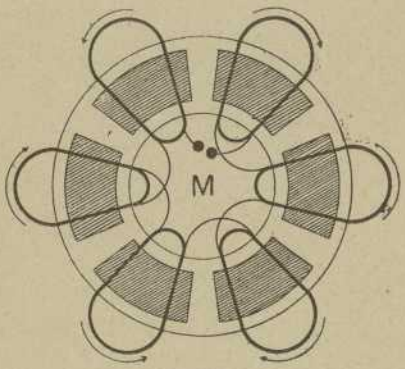

Fig. 61

trices nacidas son siempre del mismo sentido. No hay entonces necesidad de invertir las conexiones de sección a sección para que resulten sumadas las tensiones.

Secciones con más de una madeja. Cuando todos los conductores que deben formar una sección inducida se reúnen para constituir una sola madeja, el devanado se llama *concentrado*. Es claro que un devanado concentrado con madejas largas no exigirá

más que una ranura por polo, según se ve en la figura 62.

Para la mejor distribución del flujo inductor se prefiere formar varias madejas con los conductores correspondientes a una misma sección y entonces el devanado se llama *diseminado*. Estos exigen mayor número de ranuras.

Las varias madejas que forman una sección indu-

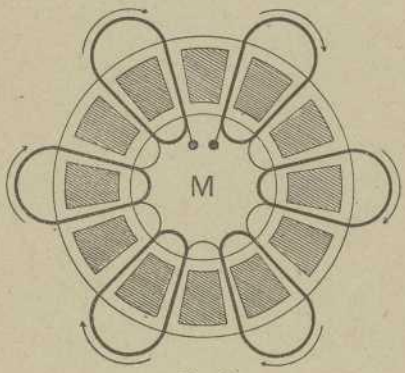

Fig. 62

cida en un devanado diseminado, pueden ser interiores unas a otras, como sucede en la figura 63, o pueden ser exteriores en parte, como en la figura 60. Las madejas interiores tienen forzosamente que ser desiguales, cortarán desigual cantidad de flujo inductor y darán lugar a fuerzas electromotrices diferentes, y ésto puede ser causa de corrientes interiores, y es, por tanto, un inconveniente del devanado en esta forma.

Las madejas exteriores de la figura 60 no evitan

por completo aquel inconveniente, pues si bien son iguales, en cambio, sus fuerzas electromotrices no son concordantes, puesto que no pasan a la vez por frente a los polos inductores. A este devanado se le llama *imbricado*, por su parecido con los imbricados de corriente continua.

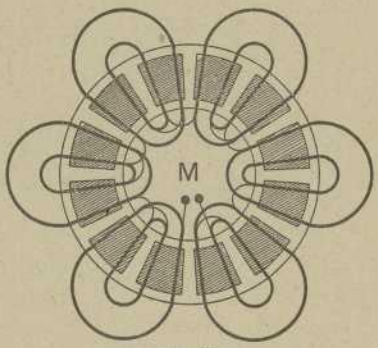

Fig. 63

Madejas separadas y madejas superpuestas. En los devanados polifásicos las madejas correspondientes a fases distintas pueden ser por completo independientes, es decir, sin que se crucen los elementos de una con los elementos de otra, como en la figura 64 (lámina 8.ª), y se llaman entonces madejas *separadas*. Otras veces, una sección de una fase tiene en su interior los costados correspondientes a secciones de otras fases, como se ve en la figura 65 (lámina 8.ª), y en tal caso se dice que las madejas están *superpuestas*.

Este último procedimiento es el más empleado en los devanados modernos, porque procura una co-

rriente alterna más aproximada a la senoidal que hemos considerado en la teoría para el establecimiento de definiciones y fórmulas (tomo II, capítulo II).

Devanados monofásicos. El devanado monofásico más sencillo es el llamado *unidentario*, es decir,

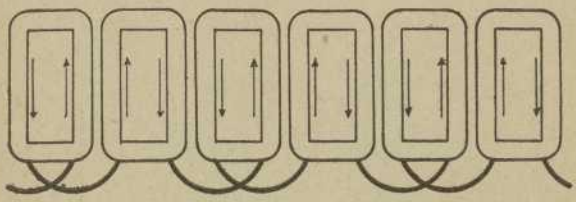

Fig. 66

con un solo diente por polo o con una sola ranura por polo. Éste es el representado en la figura 66 mediante esquema rectangular. En cada ranura se alojan dos costados de dos madejas, es decir, $2n$ conductores, siendo n las vueltas por sección. El devanado resulta en dos capas y de madejas cortas.

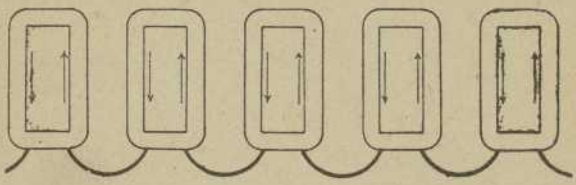

Fig. 67

La tensión que nace en un devanado es proporcional al número de conductores activos que lo forman; luego conseguiremos el mismo efecto que en el

devanado anterior, con la disposición representada en la figura 67. La armadura es la misma; el número de conductores que debe alojar una ranura es también el mismo $2n$; pero se reduce a la mitad el número de secciones y duplican las vueltas de cada

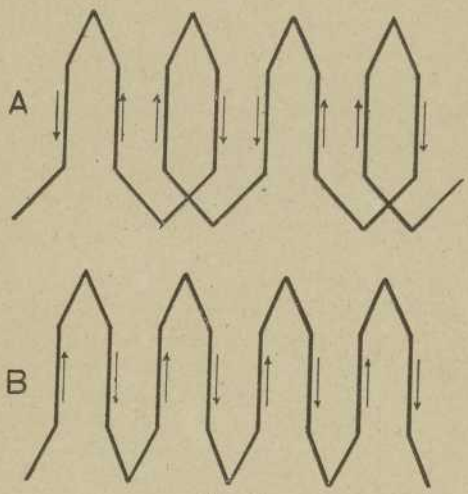

Fig. 63

una $2\,n$. El devanado tiene una sola capa y las madejas son largas.

Este devanado tiene grandes ventajas en los inducidos polifásicos.

El devanado que contiene una madeja por polo inductor se llama *monotropo*, y el que contiene solamente media madeja inducida por polo inductor se le llama *hemitropo*.

Cuando se trata de devanados monofásicos, no

tienen ventaja especial ninguna de las dos formas; pero cuando se trata de devanados polifásicos, es siempre más conveniente el hemitropo.

El esquema rectangular de la figura 67 se corresponde con el circular de la figura 62 y el de la 66 con el de la 61.

Si consideramos las madejas con una sola vuelta de conductor, como hemos supuesto en los preliminares y como es realmente en algunos casos, los devanados representados en las dos figuras anteriores se reducirán a los esquemas *A* y *D* de la figura 68.

Estos devanados se efectúan en la práctica con barras de cobre en lugar de hilos, y están indicados para máquinas de gran intensidad y baja tensión.

Devanados diseminados. El primer grado de diseminación de devanado monofásico es, evidentemente, el caso de dos ranuras por polo.

La disposición *A* de la figura 69 consiste en colocar una serie de madejas alojadas en las ranuras de orden par, y otra serie alojadas en las de orden impar. Las dos series se reúnen mediante una conexión *a b* que va de la última ranura impar a la primera par.

