

ARROLLAMIENTOS

Norberto A. Lemozy

1 INTRODUCCIÓN

La teoría clásica de las máquinas eléctricas está basada en el estudio de las interacciones entre fuerzas magnetomotrices, éstas son las dan lugar al campo magnético dentro de la máquina, a las tensiones inducidas, y a la denominada *cupla electromagnética* en las máquinas rotativas. Esas fuerzas magnetomotrices están producidas por las corrientes que circulan por los distintos arrollamientos.

En este capítulo se hará una descripción de los distintos tipos de arrollamientos utilizados en las máquinas eléctricas, haciendo especial hincapié en los denominados *distribuidos*, que son los más difíciles de concebir.

2 FORMAS CONSTRUCTIVAS Y TIPOS DE ARROLLAMIENTOS

En las máquinas eléctricas rotativas se encuentran dos formas constructivas básicas: las *cilíndricas* y con *polos salientes*. Estas se pueden encontrar en el estator, en el rotor o en ambos, lo que da lugar a cuatro posibilidades constructivas, que se muestran en la figura 1.

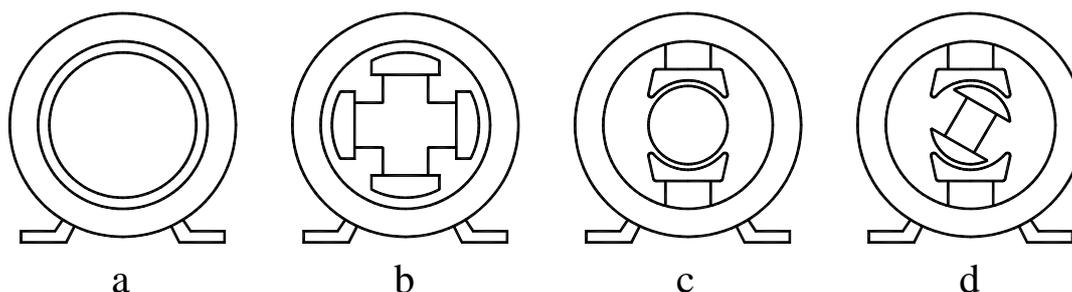


Fig. 1. Combinación de formas constructivas.

Los usos más frecuentes de las distintas combinaciones son:

a) Estator y rotor cilíndricos: es la combinación característica de los motores asíncronos y de las máquinas sincrónicas de alta velocidad.

b) Estator cilíndrico y rotor con polos saliente es característico de las máquinas sincrónicas de baja velocidad.

c) Estator con polos salientes y rotor cilíndrico es característico de las máquinas de corriente continua y de algunas máquinas sincrónicas de poca potencia.

d) Estator y rotor con polos salientes se emplea en máquinas especiales, por ejemplo en los motores por pasos.

2.2 Formas cilíndricas

En las formas cilíndricas de las máquinas se colocan arrollamientos *distribuidos*, estos arrollamientos están formados por bobinas ubicadas en toda o parte de esa superficie cilíndrica.

Para fijar las bobinas éstas se colocan en *ranuras* realizadas en la superficie o muy cerca de ella. En general esas bobinas se encuentran recorridas por *corriente alterna* y cumplen la función de *inducido*, (lugar donde se inducen tensiones).

Como en esas formas cilíndricas el flujo es alterno, las mismas deben ser laminadas y con chapas finas, para disminuir las pérdidas por corrientes parásitas y permitir la rápida variación del flujo. En la figura 2 se muestra una máquina de corriente continua de dos polos donde se pueden apreciar el arrollamiento rotórico del tipo distribuido, que cumple la función de inducido.

2.1 Polos salientes

En los polos salientes de las máquinas se colocan arrollamientos *concentrados* que son bobinas ubicadas alrededor de los polos.

Esos arrollamientos concentrados generalmente se encuentran recorridos por corriente continua y cumplen la función de *excitación*. Los ejemplos característicos son las máquinas de corriente continua y las sincrónicas de baja velocidad.

Como el flujo en esos polos salientes es constante, o varía lentamente, se los puede construir *macizos*, pero muchas veces se los hace laminados, con chapas relativamente gruesas, para facilitar su construcción, ya que es más fácil estampar chapas con la forma adecuada y luego apilarlas que mecanizar un bloque de acero. En la misma máquina de corriente continua de la figura 2 se pueden apreciar polos salientes con arrollamientos concentrados en el estator los que cumplen la función de excitación.

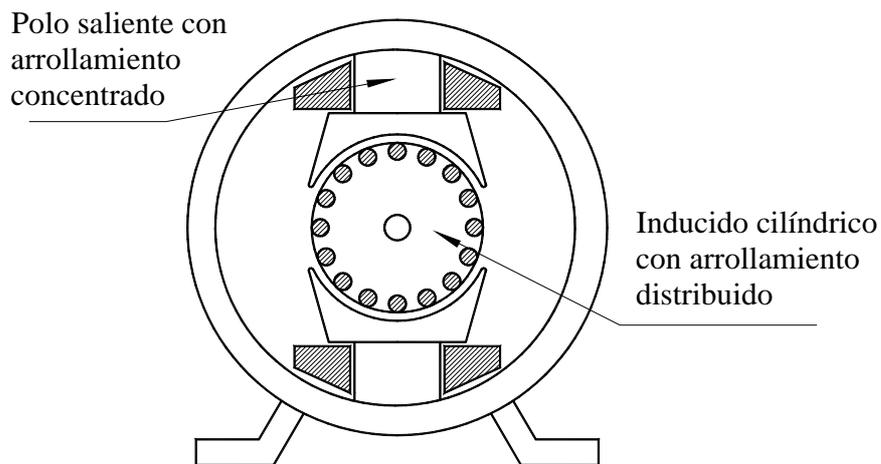


Fig. 2. Máquina de corriente continua.

Estos arrollamientos concentrados se fabrican sobre moldes y luego de aislarlos convenientemente, se colocan en los polos de la máquina. Si los conductores no tienen suficiente sección como para mantener la forma de la bobina, se utilizan carretes de soporte de material aislante.

3 ARROLLAMIENTOS DISTRIBUIDOS

3.1 Tipos de arrollamiento

Así como los arrollamientos concentrados son simples bobinas, fáciles de concebir, los arrollamientos distribuidos son mucho más complejos ya que deben cumplir no solamente condiciones eléctricas y magnéticas, sino también constructivas: las bobinas deben ser sencillas de realizar, de colocar y minimizar el uso de materiales.

Los arrollamientos rotóricos de las máquinas eléctricas se conectan a través de *escobillas* que puede apoyar sobre *anillos rozantes*, figura 3, que son aros conductores, continuos, conectados a los extremos del arrollamiento; o sobre un *colector*, figura 4, que está formado por segmentos conductores, denominados *delgas*, aisladas entre sí y conectadas a cada bobina.

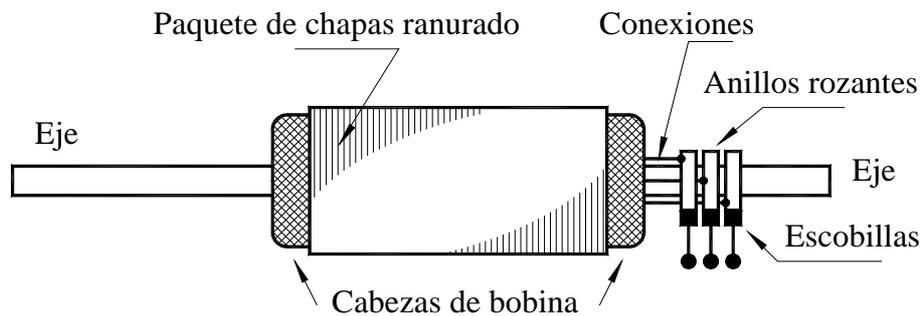


Fig. 3. Anillos rozantes en un rotor trifásico.

