



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA*



CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

ABREVIATURAS UTILIZADAS

A.T.	Alta tensión
B.T.	Baja tensión
c.a.	Corriente alterna
c.c.	Corriente continua (= corriente directa)
f.e.m.	Fuerza electromotriz
f.m.m.	Fuerza magnetomotriz
r.p.m.	Revoluciones por minuto

© 2010, Miguel Angel Rodríguez Pozueta

Universidad de Cantabria (España)

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

Está permitida la reproducción total o parcial de este documento con la condición inexcusable de citar su autor y su carácter gratuito.

Este documento puede descargarse gratuitamente desde esta Web:

<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

ÍNDICE

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Introducción	1
Constitución general de una máquina eléctrica rotativa	1
Estator y rotor. Entrehierro	1
Circuitos magnético y eléctrico	3
Colectores	5
Configuraciones básicas	7
Paso polar. Ángulos eléctricos o magnéticos	7
Devanados	9
Definición y clasificación	9
Devanados de tambor. Definiciones	12
Representación de devanados	14
Devanados de corriente alterna	15
Denominación de los extremos de las fases	15
Grupos polares	16
Devanados enteros y fraccionarios	17
Tipos de bobinado de corriente alterna	18
Ramas en paralelo	23
Ocupación de ranuras por el bobinado	24
Expresiones relativas a los devanados de corriente alterna	24
Observaciones respecto a los devanados de corriente alterna	27
Ubicación de los extremos de las fases	27
Simetría de una fase	27
Ejemplo 1	28
Principio de reversibilidad	31
Las máquinas eléctricas clásicas: clasificación y características básicas	31
Clasificación	31
Transformadores	32
Máquinas síncronas	32
Máquinas asíncronas o de inducción	34
Máquinas de corriente continua	35
Máquinas de corriente alterna de colector	36
Bibliografía	38

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Miguel Angel Rodríguez Pozueta

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se inicia el estudio de las máquinas eléctricas con una descripción de sus elementos constitutivos y de sus principios básicos, con especial referencia a las máquinas eléctricas rotativas. No se ha pretendido realizar una descripción detallada y pormenorizada de las máquinas eléctricas, sino sólo dar unas ideas básicas que permitan al lector hacerse una idea de su constitución y funcionamiento para así poder entender el resto del libro.

Se ha hecho especial énfasis en la explicación de los aspectos básicos de los devanados, ya que son necesarios para poder comprender algunos de los fenómenos más importantes de las máquinas eléctricas, tales como: la formación del campo magnético en el entrehierro, las f.e.m.s inducidas, etc.

Este capítulo también incluye la explicación de algunos conceptos que más tarde se utilizarán frecuentemente, como el paso polar, los ángulos eléctricos, etc., así como una clasificación y explicación de los principios básicos de funcionamiento de las máquinas eléctricas clásicas.

CONSTITUCIÓN GENERAL DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA ROTATIVA

Estator y rotor. Entrehierro

- Una máquina eléctrica rotativa consta básicamente de dos partes: estator y rotor (Figs. 1, 2, 10c, 32, 33 y 34).

El **estator** es la parte fija de la máquina y tiene forma de cilindro hueco. El **rotor** se coloca en el interior del estator y es la parte móvil. Entre el estator y el rotor existe una holgura denominada **entrehierro**, la cual impide que ambas partes rocen entre sí. En el entrehierro tienen lugar los fenómenos electromagnéticos que permiten la conversión de energía eléctrica en mecánica y viceversa, por lo que el estudio del campo magnético en esta zona es muy importante.

- En el rotor de la máquina se encuentra un *núcleo magnético*, bien cilíndrico o bien de polos salientes, sobre el que se coloca el *devanado*, *bobinado* o *arrollamiento* del rotor. El núcleo magnético tiene un hueco central donde se sitúa el *eje* o *árbol* de la máquina, el cual se fija rígidamente al mismo mediante una chaveta.

Si es preciso se coloca un **colector** en el eje. Un colector es un elemento que permite conectar eléctricamente el devanado del rotor con un circuito exterior.

Además, en el rotor también se suelen colocar *dispositivos de refrigeración*, tales como: ventiladores, aletas, canales de ventilación, etc.

- El estator de una máquina tiene un núcleo magnético, bien cilíndrico o bien de polos salientes, sobre el que se bobina el devanado correspondiente. Su parte

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

exterior está rodeada por una **culata** o **carcasa** que actúa como envolvente de la máquina y la protege del medio exterior. La culata normalmente está fabricada con hierro fundido y tiene forma cilíndrica u octogonal. En ocasiones tiene aletas de refrigeración longitudinales o, más raramente, radiales que facilitan la evacuación de calor.

En la carcasa se coloca la *caja de bornes* donde se realizan las conexiones eléctricas de la máquina con el exterior.

La culata dispone de los dispositivos de fijación de la máquina: patas, bridas, etc. A sus lados se colocan las *tapas* que cierran el motor y que poseen un hueco en su centro donde se alojan los *cojinetes* o *rodamientos* sobre los que descansa el eje del rotor y que minimizan el rozamiento entre éste y las tapas de la carcasa.

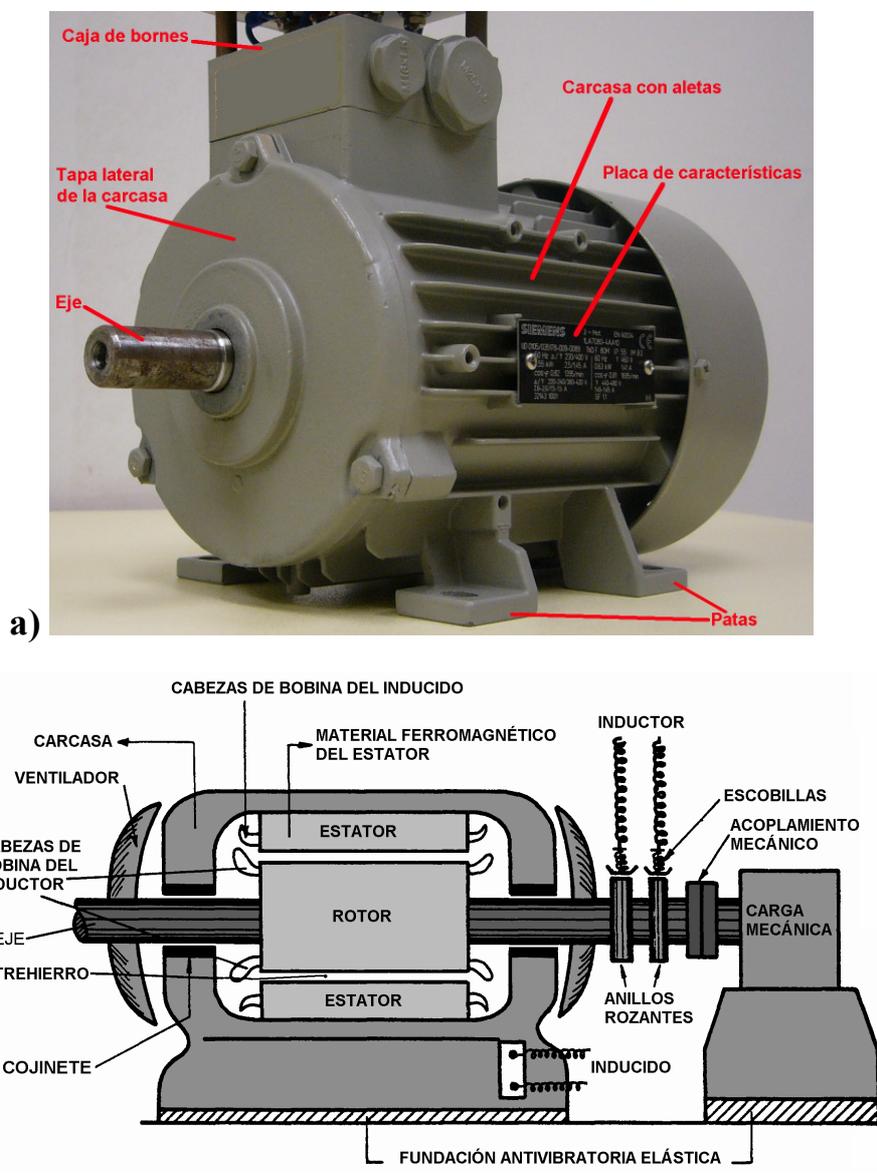
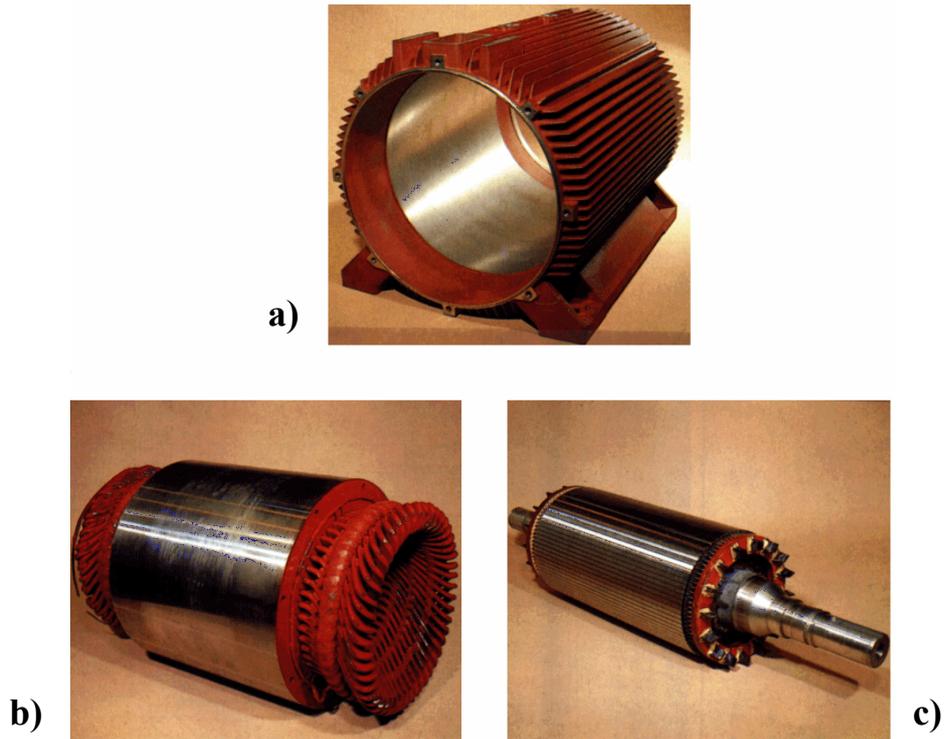


Fig. 1: Constitución de máquinas eléctricas rotativas:
a) Constitución de una máquina de inducción de jaula de ardilla.
b) Constitución de una máquina síncrona (Fuente: "El fenómeno electromagnético" de José Antonio de Gurrutxaga Ruiz).

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



*Fig. 2: Carcasa, estator y rotor de un motor asíncrono.
(Fuente: Revista ABB, n° 5, 1990).*

Circuitos magnético y eléctrico

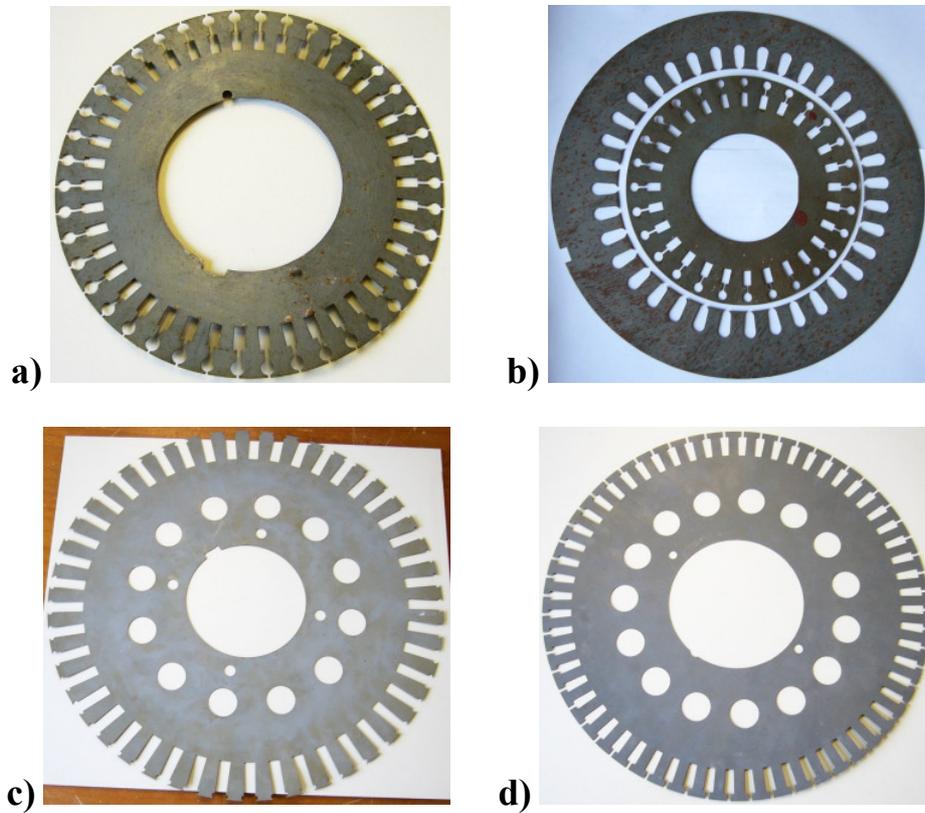


Fig. 3: Chapas magnéticas.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

- Los núcleos magnéticos del estator y del rotor se construyen de material ferromagnético. En el caso de que estén sometidos a la acción de un flujo magnético variable con el tiempo, los núcleos magnéticos se realizan apilando *chapas* de acero al silicio de 0,5 mm de espesor (Fig. 3), reduciendo así las pérdidas en el hierro por histéresis y por corrientes de Foucault.

Estas chapas tienen forma de corona circular y están aisladas entre sí mediante un barniz o un tratamiento químico. Pueden poseer un conjunto de orificios que permitan la circulación de aire u otro fluido refrigerante a través del núcleo magnético.

Las chapas del rotor tienen un agujero central con un chavetero donde se coloca el eje de la máquina.

Cuando el núcleo magnético no es de polos salientes, la superficie enfrentada al entrehierro es cilíndrica y posee una serie de **ranuras** donde se alojan los devanados (Fig. 4).

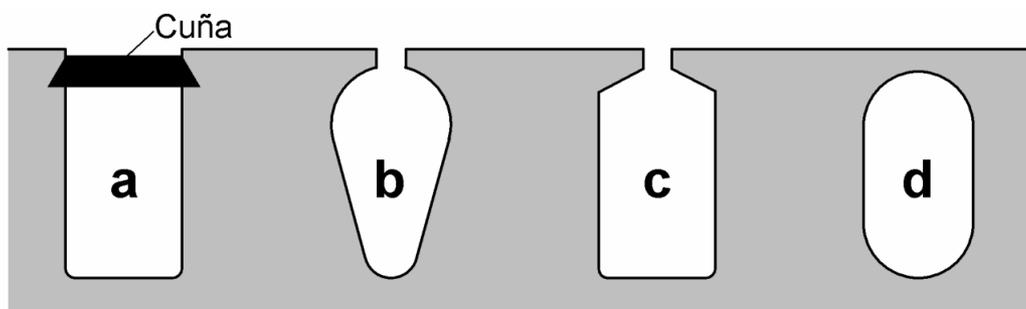


Fig. 4: Ranuras abierta (a), semicerradas (b, y c) y cerrada (d).