La disposición *B* es la misma *A*, con la única variación de que el devanado se recorre en los dos sentidos, creciente y decreciente, según la numeración de las ranuras. Después de recorrer en orden creciente las ranuras de orden impar, se recorre en orden decreciente las ranuras de orden par, y para ello se unen la última impar con la penúltima par.

Existen muy diversas maneras de aprovechar las dos ranuras por polo.

En las disposiciones *C*, *D* y *E* cada sección indu-

LÁMINA 8.ª

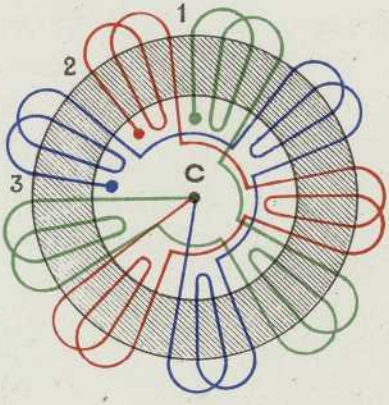

FIG.ª 64

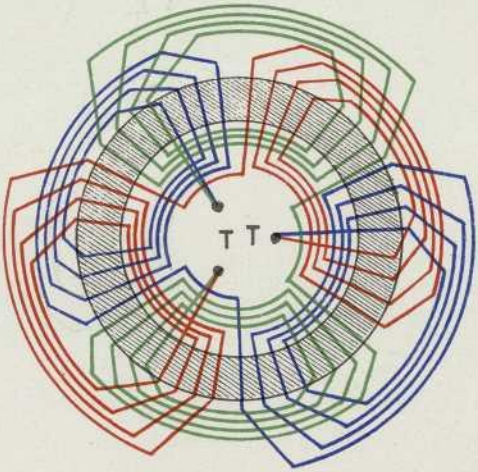

FIG.ª 65

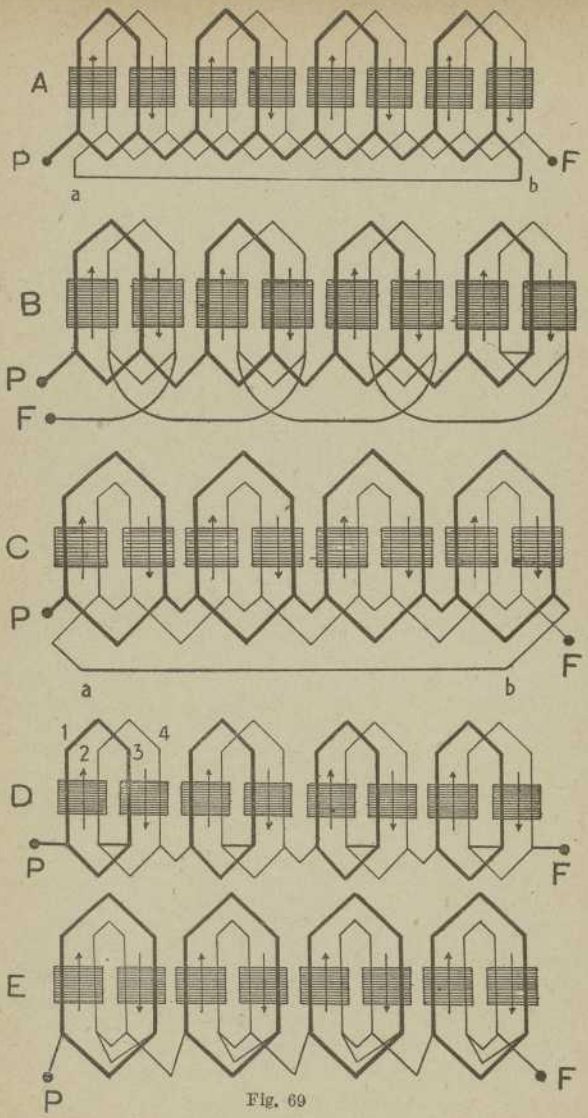

Fig. 69

cida se compone de dos madejas. En la *C* las madejas son la una interior a la otra, y, por tanto, desiguales. Se forma una serie con las madejas grandes y otra

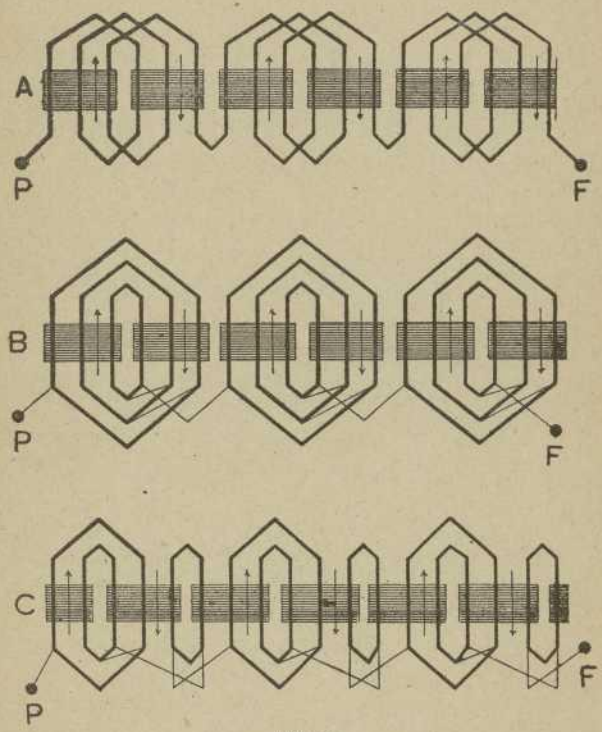

Fig. 70

con las pequeñas, reuniendo luego las dos series mediante la conexión *a b* que se ve en la figura.

La disposición *D* es parecida a las *A* y *B*, con la

única diferencia de unir todas las madejas en una sola serie, de manera que una madeja de ranuras impares 1-3, se une a su inmediata de ranuras pares 2-4.

Finalmente, la disposición *E*, es la misma *C*, pero reuniendo todas las madejas en una sola serie, para lo cual cada madeja grande se empalma con la pequeña que tiene dentro.

Cuando el inducido presenta tres ranuras por polo, el devanado debe tener la mitad de secciones inducidas que polos inductores, con objeto de que cada sección disponga de un número par de ranuras, o bien, las secciones inductoras han de ser desiguales.

La disposición *A* de la figura 70 tiene cada una de sus secciones inducidas formada por tres madejas iguales, resultando, por tanto, un devanado imbricado.

La disposición *B* contiene tres madejas desiguales por sección inducida.

La disposición *C* tiene desiguales las secciones inducidas, formadas alternativamente por dos y por una madeja.

Cuando el inducido presente cuatro ranuras por polo, puede devanarse con tantas secciones como polos, o con la mitad de secciones que polos.

En la figura 71, *A*, se ve un devanado con tantas secciones como polos y cada sección formada por dos madejas desiguales. En *B* hay la mitad de secciones que polos y desiguales entre sí las cuatro madejas que forman una sección. *C* y *D* son imbricados, el primero con tantas secciones como polos, y el segundo con la mitad de secciones que polos.

Creemos innecesario seguir analizando devanados de inducidos con mayor número de ranuras por polo.