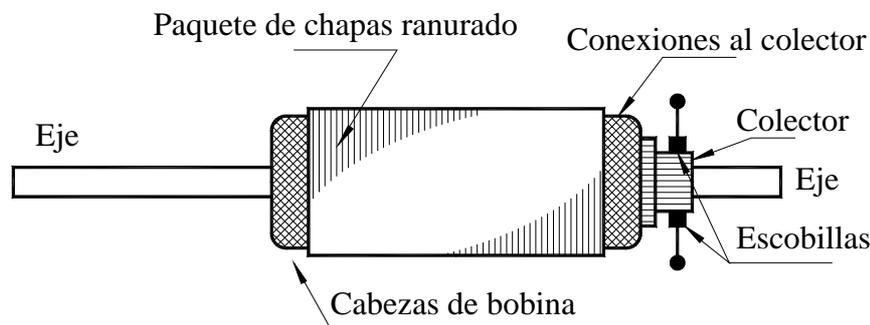


Fig. 4. Colector en un inducido.

Esto da lugar a dos tipos de arrollamientos distribuidos, los primeros denominados *a anillos*, o *de fases* son eléctricamente *abiertos* y pueden estar tanto en el estator como en el rotor; mientras que los segundos, denominados *a colector*, son eléctricamente *cerrados* y se utilizan solamente en el rotor.

3.2 Tipos de ranuras

Como ya se dijo las bobinas de los arrollamientos distribuidos, y sus aislaciones, se alojan en *ranuras* o *canaletas* ubicadas en la superficie, o muy cerca de ella, del estator o del rotor o en ambas. Las partes magnéticas entre las ranuras se denominan *dientes*.

Las ranuras pueden ser *abiertas*, *semicerradas* o *cerradas* como se muestran en la figura 5.

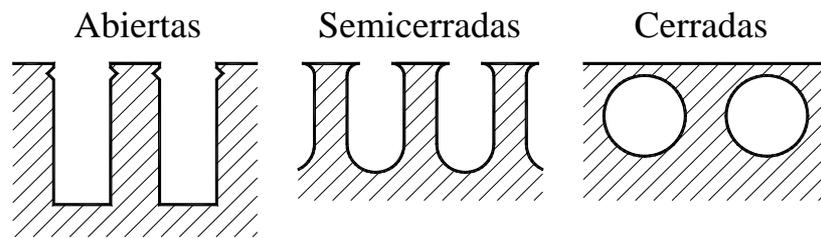


Fig. 5. Tipos de ranuras.

Las ranuras abiertas, que poseen sus lados paralelos, se emplean en máquinas de potencia media o grande, por ejemplo más de 50 kW y en los inducidos a colector, salvo los muy pequeños, de pocos cientos de watt. Cuando las ranuras son abiertas, con sus lados paralelos, y están ubicadas sobre una estructura cilíndrica, los dientes resultan necesariamente *trapezoidales*, es decir no tienen la misma sección en toda su altura, lo que debe ser tenido en cuenta al considerar la inducción magnética y la saturación de los mismos.

La razón por la cual se emplean las ranuras abiertas, con sus lados paralelos, es que las bobinas utilizadas en esas máquinas son prácticamente rígidas y no se podrían colocar si la abertura de la ranura fuera más estrecha.

Las ranuras semiabiertas se emplean en máquinas de menor potencia, que utilizan bobinas formadas por conductores sueltos, los que se colocan individualmente o en pequeños grupos, muchas veces en forma manual y luego se terminan de conformar y de acomodar las cabezas de bobina, en la propia máquina. A fin de poder acomodar mejor los conductores en el fondo y en el tope de las ranuras, lo que mejora el *factor de llenado* de las mismas, conviene que ambos sean redondeados, como se muestra en la figura 5.

Tanto en las ranuras abiertas como en las semicerradas, se debe evitar que los lados de las bobinas se salgan de las mismas, especialmente si están sometidas a la fuerza centrífuga del rotor, lo que provocaría un accidente catastrófico. El cerrado de las ranuras se hace por medio de una *cuña de cierre* construida con un material de la resistencia adecuada y que, en la mayoría de los casos, es no magnético. En los dientes de las ranuras abiertas se hacen unas entalladuras a fin de sostener esas cuñas de cierre.

Las ranuras cerradas, que no necesariamente deben tener una sección circular como se muestra en la figura 5, se emplean principalmente en los rotores de las máquinas asincrónicas. Dentro de esas ranuras se colocan barras conductoras, normalmente sin aislación, que constituyen el arrollamiento rotórico de esas máquinas.

Es común que las máquinas posean distintos tipos de ranuras en el estator y en el rotor, adecuándolas a los arrollamientos empleados.

3.3 Lados de bobinas y capas

Dentro de cada ranura puede haber uno, dos o más lados de bobinas, al número de *lados de bobina por ranura* se lo designará con la letra *u*. Cuando hay un solo lado de bobina por ranura, se dice que el arrollamiento es de *simple capa*, cuando hay dos o más lados de bobina por ranura estos se disponen en dos capas y se dice que el arrollamiento es de *dobles capas*, esto se muestra en la figura 6.

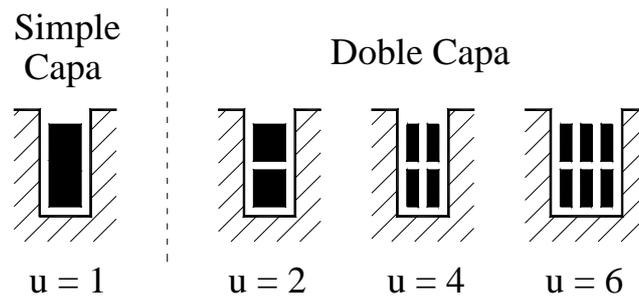


Fig. 6. Lados de bobina por ranura.

Los arrollamientos de doble capa presentan mayor flexibilidad de diseño y son los más empleados. En los arrollamientos a anillos se utilizan hasta dos lados de bobina por ranura ($u=2$), valores mayores de u se emplean en los arrollamientos *a colector*.

Cuando se dibujan arrollamientos de doble capa, los lados de las bobinas que no se ven, por quedar tapados por otras bobinas, se indican con líneas de trazos como lo establecen las normas del dibujo técnico.

La cantidad de bobinas que se pueden colocar en Q ranuras depende del número de lados de bobina que se coloquen en cada una de ellas. En efecto, multiplicando el número total de ranuras Q por la cantidad de lados de bobina que hay en cada ranura u , se obtiene el número total de lados de bobina que caben en esas ranuras y, como cada bobina tienen dos lados, el número total de bobinas B será:

$$B = \frac{u \cdot Q}{2} \quad (1)$$

Como los casos más comunes son $u = 1$ y $u = 2$ resulta:

$$\begin{array}{l} \text{Si } u = 1 \Rightarrow B = \frac{Q}{2} \\ \text{Si } u = 2 \Rightarrow B = Q \end{array} \quad (2)$$

3.4 Formas de las bobinas

Las partes de la bobina que se encuentran colocadas dentro de las ranuras son las que están sometidas al flujo mutuo y consecuentemente donde se inducen las tensiones y se desarrollan las fuerzas útiles, éstos son los *lados activos* de la bobina, el resto se encuentra en el aire y constituyen las *cabezas de bobina* y las *conexiones*, éstas concatenan solamente flujo disperso y contribuyen en gran medida a la reactancia de dispersión, estas son las partes más afectada por los esfuerzos dinámicos que se producen particularmente en los cortocircuitos. En la figura 7 se muestran esquemáticamente las distintas partes de las bobinas.

Las bobinas utilizadas en la mayoría de los arrollamientos a anillos de las máquinas de unos pocos kilowatts, suelen hacerse sobre un molde rectangular, con los vértices redondeados, manteniendo las espiras sueltas para luego colocarlas, generalmente a mano, de a una espira por vez o en pequeños grupos, dentro de ranuras semicerradas. La forma definitiva de las bobinas, el acomodado y fijación de las cabezas, se hace en la propia máquina.