- * Las *ranuras abiertas* tienen sus flancos paralelos, por lo que dan lugar a dientes trapeziales. Este ranurado permite preparar el bobinado totalmente acabado en una bobinadora e introducir luego las bobinas enteras en las ranuras. A continuación éstas se cierran mediante cuñas aislantes.
 - * Las *ranuras semicerradas* se comunican con el entrehierro por medio de una estrecha abertura. En máquinas pequeñas si fueran de flancos paralelos darían lugar en el rotor a dientes con una base demasiado estrecha que los haría mecánicamente débiles. Para evitarlo las ranuras se redondean en sus zonas inferior y superior. En estas ranuras el devanado se coloca haciendo pasar los hilos uno por uno a través de la garganta de la entrada. Aquí, al igual que en las ranuras abiertas, una cuña de material aislante sirve de cierre de la abertura de la ranura.
 - * Las *ranuras cerradas* se usan casi exclusivamente en los devanados de jaula de ardilla. En este caso los devanados se construyen con barras que se introducen en las ranuras por un costado y luego se unen a los anillos de cortocircuito con soldaduras, remaches o tornillos.
- Salvo en las máquinas con imanes permanentes, las cuáles carecen de devanado inductor, todas las máquinas eléctricas disponen de, al menos, dos devanados: el inductor y el inducido.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

El devanado **inductor**, también denominado **excitación** o **campo**, tiene por objeto el crear el campo magnético en el entrehierro. El devanado **inducido**, también denominado de **armadura**, recibe el campo magnético creado por el inductor, lo que origina que en sus fases se induzcan unas f.e.m.s.

En los transformadores y en las máquinas asíncronas se suele denominar **primario** al devanado inductor y **secundario** al inducido.

El funcionamiento de una máquina, en teoría, no está influido porque el inductor se coloque en el estator y el inducido en el rotor o viceversa. Sin embargo, en la práctica la mayor facilidad de construcción, las condiciones de refrigeración, etc. aconsejan adoptar preferentemente una de las dos posibilidades. Así en las máquinas de corriente continua el inductor se coloca en el estator y el inducido en el rotor mientras que en las máquinas síncronas se suele adoptar la disposición contraria.

Además del inductor y del inducido, las máquinas eléctricas pueden tener más devanados: de conmutación, de compensación, amortiguador, etc.

Colectores

- Existen dos tipos de colectores: de anillos y de delgas.
 - * Los **colectores de anillos** (Figs. 1b y 5) se utilizan en máquinas de corriente alterna. Consisten en dos o tres anillos de bronce colocados sobre el eje del rotor y aislados de éste y entre sí. Estos anillos están conectados a las bobinas del rotor y sobre ellos rozan unas *escobillas* de grafito (Fig. 5b) situadas en el estator y conectadas al circuito exterior. Un resorte que presiona la escobilla contra el anillo garantiza un buen contacto entre ambos.

En este tipo de colector la corriente que circula por las bobinas del rotor es de la misma forma que la que viene desde el circuito exterior.

- * Los **conmutadores** o **colectores de delgas** (Figs. 6 y 34b) se utilizan en máquinas con devanados cerrados¹ (las máquinas de c.c. y algunas máquinas de c.a.). Consisten en varias láminas de cobre, denominadas *delgas* (Fig. 6a), dispuestas alrededor del eje del rotor de manera que forman un cuerpo cilíndrico. Las delgas están aisladas entre sí y del eje mediante piezas de mica. Cada delga tiene un talón donde se realiza la conexión a una de las bobinas del rotor mediante soldadura. Las delgas se sujetan al cubo del colector mediante uniones del tipo “cola de milano” para evitar que puedan salirse por la fuerza centrífuga. Sobre las delgas rozan las escobillas, que están fijas al estator y conectadas al circuito exterior.

Al girar el colector de delgas se produce una conmutación de las bobinas que están conectadas al circuito exterior a través de las escobillas. Por lo tanto, la forma de la corriente es distinta en las bobinas del rotor y en el circuito exterior, actuando el colector de delgas como un rectificador o como un inversor mecánico de la corriente.

¹ Más adelante se describen los diferentes tipos de devanado.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

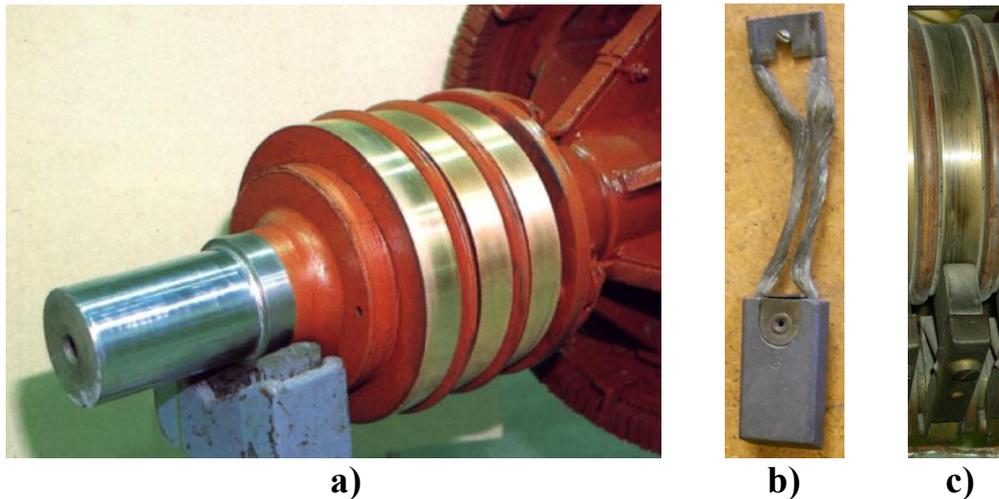


Fig. 5: a) Colector de 3 anillos; b) Escobilla; c) Anillo con escobilla.

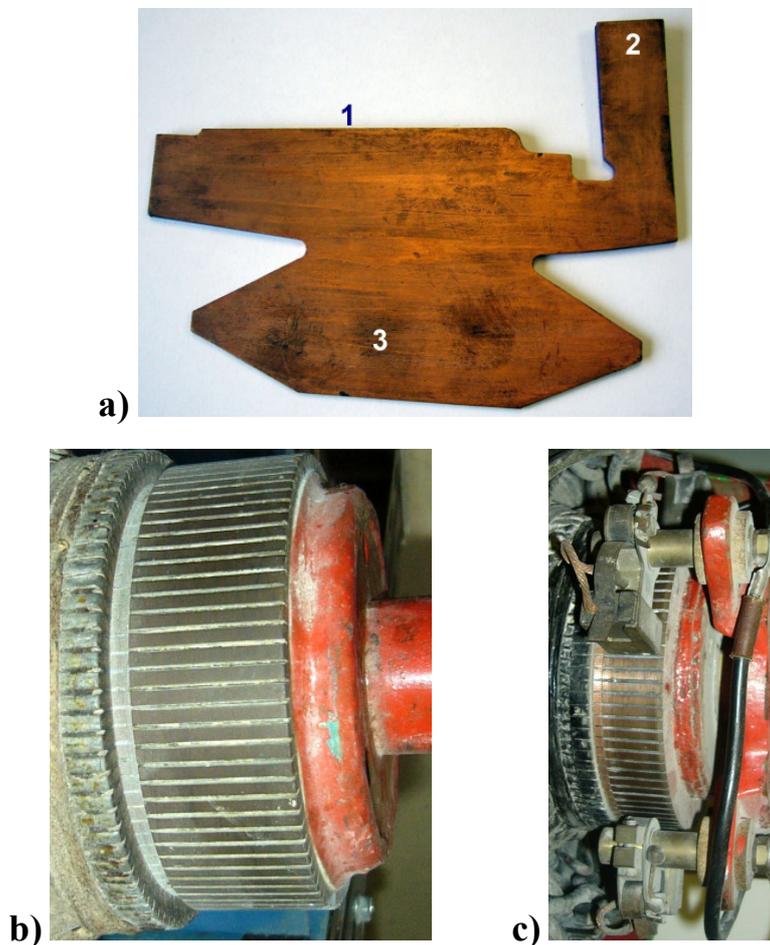


Fig. 6: a) Delga; b) y c) Colectores de delgas.
(1: Superficie de contacto con las escobillas;
2: Talón para la conexión a las bobinas; 3: Cola de milano)

En un colector existe un roce mecánico entre las escobillas y los anillos o las delgas que produce un desgaste de sus piezas. Es más fácil reemplazar las escobillas que cambiar el colector, por lo que interesa que las piezas sometidas a mayor desgaste sean aquellas y no éste. Es por esta razón que las escobillas se fabrican con un material más blando (grafito) que los anillos (bronce) o las delgas (cobre).

Configuraciones básicas

- Las máquinas eléctricas rotativas adoptan tres formas básicas (Fig. 7):
 - * Estator y rotor cilíndricos (Fig. 7a), luego su entrehierro es uniforme². Es la habitualmente empleada en las máquinas asíncronas y síncronas rápidas.
 - * Estator cilíndrico y rotor de polos salientes (Fig. 7b), usualmente utilizada en las máquinas síncronas lentas.
 - * Estator de polos salientes y rotor cilíndrico (Fig. 7c), normalmente usada en las máquinas de corriente continua.

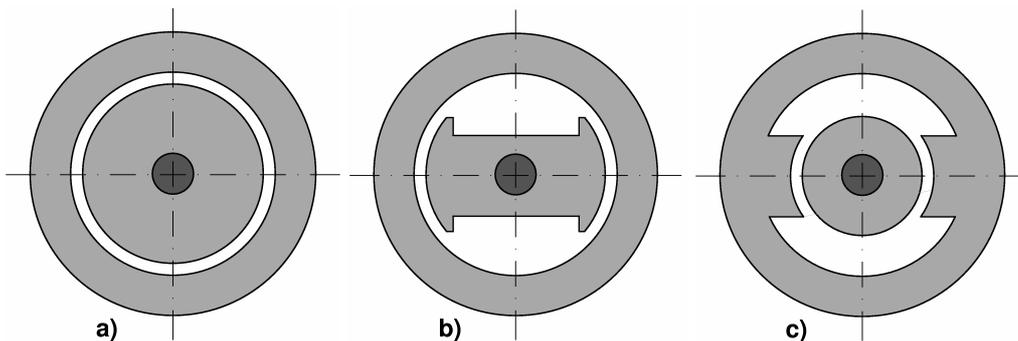


Fig. 7: Formas básicas de las máquinas eléctricas rotativas.

En las dos últimas configuraciones, la parte con polos salientes es la que aloja al devanado inductor.

En las máquinas muy pequeñas también puede encontrarse una estructura en que tanto el estator como el rotor tienen polos salientes.

PASO POLAR. ÁNGULOS ELÉCTRICOS O MAGNÉTICOS

- La mayor parte de las máquinas eléctricas son de construcción simétrica. Esto significa que sus devanados y sus núcleos magnéticos son tales que generan polos magnéticos Norte y Sur que se suceden alternativamente, de forma que la distribución del campo magnético a lo largo del entrehierro se repite para cada par de polos. Por consiguiente, la distribución del campo magnético en el entrehierro es una función periódica donde cada ciclo abarca dos polos magnéticos consecutivos (un par de polos). Además, los devanados inductor e inducido tienen igual número de polos.

Por lo tanto, el número de polos de una máquina es siempre par. Se designa por p al número de pares de polos y, por consiguiente, el número de polos de una máquina es $2p$.

- Las funciones periódicas se tratan matemáticamente mediante las series de Fourier; es decir mediante funciones seno o coseno. Por lo tanto, se definen los **ángulos eléctricos** o **magnéticos** de forma tal que a un ciclo magnético (es decir, un par de polos) corresponda un ángulo de 360 grados eléctricos o 2π

² Se desprecian las pequeñas variaciones de entrehierro debidas a la existencia de dientes y ranuras en el estator y en el rotor.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

radianes eléctricos (lo que equivale a un ciclo en una función seno o coseno). Dado que el campo magnético en el entrehierro tiene una distribución que se repite cada par de polos, en una vuelta completa del rotor se recorren p ciclos magnéticos completos. Es decir, a 360 *grados geométricos* corresponden $p \cdot 360$ *grados eléctricos*. En general, la relación entre ángulos eléctricos o magnéticos (α)³ y ángulos geométricos (α_g) es:

$$\alpha = p \cdot \alpha_g \quad (1)$$

La simetría de las máquinas da lugar a que en cada par de polos se repitan los mismos fenómenos. Por lo tanto, va a bastar con estudiar un único par de polos; es decir, con analizar la máquina como si fuera bipolar. En este estudio es más cómodo utilizar los ángulos eléctricos, ya que así el análisis resulta independiente del número de polos de la máquina.

- En este texto las velocidades recibirán diferente denominación según las unidades en que estén medidas:

n : velocidad medida en revoluciones por minuto (r.p.m.)

Ω : velocidad medida en radianes geométricos/segundo

ω : velocidad medida en radianes eléctricos/segundo

Se cumplen, pues, las siguientes relaciones:

$$\Omega = \frac{2 \pi}{60} n \quad (2)$$

$$\omega = p \cdot \Omega \quad (3)$$

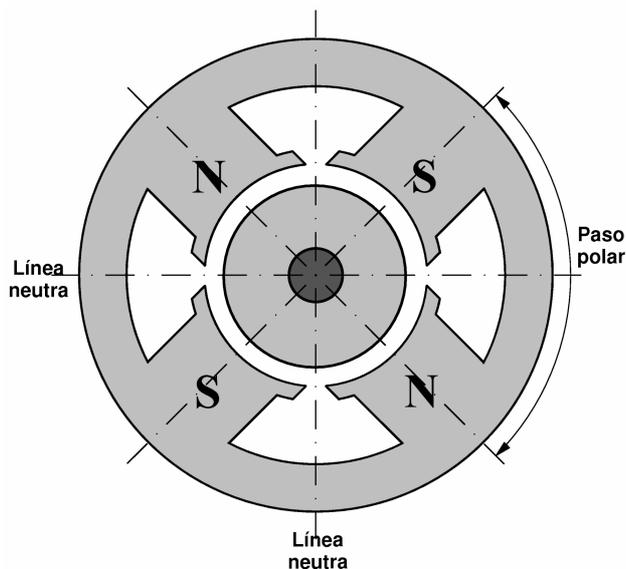


Fig. 8: Línea neutra y paso polar.

- Se llama **línea neutra** (Fig. 8) a la línea media entre dos polos consecutivos. Una máquina tiene tantas líneas neutras como pares de polos.

³ En este texto se supone que los ángulos son siempre eléctricos salvo cuando se representan con el subíndice g , en cuyo caso se trata de ángulos geométricos.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

- La distancia entre dos polos consecutivos recibe el nombre de **paso polar**. Según como esté medido, el paso polar se designará por:

t_p : Medido en longitud de arco (metros) de la circunferencia del entrehierro.

τ_p : Medido en radianes eléctricos

y_p : Medido en número de ranuras

En un núcleo magnético con K ranuras y diámetro de entrehierro d se verifica que:

$$t_p = \frac{\pi d}{2 p} \quad (4)$$

$$\tau_p = \pi \quad (5)$$

$$y_p = \frac{K}{2 p} \quad (6)$$

DEVANADOS

Definición y clasificación

- No es propósito de este libro el realizar un estudio detallado de la constitución y el cálculo de los devanados de las máquinas eléctricas, sino sólo el proporcionar las ideas básicas de su constitución y propiedades; suficientes para comprender los siguientes capítulos del texto. El lector interesado en ampliar conceptos sobre este tema puede consultar los libros [10], [12], [14] y [15] de la bibliografía.