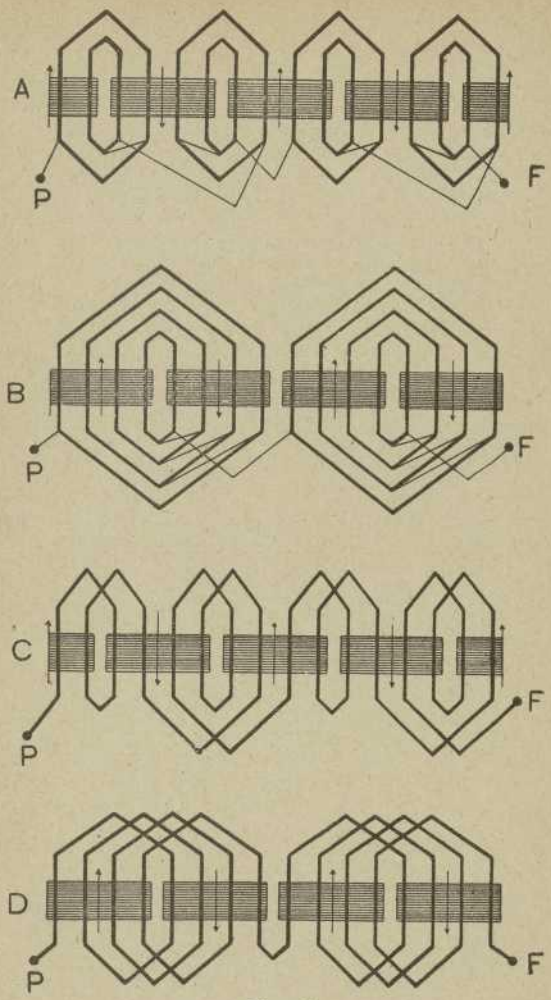

Fig:. 71

Devanados semisimétricos. Se llama así a los devanados que tienen un número fraccionario de ranuras por polo. Generalmente se determinan por el

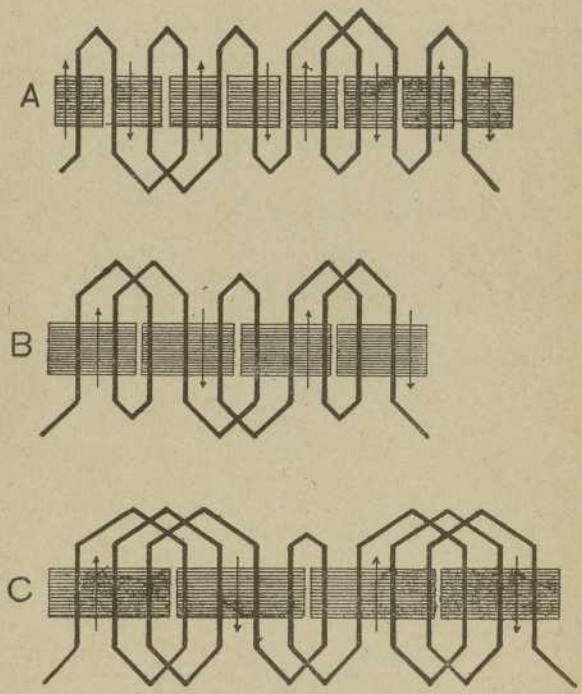

Fig. 72

número de ranuras que corresponden a cuatro polos. Así, por ejemplo, las 1'5 ranuras por polo corresponden a seis ranuras por cuatro polos; las 2'5 por polo, con 10 por cuatro polos, etc.

En la figura 72, *A*, se ve la distribución de madejas que puede adoptarse para 1'5 ranuras por polo. En *B*, la de 2'5 ranuras por polo, y en *C* la de 3'5.

Devanados de dínamo. Un devanado de los estudiados para dínamos de corriente continua puede emplearse para alternador de corriente monofásica, sin más que dividirlo en tantas partes iguales como circuitos derivados debía tener, sacando derivacio-

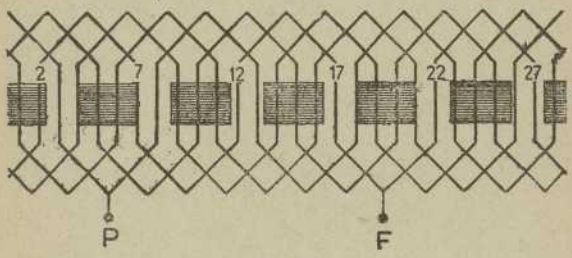

Fig. 73

nes de estos puntos de división y reuniendo en un terminal las derivaciones de orden par y en otro las de orden impar.

La figura 73 representa el mismo devanado de la figura 10, transformado para alternador monofásico. Se ha suprimido el colector de barras, y como se trata de un devanado serie ($2c = 2$), ha bastado dividirlo en dos partes iguales y sacar las derivaciones *P* y *F*, que serán los terminales del inducido.

La figura 74 representa el mismo devanado de la 38, transformado para alternador monofásico. Teniendo cuatro circuitos derivados, se han sacado

cuatro derivaciones equidistantes, reuniendo las M y N en un terminal A, y las dos intermedias P, Q, en el otro terminal B.

Es claro que con esta disposición los $2c$ circuitos derivados quedan conexionados en paralela entre los terminados del devanado.

A estos devanados se les llama *distributivos.*

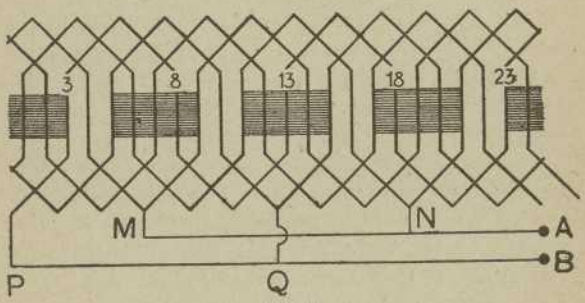

Fig. 74

Devanados difásicos. *Un devanado difásico es sencillamente la superposición de dos monofásicos en un mismo inducido, con la condición de que sus elementos homólogos estén desviados el uno con respecto al otro la mitad de un paso polar.* La fuerza electromotriz inducida en una espira de hilo sufre las variaciones correspondientes a un período completo en el tiempo empleado para pasar de un polo norte a otro polo norte inmediato. Si el doble paso polar corresponde a un período completo, el medio paso polar corresponderá al cuarto de período, y éste será el fasaje correspondiente a las dos corrientes del doble devanado que hemos descrito.

El devanado difásico más sencillo es el que tiene

solamente *una ranura por polo y por fase*. En esta rapodemos colocar dos costados de madeja con n conductores cada uno, o un solo costado con $2n$ conductores. La primera solución es la representada en la figura 75 (lámina 9.ª), A, y la segunda en B. Los dos devanados correspondientes a las dos fases del alternador son iguales y se representan en distinto color para mayor claridad.

En la solución A, cada uno de los devanados se compone de tantas madejas como polos, luego las conexiones de madeja a madeja necesitarán las inversiones de que hablamos al tratar de los monofásicos y que se ven bien en la figura.

En la solución F cada uno de los devanados componentes tienen un número de madejas mitad del de polos, luego no será preciso invertir las conexiones para que resulten sumadas en serie las fuerzas electromotrices de las diversas madejas.

Si se tratase de devanados hechos con barra de cobre, es decir, con una sola vuelta por madeja, el de la figura A se convertiría en el C y el de la B pasaría a ser el D.

En la figura 76 (lámina 10.ª) se representan tres devanados difásicos, diseminados, formándose de tres madejas cada sección inductora. En el A, son iguales las tres madejas de una sección, y, por tanto, el devanado es imbricado. En el B son desiguales las madejas componentes de cada sección e interiores una a otra.

En el A cada fase contiene tantas secciones como polos inductores. En el B el número de secciones inducidas es mitad del de polos.