En las máquinas de mayor potencia las bobinas se construyen en moldes complejos que, en varias etapas, le confieren la forma definitiva. Antes de insertarlas en la máquina, las bobinas están completamente aisladas y ensayadas, especialmente cuando las máquinas son de tensiones

mayores a las industriales. Como esas bobinas son rígidas se las debe colocar, con mucho cuidado y en ranuras abiertas.

Cuando el arrollamiento esta terminado debe quedar perfectamente aislado, con las cabezas de bobina y las conexiones bien acomodadas y fijas para soportar los esfuerzos a que estarán sometidas; todo eso, la experiencia, la facilidad del armado y la economía de materiales, ha establecido ciertas formas de bobinas como las más convenientes; entre las más empleadas se encuentran las de forma *hexagonal (diamante)*, *trapezoidal* y *rectangular*, como se muestran en la figura 7.

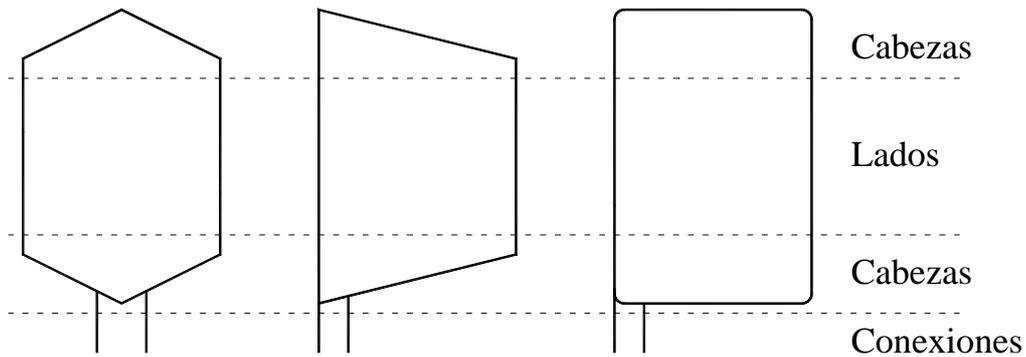


Fig. 7. Formas de bobinas.

La forma más utilizada es la hexagonal o en diamante, especialmente en máquinas de mediana y gran potencia y con arrollamientos dispuestos en doble capa. Para que las cabezas de bobina queden perfectamente ordenadas, en sus extremos dan una media vuelta con lo que se consigue que sus lados queden a distintos niveles, figura 8.

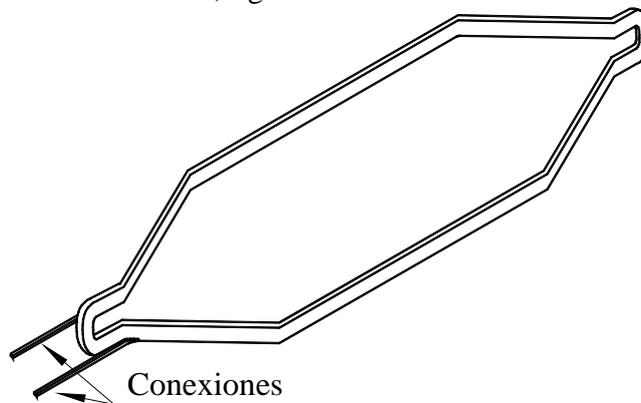


Fig. 8. Cambio de capa.

Como las ranuras están ubicadas en una superficie cilíndrica, las cabezas de bobina no son planas, figura 8 y, además, como las ranuras tienen dirección radial, los lados de las bobinas, también deben ser radiales. En la figura 9 se muestra la cabeza de una bobina, como la de la figura 8, colocada en un rotor cilíndrico.

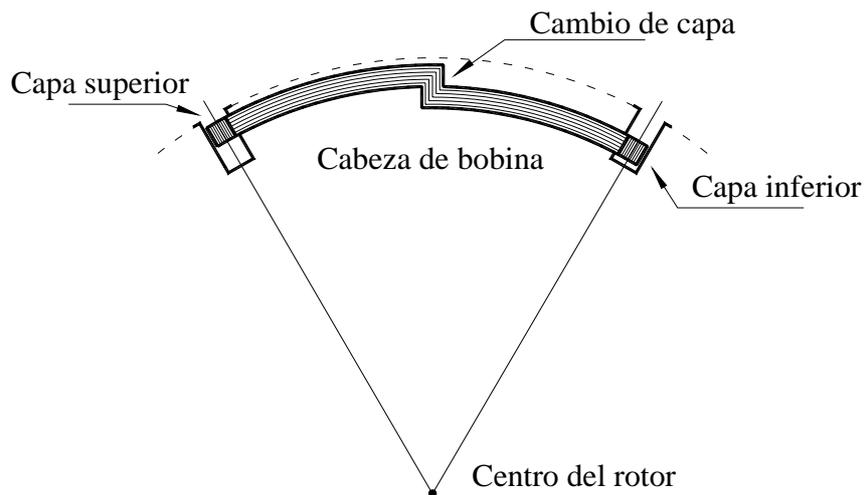


Fig. 9. Ranuras radiales.

3.5 Pasos polar y de bobina

Se denomina *paso polar*, τ_p a la distancia que hay de un polo al siguiente, figura 10. En una máquina con geometría cilíndrica hay que definir el radio al cual se mide esa distancia y hay varias posibilidades, tomar el radio del rotor, el interno del estator, el medio del entrehierro u otro; lo que en todos los casos deberá quedar claramente definido. Por ejemplo si se desea calcular el flujo por polo en el entrehierro, conviene utilizar el radio o el diámetro medio del entrehierro.

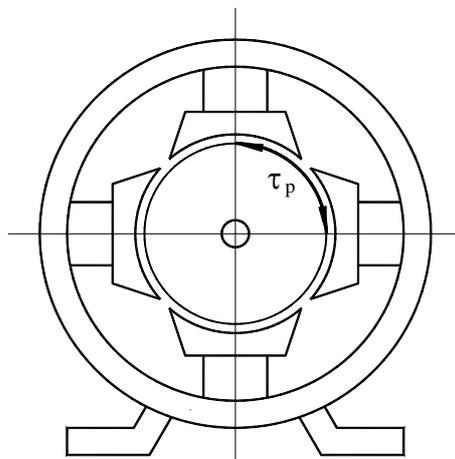


Fig. 10. Paso polar.

Por ser distancias, los pasos se deben expresar en unidades de longitud, por ejemplo metro o milímetro, como se hace cuando hay que dimensionar las bobinas, o construir los moldes, pero cuando interesa estudiar un arrollamiento, cuyas bobinas están colocadas en ranuras equiespaciadas, resulta muy cómodo utilizar como unidad de medida la “*ranura*” que es, precisamente, la distancia entre ranuras.

La utilización de la ranura como unidad de medida para los pasos, tiene varias ventajas: la mayoría de los resultados son números enteros, relativamente pequeños y no se requiere ningún elemento de medición, simplemente se cuentan las ranuras.

A la distancia entre los lados de las bobinas se la denomina *paso de bobina* Y_1 , como se muestra en las figuras 11 a 14.

El paso de las bobinas puede ser igual, menor o mayor que el paso polar, y en esos casos se dice que la bobina es diametral, acortada o alargada respectivamente, tabla I.

Tabla I. Pasos de bobina.

Bobina	Paso
Diametral	$Y_1 = \tau_p$
Acortada	$Y_1 < \tau_p$
Alargada	$Y_1 > \tau_p$

Como se verá más adelante las bobinas diametrales son comunes en los arrollamientos de simple capa, mientras que en los de doble capa, que poseen menos restricciones constructivas, son comunes las bobinas acortadas. En ambos casos hay muchas excepciones. Las bobinas acortadas, al ser más angostas, permiten un ahorro de material y mejoran la distribución del campo magnético en el entrehierro. Las bobinas alargadas producen la misma mejora del campo magnético en el entrehierro pero utilizan mayor cantidad de material, por lo tanto su empleo es muy limitado.