Este apartado tratará más intensamente sobre los devanados de las máquinas de corriente alterna, dejando el análisis detallado de los devanados de las máquinas de corriente continua para cuando se estudie la teoría de estas máquinas.

- Los **devanados**, **bobinados** o **arrollamientos** de una máquina eléctrica son el conjunto de los conductores de la misma.

El material conductor suele ser cobre en forma de hilo esmaltado (el esmalte sirve de aislamiento entre conductores) o de pletina de sección rectangular y recubierta de un material aislante. Para las jaulas de ardilla (Fig. 2c) también se utiliza el aluminio.

- En algunas máquinas (básicamente las de corriente continua y síncronas de más de dos polos) el núcleo magnético del inductor está construido a base de polos salientes. En este caso el devanado inductor consiste simplemente en un arrollamiento de varias espiras en serie (Fig. 9) alrededor de los polos en el sentido adecuado para que éstos sean alternativamente Norte y Sur. El conjunto de espiras devanadas alrededor de un polo forma una bobina y las bobinas de todos los polos se suelen conectar en serie entre sí, aunque a veces se puedan conectar formando varias ramas en paralelo iguales.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Este tipo de devanado es *concentrado* y en él todas las espiras de un polo están atravesadas por el mismo flujo magnético principal.

En los transformadores también se utilizan devanados de este tipo, aunque con algunas peculiaridades específicas.

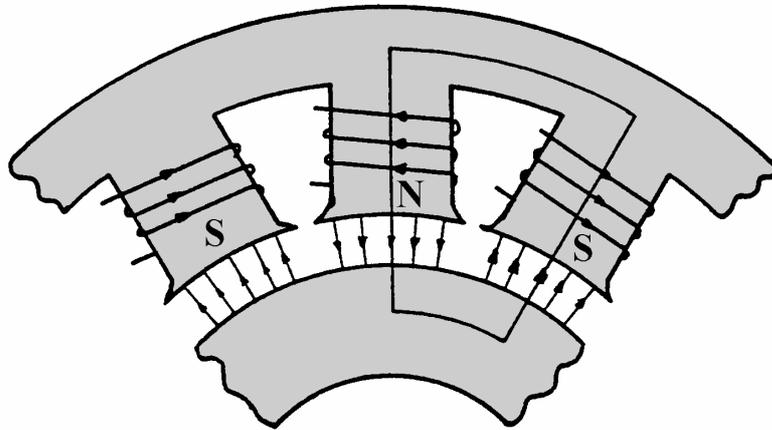


Fig. 9: Corte de una máquina cuyo inductor está en el estator y es de polos salientes.

- En los demás casos, el núcleo magnético sobre el que se coloca el bobinado es cilíndrico y se utilizan devanados *distribuidos*. Esto da lugar a que las espiras de una fase correspondientes a un mismo polo no estén sometidas a los mismos flujos magnéticos.

Estos devanados están alojados en ranuras del núcleo magnético practicadas al efecto en la superficie cilíndrica que está frente al entrehierro y pueden ser de dos tipos: anulares y de tambor.

$$\text{DEVANADOS} \left\{ \begin{array}{l} \text{Concentrados} \\ \text{Distribuidos} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Anulares o en anillo} \\ \text{De tambor} \end{array} \right.$$

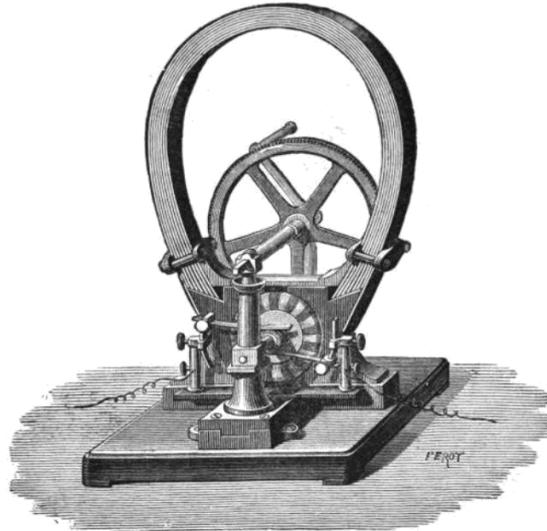
En los **devanados anulares o en anillo** (Figs. 10 a y b) las espiras se arrollan sobre el anillo que constituye el núcleo magnético. En este tipo de devanado cada espira sólo tiene un lado activo, es decir, un lado que corta líneas de campo magnético cuando gira la máquina.

En los **devanados de tambor** (Fig. 10c) cada espira tiene dos lados activos situados en sendas ranuras, obteniéndose un mejor aprovechamiento del cobre respecto a los bobinados de anillo.

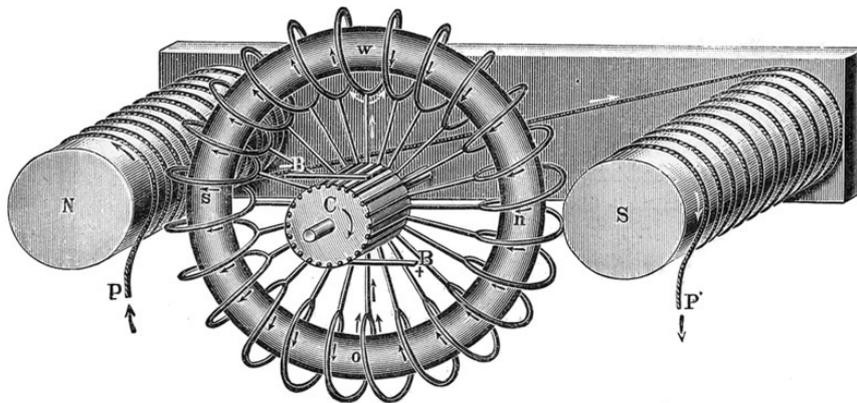
Los devanados anulares fueron los que se emplearon en un principio, como en la máquina de Gramme (Fig. 10a), pero hoy en día están totalmente en desuso y sólo se utilizan los de tambor. Por esta razón aquí se tratará de éstos últimos.

No obstante, es preciso indicar que algunos fenómenos de las máquinas eléctricas, como la conmutación en un colector de delgas, se entienden más fácilmente con bobinados anulares, por lo que en algunas explicaciones se hará referencia a este tipo de devanado.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS



a)



b)



c)

Fig. 10:

- a) *Dinamo de Gramme (Fuente: Wikimedia Commons: "Electric lighting: A practical treatise". Hippolyte Fontaine. 1878).*
- b) *Representación esquemática de una máquina de c.c. con devanado anular en el inducido (Fuente: Wikimedia Commons: "Bibliothek allgemeinen und praktischen Wissens für Militäranwärter Band III, 1905").*
- c) *Devanado de tambor alojado en las ranuras del estator de una máquina síncrona.*

Devanados de tambor. Definiciones

- Dos *conductores* alojados en ranuras diferentes unidos por una *conexión frontal* forman una **espira** (Fig. 11). Un conjunto de una o varias espiras iguales, alojadas en las mismas ranuras y aisladas juntas formando una unidad constituyen una **bobina**.

El conjunto de los conductores de una bobina forman los *lados o haces activos* de la misma. Es decir, los lados activos son las zonas de la bobina que están dentro de las ranuras. Las uniones entre los dos lados de una bobina, las cuáles sobresalen del entrehierro por sus dos costados y no están ubicadas en ranuras, son las *cabezas de bobina*. Una bobina con varias espiras en serie tiene, pues, dos lados activos y dos cabezas (Fig. 12).

En los devanados de corriente alterna todas las espiras de una bobina se conectan en serie. En los bobinados conectados a un colector de delgas las espiras de una bobina están divididas en una o varias secciones iguales.

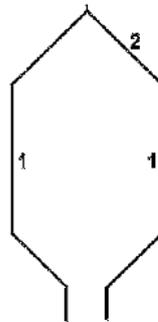


Fig. 11: Espira. 1: Conductores, 2: Conexión frontal.

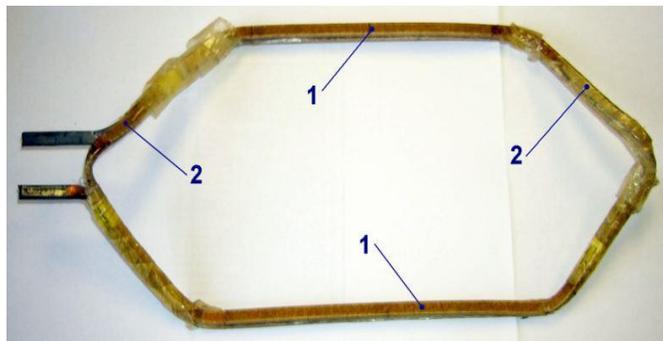
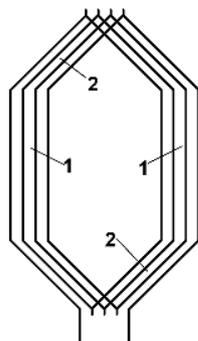


Fig. 12: Bobinas. 1: Lados o haces activos; 2: Cabezas de bobina.



a)

b)

Fig. 13: Bobinas de un devanado de c.c. fabricadas con pletina de cobre de: a) una sección de dos espiras; b) cuatro secciones de una espira.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En las máquinas con colector de delgas, como las de corriente continua, cada bobina está formada por una o varias **secciones**, también denominadas **elementos** (Fig. 13). Una sección es el conjunto de espiras en serie que en el esquema del devanado están comprendidas entre dos delgas consecutivas del colector. Una sección puede tener una o más espiras.

- Se denomina **paso de bobina** a la distancia que hay entre los dos lados de una bobina. Se puede medir en fracciones del paso polar, en radianes eléctricos o geométricos, etc., pero normalmente se mide contando el número de ranuras que hay entre los dos lados de la bobina. Al paso de bobina medido en número de ranuras se lo designará por y_1 .

Los dos lados de una bobina deben estar situados frente a polos contiguos, lo que da lugar a que el paso de bobina no sea muy diferente del paso polar o distancia entre dos polos consecutivos. Al paso polar medido en número de ranuras se le designa por y_p .

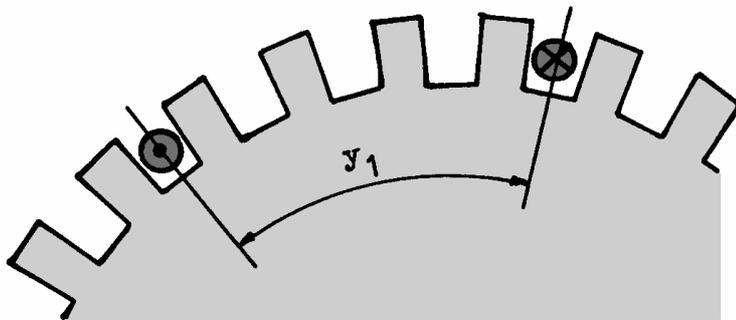


Fig. 14: Bobina de paso y_1 igual a 4 ranuras

Una bobina se denomina de *paso diametral* si su paso es igual al paso polar, de *paso acortado* si su paso es inferior al paso polar y de *paso alargado* si su paso es superior al paso polar:

Paso diametral:	$y_1 = y_p$
Paso acortado:	$y_1 < y_p$
Paso alargado:	$y_1 > y_p$

- Los **devanados abiertos** (Figs. 17 a 25) están formados por una o varias *fases*, cada una de las cuales tiene un principio y un final. Estos devanados se usan en las máquinas de corriente alterna, excepto en el inducido de las máquinas con colector de delgas.

Los **devanados cerrados** se emplean en las máquinas con colector de delgas (Fig. 34b), tanto de c.c. como de c.a., no tienen extremos libres y el conjunto de las bobinas forma uno o varios circuitos cerrados. La corriente se saca al exterior mediante tomas intermedias que se conectan a las delgas del colector. El bobinado en anillo de la Fig. 10b es un ejemplo de devanado cerrado. Estos devanados son siempre de dos capas, como se explica a continuación.

- En los **devanados de una capa o de simple capa** (Fig. 15a) cada ranura sólo posee un lado activo de una bobina. Actualmente sólo se utilizan estos devanados en máquinas de corriente alterna.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

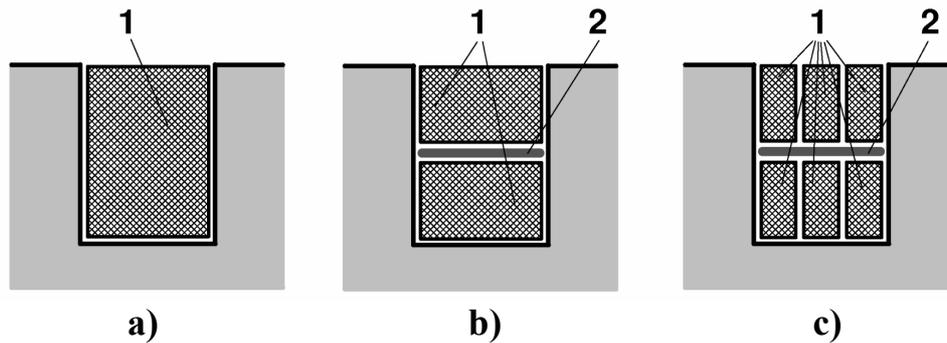


Fig. 15: Ranuras con devanados (1: Lado de bobina, 2: Aislamiento entre capas):
a) de una capa.
b) de dos capas de corriente alterna
c) de dos capas de c.c. con tres lados de bobina por capa y ranura.

En los **devanados de corriente alterna de dos capas o de doble capa** (Fig. 15b) en cada ranura hay dos lados activos, correspondientes a dos bobinas distintas, colocados uno encima del otro formando dos capas de conductores entre las cuáles se coloca un aislante. Estos devanados son abiertos.

En los **devanados de corriente continua de dos capas o de doble capa** (Fig. 15c) en cada ranura hay dos capas de conductores, una superior y otra inferior, cada una de las cuáles consta de uno o varios lados activos de bobina dispuestos uno al lado de otro (en la Fig. 15c hay tres lados de bobina por capa y ranura). Estos devanados son cerrados y se utilizan en las máquinas con colector de delgas, no sólo de c.c. sino también de c.a.

Por lo tanto, la diferencia entre los devanados de doble capa de corriente alterna y de corriente continua es que en los de c.a. hay siempre un solo lado activo de bobina por capa y ranura, mientras que en los bobinados de c.c. puede haber más de un lado de bobina por capa y ranura.

En los devanados de dos capas, tanto de c.c. como de c.a., cada bobina tiene situado uno de sus lados en la capa inferior de una ranura y el otro en la capa superior de otra ranura.

Representación de devanados

- Para representar gráficamente un devanado en este texto se emplearán **esquemas rectangulares** (Figs. 17 y siguientes). En estos esquemas cada bobina se dibuja como si sólo tuviera una espira, aunque en realidad esté formada por varias. Esto es así porque lo que interesa reflejar son las conexiones entre las bobinas y las ranuras que éstas ocupan, lo cuál no depende del número de espiras de cada bobina.

En la representación rectangular se supone la máquina cortada según una generatriz y desarrollada de tal manera que la superficie cilíndrica del núcleo magnético que está frente al entrehierro se convierta en un plano. Los lados activos del bobinado se representan por medio de rectas verticales, las cabezas de bobina se dibujan en la parte superior del esquema y las conexiones entre bobinas y los extremos libres del bobinado o las conexiones al colector de delgas, en la parte inferior. Si el bobinado es de doble capa los dos lados activos

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

colocados en la misma ranura se representan por medio de dos líneas paralelas, una al lado de la otra; la representativa del lado de la capa superior (la capa más próxima al entrehierro) se dibuja de trazo continuo y la del lado inferior (la capa situada en el fondo de la ranura) se representa con una línea de trazos.