A y B son devanados de fases superpuestas, mientras C es de fases separadas.

LÁMINA 9.ª

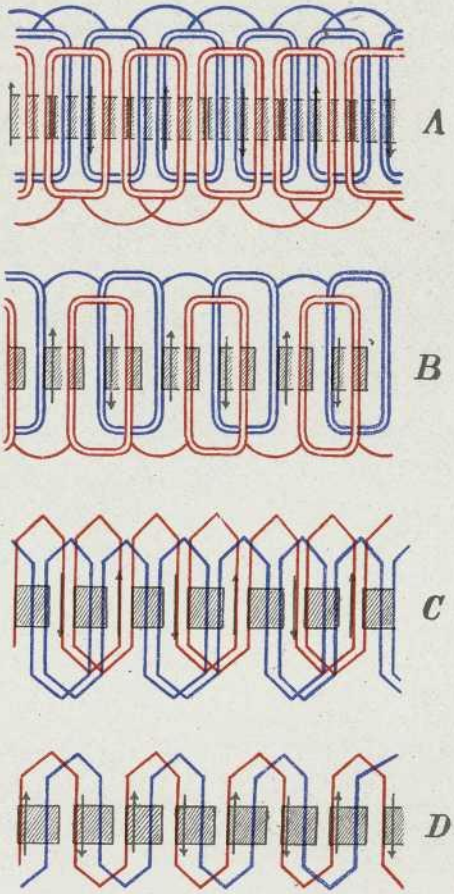

FIG.ª 75

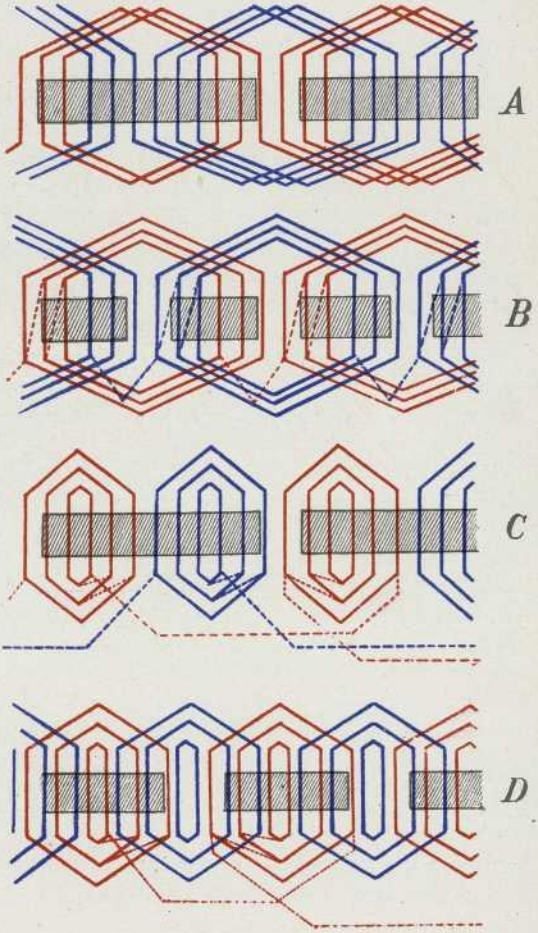

FIG.ª 76

Los tres devanados *A*, *B* y *C* corresponden a seis ranuras por polo y por fase. Estos devanados podrían realizarse también con inducidos que tuvieran solamente tres ranuras por polo y por fase; pero devanando en dos capas para alojar en cada ranura dos costados de madejas correspondientes a una misma fase.

La disposición *D* es la misma *C*, pero reduciendo a tres el número de ranuras por polo y por fase.

Al tratar de devanados monofásicos hemos visto que uno de corriente continua podía utilizarse para alternador monofásico. Cuando estudiemos los trifásicos llegaremos a una conclusión análoga. Pero no hay posibilidad de convertir un devanado de corriente continua en difásico con un desfasaje de un cuarto de período. En general, *un devanado de continua podrá convertirse en polifásico completo, de* q *fases unidas en polígono; pero nunca en polifásicos incompletos ni conexionados en estrella.* El difásico de un cuarto de período es un tetrafásico incompleto.

Devanados trifásicos. *Un devanado trifásico es una superposición de tres monofásicos en un mismo inducido, con la condición de que tres elementos homólogos de los devanados estén desviados cada uno con relación a los colaterales, el tercio o el sexto de un doble paso polar.*

Si el desvío es un sexto del doble paso polar, es evidente que el desfasaje de las corrientes será un sexto de período, y, por tanto, el sistema será incompleto, resultando medio hexafásico en lugar de un trifásico.

Es fácil convertir este hexafásico incompleto en trifásico completo. En efecto, recordando la repre-

sentación geométrica que dimos de las corrientes alternas (tomo II, capítulo II) es evidente que el medio sistema exafásico con un desfasaje de un sexto de período, estará representado por los tres vectores *O A*, *O B* y *O C* (fig. 77). Si en la fase de en medio *O B*, invertimos las conexiones, es decir, tomamos el principio del devanado, por fin, y el fin por principio, es claro que cambiará el sentido del vector *O B* y se convertirá en *O B'*, y en tal caso,

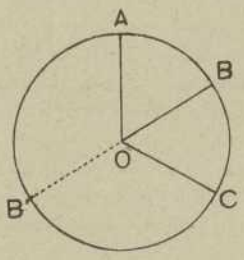

Fig. 77

los vectores *O A*, *O B'* y *O C* corresponderán a un sistema trifásico completo, con un desfasaje de un tercio de período.

El procedimiento, como se ve, no puede ser más sencillo.

El devanado representado en la figura 78 (lámina 11.ª), *A*, es un trifásico, construído con barras, atendiendo a las indicaciones anteriores. En efecto, tres barras consecutivas, las 1, 2 y 3, por ejemplo, tienen una separación relativa de un sexto del doble paso polar, luego las corrientes que nacen en ellas tendrán también un desfasaje de un sexto de período; pero dada la disposición de la segunda fase, de-

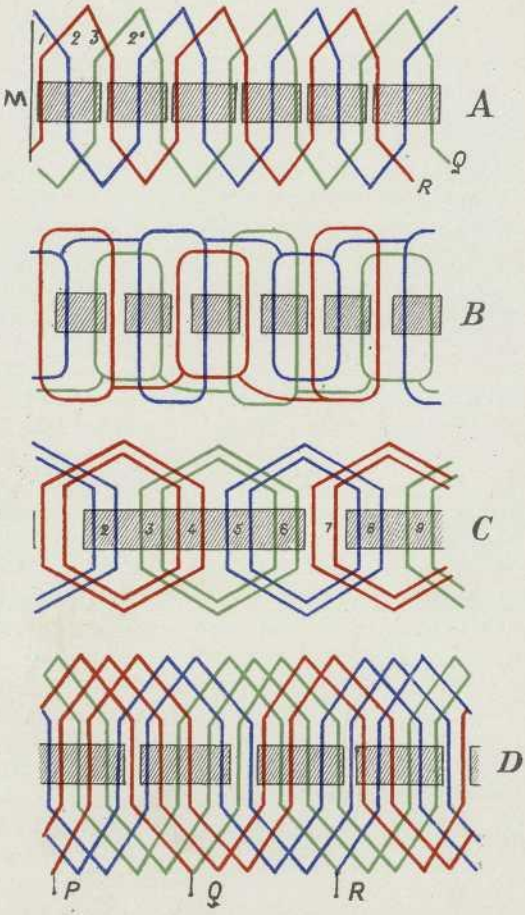

FIG.ª 78

ben considerarse elementos homólogos de los devanados 1, 3, 2′, cuyas posiciones relativas corresponden a un desfasaje de un tercio de período.