3.6 Tipos de arrollamientos

Los tipos básicos de arrollamientos distribuidos son dos: *imbricados* y *ondulados*, los que pueden tener variantes respecto a su forma básica. Los arrollamientos imbricados son los más utilizados, mientras que los ondulados suelen emplearse en máquinas de corriente alterna de gran porte o en algunos inducidos de máquinas de corriente continua.

3.6.1 Arrollamientos imbricados

En ellos las sucesivas bobinas quedan *parcialmente superpuestas*. En la figura 11 se muestra un grupo de dos bobinas de un arrollamiento imbricado.

Donde:

- Y_1 Paso de bobina.
- Y_2 Paso de conexión.
- Y Paso total o del arrollamiento

En los arrollamientos imbricados se cumple la siguiente relación entre los pasos:

$$\boxed{Y = Y_1 - Y_2} \quad (3)$$

Si bien en los arrollamientos a anillos es frecuente es que Y_2 sea una ranura menor que Y_1 , con lo que resulta $Y = I$, en los arrollamientos *a colector* pueden presentarse otras variantes que dan lugar a arrollamientos con distinta características y denominaciones, como se verá en 5.1.

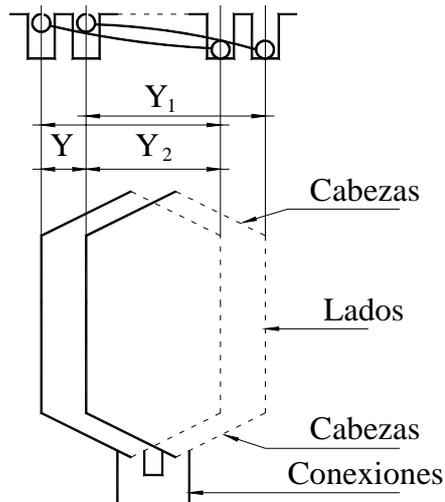


Fig. 11. Arrollamiento imbricado.

El dibujo de los arrollamientos imbricados se simplifica suponiendo que las bobinas tienen una sola espira, figura 12.

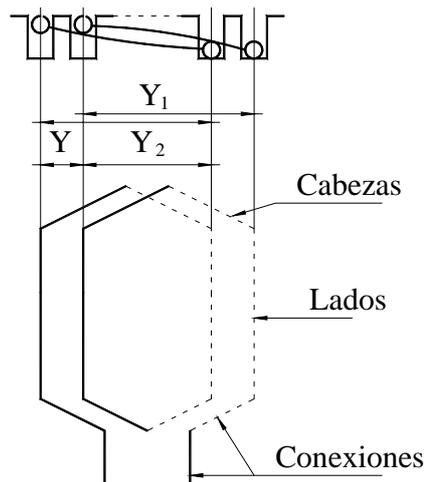


Fig. 12. Arrollamiento imbricado, dibujo simplificado.

Más adelante, se muestran algunos ejemplos de arrollamientos imbricados sencillos.

3.6.2 Arrollamientos ondulados

En los arrollamientos ondulados dos bobinas sucesivas se encuentran distanciadas aproximadamente un paso polar, es decir no se superponen, figura 13.

Los pasos indicados en la figura 13 tienen la misma denominación que en el arrollamiento imbricado de la figura 11.

En los arrollamientos ondulados se cumple la siguiente relación entre los pasos:

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad (4)$$

Además resulta:

$$Y_1 \cong Y_2 \cong \tau_p \quad (5)$$

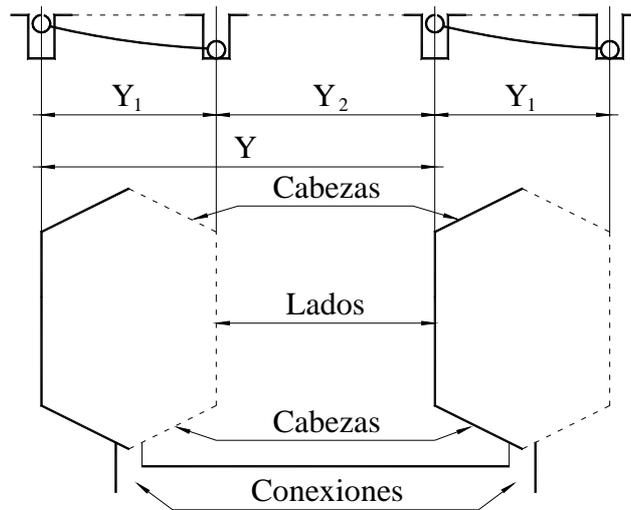


Fig. 13. Arrollamiento ondulado.

El dibujo de estos arrollamientos también se simplifica suponiendo que las bobinas tienen una sola espira, figura 14.

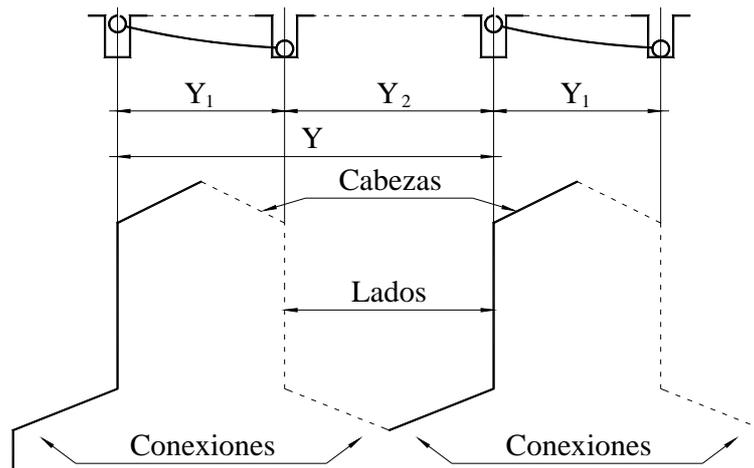


Fig. 14. Arrollamiento ondulado, dibujo simplificado.

Este tipo de arrollamiento se emplea mucho menos que los imbricados y, en los a colector, también existen las variantes progresivo, regresivo, simple, doble, etc.

4 ARROLLAMIENTOS A COLECTOR

Como ya se mencionó, estos arrollamientos se utilizan solamente en los rotores y tienen la función de inducido; y a las máquinas que los emplean se las denomina “a colector” siendo su exponente más representativo la máquina de corriente continua, pero también se emplean en algunas máquinas de corriente alterna monofásicas y trifásicas, estas últimas no tan comunes.

El colector y las escobillas de estas máquinas actúan como un conmutador que cambia las conexiones de las bobinas, este proceso se denomina *conmutación*, y en el mismo se pueden formar chispas entre las escobillas y las delgas del colector; en todas las máquinas se toman precauciones para eliminar o reducir a un mínimo esas chispas y uno de los recursos es bajar la inductancia de las bobinas para lo cual conviene que tengan la menor cantidad de espiras, y es muy frecuente que sean de una sola espira, pero esto obliga a colocar muchas bobinas, y por tal motivo es común que se coloquen 4, 6 o incluso más lados de bobina por ranura, como se muestra en la figura 6, de esta forma se reduce la cantidad de ranuras y se aprovecha mejor la periferia del rotor.

Como ya se mencionó, estos arrollamientos forman circuitos eléctricos cerrados y todas las bobinas quedan conectadas una a continuación de la otra. Las conexiones a las delgas del colector se hacen desde las uniones de dos bobinas consecutivas, como se muestra en la figura 15 por lo tanto el número de bobinas B es igual al número de delgas del colector C .