Cuando se produzca un cruce entre dos cabezas de bobina o dos conexiones entre bobinas, se suele representar con trazo continuo a lo situado más cerca del entrehierro y con línea de trazos a lo más alejado del entrehierro.

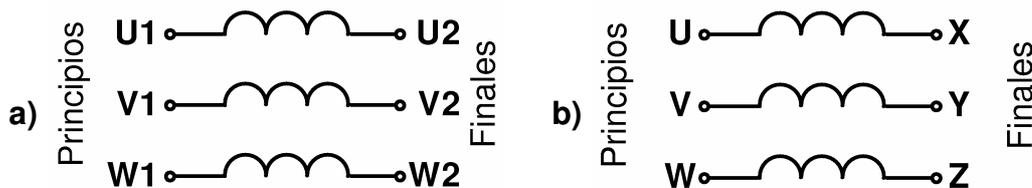
Devanados de corriente alterna

- En este apartado se van a estudiar los devanados utilizados en las máquinas de corriente alterna (salvo en las que tienen un colector de delgas, las cuales tienen en el inducido bobinados cerrados, similares a los de la máquinas de corriente continua). Estos devanados son abiertos y constan de una o varias fases, cada una de las cuáles tiene dos *extremos*: el *principio* y el *final* de la fase.
- En los devanados de corriente alterna las distancias se van a medir contando números de ranuras. Para ello, lo más sencillo es contar las ranuras incluyendo las dos extremas y luego restar 1.

Así, por ejemplo, en el devanado de la Fig. 17 la primera de las bobinas tiene sus lados en las ranuras 1 y 12. Si se cuentan las ranuras que hay entre estos lados, incluyendo las ranuras extremas, 1 y 12, se obtiene un resultado de 12 ranuras. El paso de esta bobina vale, pues, $12 - 1 = 11$ ranuras.

Denominación de los extremos de las fases

- Los extremos de las fases de los bobinados de c.a. tienen una denominación normalizada (norma UNE-EN 60034-8), la cual está representada en la Fig. 16.



*Fig. 16: Denominación de los extremos de las fases de un devanado trifásico:
a) denominación actual (UNE-EN 60034-8); b) denominación antigua.*

Según la norma UNE-EN 60034-8 (que se corresponde con la norma CEI 60034-8), en los bobinados trifásicos los 3 principios de fase se denominan U1, V1 y W1 y los tres finales U2, V2 y W2 (Fig. 16a). Antes se usaban las letras U, V y W para los principios y las letras X, Y y Z para los finales (Fig. 16b).

En los bobinados bifásicos los dos principios de fase se denominan U1 y V1 y los finales U2 y V2.

En los bobinados monofásicos el principio de la fase se designa por U1 y el final por U2.

Grupos polares

- En los devanados de corriente alterna las bobinas de una misma fase correspondientes a un mismo polo forman un **grupo polar**. Un grupo polar es, pues, un conjunto de bobinas de la misma fase conectadas en serie, alojadas en ranuras contiguas y arrolladas alrededor de un mismo polo. Los grupos polares se conectan entre sí en serie o formando varias ramas en paralelo idénticas para, así, constituir una fase del devanado. En las Figs. 17 y siguientes los grupos polares se han señalado con un número rodeado de una circunferencia: ①, ②, ...
- Según como se dispongan los grupos polares de una fase existen devanados por polos y por polos consecuentes.

En los **devanados por polos** (Fig. 17) existen tantos grupos polares por fase, G_f , como polos, $2p$, tiene la máquina eléctrica:

$$G_f = 2p \tag{7}$$

En los **devanados por polos consecuentes** (Fig. 18) el número de grupos polares por fase, G_f , es igual al número de pares de polos, p , de la máquina:

$$G_f = p \tag{8}$$

- Cuando circula corriente por un devanado por polos (Fig. 17) cada grupo polar genera un polo magnético y el conjunto de lados de bobina con corrientes de igual sentido situado entre los ejes de dos polos magnéticos consecutivos pertenece a partes iguales a dos grupos polares distintos. En consecuencia, para conseguir que en un devanado por polos, de una capa y realizado con bobinas que tienen todas el mismo número de espiras, todos los grupos polares sean iguales tiene que suceder que el número de ranuras por polo y fase, “q”, sea un número entero par. En efecto, los lados de bobina situados en estas q ranuras se deben repartir a partes iguales entre dos grupos polares con el mismo número de bobinas, lo que obliga a que “q” sea un número par.

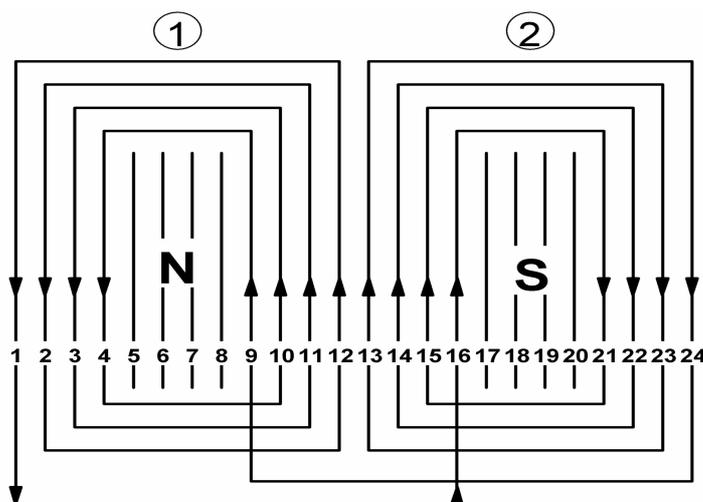


Fig. 17: Bobinado monofásico concéntrico por polos, de 2 polos, simple capa, 2 grupos polares de 4 bobinas cada uno, $K = 24$ ranuras, $a' = 1$ rama en paralelo. Las 4 ranuras centrales de cada polo no están ocupadas. Los dos grupos polares se han marcado como ① y ②.

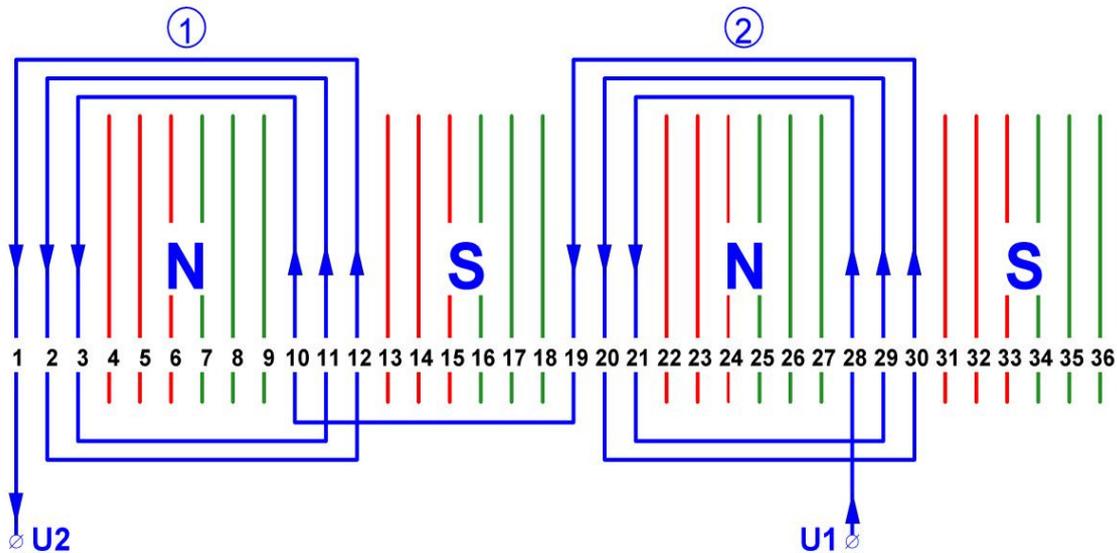


Fig. 18: Bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes, de 4 polos, simple capa, 2 grupos polares por fase de 3 bobinas cada uno, $K = 36$ ranuras, $q = 3$ ranuras por polo y fase, $a' = 1$ rama en paralelo. Los dos grupos polares se han marcado como ① y ②. Sólo de ha dibujado una de las tres fases.

Cuando circula corriente por un devanado por polos consecuentes (Fig. 18) cada grupo polar genera dos polos magnéticos y el conjunto de conductores con corrientes de igual sentido situado entre los ejes de dos polos magnéticos consecutivos pertenece a un solo grupo polar.

- Para realizar un bobinado por polos hay que conectar el final del primer grupo polar con el final del segundo, el principio del segundo con el principio del tercero, el final del tercero con el final del cuarto, etc. Es decir, “se conectan principios con principios y finales con finales”.

Para realizar un bobinado por polos consecuentes se unen el final de un grupo polar con el principio del siguiente. Es decir, “se conectan finales con principios”.

Devanados enteros y fraccionarios

- En ciertas ocasiones (especialmente en los inducidos de alternadores) se utilizan **devanados fraccionarios** en los que los grupos polares de una fase no son todos exactamente iguales; algunos tienen una bobina más que los otros.

En los bobinados fraccionarios el número de bobinas por par de polos y fase, b , no es entero, ni tampoco el número de ranuras por polo y fase, q . Esto no significa que cada par de polos tenga un número no entero de bobinas; sino que, como hay diferencias entre el número de bobinas de cada grupo polar, en una fase los valores medios de los parámetros b y q no son números enteros.

Este tipo de bobinado da origen a una ligera asimetría, pues el devanado no es igual en todos los polos de la máquina. Sin embargo, logran que las f.e.m.s inducidas en las fases tengan una forma más sinusoidal (con menos armónicos temporales).

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

- Este texto va a tratar solamente los devanados **enteros**, en los que todos los grupos polares son iguales y, por lo tanto, los parámetros b y q tienen valores enteros.

En consecuencia, algunas de las características de los devanados que se indican en los apartados de este libro no son de aplicación en los devanados fraccionarios.

Tipos de bobinado de corriente alterna

- Según el orden de sucesión de los lados activos de una fase, los devanados de corriente alterna se clasifican en: concéntricos, imbricados y ondulados.
- * En los **devanados concéntricos** las bobinas de un grupo polar son de diferentes tamaños y se van situando sucesivamente unas dentro de las otras (Figs. 17, 18 y 19).

En este tipo de bobinado los pasos de bobina son diferentes de unas bobinas a otras. Cuando se usa la conexión por polos consecuentes el valor medio de los pasos de las bobinas de un grupo polar es igual al paso polar (Fig. 18).

En la práctica, los devanados concéntricos trifásicos de más de dos polos se ejecutan por polos consecuentes. En los demás casos se realizan por polos. Estos bobinados se fabrican siempre de una capa.

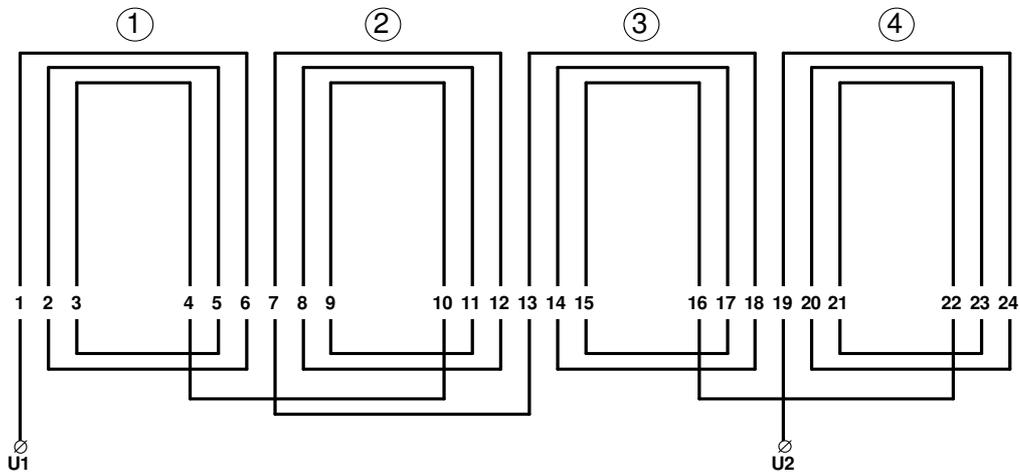


Fig. 19: Bobinado monofásico concéntrico por polos, de 4 polos, simple capa, 4 grupos polares de 3 bobinas cada uno, $K = 24$ ranuras, $q = 6$ ranuras por polo y fase, $a' = 1$ rama en paralelo. En el centro de cada polo hay una zona sin ranurar.

- * Los **devanados imbricados** (Figs. 20, 21, 22 y 23) están realizados con bobinas de igual tamaño y forma.

En los devanados imbricados un grupo polar se obtiene conectando en serie varias bobinas de una misma fase, todas ellas correspondientes al mismo polo (Figs. 20, 21, 22 y 23). Por esta razón, en estos devanados hay que retroceder para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de la una bobina está por delante del principio de la siguiente con la que se conecta, como se puede ver en las Figs. 20 a 23).

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

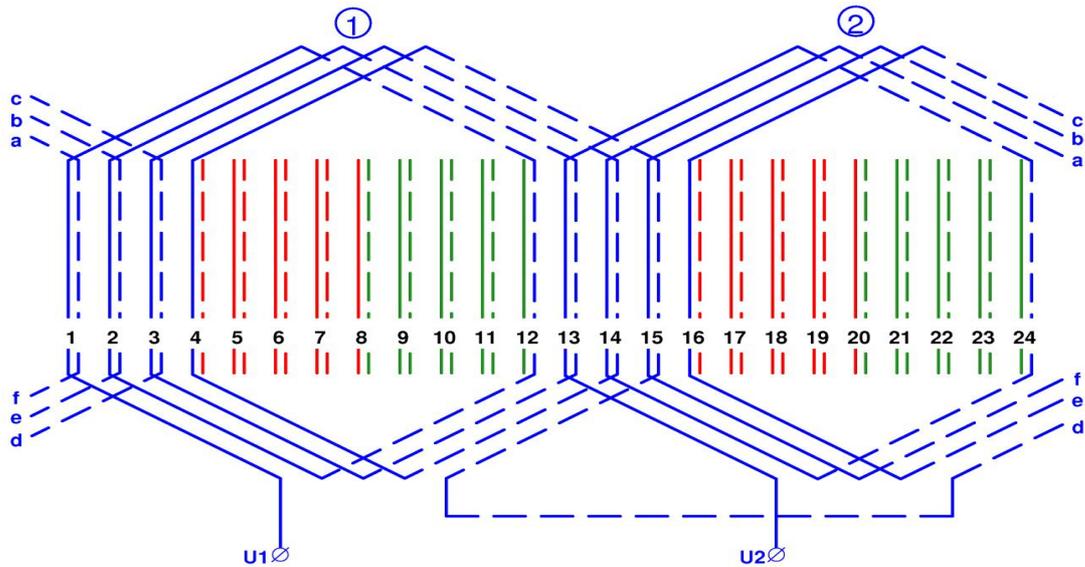


Fig. 20: Bobinado trifásico imbricado, por polos, de 2 polos, doble capa, 2 grupos polares por fase de 4 bobinas cada uno, $K = 24$ ranuras, $q = 4$ ranuras por polo y fase, paso de bobina acortado en 1 ranura, $a' = 1$ rama en paralelo. Sólo se ha dibujado una de las tres fases.

Estos bobinados pueden ser de una o de dos capas, de paso diametral, alargado o acortado y siempre se ejecutan por polos.