Cada uno de los devanados tiene la mitad de secciones que polos.

Los tres devanados están unidos en estrellas me diante el hilo *M*, siendo *P*, *Q*, *R*, los terminales.

La disposición *B* es un devanado para ser efectuado con madejas. A estas madejas se les dan dos tamaños distintos, para evitar confusiones de representación esquemática y hasta de construcción práctica. Cada una de las fases constituye un devanado hemitropo, esto es, con la mitad de secciones que polos, por lo cual, las conexiones de sección son directas, sin inversiones.

El enrollamiento, en su conjunto, es de fases superpuestas, puesto que entre dos costados de una madeja, se alojan costados de madejas que pertenecen a las otras dos fases.

Obsérvese que una fase cualquiera, la roja, por ejemplo, tiene sus madejas consecutivas, alternativamente grandes y pequeñas, de manera que la distancia entre dos madejas iguales corresponde a la de cuatro polos inductores. Para que el enrollamiento sea por completo simétrico, se necesita que el número de polos inductores sea divisble por 4.

La disposición *C* de la misma figura representa un enrollamiento trifásico para ser ejecutado con madejas iguales. Cada fase tiene tantas madejas como polos inductores, por lo cual, sus conexiones deben tener las inversiones necesarias para la suma en serie de sus fuerzas electromotrices. El conjunto es también de fases superpuestas.

Finalmente, la disposición *D* es un devanado de

corriente continua, convertido en trifásico con conexión en triángulo.

Como devanado de corriente continua, es ondulado, tetrapolar, en serie, con pasos iguales, correspondiendo a la fórmula

$$y_1 = y_2 = \frac{30 - 2}{4} = 7$$

Se ha suprimido el colector de delgas y se sacan tres derivaciones P, Q, R, equidistantes, que corresponderán a los vértices del triángulo y serán los terminales del conductor. Cada fase contiene 10 conductores.

En general, para convertir un devanado de corriente continua en polifásico de q fases, se toma un número N de conductores, que sea múltiplo de qc ($2c$ es el número de circuitos derivados en el enrollamiento de continua). Se sacan qc derivaciones equidistantes del devanado y se forman q grupos de c derivaciones cada uno, reunidas en un solo conductor que serán los terminales del devanado.

EJEMPLO. *Proyectar un devanado de corriente continua, con seis circuitos derivados, que podamos convertirlo en tetrafásico conexionado en polígono.*

Tenemos $c = 3$ y $q = 4$, luego el número de conductores debe ser múltiplo de $cq = 12$. Fijémoslo en $N = 24$.

Supongamos que la máquina tiene seis polos y podremos proyectar un devanado imbricado, mediante la fórmula conocida (capítulo III).

$$y_1 - y_2 = \frac{2c}{p} = \frac{6}{3} = 2$$

Teniendo en cuenta que se tienen 24 conductores y seis polos, podemos fijar los pasos componentes en

$$y_1 = 7 \qquad y_2 = 5.$$

La figura 79 (lámina 7.ª) representa este devanado.

Para convertirlo en tetrafásico debemos sacar $cq = 12$ derivaciones equidistantes, uniendo a un terminal A las 1, 5, 9; al terminal B las 2, 6, 10; al C las 3, 7, 11, y al D las 4, 8, 12.

Como se ve, resulta un devanado polifásico del mismo tipo que el A de la figura 78 (lámina 11.ª), con la sola diferencia de tener las secciones de cada fase unidas en cantidad entre dos terminales, en lugar de tenerlas unidas en serie.

CAPÍTULO IX

MOTORES ASÍNCRONOS Y TRANSFORMADORES DE FASES

Campos giratorios. En el tomo II, capítulo V, al estudiar los campos giratorios, decíamos que tienen por objeto *combinar campos electromagnéticos alternos convenientemente escogidos en posición y fase, para que nos den como resultante una intensidad magnética variable en posición.* El campo giratorio ideal para utilizarlo en motores asíncronos y transformadores estáticos de fases es aquel cuya intensidad permanece constante en magnitud y gira uniformemente, es decir, el *campo circular uniformemente giratorio.*

Se clasifican los campos giratorios atendiendo al número de sus polos. Si la resultante magnética es única, tendrá un solo polo norte y un solo polo sur, llamándose el campo *bipolar.* Si la combinación de los campos electromagnéticos alternos da lugar a p intensidades resultantes simultáneas, contando con los dos polos de cada resultante, diremos que el campo giratorio tiene $2p$ polos.

Un campo giratorio tiene una velocidad tanto menor cuanto mayor sea el número de sus polos y tanto mayor cuanto mayor es la frecuencia de las corrientes que ali-

mentan los campos componentes. De manera que llamando f a la frecuencia de las corrientes y n al número de revoluciones por segundo, tendremos

$$n = \frac{f}{p} \qquad [1]$$

Si se quiere expresar n en *vueltas por minuto,* tendremos

$$n = \frac{60\,f}{p} \qquad [2]$$

Para crear un campo giratorio de $2p$ polos, mediante corrientes de q fases, se divide la circunferencia en r segmentos iguales y en cada uno de ellos se colocan equidistantes las q secciones correspondientes a las fases distintas de la corriente.

De aquí se deduce que para crear un campo giratorio de $2p$ polos, mediante corrientes de q fases, se necesita un número de secciones.

$$b = pq \qquad [3]$$

Las fórmulas [2] y [3] son suficientes para resolver todos los problemas referentes a velocidades de los campos giratorios.

EJEMPLO 1.° *Un motor trifásico que tiene seis secciones se alimenta con corrientes de 50 períodos, ¿cuántas revoluciones dará su campo inductor?*

La fórmula [3] nos dice

$$6 = p \times 3 \quad \text{o} \quad p = 2$$

y con este valor de p, la fórmula [2] nos dará

$$n = \frac{60 \times 50}{2} = 1{,}500$$

EJEMPLO 2.° *¿Cuántas secciones debe tener el inductor de un motor trifásico para que dé 480 vueltas con corrientes de 40 períodos?*

La fórmula [2] nos dará

$$480 = \frac{60 \times 40}{p} \quad \text{o} \quad p = \frac{2{,}400}{480} = 5$$

y con este valor de p la [3] nos dice

$$b = 5 \times 3 = 15$$

Motores asíncronos de campo giratorio. En el tomo VII hemos estudiado al detalle estos alternomotores. Recordaremos aquí lo preciso de ellos, para estudiar los devanados de sus órganos fijo y móvil.

El inductor es, generalmente, exterior al inducido, y en lugar de presentar polos salientes, como en las máquinas de corriente continua, y como hemos dibujado al estudiar los campos giratorios, se forma de secciones aplanadas, teniendo el mismo aspecto que los inducidos de los alternadores. Se forma de una serie de discos anulares provistos de ranuras en su circunferencia interior, en las cuales se alojan los conductores, devanados convenientemente según los polos y fases que debe presentar.

El inducido, generalmente interior y móvil, tiene un núcleo formado de hojas y dentado u horadado como los inducidos de corriente continua.

El devanado ha de estar formado por una serie de circuitos cerrados, para que en ellos nazca la fuerza electromotriz inducida. Los diversos circuitos pueden ser completamente independientes unos de otros, formados por madejas cerradas, o bien pueden tener

comunes sus extremos, formando una conexión en estrella.