Como estos arrollamientos forman un circuito eléctrico cerrado, al ser alimentado, a través de las escobillas, en dos o más puntos, siempre se forma un *número par* de ramas en paralelo que se indicará con la letra a . A fin de evitar la circulación de corriente entre las ramas, las tensiones inducidas en ellas deben ser iguales. Las inexactitudes mecánicas conspiran contra las simetrías y la igualdad de las tensiones inducidas en las ramas en paralelo, para reducir sus efectos se hacen unas conexiones entre las delgas del colector denominadas *equipotenciales*, que se analizan brevemente en 4.1.2.

4.1 Arrollamientos imbricados a colector

En la figura 15 se muestran varias bobinas de un arrollamiento, imbricado de doble capa, con bobinas de una sola espira y sus conexiones a las delgas del colector.

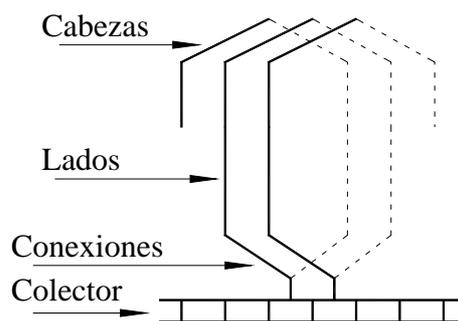


Fig. 15. arrollamiento imbricado, conexión de las bobinas al colector.

Como se mencionó en 3.6.1 en los arrollamientos imbricados a colector pueden utilizarse algunas variantes que conducen a bobinados con distintas características, lo que se resume en las tablas II y III.

Los arrollamientos progresivos o regresivos son simplemente variantes con prácticamente las mismas características eléctricas; pero los simples, dobles o de mayor orden tienen distintas

cantidad de pares de ramas en paralelo a , las que están relacionadas con el número de pares de polos p , como se indica en la tabla III.

Tabla II. Tipos de arrollamientos imbricados a colector.

$Y_2 < Y_1$	<i>Progresivo</i>
$Y_2 > Y_1$	<i>Regresivo</i>
$Y = \pm 1$	<i>Simple</i>
$Y = \pm 2$	<i>Doble</i>

Tabla III. Ramas en paralelo y polos.

$Y = \pm 1$	$a = p$	<i>Simple</i>
$Y = \pm 2$	$a = 2p$	<i>Doble</i>
- - -	- - -	- - -

No obstante lo dicho, los más comunes son los progresivos simples, que se verán en el presente trabajo.

Debido a la facilidad con que se generan ramas en paralelo, a los arrollamientos imbricados a colector, también se los suele llamar *arrollamientos paralelo*.

4.1.1 Ejemplo de arrollamiento imbricado a colector

A fin de ejemplificar lo dicho, a continuación se analiza un arrollamiento de las características indicadas en la tabla IV.

Tabla IV. Ejemplo de arrollamiento imbricado a colector.

Imbricado	$Y = Y_1 - Y_2$
Progresivo	$Y = 1$
Simple	
Doble capa	$u = 2$
Cuatro polos	$p = 2$
16 ranuras	$Q = 16$
Bobinas diametrales	$Y_1 = \tau_p$

El número de bobinas y de delgas del colector resulta:

$$B = C = \frac{u \cdot Q}{2} = \frac{2 \cdot 16}{2} = 16 \text{ Ranuras} \quad (6)$$

El paso polar y el de bobina, que en este caso son iguales:

$$Y_1 = \tau_p = \frac{Q}{2p} = \frac{16}{2 \cdot 2} = 4 \text{ Ranuras} \quad (7)$$

El paso de conexión es:

$$Y_2 = Y_1 - Y = 4 - 1 = 3 \text{ Ranuras} \quad (8)$$

Para dibujar el arrollamiento se puede empezar en cualquier ranura ya que, cuando quede completo, se cerrará en la misma ranura en que se comenzó. En la figura 16 se muestran cinco bobinas, comenzando en la ranura 4, y se puede observar que la ranura 8 ha quedado llena: en la capa inferior está un lado de la bobina 4-8 y en la capa superior está un lado de la bobina 8-12; el resto de las ranuras mostradas todavía están parcialmente ocupadas.

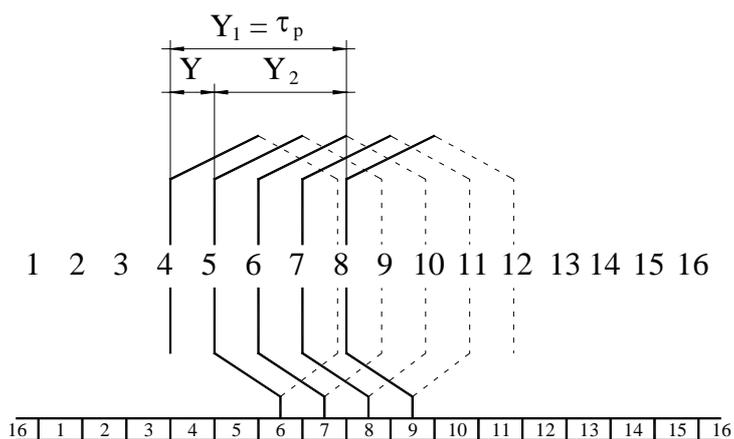


Fig. 16. Comienzo del arrollamiento imbricado y pasos.

En la figura 17 se muestra el arrollamiento completo y las tensiones inducidas, por aplicación de la regla de la mano derecha, suponiendo que el arrollamiento se mueve hacia la izquierda y los polos están fijos.

La ubicación de las escobillas y sus polaridades resultan del análisis que se hace en el punto 4.1.2 pero se puede observar que las mismas quedan ubicadas en los ejes de cada polo; esto es así siempre y cuando las conexiones a las delgas del colector se hagan en forma *simétrica*, por ejemplo las conexiones a la delga 2 provienen de las ranuras 1 y 4 equidistantes. Esta es la forma en que normalmente se hacen las conexiones, pero en máquinas muy pequeñas puede ser que convenga ubicar los *portaescobillas* en otra posición para lo cual se hacen conexiones asimétricas.

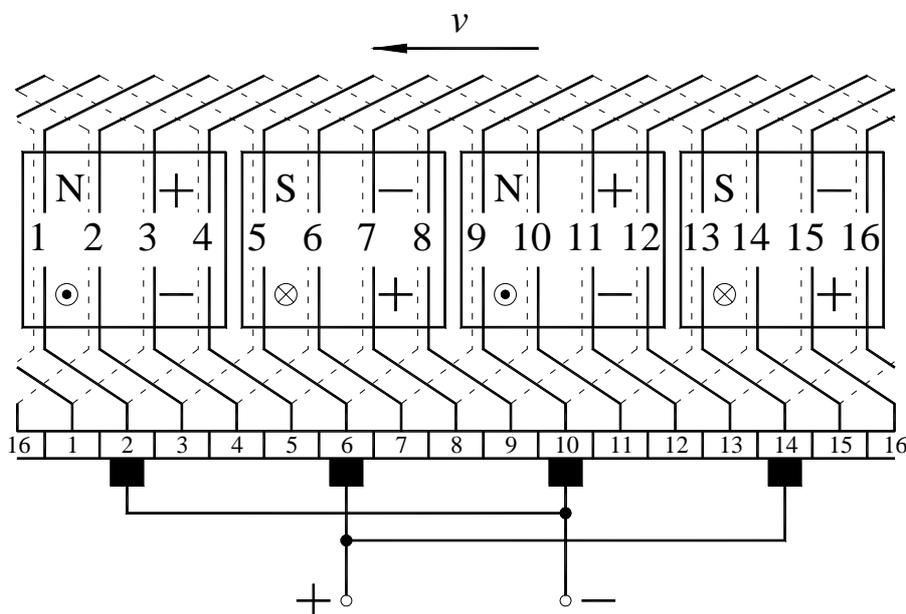


Fig. 17. Arrollamiento imbricado completo.

4.1.2 Circuito eléctrico

En la figura 18 se muestra un circuito eléctrico donde se ven las bobinas identificadas por las ranuras en las que se encuentran, sus tensiones inducidas y las delgas mostradas como puntos de conexión entre bobinas. Se observa que se trata de un circuito cerrado y que las tensiones inducidas forman cuatro ramas como era de esperar en este arrollamiento imbricado simple de cuatro polos.