Cuando un bobinado imbricado es de una sola capa el paso de bobina medido en número de ranuras, y_1 , debe ser impar (Fig. 23). Esto se debe a que, como se muestra en la Fig. 23, en las ranuras se van colocando alternativamente el lado derecho de una bobina, el lado izquierdo de otra bobina, el lado derecho y así sucesivamente. Por consiguiente, una bobina tendrá uno de sus lados en una ranura par y el otro en una ranura impar y el paso de bobina, y_1 , es, pues, impar.

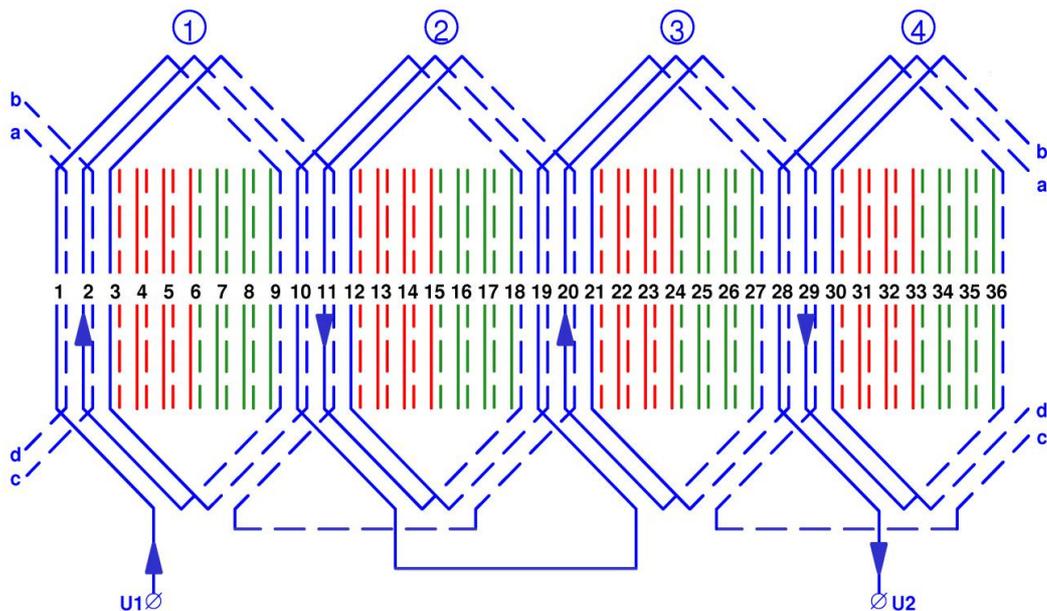


Fig. 21: Bobinado trifásico imbricado, por polos, de 4 polos, doble capa, 4 grupos polares por fase de 3 bobinas cada uno, $K = 36$ ranuras, $q = 3$ ranuras por polo y fase, paso de bobina acortado en 1 ranura, $a' = 1$ rama en paralelo. Sólo se ha dibujado una de las tres fases.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

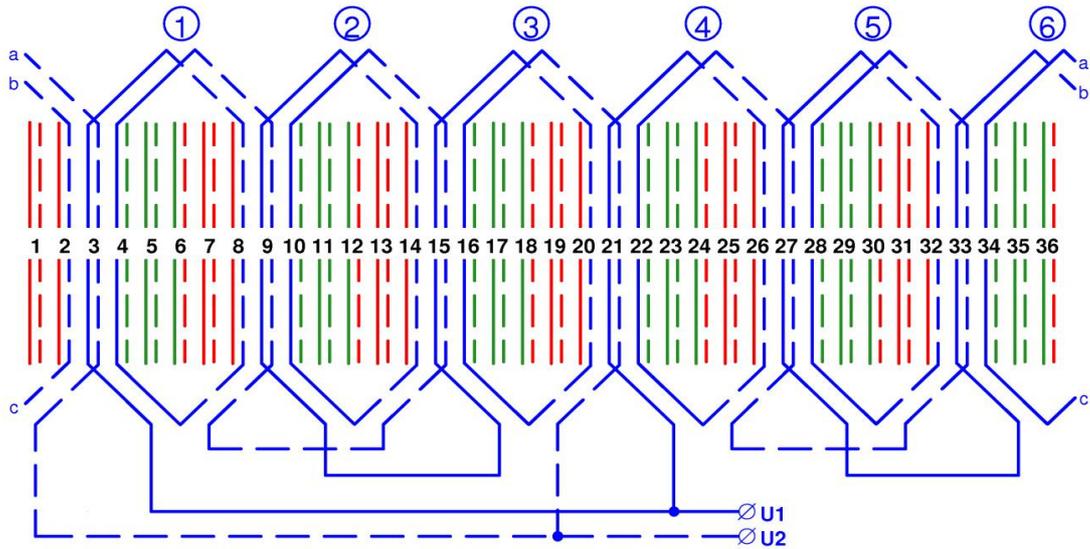


Fig. 22: Bobinado trifásico imbricado, por polos, de 6 polos, doble capa, 6 grupos polares por fase de 2 bobinas cada uno $K = 36$ ranuras, $q = 2$ ranuras por polo y fase, paso de bobina acortado en 1 ranura, $a' = 2$ ramas en paralelo. Sólo se ha dibujado una de las tres fases.

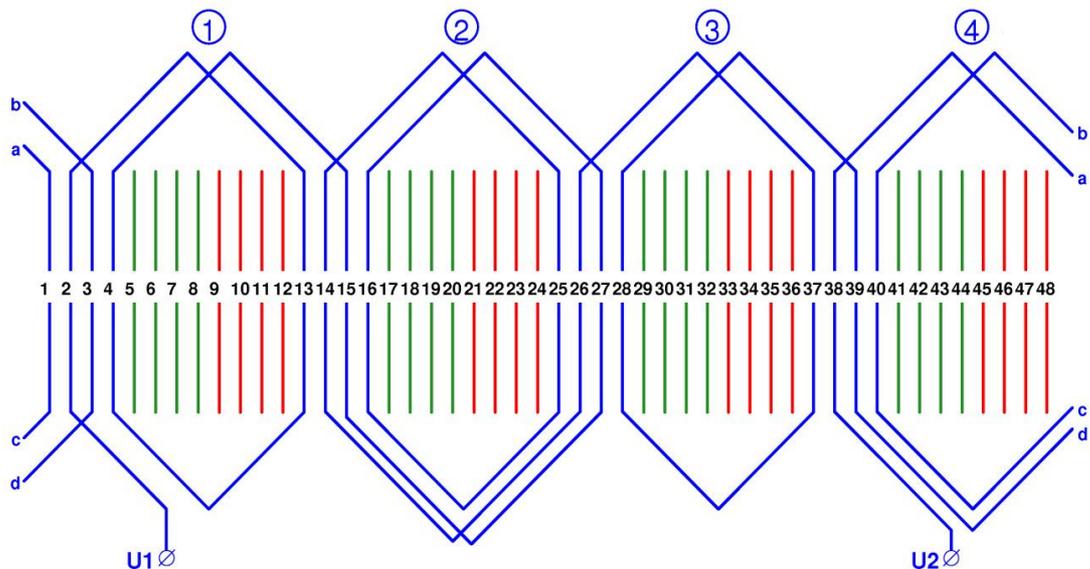


Fig. 23: Bobinado trifásico imbricado, por polos, de 4 polos, una capa, 4 grupos polares por fase de 2 bobinas cada uno, $K = 48$ ranuras, $q = 4$ ranuras por polo y fase, $a' = 1$ rama en paralelo, $y_1 = 11$ ranuras. Sólo se ha dibujado una de las 3 fases.

* Los **devanados ondulados** (Figs. 24 y 25) también están realizados con bobinas de igual tamaño.

A diferencia de lo que sucede en los bobinados imbricados, en los devanados ondulados una bobina se conecta con otra de la misma fase que está situada bajo el siguiente par de polos. Por esta razón, en estos devanados hay que avanzar para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente (pues el final de la una bobina está detrás del principio de la siguiente con la que se conecta, como se puede apreciar en la Fig. 24). Esto hace que estos arrollamientos tengan forma de onda, lo que da origen a su denominación.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

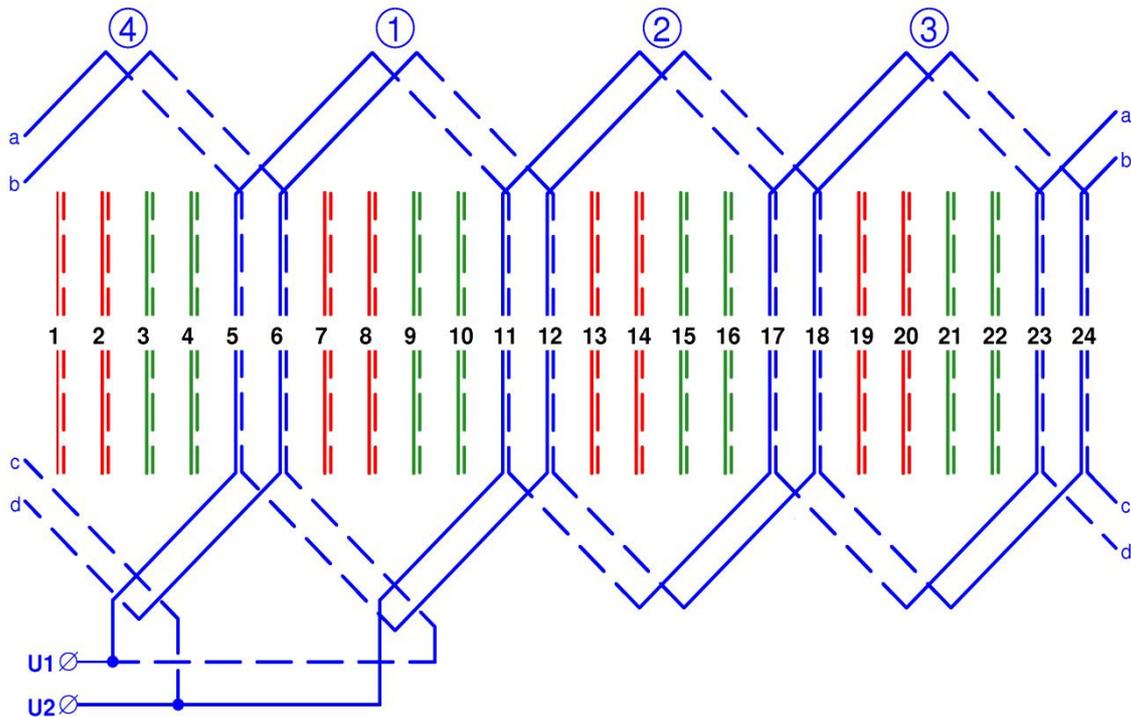


Fig. 24: Devanado trifásico ondulado, por polos, 4 polos, doble capa, 4 grupos polares por fase de 2 bobinas cada uno, $K = 24$ ranuras, $q = 2$ ranuras/polo y fase, paso de bobina diametral, $a' = 2$ ramas en paralelo. Se ha dibujado sólo una de las tres fases.

Cada fase de un devanado ondulado consta de dos mitades, una corresponde a los grupos polares impares y la otra a los grupos polares pares.

La media fase de los grupos polares impares se construye uniendo sucesivamente la primera de las bobinas de cada grupo polar impar hasta dar una vuelta completa al devanado, luego se continúa el devanado con una segunda vuelta uniendo sucesivamente la segunda de las bobinas de cada grupo polar impar, y así sucesivamente se van dando vueltas al bobinado hasta completar todas las bobinas de los grupos polares impares. La media fase de los grupos polares pares se construye de forma similar.

La fase completa se consigue conectando en serie ($a' = 1$), mediante el denominado punte de retorno (Fig. 25), o en paralelo ($a' = 2$) (Fig. 24) ambas mitades. Al realizar estas conexiones hay que tener en cuenta que la corriente debe circular en sentidos contrarios en ambas mitades, pues los grupos polares impares deben originar polos magnéticos de signo contrario a los que generan los grupos polares pares.

En la práctica los devanados ondulosos se fabrican de dos capas y se ejecutan por polos. Estos arrollamientos pueden ser de paso diametral, alargado o acortado.

- De lo anterior se deduce que cuando se desee realizar un devanado de una capa, éste deberá ser concéntrico o imbricado, pero no ondulado. Del mismo modo, si se desea que el bobinado sea de doble capa, éste deberá ser imbricado u ondulado, pero no concéntrico.

Por otra parte, en la práctica sucede que todos los devanados son por polos; excepto los bobinados concéntricos trifásicos de más de dos polos, que son por polos consecuentes.

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

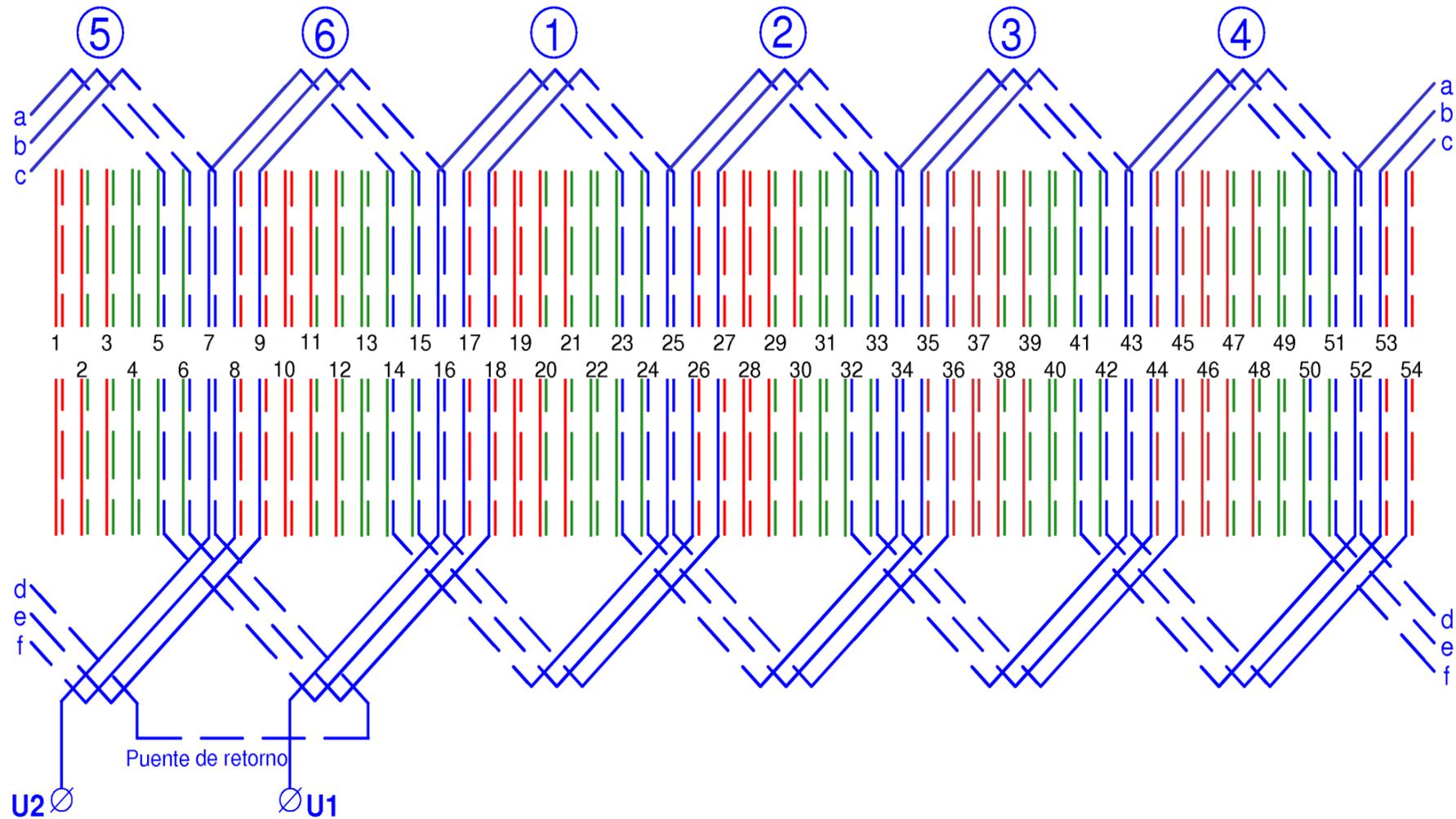


Fig. 25: Devanado trifásico ondulado, por polos, 6 polos, doble capa, 6 grupos polares por fase de 3 bobinas cada uno, $K = 54$ ranuras, $q = 3$ ranuras/polo y fase, paso de bobina acortado en dos ranuras, $a' = 1$ rama en paralelo. Se ha dibujado sólo una de las tres fases.

