

**Reparación y Bobinado**  
**de Motores**  
**Eléctricos**

# ÍNDICE

---

---

<b>PRÓLOGO</b> .....	XI
<b>1. MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA</b> ..	1
1.1. Constitución general de una máquina de corriente continua .....	1
1.2. Principio de funcionamiento de las máquinas de corriente continua .....	4
1.3. Características eléctricas de las máquinas de corriente continua .	6
1.4. Conmutación en máquinas de corriente continua .....	10
1.5. Reacción de inducido en máquinas de corriente continua .....	13
1.6. Clasificación de las máquinas de corriente continua e identificación de bornes .....	15
<b>2. LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS 23 DE CORRIENTE CONTINUA</b> .....	23
2.1. Introducción .....	23
2.2. Localización de contactos a masa .....	24
2.3. Localización de cortocircuitos .....	27
2.4. Localización de conductores cortados .....	31
2.5. Determinación de las polaridades correctas .....	32
2.6. Determinación de la posición de las escobillas .....	35
2.7. Resumen de localización de averías .....	37
<b>3. MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA</b> .....	39
3.1. Generalidades y tipos de motores eléctricos .....	39
3.2. Principio de funcionamiento del motor asíncrono .....	41
3.3. Constitución del motor asíncrono de inducción .....	42
3.4. Motor asíncrono trifásico .....	43

3.5.	Tipos de rotor en motores asíncronos de corriente alterna . . . . .	49
3.6.	Relaciones entre los bobinados de rotor y estator . . . . .	53
3.7.	Bobinados del estator en los motores asíncronos . . . . .	54
3.8.	Motores monofásicos. Principio de funcionamiento . . . . .	55
3.9.	Motores monofásicos con devanados auxiliares . . . . .	57
3.10.	Motores monofásicos con condensador . . . . .	60
3.11.	Motores monofásicos con espira en cortocircuito o polos patidos . . . . .	61
3.12.	Motores universales . . . . .	62
3.13.	Motor trifásico trabajando en monofásico . . . . .	65
3.14.	Grados de protección de las envolventes . . . . .	67
<b>4.</b>	<b>LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA . . . . .</b>	<b>71</b>
4.1.	Introducción . . . . .	71
4.2.	Localización de contactos a masa . . . . .	71
4.3.	Localización de cortocircuitos . . . . .	73
4.4.	Localización de conductores cortados . . . . .	76
4.5.	Determinación de la polaridad correcta . . . . .	77
4.6.	Resumen de localización de averías . . . . .	79
<b>5.</b>	<b>DEFINICIONES EMPLEADAS EN LOS DEVANADOS ELÉCTRICOS . . . . .</b>	<b>83</b>
5.1.	Definiciones para devanados de corriente continua . . . . .	84
5.2.	Definiciones para devanados de corriente alterna . . . . .	91
<b>6.</b>	<b>MATERIALES EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DE DEVANADOS ELÉCTRICOS . . . . .</b>	<b>101</b>
6.1.	Materiales conductores para devanados . . . . .	101
6.2.	Materiales aislantes para devanados . . . . .	104
<b>7.</b>	<b>CÁLCULOS Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS DE CORRIENTE CONTINUA . . . . .</b>	<b>111</b>
7.1.	Bobinados imbricados simples . . . . .	111
7.2.	Bobinados imbricados múltiples . . . . .	115
7.3.	Bobinados ondulados en serie, simples o sencillos . . . . .	119
7.4.	Bobinados ondulados múltiples . . . . .	127
7.5.	Conexiones equipotenciales, para devanados de corriente continua . . . . .	132

<b>8. CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA</b> .....	139
8.1. Devanados concéntricos trifásicos .....	139
8.2. Devanados imbricados, trifásicos .....	149
- Enteros, a una capa .....	150
- Enteros, a dos capas .....	154
- Fraccionarios regulares .....	158
- Fraccionarios irregulares .....	167
- Fraccionarios, con tres bobinas muertas .....	170
8.3. Devanados ondulados, trifásicos .....	174
8.4. Devanados de corriente alterna con circuitos en paralelo .....	181
8.5. Conexión de devanados, con circuitos en paralelo, para cambio de tensión de un motor .....	185
<b>9. DEVANADOS PARA MOTORES DE DOS VELOCIDADES</b> .....	189
9.1. Motores asíncronos trifásicos de varias velocidades .....	189
9.2. Motores de dos velocidades, en conexión <i>Dahlander</i> .....	191
9.3. Proceso de cálculo de un devanado de dos velocidades, en conexión <i>Dahlander</i> .....	192
<b>10. CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA</b> .....	199
10.1. Características principales .....	199
10.2. Cálculo y ejecución de devanados monofásicos, de fase partida .	200
<b>11. EJECUCIÓN PRÁCTICA Y BARNIZADO DE MOTORES ELÉCTRICOS</b> .....	209
11.1. Construcción de bobinas .....	209
11.2. Colocación y aislamiento de las bobinas .....	211
11.3. Estrangulamiento de bobinas .....	212
11.4. Zunchado de rotores e inducidos .....	213
11.5. Barnizado de devanados eléctricos .....	215
<b>12. MODIFICACIÓN DE DEVANADOS ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA</b> .....	219
12.1. Cambio de tensión .....	219
12.2. Cambio de frecuencia .....	222
12.3. Cambio de velocidad .....	224
<b>13. APÉNDICE. ESQUEMAS DE DEVANADOS</b> .....	229
<b>Devanados de corriente continua</b>	
13.1. Devanado imbricado simple: $K = 16$ ; $D = 32$ ; $2p = 4$ ; $U = 2$ ...	230