A fin de aprovechar las tensiones inducidas en cada una de las ramas, se colocaron cuatro escobillas, que en el instante mostrado apoyan en las delgas 2, 6, 10 y 14.

Las escobillas tienen polaridades alternadas y las de la misma polaridad están unidas entre sí para repartir la corriente entre todas las ramas en paralelo. En la figura 18 se indican las corrientes por medio de flechas, suponiendo que la máquina es un generador.

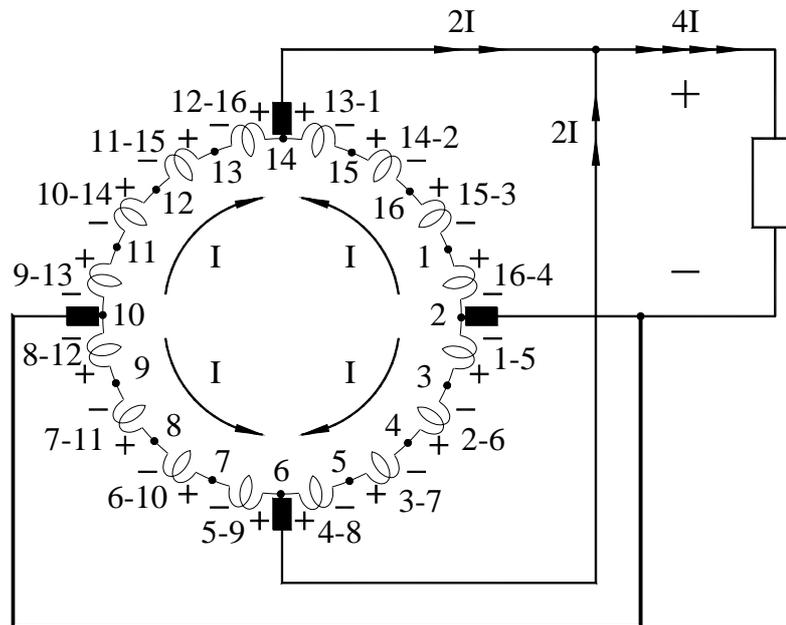


Fig. 18. Arrollamiento imbricado, circuito eléctrico.

4.1.3 Conexiones equipotenciales

En la figura 18 se puede observar que entre dos delgas diametralmente opuestas no hay diferencia de potencial; si la máquina tuviera más polos, lo anterior se cumpliría para delgas separadas $2 \tau_p$. Lo dicho es cierto siempre y cuando la máquina no tenga ningún tipo de asimetría, por ejemplo que los entrehierros polares no sean todos iguales. Como siempre hay imperfecciones constructivas podría ser que las delgas 2 y 10 ó 6 y 14, de la figura 18, no sean perfectamente equipotenciales, y al cortocircuitarlas entre sí por medio de las escobillas, circularía una corriente que se sumaría a la de carga y podría comprometer la conmutación.

Lo anterior es especialmente importante en las máquinas grandes, que se encuentran más exigidas y tienen poco margen para el sobredimensionamiento. Para evitar que esas corrientes de circulación pase a través de las escobillas, se colocan las denominadas conexiones equipotenciales que, en el mismo colector, hacen puentes entre delgas diametrales; lo que reduce considerablemente la diferencia de potencial que podría aparecer entre las escobillas de una misma polaridad. Esas conexiones equipotenciales no se realizan entre todas las delgas

diametrales del colector, ya que sería una gran complicación y poco el beneficio, la experiencia indicará la cantidad conveniente de esas conexiones.

4.1.4 bobinas cortocircuitadas

En todos los arrollamientos a colector, en algún momento las bobinas son cortocircuitadas por las escobillas, por ejemplo en la figura 17, si se considera en instante posterior al mostrado en las figuras 17 y 18, en el que el bobinado se ha desplazado hacia la izquierda media delga, las escobillas cortocircuitarán a las delgas 2-3, 6-7, 10-11 y 14-15 y a las respectivas bobinas, como se muestra en la figura 19.

Las bobinas cortocircuitadas que se muestran en la figura 19 se encuentran todas en la zona interpolar, muy próximas a la línea neutra, donde la inducción magnética es muy baja y por lo tanto la tensión inducida en las mismas también lo será.

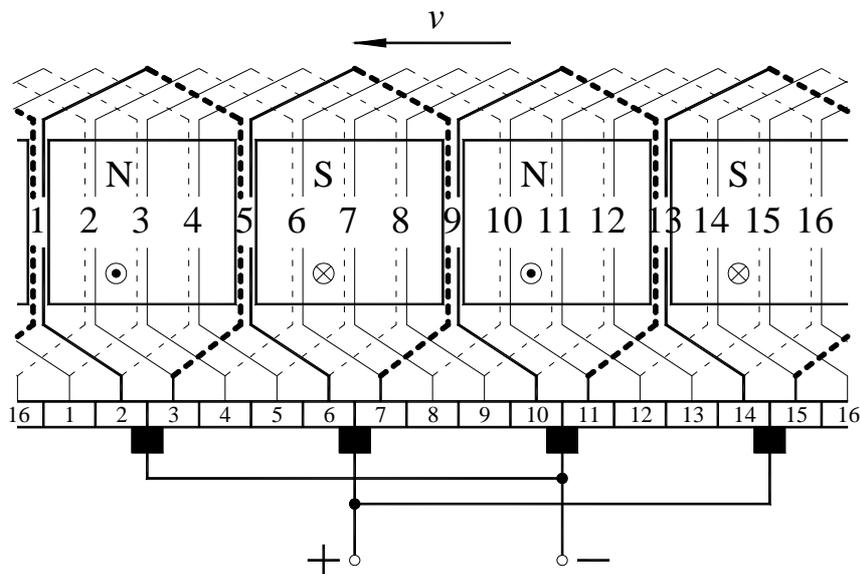


Fig. 19. Arrollamiento imbricado, bobinas cortocircuitadas.

No obstante, en las bobinas cortocircuitadas la corriente está cambiando de valor y dirección, lo que da lugar a tensiones inducidas debidas a las inductancias propias de las bobinas y se pueden producir chispas; este fenómeno es complejo y se analizará en otra oportunidad.

4.2 Arrollamientos ondulados a colector

En la figura 20 se muestran dos bobinas de un arrollamiento, ondulado de doble capa, con bobinas de una sola espira y sus conexiones a las delgas del colector.

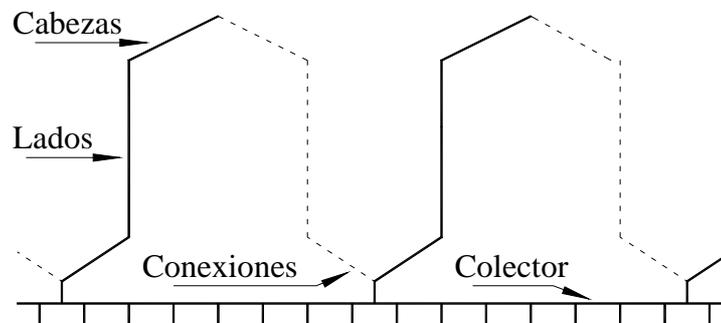


Fig. 20. Arrollamiento ondulado, conexión de las bobinas al colector.

En los arrollamientos ondulados la cantidad de ranuras Q y los pasos deben estar relacionados para que se ocupen todas las ranuras con todas las bobinas y conexiones del mismo paso. Por ejemplo en la figura 21 se muestra un inducido de 4 polos ($p = 2$), 19 ranuras con un arrollamiento ondulado que comienza en la ranura 1 con bobinas de $Y_1 = 5$ e $Y_2 = 4$; donde la primera vuelta termina en la ranura 19 que *debe* ser distinta de la ranura 1 donde empezó para que no se cierre en la primera vuelta. Si la primera vuelta termina *antes* que el comienzo, como en la figura 21, el arrollamiento es *regresivo* y *progresivo* en el caso contrario.