Ramas en paralelo

- Los grupos polares que constituyen una fase pueden conectarse entre sí en serie, que es lo más frecuente, o formando a' *ramas en paralelo*. Todas las ramas en paralelo de una fase han de ser iguales, de forma que en todas ellas se induzca la misma f.e.m. y posean la misma impedancia.

Si N_f es el número total de espiras de una fase y a' el número de sus ramas en paralelo, cada una de estas ramas consta de estas N espiras en serie:

$$N = \frac{N_f}{a'} \tag{9}$$

Si la corriente total que circula por una fase es I, la corriente que circula por cada rama en paralelo vale

$$I_r = \frac{I}{a'} \tag{10}$$

Como todas las bobinas de una rama en paralelo están en serie y cada bobina consta, a su vez, de una o varias espiras en serie, la corriente que circula por una espira también es igual a I_r .

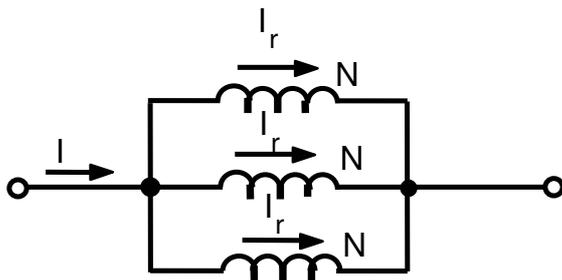


Fig. 26: Reparto de corrientes en una fase con a' = 3 ramas en paralelo.

En los bobinados *concéntricos e imbricados enteros* el número de ramas en paralelo a' que puede tener una fase está condicionado por su número de grupos polares; el cual, a su vez, depende del número de polos (ecuaciones (7) y (8)). Así, por ejemplo, en un devanado con 6 grupos polares por fase ($G_f = 6$), éstos se pueden conectar en serie ($a' = 1$), formado dos ramas en paralelo ($a' = 2$) con tres grupos polares en serie en cada una, formado tres ramas en paralelo ($a' = 3$) con dos grupos polares en serie en cada una o en paralelo ($a' = 6$). Es decir, en este devanado a' sólo puede tomar alguno de estos valores: 1, 2, 3 ó 6.

Se comprueba, pues, que el número de ramas en paralelo, a', en bobinados concéntricos e imbricados enteros sólo puede tomar valores iguales a los divisores enteros del número de grupos polares por fase, G_f .

El caso de los *devanados ondulados enteros* es algo diferente, pues se puede comprobar que en ellos los grupos polares de una fase sólo se pueden conectar en serie ($a' = 1$) o formando dos ramas en paralelo ($a' = 2$). En este último caso una de las ramas en paralelo incluye a los grupos polares pares y la otra a los grupos polares impares (Fig. 24).

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En los devanados fraccionarios los valores que puede adoptar el número de ramas en paralelo a' que puede tener una fase están más limitados que en los devanados enteros.

Si todas las espiras de una fase están conectadas en serie, que es lo que sucede en la mayoría de los bobinados, se cumplirá que $a' = 1$ y, por tanto, $N = N_f$ e $I_r = I$.

Ocupación de ranuras por el bobinado

- Cuando una máquina tiene el inductor o el inducido monofásico, es muy corriente que este devanado no llene la totalidad de las ranuras del núcleo magnético correspondiente (Fig. 17); de tal forma que en el centro de los polos quedan algunas ranuras sin ocupar por el bobinado. Esto es así porque, como se estudiará más adelante, el efecto de las bobinas que se colocaran en estas ranuras centrales sería muy reducido y no justifica el gasto de cobre que supone el instalarlas. Por esta razón, en este caso es frecuente que los núcleos magnéticos ya se construyan careciendo de estas ranuras centrales, dando lugar a un reparto de ranuras no uniforme a lo largo del entrehierro (Fig. 19).
- Si el devanado es polifásico lo normal es que el núcleo magnético tenga sus ranuras uniformemente repartidas a lo largo del entrehierro y que el devanado las ocupe todas (esto se aprecia claramente en la Fig. 30b).

Expresiones relativas a los devanados de corriente alterna

- Seguidamente se van a deducir una serie de relaciones que existen entre los parámetros de un devanado de corriente alterna. Estas expresiones sólo son válidas para los bobinados monofásicos y para los devanados polifásicos en los que todas las fases son idénticas, que es lo que sucede en la mayoría de los casos.

Cuando un devanado monofásico tiene ranuras no ocupadas (Fig. 17), las magnitudes relativas al número de ranuras, K , q y Q (las cuáles se definen en los siguientes párrafos), se refieren sólo a las ranuras ocupadas por las bobinas. En este caso, las distancias se miden contando sólo las ranuras ocupadas por el bobinado y, por consiguiente, omitiendo las ranuras vacías.

- Si en un circuito magnético que tiene K ranuras se coloca un devanado de $2p$ polos y m fases, el número de ranuras por polo Q vale

$$Q = \frac{K}{2p} \quad (= y_p) \quad (11)$$

Nótese que esta magnitud, Q , coincide con el paso polar medido como número de ranuras, y_p (ecuación (6)).

El número de ranuras por polo y fase q vale

$$q = \frac{Q}{m} = \frac{K}{2pm} \quad (12)$$

CONSTITUCIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

- Un arrollamiento de b bobinas por par de polos y fase tiene $p \cdot b$ bobinas por fase. Si cada una de estas bobinas tiene N_r espiras en serie, este devanado verifica las siguientes relaciones:

$$N_f = p \cdot b \cdot N_r \quad \text{espiras por fase} \quad (13)$$

$$N = \frac{p}{a'} \cdot b \cdot N_r \quad \text{espiras por rama en paralelo} \quad (14)$$

$$B = m \cdot p \cdot b \quad \text{bobinas totales (incluyendo todas fases)} \quad (15)$$

- En los devanados de una capa, dado que una bobina tiene dos lados activos, se cumple que:

$$K = 2 B \quad (16)$$

luego, de las ecuaciones (12) y (15) se obtiene que:

$$2 p m q = 2 (m p b) \rightarrow q = b \quad (17)$$

En los devanados de dos capas hay dos lados activos en una ranura y

$$K = B \quad (18)$$

por consiguiente, de (12) y (15):

$$2 p m q = m p b \rightarrow 2 q = b \quad (19)$$

De las relaciones (17) y (19) se deduce que el número de capas de un bobinado es igual al cociente b/q .

- Un devanado tiene G_f grupos polares por fase y G grupos polares en total (considerando todas las fases). Luego:

$$G = m \cdot G_f \quad (20)$$

Si b_G es el número de bobinas de un grupo polar, el número total de bobinas (considerando todas las fases) B vale:

$$B = G \cdot b_G \quad (21)$$

- De las expresiones (10) y (14) se deduce que:

$$(b \cdot N_r) I_r = \left(\frac{N a'}{p} \right) \cdot \left(\frac{I}{a'} \right) = \frac{N I}{p} \quad (22)$$

Todas estas expresiones se resumen en el cuadro de la página siguiente.

DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- a' Número de ramas en paralelo de una fase
- B Número total de bobinas simples
- b Número de bobinas simples de una fase por par de polos
- b_G Número de bobinas simples de un grupo polar
- G Número total de grupos polares
- G_f Número de grupos polares de una fase
- I Corriente total absorbida por una fase
- I_r Corriente que circula por cada una de las ramas en paralelo de una fase
- K Número total de ranuras
- m Número de fases
- N_r Número de espiras de una bobina simple
- N_f Número de espiras totales de una fase
- N Número de espiras efectivas en serie de una fase = Número de espiras de cada rama en paralelo de una fase
- p Número de pares de polos
- Q Número de ranuras por polo
- q Número de ranuras por polo y fase
- Z_f Número de conductores totales de una fase (Z_f = 2 N_f)
- Z Número de conductores efectivos en serie de una fase (Z = 2 N)

$$Q = m \cdot q$$

$$K = 2 \cdot p \cdot Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q$$

$$N_f = a' \cdot N$$

$$I = a' \cdot I_r$$

$$N = \frac{p}{a'} \cdot b \cdot N_r$$

$$N_f = p \cdot b \cdot N_r$$

$$B = m \cdot p \cdot b$$

$$B = G \cdot b_G$$

$$b \cdot N_r \cdot I_r = \left(\frac{N \cdot a'}{p} \right) \cdot \left(\frac{I}{a'} \right) = \frac{N I}{p}$$

$$G = m \cdot G_f$$

En **devanados de una capa** (como cada bobina ocupa dos ranuras):

$$\boxed{K = 2 B} \rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 (m \cdot p \cdot b) \rightarrow \boxed{q = b}$$

En **devanados de dos capas** (con un lado de bobina por capa):

$$\boxed{K = B} \rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = m \cdot p \cdot b \rightarrow \boxed{2 q = b}$$

En **devanados por polos**:

$$\boxed{G_f = 2 p}$$

En **devanados por polos consecuentes**:

$$\boxed{G_f = p}$$

Observaciones respecto a los devanados de corriente alterna

Ubicación de los extremos de las fases

- Cuando un devanado tiene más de dos polos existen varias posiciones en una fase donde se pueden colocar el principio de fase, una posición por cada par de polos. En efecto, todas estas posiciones forman los mismos ángulos eléctricos con los principios de las fases anterior y siguiente. Análogamente sucede con el final de fase. Luego, en estos arrollamientos existen varias opciones donde colocar los extremos de las fases. Cuando se elige la posición de los extremos de las fases de un bobinado de más de dos polos conviene tener en cuenta lo siguiente:
 - * En un estator con un devanado polifásico, los extremos de cada fase se unen a los terminales de la caja de bornes. Se procura que los extremos de las fases estén próximos entre sí y a la caja de bornes, de forma que los cables de conexión sean lo más cortos posible.
 - * En un rotor con un devanado trifásico, éste se conecta en estrella y los principios de las fases se unen a un colector de tres anillos. Se procura que los principios de las tres fases estén sobre ranuras que disten $360/3 = 120^\circ$ geométricos entre sí, de manera que el reparto de las masas del rotor dé lugar al mejor equilibrio dinámico posible.

Simetría de una fase

- Las máquinas eléctricas que se van a estudiar en este libro son simétricas. Esto quiere decir que tanto su circuito magnético como sus devanados tienen una geometría que se repite para cada par de polos y que dos polos consecutivos (de distinta polaridad) tienen devanados antisimétricos (es decir, cada π radianes eléctricos el devanado se repite, pero arrollado en sentido opuesto).

Esto obliga a que cuando un devanado está construido a base de bobinas iguales de paso no diametral sea preciso que cada bobina esté acompañada de otra, de forma que el par de bobinas sí tenga simetría diametral. Así, en la Fig. 27a se aprecia como en una máquina de dos polos una bobina de paso acortado a-a' no verifica que cada paso polar (π radianes eléctricos) el bobinado sea idéntico, pero arrollado en sentido inverso. En la Fig. 27b se puede observar que añadiendo otra bobina b-b' de paso acortado, idéntica a la primera (a-a') y dispuesta en una posición simétrica a ésta, se consigue la simetría buscada. En efecto, en la Fig. 27b se observa que a 180° eléctricos del lado de bobina a con corriente entrante se encuentra otro simétrico, el b', con corriente saliente. Del mismo modo, a 180° eléctricos del lado b se encuentra otro simétrico, el a', con corriente de sentido contrario.

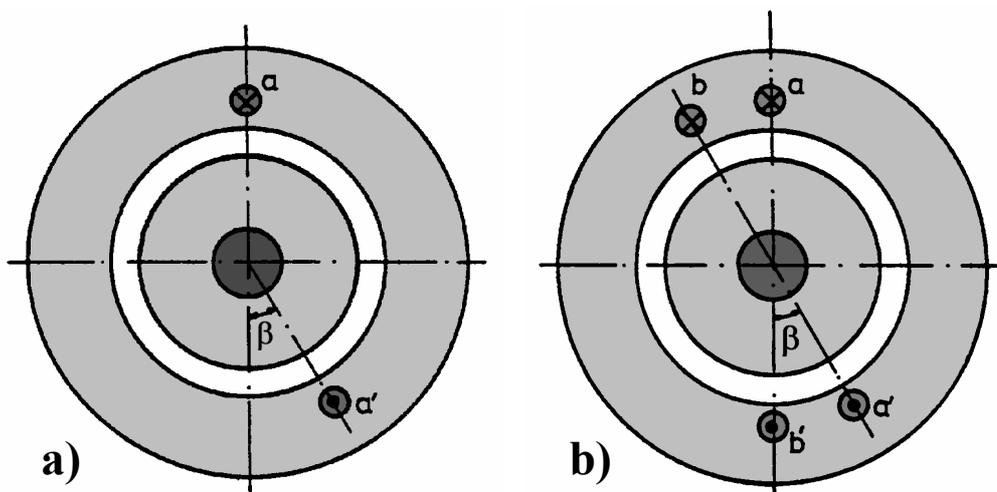


Fig. 27: Bobinas de paso acortado.

- En las máquinas polifásicas con devanado simétrico de una capa el paso de bobina sólo puede adoptar un número reducido de valores y, por consiguiente, no puede ser acortado en un número de ranuras cualquiera. Sin embargo, los bobinados de doble capa permiten que el número de ranuras en que se acorta el paso tome cualquier valor entero.

Ejemplo 1:

Para comprender mejor como son estos devanados, a continuación se va a deducir como puede obtenerse un bobinado trifásico, bipolar, de doble capa, con tres ranuras por polo y fase ($q = 3$) y bobinas acortadas en una ranura. Al dibujar el devanado se supondrá que las corrientes que circulan por las fases son las correspondientes al instante inicial en la Fig. 28; es decir, la corriente de la fase R, i_R , es positiva y las corrientes en las otras dos fases, i_S e i_T , son negativas.

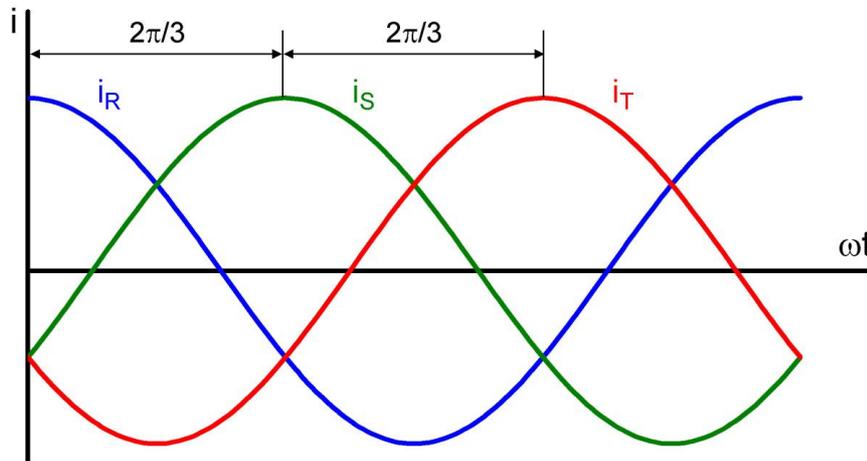


Fig. 28: Sistema trifásico de corrientes.