Para motores pequeños, cada circuito o brazo de la estrella contiene un solo conductor, y el devanado puede estar formado por varillas o hilos de cobre alojados en las ranuras y soldados por sus extremos a dos anillos, que los reúnen a todos en corto circuito, ofreciendo el conjunto un aspecto de jaula de ardilla o linterna de husillos (fig. 80).

Para motores cuya potencia sea superior a 10 ca-

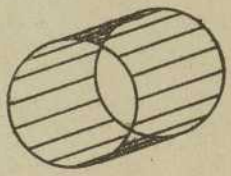

Fig. 80

ballos, el inducido se devana generalmente con tres fases unidas en estrella, y presentando un número de polos igual al del inductor.

Los extremos libres de la estrella se hacen comunicar con tres anillos colectores, montados sobre el eje y en los cuales se apoyan frotadores de carbón. Estos frotadores pueden unir las tres fases en corto circuito o a través de resistencias, pero siempre formando circuitos cerrados sobre sí mismos, como en el caso de los inducidos en jaula.

Como siempre, llamaremos rotor y estator a los órganos móvil y fijo, respectivamente.

Devanado de los inductores. Los inductores de los motores asíncronos se devanan en una de las tres

formas siguientes: devanado de alternador, devanado en anillo y devanado en serie.

Devanado de alternador. Se llama así porque es en un todo análogo al devanado del inducido de los alternadores que hemos estudiado en el capítulo anterior. Es el devanado más empleado para los motores asíncronos.

Los haces activos de las secciones inductoras se alojan en las ranuras practicadas en la superficie interior de un tambor. Cada una de las secciones inductoras puede alojarse en un número cualquiera $2r$ de ranuras, que generalmente no baja de 4 ni pasa de 12.

Se fija el número r de ranuras por polo y por fase, y tendremos también el número total de ranuras del inducido.

$$R = 2\,pqr$$

Para producir $2p$, polos magnéticos, con corrientes de q fases, se necesitan

$$b = pq$$

secciones inductoras; luego a cada sección le corresponderá un número de ranuras

$$\frac{R}{b} = \frac{2\,pqr}{pq} = 2\,r$$

y en estas ranuras se alojarán r madejas.

Resulta que el número r de madejas por sección inductora es igual al número de ranuras, por polo y por fase, que habíamos escogido.

Teniendo, cada sección inductora una sola rama por polo, el devanado resultará de *madejas largas*

(capítulo VIII). Cuando convenga devanar en *madejas cortas* bastará reducir a la mitad el número de polos, cruzando las conexiones de sección a sección.

Todas las fórmulas anteriores son aplicables a los devanados polifásicos de madejas cortas sin más que substituir p por $2p$.

Las madejas correspondientes a una sección y las diversas secciones correspondientes a una fase se devanan y empalman lo mismo que los inducidos de los alternadores polifásicos, que hemos estudiado en el capítulo anterior.

Las secciones pueden ser imbricadas (fig. 64, lámina 8.ª), o concéntricas (fig. 65), resultando en el primer caso independientes las secciones inductoras distintas y en el segundo superpuestas unas a otras. Los devanados resultantes se llaman *de fases separadas o de fases superpuestas.*

La figura 64 representa con los convenios establecidos en el capítulo anterior, un devanado de las siguientes condiciones:

Polos magnéticos del campo....	$2p = 6$	
Fases de la corriente.....	$q = 3$	
Secciones inductoras.....	$b = pq$	$= 9$
Ranuras por polo y fase.....	$r = 2$	
Ranuras en total.....	$R = 2\,pqr$	$= 36$
Ranuras por sección inductora..	$2\,r = 4$	
Madejas por sección inductora...	$r = 2$	

El inductor de la figura 65 tiene:

Polos magnéticos del campo....	$2p = 4$	
Fases de la corriente.....	$q = 3$	
Secciones inductoras.....	$b = pq$	$= 6$
Ranuras por polo y fase.....	$r = 4$	
Ranuras en total.....	$R = 2\,pqr$	$= 48$
Ranuras por sección inductora...	$2\,r = 8$	
Madejas por sección inductora...	$r = 4$	

Los devanados correspondientes a las diversas fases se empalman entre sí, dentro o fuera de la máquina, según el procedimiento de arranque que se emplee. Si el arranque se efectúa modificando la corriente inductora, los circuitos serán completamente independientes dentro de la máquina, y cada fase presentará borne de entrada y borne de salida. Si el arranque se regula modificando la corriente inducida, los enrollamientos del inductor se empalman dentro de la máquina, en estrella o en polígono, según el voltaje de que se disponga y las condiciones del motor que se construya.

Algunas veces, las distintas secciones inductoras, correspondientes a una misma fase se empalman en cantidad o en series paralelas, en lugar de dejarlas en tensión, como se indica en las figuras aludidas. De este modo, el voltaje exigido por la máquina es menor, pero hay el peligro de que las corrientes magnetizantes sean desiguales y el campo pierda la necesaria simetría.

Devanado en anillo. En los devanados en anillo cada espira tiene uno de sus costados en el interior del tambor y otro en el exterior. Es evidente que el flujo creado por una espira así dispuesta tiende a circular por el hierro del estator constituyendo un imán toral. Para que el flujo salga del inductor y penetre en el inducido, es preciso montar en cada sección dos madejas en oposición, como las *A* y *B* de la figura 82 (lámina 12.ª), por tanto, en los anillos, cada sección inductora deberá partirse en dos mitades, montando éstas en oposición.

La figura 82 (lámina 12) representa el mismo inductor de la figura 81 (lámina 12), devanado ahora en anillo.

LÁMINA 12.ª

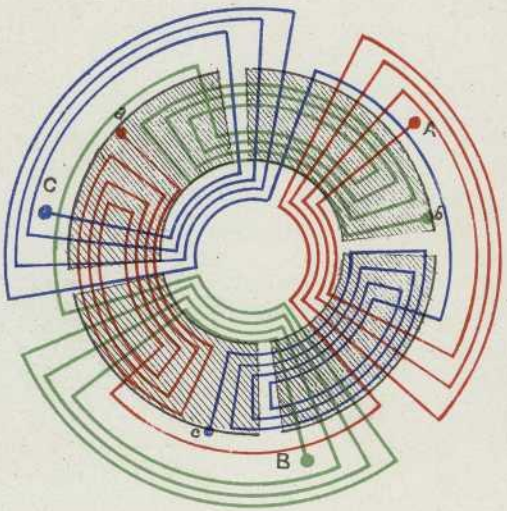

FIG.ª 81

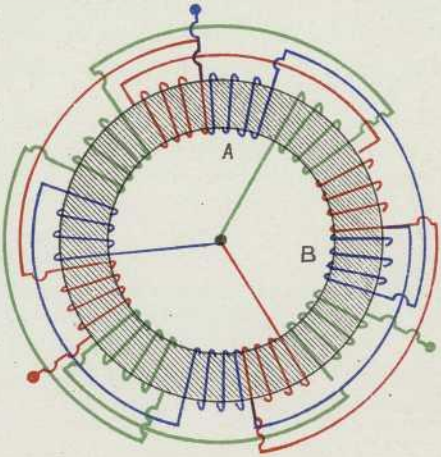

FIG.ª 82

La manera de proyectar estos devanados es la misma que para los tambores, y únicamente debe notarse que los conductores del tambor están substituídos por espiras en el anillo, lo cual supone mayor gasto de cobre, mayor resistencia y mayor efecto de autoinducción.