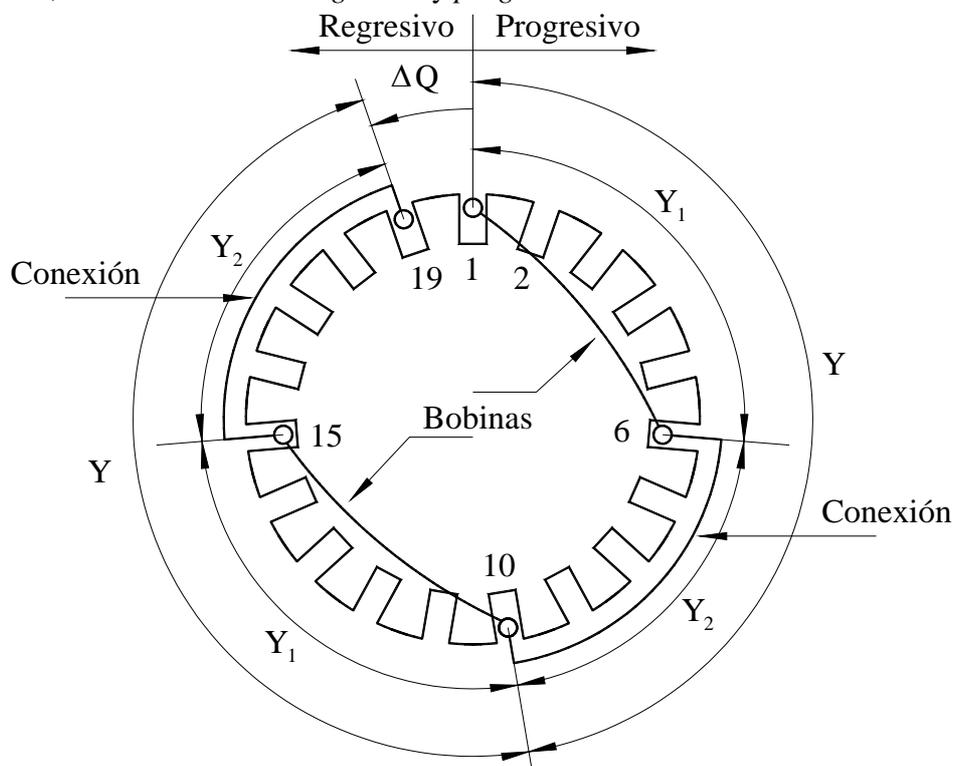


Fig. 21. Arrollamiento ondulado, regresivo, simple, primera vuelta.

La diferencia ΔQ entre el comienzo y el final de cada vuelta, puede ser de ± 1 ranura, ± 2 ranuras o más, y coincide con el número de pares de ramas en paralelo a con que resulta el bobinado, por lo tanto se puede escribir:

$$pY = Y_1 + Y_2 = Q \pm a \quad (9)$$

De donde resulta:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{Q \pm a}{p} \quad (10)$$

Según sea el valor $\Delta Q = a$ el arrollamiento resulta, tabla IV:

Tabla IV. Tipos de arrollamientos ondulados a colector.

$a > 0$	<i>Progresivo</i>
$a < 0$	<i>Regresivo</i>
$a = \pm 1$	<i>Simple</i>
$a = \pm 2$	<i>Doble</i>

Como ya se mencionó los arrollamientos progresivos o regresivos son variantes constructivas, prácticamente con las mismas características eléctricas. No así los simples o dobles, en los que

cambian la cantidad de ramas en paralelo y en consecuencia los valores de tensión y corriente. De igual manera que en los arrollamientos imbricados, los más comunes son los simples.

Una diferencia importante con los arrollamientos imbricados es que en estos arrollamientos ondulados las ramas en paralelo *son independientes del número de polos* de la máquina. En una máquina multipolar con un arrollamiento ondulado se obtendrá más tensión y menos corriente que si se emplease un arrollamiento imbricado. A igualdad de condiciones de diseño, ambos arrollamientos desarrollarían la misma potencia.

Como en los inducidos multipolares, los arrollamientos ondulados tienen mayor cantidad de bobinas en serie por rama que los imbricados, a los primeros se los suele llamar *arrollamientos serie*.

4.2.1 Ejemplo de arrollamiento ondulado a colector

A fin de ejemplificar lo dicho, a continuación se analiza un arrollamiento de las características indicadas en la tabla VI.

Tabla VI. Ejemplo de arrollamiento ondulado a colector.

Ondulado	$Y = Y_1 + Y_2$
Regresivo	$a = -1$
Simple	
Doble capa	$u = 2$
Cuatro polos	$p = 2$
19 ranuras	$Q = 19$

El número de bobinas y de delgas del colector resulta:

$$B = C = \frac{u \cdot Q}{2} = \frac{2 \cdot 19}{2} = 19 \text{ Ranuras} \quad (11)$$

El paso polar:

$$\tau_p = \frac{Q}{2p} = \frac{19}{2 \cdot 2} = 4,75 \text{ Ranuras} \quad (12)$$

El paso del arrollamiento es:

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{Q + a}{p} = \frac{19 - 1}{2} = 9 \text{ Ranuras} \quad (13)$$

Además se debe cumplir la ecuación (5):

$$Y_1 \cong Y_2 \cong \tau_p = 4,75 \text{ Ranuras} \quad (14)$$

Se adopta:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 5 \\ Y_2 &= 4 \end{aligned} \text{ Ranuras} \quad (15)$$

Es decir el paso de bobina Y_1 más próximo al paso polar τ_p .

Igual que en el ejemplo de arrollamiento imbricado, para dibujar el arrollamiento se puede empezar en cualquier ranura ya que, cuando quede completo, se cerrará en la misma ranura en que se comenzó.

En la figura 22 se muestran tres bobinas, comenzando en la ranura 1, y se puede observar que la “segunda vuelta” comienza en la ranura 19 es decir, la anterior a la ranura en que se comenzó, como corresponde al arrollamiento que debe ser regresivo y simple. Este ejemplo coincide con el mostrado en la figura 21.

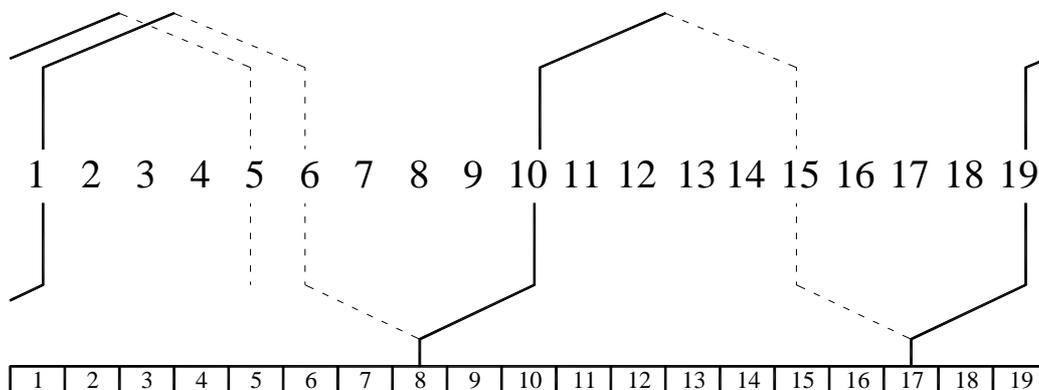


Fig. 22. Comienzo del arrollamiento ondulado y pasos.

En la figura 23 se muestra el arrollamiento completo y las tensiones inducidas, por aplicación de la regla de la mano derecha, suponiendo que el arrollamiento se mueve hacia la izquierda y los polos están fijos. Los polos se ubicaron simétricamente en el desarrollo del bobinado y las escobillas en los ejes de los polos.