Al principio se dibujará la mitad de las bobinas de cada fase y luego se indicarán las bobinas que, junto con las primeras, consiguen que el devanado sea simétrico. Para ello se tendrá en cuenta que, como el bobinado es de doble capa, cada bobina tiene un lado en la capa inferior y otro en la capa superior.

Este devanado tiene

$$K = 2 p m q = 2 \cdot 3 \cdot 3 = 18 \text{ ranuras}$$

El paso polar vale

$$y_p = \frac{K}{2 p} = 9 \text{ ranuras}$$

y el paso de bobina, al haber un acortamiento de una ranura, vale

$$y_1 = y_p - 1 = 9 - 1 = 8 \text{ ranuras}$$

La distancia entre dos fases consecutivas es $2\pi/3$ radianes eléctricos y un paso polar abarca π radianes eléctricos. Por lo tanto, dos fases están separadas

$$\frac{2 y_p}{3} = \frac{2 \cdot 9}{3} = 6 \text{ ranuras}$$

Así en la Fig. 29a se comienza tomando $q = 3$ lados de bobina de ida, a, b y c, de la fase R. A una distancia de $y_1 = 8$ ranuras y en diferente capa estarán los lados de vuelta a' , b' y c' . La fase R está recorrida por una corriente positiva por lo que los lados de ida tienen corrientes entrantes y los de vuelta corrientes salientes. Los lados de ida de la fase S, e, f y g, distan 6 ranuras de los lados a, b y c de la fase R y la vuelta, e' , f' y g' , la tienen 8 ranuras después. La fase S está recorrida por una corriente negativa por lo que los lados de ida tienen corrientes salientes y los de vuelta tienen corrientes entrantes. De forma análoga se analiza la fase T. En la Fig. 29 se han representado mediante círculos cada uno de los lados de bobina, dos en cada una de las 18 ranuras, y el sentido de la corriente en cada lado mediante un aspa o un círculo.

En la Fig. 29b se han dibujado el resto de los lados de bobina necesarios para conseguir un devanado simétrico. Así, a π radianes eléctricos (9 ranuras) de a, b y c deben estar colocados en la misma capa los lados a1, b1 y c1 recorridos por corrientes de sentido opuesto a las de a, b y c. a1, b1 y c1 pertenecen a bobinas acortadas también en una ranura, luego se cierran por los lados a1', b1' y c1' situados 8 ranuras después y en la otra capa. Análogamente se obtienen los demás lados de bobina de las fases S y T.

La Fig. 29c representa la totalidad de los lados del devanado, es decir, la suma de los conductores que aparecen en las Figs. 29a y 29b. En la Fig. 29d se ha dibujado la totalidad de la fase R solamente.

Existen varios posibles devanados que dan lugar a la distribución de la Fig. 29c, uno de los cuales se ha dibujado en la Fig. 30: bobinado imbricado con todos los grupos polares de una fase conectados en serie ($a^* = 1$).

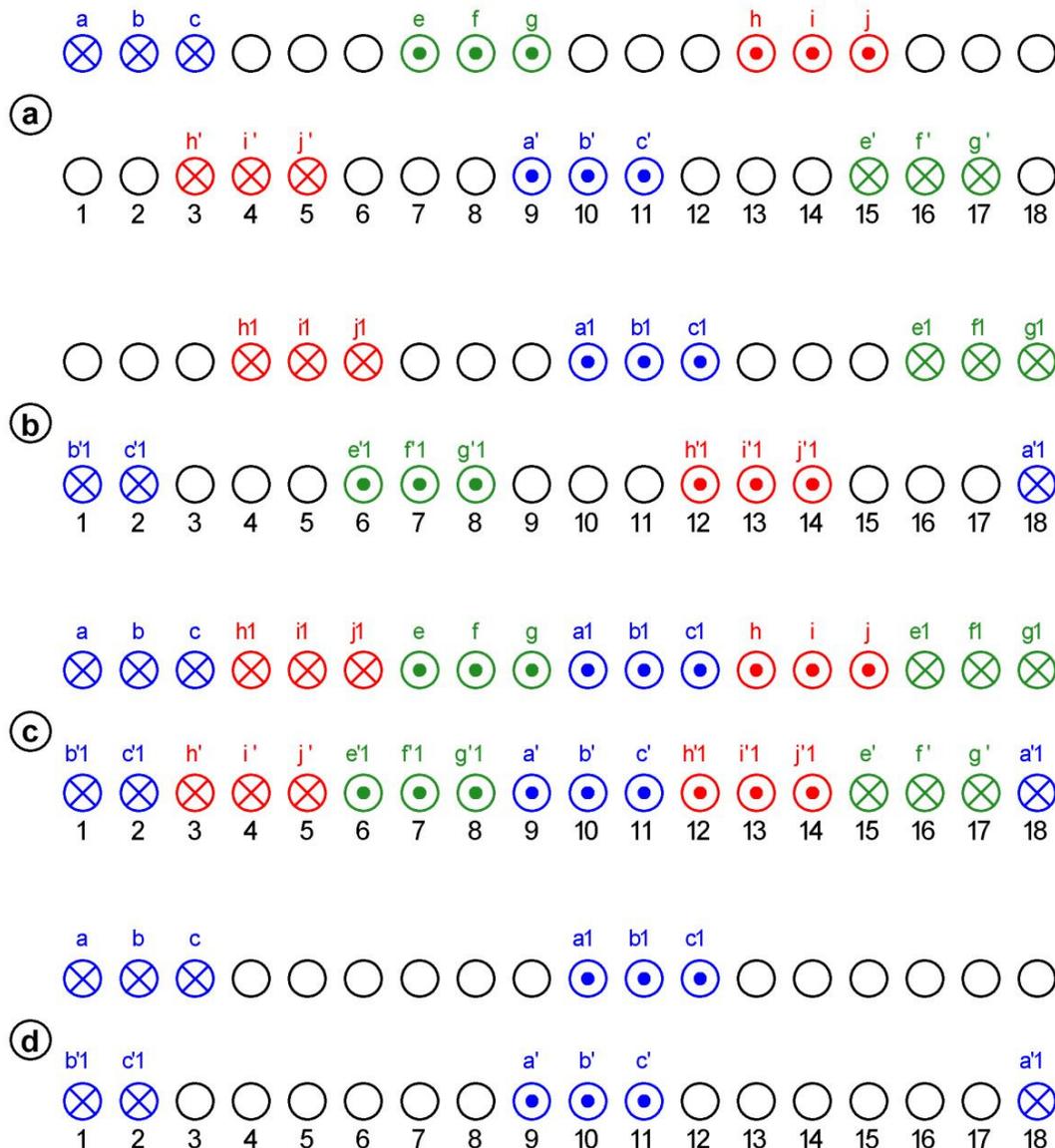


Fig. 29: Reparto de corrientes en un bobinado bipolar trifásico de doble capa, $q = 3$ y acortamiento de paso en 1 ranura cuando la intensidad de la fase R es máxima:

- a) y b) Mitades del devanado.
- c) Devanado completo.
- d) Devanado de la fase R.

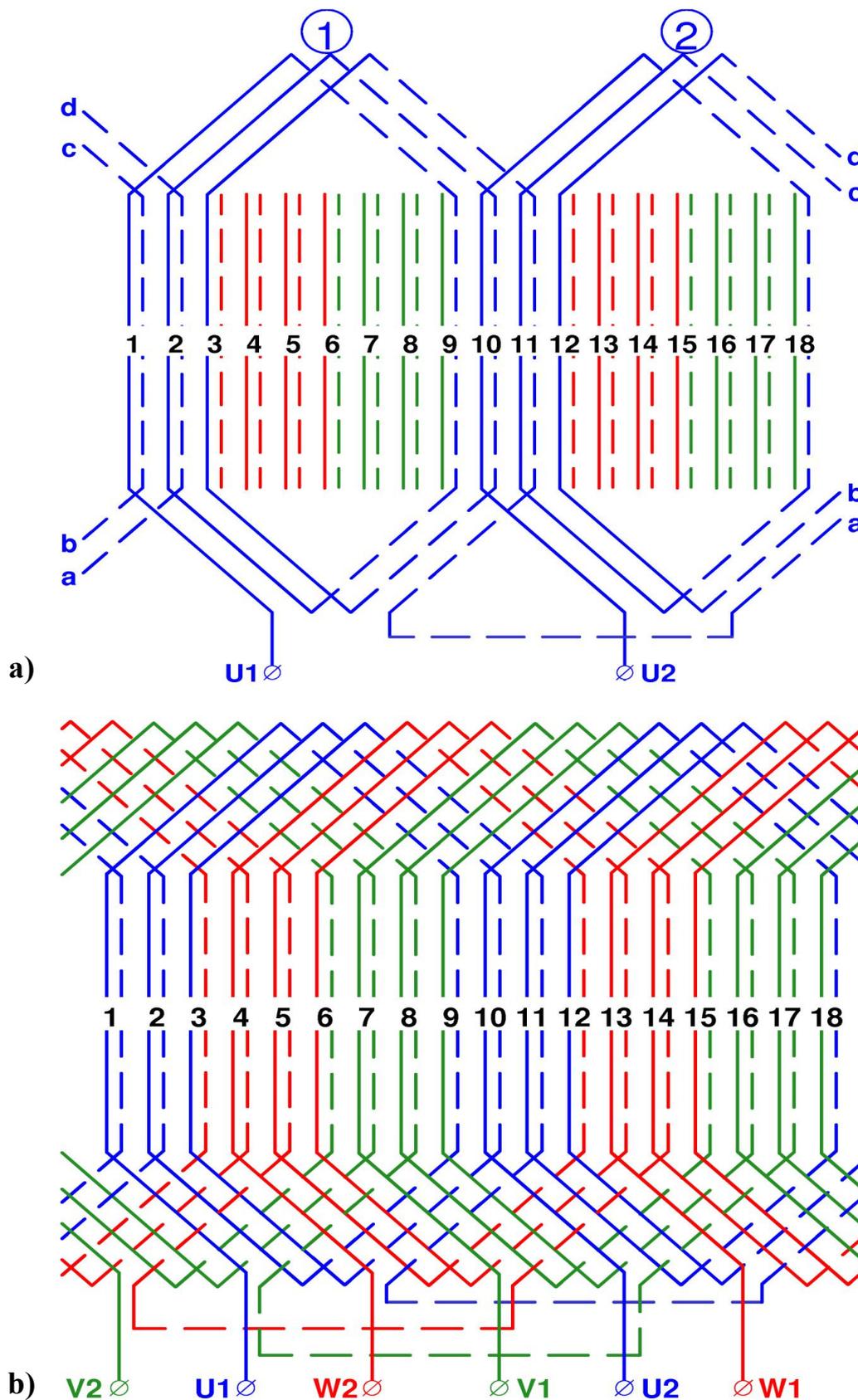


Fig. 30: Uno de los posibles devanados que da lugar al reparto de corrientes representado en la Fig. 29:
 a) Se ha dibujado sólo la fase R.
 b) Se muestran las tres fases.

PRINCIPIO DE REVERSIBILIDAD

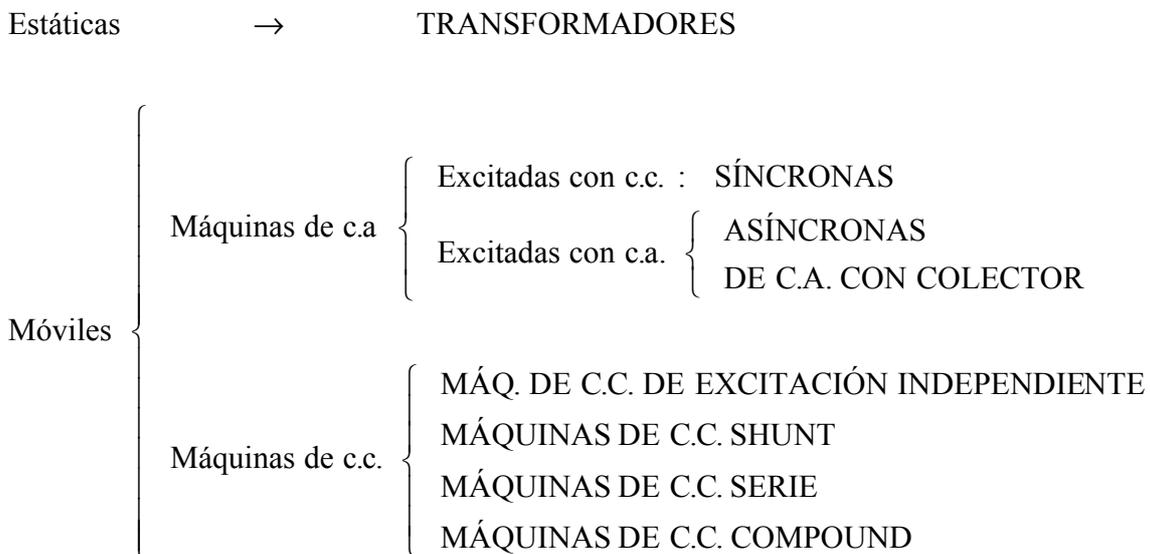
- Este principio señala que todas las máquinas eléctricas son reversibles, es decir, pueden actuar tanto como generador como motor. Esta es una de sus ventajas que permite, por ejemplo, que una máquina eléctrica que usualmente trabaja como motor pueda, en un momento dado, actuar como freno. Para ello basta con que pase a funcionar como generador transformando la energía cinética del sistema en energía eléctrica que, además, puede recuperarse devolviéndola a la red.
- Cuando una máquina trabaja como motor transforma energía eléctrica en mecánica. Por consiguiente, debe generar una fuerza contraelectromotriz, opuesta a la tensión de red, para así captar energía eléctrica y originar un par motor en su eje.

Cuando una máquina actúa como generador transforma energía mecánica en eléctrica. En este caso debe “robar” la energía mecánica que le proporciona un motor externo (un motor Diesel, una turbina hidráulica, de gas, de vapor, etc.) frenándolo. Es decir, en el eje de un generador aparecerá un par de frenado opuesto al par motor externo. Por otra parte, el generador producirá una f.e.m. del mismo sentido que la tensión de la red para suministrar energía eléctrica a dicha red.

LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS CLÁSICAS: CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

Clasificación

- Las máquinas eléctricas se pueden clasificar en estáticas y móviles y de acuerdo con el tipo de corriente que circula por sus devanados:



Transformadores

- Los transformadores son máquinas estáticas de corriente alterna con dos devanados. El devanado inductor recibe el nombre de *primario* y el devanado inducido se llama *secundario*. Ambos devanados están arrollados sobre un núcleo magnético sin entrehierros construido a base de apilar chapas magnéticas.



Fig. 31: Transformador trifásico.

Al conectar una tensión alterna V_1 al primario, circula una corriente por él que genera un flujo alterno en el núcleo magnético. Este flujo magnético, en virtud de la Ley de Faraday, induce una f.e.m. en el devanado secundario, lo que da lugar a que haya una tensión V_2 en bornes de este bobinado. De esta manera se consigue transformar una tensión alterna de valor eficaz V_1 en otra de valor eficaz V_2 y de la misma frecuencia.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los devanados de los transformadores:

TRANSFORMADORES		
<i>Devanado</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor (Primario)	50 ó 60 Hz	Concentrado
Inducido (Secundario)	50 ó 60 Hz	Concentrado

Máquinas síncronas

- En las máquinas síncronas (Figs. 1b, 10c, 32 y 33) el inductor está colocado usualmente en el rotor y se alimenta con corriente continua a través de un colector de dos anillos. El inducido está en el estator y es un devanado de corriente alterna. El núcleo magnético del estator se construye a base de apilar chapas magnéticas. Las máquinas síncronas rápidas tienen la configuración mostrada en la Fig. 7a y las lentas la mostrada en la Fig. 7b.