Los devanados en anillo son más empleados en los inducidos que en los inductores.

Devanado en serie. Este devanado está constituído por uno ondulado simple en serie, lo mismo que los empleados en los inducidos de corriente continua, proyectando para tantos polos inductores como deba tener el campo magnético giratorio. Este devanado se abre en tres puntos distantes entre sí 120°, para constituir un inductor trifásico, o en cuatro puntos distantes 90° para tener el inductor difásico.

Para proyectar el devanado emplearemos la fórmula conocida (capítulo IV)

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p}$$

con todas las condiciones de posibilidad establecidas en el capítulo II, y procurando que el número N de conductores sea un múltiplo del número de fases, para que todas las ramas del inductor sean igualmente largas.

Es evidente que para cualesquiera valores de N y p no siempre es posible este devanado.

Al tratar de los generadores en el capítulo anterior, hemos estudiado este devanado con suficiente detalle para no necesitar aquí mayor detención.

Devanado del inducido. El inducido de los motores asíncronos se devana con una libertad no admitida en ninguna de las máquinas estudiadas.

El número de fases es completamente independiente de las corrientes empleadas en el inductor.

El número de conductores inducidos ha de ser múltiplo del de fases, para que los brazos de la estrella resulten iguales; pero puede no ser múltiplo del de polos, en cuyo caso el número de conductores por polo y por fase será fraccionario.

Los devanados para inducidos pueden clasificarse en devanados cerrados en corto circuito y devanados abiertos. Los primeros se emplean exclusivamente para motores pequeños, y los segundos para motores de potencias superiores a 5 ó 6 caballos.

Devanados cerrados. Los dos tipos de devanados cerrados son: el de jaula de ardilla y el de madejas cerradas en corto circuito.

El devanado en jaula de ardilla (fig. 80) consiste, como hemos dicho, en una serie de barras de cobre unidas por sus extremos mediante dos anillos del mismo metal. En cada una de las barras nace una fuerza electromotriz de inducción, y esta fuerza electromotriz sufre un ciclo magnético completo durante el tiempo que la barra emplea en pasar de un polo a otro polo igual del campo giratorio, y en el conjunto de la jaula tendremos un sistema completo de corrientes polifásicas, con tantas fases como barras y unidas todas en estrella.

El devanado de madejas en corto circuito (fig. 83) se diferencia del anterior, en que los conductores en lugar de estar todos unidos mediante los anillos,

lo están dos a dos mediante conexiones iguales en ambas caras del inducido. Para determinar la longitud de las conexiones, se tendrá en cuenta que los conductores unidos deben estar en todo momento

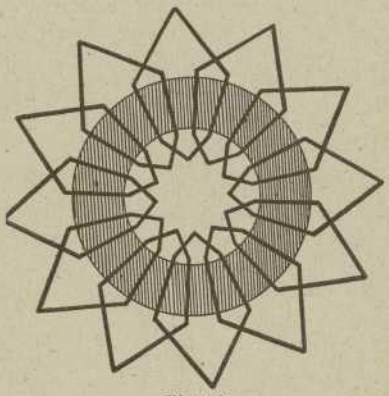

Fig. 83

sometidos a la acción de polos contrarios del campo giratorio.

Las conexiones se hacen muchas veces con metales menos conductores que el cobre.

Devanados abiertos. Para motores de media o gran potencia se devanan los inducidos como los de las generatrices polifásicas. Generalmente son *trifásicos en estrella*, uniendo los extremos de las tres fases dentro del inducido para formar el centro de la estrella y llevando los otros tres extremos a tres anillos colectores para facilitar la puesta en marcha.

Estos devanados trifásicos se proyectan para el número de polos del campo giratorio. Sus secciones

inducidas pueden tener de una a tres madejas y éstas pueden ser cortas o largas. El número de secciones inducidas es generalmente mitad del número de polos del campo.

La figura 84 (lámina 13.ª), representa un devanado de esta clase, con las siguientes condiciones:

Número de polos del campo giratorio.	$2p = 6$
Ranuras por polo y por fase. . . .	$r = 3$
Número de fases del inducido. . .	$q = 3$
Número total de ranuras	$R = 2pqr = 54$
Madejas por sección inducida. . .	$r = 3$
Ranuras por sección inducida. . .	$2r = 6$

La figura 85 (lámina 13.ª), representa otro devanado de esta clase, siendo

Números de polos del campo. . .	$2p = 8$
Ranuras por polo y fase.	$r = 2$
Número de fases del inducido. . .	$q = 3$
Número total de ranuras.	$R = 2pqr = 48$
Madejas por sección inducida. . .	$r = 2$
Ranuras por sección inducida. . .	$2r = 4$

Otro tipo de devanado abierto para inducidos es el *devanado en serie*, análogo al estudiado para los inductores. Como allí, le proyectaremos mediante la fórmula

$$y_1 + y_2 = \frac{N \pm 2}{p}$$

procurando que N sea un múltiplo de 3, y una vez conseguido, lo partiremos en tres puntos distantes entre sí 120°. Los principios de las tres secciones los uniremos dentro del inducido para formar el centro de la estrella, y los extremos los llevaremos a los anillos colectores.

LÁMINA 13.ª

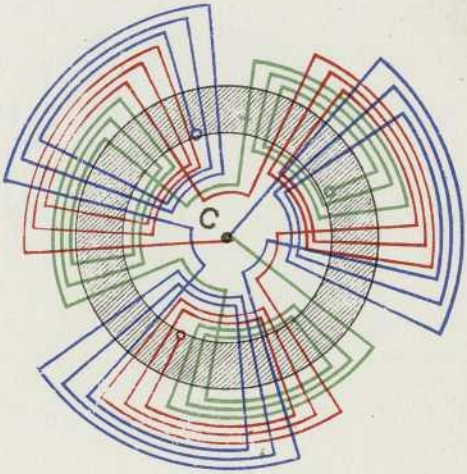

FIG.ª 84

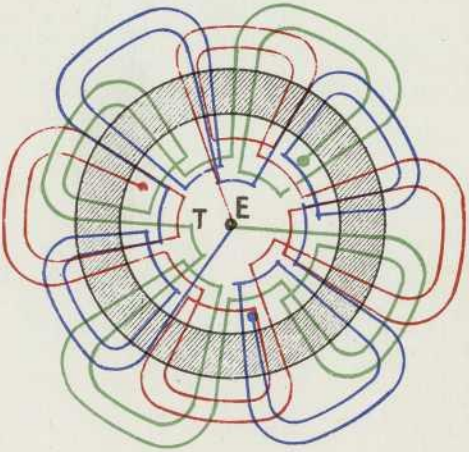

FIG.ª 85

LÁMINA 14.ª

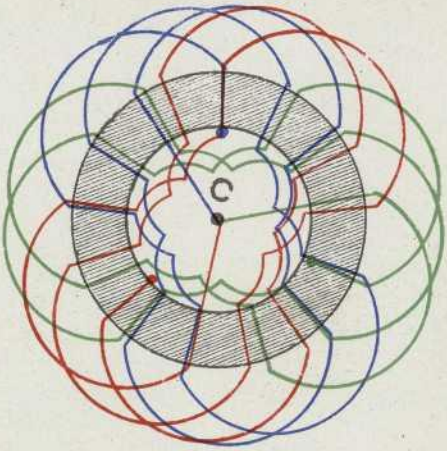

FIG.ª 86

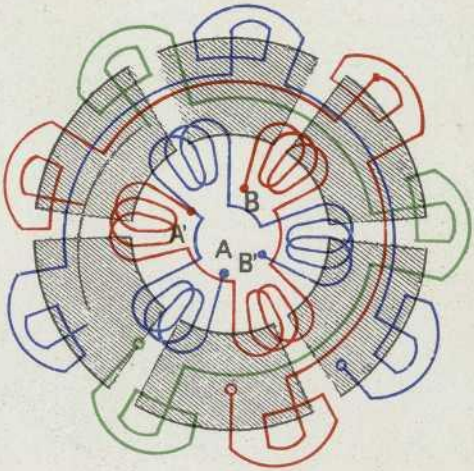

FIG.ª 87

La figura 86 (lámina 14.ª), representa un devanado de esta clase, con las siguientes condiciones:

Número de haces activos.....	$N = 30$
Polos del campo giratorio.	$2p = 4$
Pasos anterior y posterior.....	$\frac{N-2}{2p} = 7$
Número de fases.....	$q = 3$
Conductores por polo y fase. ...	$\frac{N}{2pq} = \frac{5}{2}$

Pueden también devanarse los inducidos *en anillo* de un modo igual al estudiado para los inductores en la figura 82.

Transformadores de núcleo toral. El estudio de campos giratorios proporciona un procedimiento general para transformar un sistema de corrientes polifásicas en otro de distinto número de fases.

La transformación es estática, y como tal, de buen rendimiento, permitiendo cambiar la tensión a la vez que se cambia el número de fases.

El campo giratorio, tal como le conocemos, produce el mismo efecto que el inductor de los alternadores, pero sin movimiento mecánico alguno.

Hagamos actuar este campo giratorio sobre un inducido de alternador que presente el mismo número de polos y podremos recoger corrientes cuyo número de fases sea cualquiera, completamente independientes del número de fases de las corrientes inductoras.

Las secciones inductoras e inducidas pueden ser aplanadas como las de los inducidos de alternadores, y con esta disposición podremos situar los dos devanados en las caras contiguas de dos tambores

concéntricos. Como estos dos tambores no han de tener movimiento relativo alguno, el entrehierro podrá hacerse tan pequeño como se quiera y aun suprimirse por completo, como si los dos tambores se hubieran soldado por la dentadura.

En resumen, daremos al núcleo la forma de corona circular, con agujeros en su línea media para alojar en ellos las secciones de los dos devanados, inductor e inducido.

La figura 87 (lámina 14.ª) representa un transformador de esta clase, mediante los esquemas circulares de los dos devanados. El circuito exterior es el inductor, y está formado por nueve secciones inductoras, alimentadas por corrientes trifásicas, creando un campo giratorio cuyo número de pares de polos será

$$p = \frac{b}{q} = \frac{9}{3} = 3$$

En la figura se indican los seis polos.

El circuito interior es el inducido. Es difásico y hemitropo en cada una de sus fases.

En los puntos A, B y A', B' podremos recoger dos corrientes con un desfasaje de medio período, es decir, en oposición de fase.

Empalmando los puntos B y A' recogeremos en A y B' una sola corriente alterna simple y tendremos, por tanto, una transformación de trifásicas en monofásica.

Con los números de conductores escogidos para los dos devanados, inductor e inducido, se ve que será suficiente una sola serie de agujeros en el núcleo, ya que los dos circuitos contienen en total 36 haces activos cada uno.

CAPÍTULO X

SECCIÓN DE LOS CONDUCTORES

Método de cálculo. La sección de los conductores para los devanados se calcula siempre por el método de *densidad de corriente*, que consiste en fijar los amperios δ que pueden circular por milímetro cuadrado de cobre, según el efecto Joule que queramos tolerar, y determinar la sección s del conductor desnudo por la fórmula

$$s = \frac{I}{\delta}$$

La densidad de corriente δ se escoge entre 0'5 y 3 amperios por milímetro cuadrado. Adoptando una densidad grande se economizará cobre en el devanado; pero la máquina se calentará mucho y tendrá mal rendimiento. Con densidades pequeñas se obtienen máquinas con buen rendimiento y baja temperatura, aunque caras.

En máquinas de poca intensidad (conductores finos) se pueden escoger densidades próximas a la máxima; en cambio, cuanto mayor sea la intensidad (conductores gruesos) más pequeña conviene tomar la densidad de corriente, puesto que los con-

ductores de mucha sección tienen la superficie de enfriamiento relativamente pequeña.

En efecto, la sección de los conductores crece como el cuadrado del diámetro ($\pi d^2 : 4$) mientras la superficie de enfriamiento sólo aumenta en proporción sencilla al diámetro (πd); es decir, que al cuadruplicar la sección de un conductor, su superficie de enfriamiento sólo se duplica y, por tanto, a igualdad de densidad será mayor su temperatura.

Intensidades. En la fórmula anterior I representa la *intensidad por circuito* derivado o la *intensidad por fase*, según se trate de devanados de corriente continua o de alterna.

Si una máquina de corriente continua tiene $2c$ circuitos derivados y su corriente total es I', a cada circuito le corresponderá una intensidad

$$I = \frac{I'}{2\,c}$$

Así, por ejemplo, una dínamo de 28 amperios con cuatro circuitos derivados, la sección de sus conductores debe calcularse para

$$I = \frac{28}{4} = 7 \text{ amperios}$$

y fijando en 2 amperios la densidad de corriente, resulta una sección de hilo

$$s = \frac{I}{\delta} = \frac{7}{2} = 3'5 \text{ mm.}^2$$

En generadores y motores monofásicos la corriente de la fase única será la total de la má-

quina, dada por la siguiente fórmula (tomo II, capítulo IV):

$$I = \frac{W}{V \cos \varphi}$$

En máquinas trifásicas, la intensidad total que da la fórmula (tomo II, capítulo IV)

$$I = \frac{W}{1'732\, V \cos \varphi}$$

es igual a la intensidad por fase si están esas conectadas a la estrella, y cuando la conexión es en triángulo, la intensidad por fase es sólo 1 : 1,732 del valor anterior (tomo II, capítulo IV), o también la que directamente da la siguiente fórmula:

$$I = \frac{W}{3\, V \cos \varphi}$$

Cuando las fases tienen varias secciones unidas en cantidad, la sección resultante se reparte entre todas las ramas de una misma fase.

Forma de los conductores. Calculada la sección del conductor, se busca su diámetro

$$d = 1'13 \sqrt{s}$$

Si este diámetro no pasa de 4 mm. se adopta para el conductor la forma circular. Cuando el diámetro del hilo resulta mayor de 4 mm. no puede aceptarse la forma circular de un solo conductor, que resultaría de difícil moldeo; en tal caso se reparte la

sección total en dos, tres o más conductores unidos en paralelo, siempre los suficientes para que tengan poco diámetro y resulten de fácil moldear.

Si el número de conductores necesarios para formar la sección total pasa de cuatro, se les enrolla en espiral en forma de cable flexible.

En secciones grandes con pocos conductores por ranura, se emplean éstos en forma de barra rectangular de lados desiguales, con el lado menor en el sentido de la conexión.

FIN DEL TOMO IX

ÍNDICE

PRIMERA PARTE

Máquinas de corriente continua

SEGUNDA PARTE

Máquinas de corriente alterna

ÍNDICE DE LÁMINAS

DE GENERADORES Y MOTORES ELECTRICOS