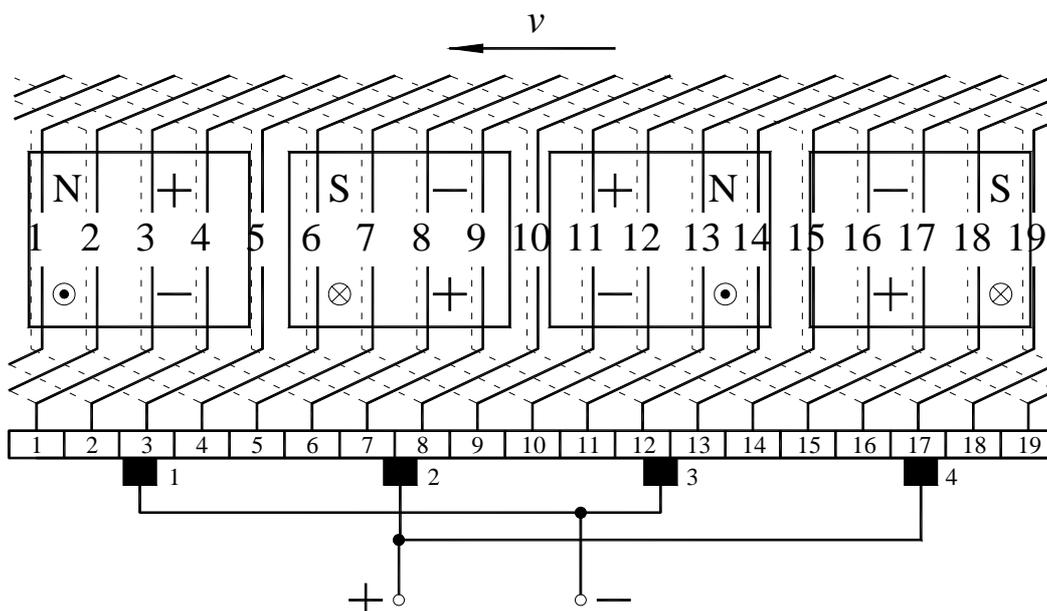


Fig. 23. Arrollamiento ondulado completo.

5.2.2 Circuito eléctrico

En la figura 24 se muestra un circuito eléctrico correspondiente al bobinado ondulado del ejemplo, dibujado con los mismos criterios utilizados en el caso del circuito eléctrico del arrollamiento imbricado de la figura 18. Se observa que se trata de un circuito cerrado y que las tensiones inducidas forman dos ramas en paralelo, como corresponde a un arrollamiento

ondulado simple, independientemente de tener cuatro polos. Suponiendo a la máquina como generador, las flechas indican el sentido de las corrientes.

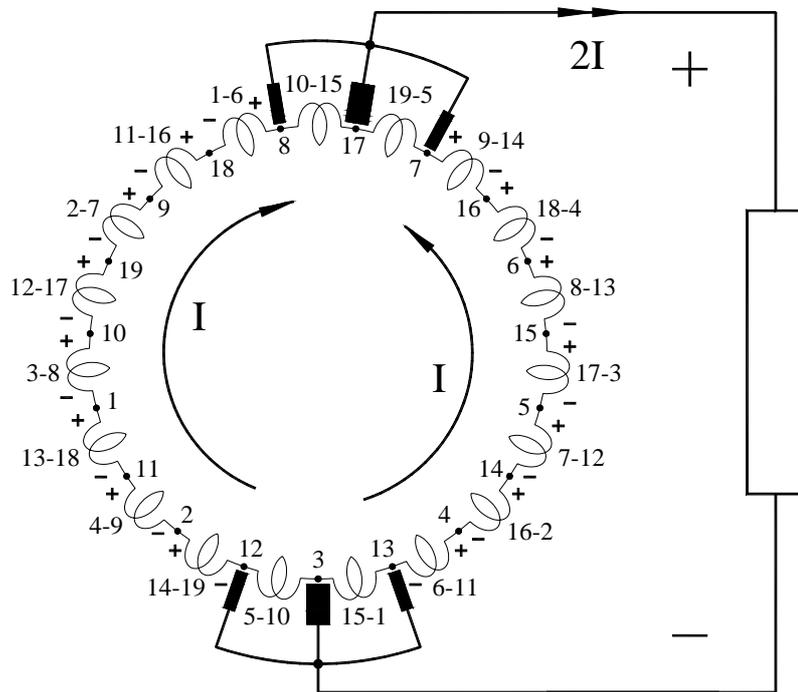


Fig. 24. Arrollamiento ondulado, circuito eléctrico.

En la figura 24 las escobillas que, en el instante considerado, están apoyando sobre dos delgas, como las escobillas 2 y 3 de la figura 23, se las dibujó de menor ancho, repetidas y unidas galvánicamente entre sí.

A fin de aprovechar las tensiones inducidas en cada una de las dos ramas en paralelo, *basta colocar dos escobillas*, de distinta polaridad como ser la 1 y la 2, o la 2 y la 3, o la 3 y la 4, o la 4 y la 1, como se muestra en la figura 25 a.

Pero, salvo que la corriente de inducido sea pequeña, conviene colocar tantas escobillas como polos tiene la máquina, figura 25 b, las que al quedar en paralelo, conducen menos corriente y se las puede hacer de menor longitud axial. Las escobillas más pequeñas permiten utilizar un colector de menor longitud, que es más robusto y menos costoso, y que también reduce la longitud total de la máquina; todo lo cual compensa el incremento del costo debido a la mayor cantidad de portaescobillas. En los ejemplos de las figuras 23 y 24 se colocaron tantas escobillas como polos.

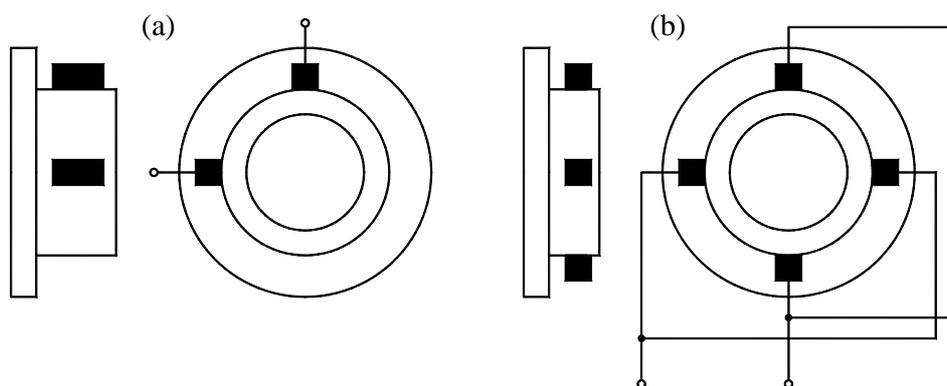


Fig. 25. Disposición de las escobillas.

En todo momento las escobillas cortocircuitan bobinas, en el instante mostrado en la figura 24, las bobinas 10-15 y 19-5 por un lado y las bobinas 5-10 y 15-1 por el otro se encuentran cortocircuitadas; pero si se observa la posición de esas bobinas se puede observar que se encuentran en el espacio interpolar o muy cerca de los extremos de las expansiones polares, donde el campo magnético es muy bajo y, consecuentemente también lo son las tensiones inducidas en esas bobinas. Por lo tanto las corrientes de circulación que se pueden generar son de bajo valor y no causan mayores problemas de conmutación.

Por otra parte las dos ramas en paralelo de la figura 24 tienen distinta cantidad de bobinas. En el instante mostrado, la rama de la derecha tiene 7 bobinas mientras que la de la izquierda 8, pero esta situación tampoco es seria ya que en la rama de la izquierda hay dos bobinas: la 1-6 y la 14-19, que se encuentran muy cerca de los extremos de los polos y por lo tanto tienen una tensión inducida menor a las restantes.

Ing. Norberto A. Lemozy
2010