Cuando la máquina síncrona actúa como alternador, una máquina motriz externa hace girar su rotor y con él gira el campo magnético inductor. Este campo está generado por una corriente continua, luego visto desde el rotor es un campo estático. Sin embargo, al girar el rotor las bobinas del estator “ven” un campo magnético móvil. Esto da lugar a que estas bobinas estén sometidas a un flujo magnético variable en el tiempo y se induzcan en ellas unas f.e.m.s alternas.

Cuando una máquina síncrona polifásica actúa como motor, su estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes. Como se verá más adelante estas corrientes dan lugar a un campo magnético giratorio que, al interactuar con el campo magnético inductor, hace girar al rotor a su misma velocidad. La velocidad del campo giratorio se denomina *velocidad de sincronismo* y es la velocidad a que gira la máquina. De ahí el nombre de síncronas de estas máquinas.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los devanados de las máquinas síncronas:

MÁQUINAS SÍNCRONAS			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Rotor	0 Hz (corriente continua)	a) Bobinas en ranuras (Rotor cilíndrico) b) Bobinas polares (Polos salientes)
Inducido	Estator	50 ó 60 Hz	Bobinas en ranuras

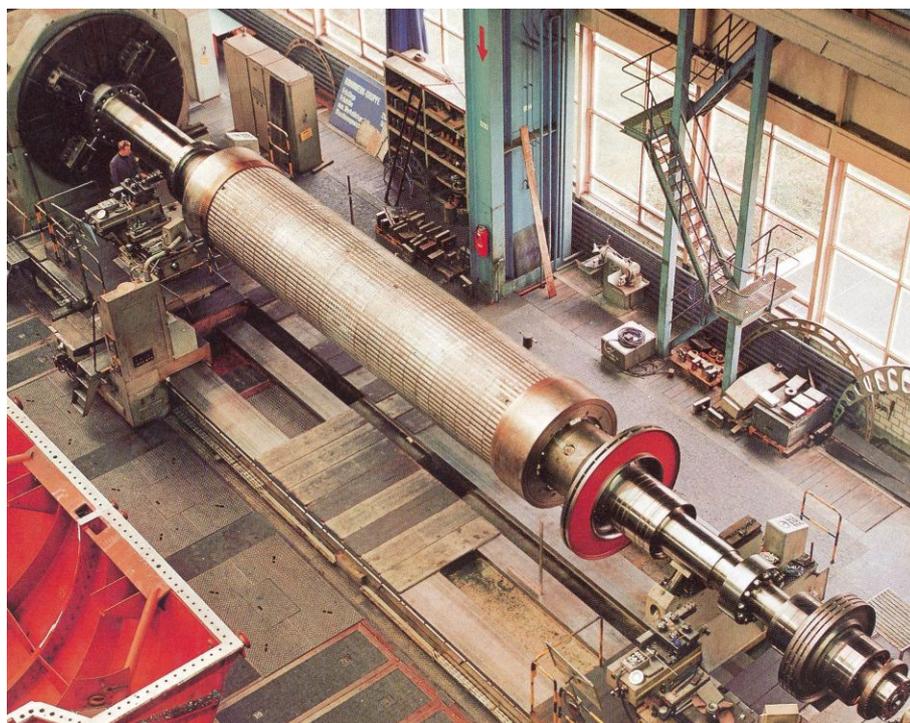


Fig. 32: Rotor cilíndrico de un turboalternador síncrono trifásico de 1500 KVA, 1800 r.p.m., 60 Hz (Fuente: Revista ABB. nº 1, 1992).



Fig. 33: Hidroalternador síncrono trifásico de la central de Itaipú de 824 MVA, 90 r.p.m., 60 Hz (Fuente: Revista ABB, n° 1, 1992).

Máquinas asíncronas o de inducción

- Las máquinas asíncronas o de inducción tienen la configuración mostrada en la Fig. 7a. En estas máquinas los devanados del estator y del rotor son de corriente alterna, estando este último conectado en cortocircuito (Figs. 1a y 2). Los núcleos magnéticos del estator y del rotor se construyen a base de apilar chapas magnéticas.

En esta máquina el bobinado del estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar a un campo magnético giratorio, al igual que en las máquinas síncronas. Si el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m.s en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego estas f.e.m.s producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan un par en el eje de la máquina. Por la Ley de Lenz, las f.e.m.s inducidas en el rotor son tales que originan corrientes que dan lugar a un par que trata de reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor. Por lo tanto, el par que actúa sobre el eje trata de que el rotor alcance la misma velocidad que el campo magnético giratorio; pero sin conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de estas máquinas es, pues, ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción.

Cuando la máquina actúa como motor, su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor.

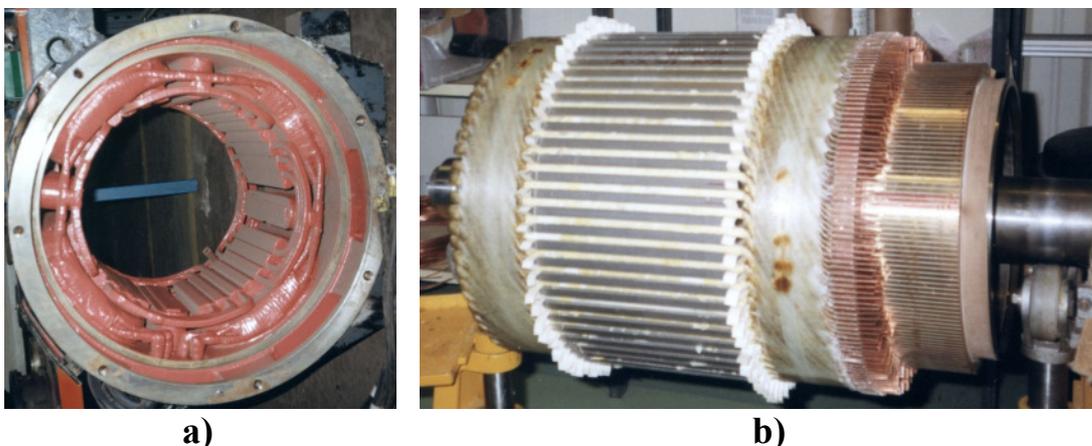
Para que esta máquina actúe como generador es preciso moverla con una máquina motriz externa de forma que su velocidad supere a la de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en su eje.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los devanados de las máquinas asíncronas:

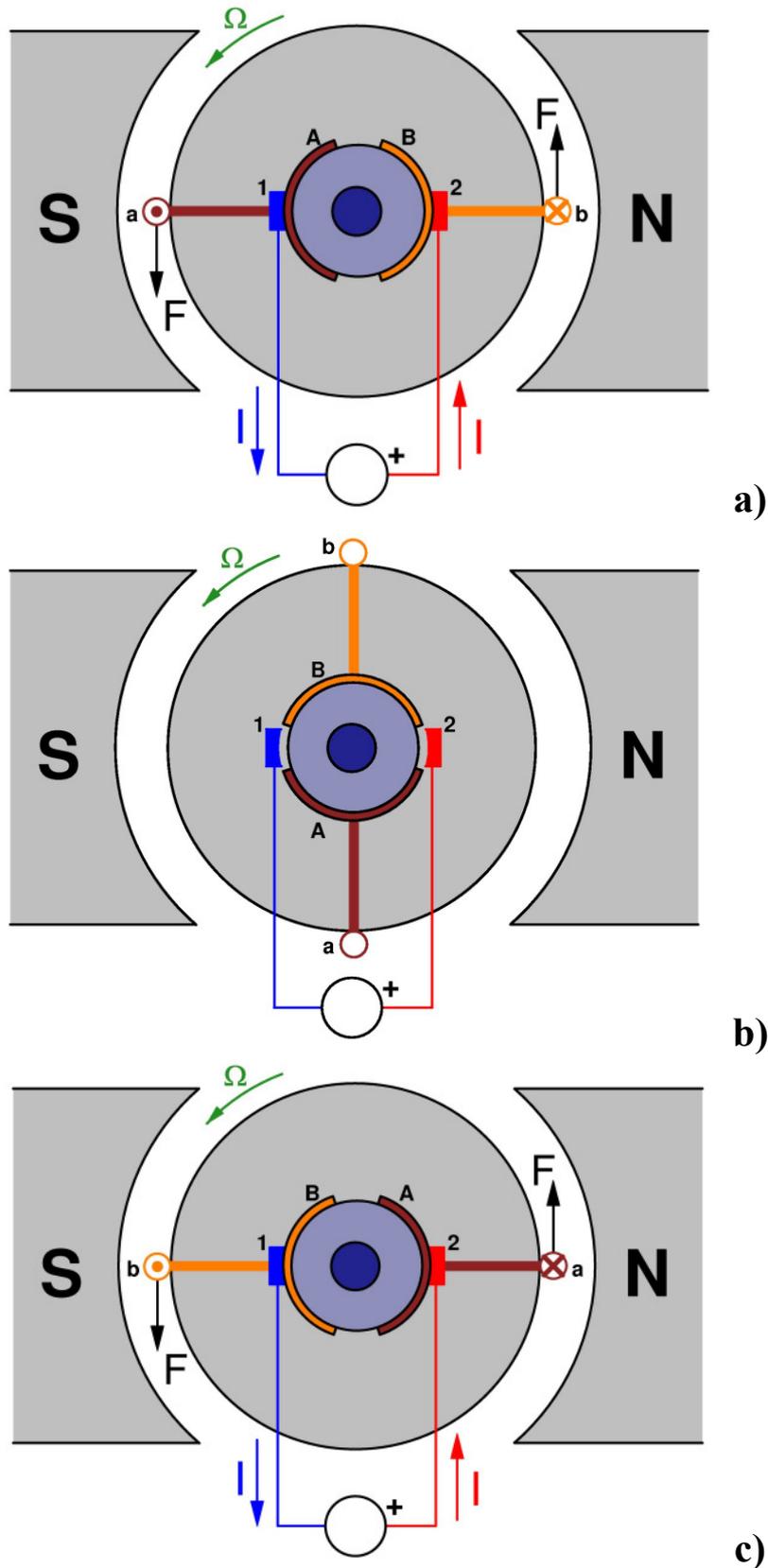
MÁQUINAS ASÍNCRONAS O DE INDUCCIÓN			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor (Primario)	Estator	50 ó 60 Hz	Bobinas en ranuras
Inducido (Secundario)	Rotor	0,5-5 Hz	a) Jaula de ardilla b) Bobinas en ranuras

Máquinas de corriente continua

- Las máquinas de c.c. tienen la configuración mostrada en la Fig. 8. El inductor está en el estator, que es de polos salientes, y el inducido está en el rotor. Ambos devanados se conectan a tensiones continuas, pero el devanado inducido recibe su tensión a través de un colector de delgas, por lo que la corriente que circula por él es alterna. En estas máquinas el núcleo magnético rotórico se construye apilando chapas magnéticas.



*Fig. 34: Máquina de c.c. durante su proceso de fabricación:
a) Estator.
b) rotor.*



*Fig. 35: Principio de funcionamiento de un motor de c.c. bipolar elemental con una sola bobina y dos delgas. (1, 2: Escobillas; A, B: Delgas; a, b: Lados de la bobina unidos respectivamente a las delgas A y B).
 En las figuras a), b) y c) se representan 3 instantes del giro del motor. Entre cada una de estas figuras la máquina ha girado 90°.*

Su principio de funcionamiento es similar al de las máquinas síncronas. Cuando actúa como generador, en el inducido se generan corrientes alternas que son rectificadas por el colector de delgas, por lo que se suministra tensión continua al exterior. Cuando actúa como motor la interacción del campo magnético inductor con las corrientes alternas que circulan por el devanado del rotor produce el giro de éste.

Existen distintas variantes de máquinas de corriente continua según cómo estén conectados los devanados inductor e inducido, lo que da lugar a máquinas de diferentes características. En las máquinas de *excitación independiente* estos devanados están conectados a sendas fuentes de tensión continua independientes. En las máquinas *serie* estos devanados se conectan en serie a una sola fuente de tensión y en las máquinas *shunt* ambos devanados están conectados en paralelo. Las máquinas *compound* tienen dos bobinados inductores; uno se conecta en serie y el otro en paralelo con el inducido.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los devanados de las máquinas de corriente continua:

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Estator	0 Hz (corriente continua)	Bobinas polares
Inducido	Rotor	$f = \frac{p n}{60}$ en bobinas $f = 0$ Hz en bornes	Bobinas en ranuras conectadas en sus extremos a un colector de delgas

Máquinas de corriente alterna de colector

- Las máquinas de c.a. de colector se basan en el mismo principio que las máquinas de corriente continua y constructivamente son muy similares a las máquinas de corriente continua con excitación serie; aunque, a veces, el estator es cilíndrico en lugar de tener polos salientes y ambas partes, estator y rotor, tienen sus circuitos magnéticos contruidos apilando chapas magnéticas (pues ambas están sometidas a flujos magnéticos variables en el tiempo).

En efecto, si en una máquina de corriente continua se invierte simultáneamente la polaridad de la corriente en los devanados inductor e inducido, cambian a la vez los signos del campo magnético inductor y de las corrientes del inducido. Por lo tanto, el par -que es proporcional al producto de estas dos magnitudes- no cambia de signo y la máquina sigue funcionando igualmente. Luego, se puede aplicar el principio de funcionamiento de las máquinas de corriente continua a estas máquinas alimentadas con corriente alterna.

En la siguiente tabla se resumen las principales características de los devanados de las máquinas de corriente alterna de colector:

MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA DE COLECTOR			
<i>Devanado</i>	<i>Situación</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Tipo</i>
Inductor	Estator	50 ó 60 Hz	a) Bobinas polares b) Bobinas en ranuras
Inducido	Rotor	$f \neq 50$ ó 60 Hz en bobinas $f = 50$ ó 60 Hz en bornes	Bobinas en ranuras conectadas en sus extremos a un colector de delgas

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Catálogos de fabricantes de máquinas eléctricas.
- [2] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] CORTES CHERTA. 1994. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. 5 tomos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [4] FAURE BENITO. 2000. *Máquinas y accionamientos eléctricos*. Madrid: Colegio oficial de ingenieros navales y oceánicos.
- [5] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [7] GURRUTXAGA, J. A. 1985. *El fenómeno electromagnético (varios tomos)*. Santander: Dpto. de publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P. de Santander.
- [8] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [9] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [10] MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ, F. 2001. *Reparación y bobinado de motores eléctricos*. Madrid: Paraninfo.
- [11] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1984. *Enciclopedia CEAC de electricidad: Pilas y acumuladores. Máquinas de c.c.* Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [12] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1991. *101 esquemas de bobinados de corriente alterna*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [13] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1998. *Enciclopedia CEAC de electricidad: Máquinas de c.a.* Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [14] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1998. *Enciclopedia CEAC de electricidad: Talleres electromecánicos. Bobinados*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [15] RAPP, J. 1997. *Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos*. Bilbao: Editado por el autor.
- [16] Revista ABB.
- [17] SANZ FEITO. 2002. *Máquinas eléctricas*. Madrid: Pearson Educación.
- [18] SERRANO IRIBARNEGARAY. 1989. *Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [19] Wikipedia [sitio web]. <http://es.wikipedia.org>.