13.2.	Devanado imbricado simple: $K = 18; D = 36; 2p = 4; U = 2$ . . .	231
13.3.	Devanado imbricado simple: $K = 20; D = 20; 2p = 4; U = 1$ . . .	232
13.4.	Devanado imbricado simple: $K = 18; D = 54; 2p = 4; U = 3$ . . .	233
13.5.	Devanado imbricado simple: $K = 24; D = 24; 2p = 6; U = 1$ . . .	234
13.6.	Devanado imbricado doble: $K = 20; D = 20; 2p = 4; U = 1$ . . . .	235
13.7.	Devanado imbricado doble: $K = 16; D = 32; 2p = 4; U = 2$ . . . .	236
13.8.	Devanado imbricado doble con conexiones equipotenciales: $K = 16; D = 32; 2p = 4; U = 2$ . . . . .	237
13.9.	Devanado imbricado doble: $K = 26; D = 52; 2p = 4; U = 2$ . . . .	238
13.10.	Devanado imbricado doble: $K = 52; D = 52; 2p = 4; U = 2$ . . . .	239
13.11.	Devanado ondulado simple: $K = 17; D = 17; 2p = 4; U = 1$ . . . .	240
13.12.	Devanado ondulado simple: $K = 25; D = 50; 2p = 6; U = 2$ . . . .	241
13.13.	Devanado ondulado simple: $K = 17; D = 34; 2p = 6; U = 2$ . . . .	242
13.14.	Devanado ondulado con una sección muerta: $K = 18; D = 35; 2p = 6; U = 2$ . . . . .	243
13.15.	Devanado ondulado simple: $K = 25; D = 49; 2p = 4; U = 2$ . . . . .	244
13.16.	Devanado ondulado con cierre artificial: $K = 12; D = 24; 2p = 2; U = 2$ . . . . .	245
13.17.	Devanado ondulado doble: $K = 18; D = 18; 2p = 4; U = 1$ . . . .	246
13.18.	Devanado ondulado doble: $K = 50; D = 50; 2p = 8; U = 1$ . . . .	247
13.19.	Devanado ondulado triple: $K = 36; D = 36; 2p = 6; U = 1$ . . . .	248
13.20.	Devanado ondulado triple con conexiones equipotenciales: $K = 36; D = 36; 2p = 6; U = 1$ . . . . .	249
<b>Devanados de corriente alterna, trifasicos</b>		
13.21.	Devanado concéntrico por polos: $K = 24; 2p = 2$ . . . . .	250
13.22.	Devanado concéntrico por polos consecuentes: $K = 36; 2p = 4$ . . . . .	251
13.23.	Devanado concéntrico por polos: $K = 36; 2p = 2$ . . . . .	252
13.24.	Devanado concéntrico por polos consecuentes: $K = 48; 2p = 4$ . . . . .	253
13.25.	Devanado concéntrico por polos: $K = 48; 2p = 4$ . . . . .	254
13.26.	Devanado concéntrico mixto, por polos consecuentes: $K = 60; 2p = 8$ . . . . .	255
13.27.	Devanado concéntrico, mixto, por polos: $K = 36; 2p = 4$ . . . . .	256
13.28.	Devanado concéntrico, mixto, por polos consecuentes: $K = 42; 2p = 4$ . . . . .	257
13.29.	Devanado imbricado, entero, por polos: $K = 36; 2p = 2$ . . . . .	258
13.30.	Devanado imbricado, entero, por polos: $K = 36; 2p = 6$ . . . . .	259
13.31.	Devanado imbricado, entero, por polos: $K = 48; 2p = 4$ . . . . .	260
13.32.	Devanado imbricado, entero, por polos: $K = 18; 2p = 2$ . . . . .	261

13.33.	Devanado imbricado, entero, por polos: $K = 36; 2p = 4$ . . . . .	262
13.34.	Devanado imbricado, fraccionario, por polos: $K = 18; 2p = 4$ ..	263
13.35.	Devanado imbricado, fraccionario, por polos: $K = 36; 2p = 4$ ..	264
13.36.	Devanado imbricado, fraccionario, por polos: $K = 33; 2p = 8$ ..	265
13.37.	Devanado imbricado, fraccionario, por polos: $K = 54; 2p = 6$ ..	266
13.38.	Devanado imbricado, fraccionario irregular, por polos: $K = 30; 2p = 6$ . . . . .	267
13.39.	Devanado imbricadofraccionario, con tres bobinas muertas: $K = 39; 2p = 4$ . . . . .	268
13.40.	Devanado imbricado fraccionario, con tres bobinas muertas: $K = 21; 2p = 6$ . . . . .	269
13.41.	Devanado imbricado entero, con tres circuitos en paralelo: $K = 36; 2p = 6$ . . . . .	270
13.42.	Devanado imbricado fraccionario, con cuatro circuitos en paralelo: $K = 36; 2p = 8$ . . . . .	271
13.43.	Devanado imbricado fraccionario, con dos circuitos en paralelo: $K = 54; 2p = 8$ . . . . .	272
13.44.	Devanado ondulado, entero, por polos: $K = 24; 2p = 4$ . . . . .	273
13.45.	Devanado ondulado, entero, por polos: $K = 30; 2p = 10$ . . . . .	274
13.46.	Devanado ondulado, entero, por polos: $K = 48; 2p = 8$ . . . . .	275
13.47.	Devanado concéntrico, en conexión Dahlander: $K = 24; 2p = 2 / 4$ . . . . .	276
13.48.	Devanado imbricado, en conexión Dahlander: $K = 24; 2p = 4 / 8$ . . . . .	277
13.49.	Devanado imbricado, en conexión Dahlander: $K = 48; 2p = 4 / 8$ . . . . .	278



# PRÓLOGO

---

La presente obra pretende analizar, desde un punto de vista eminentemente práctico, tanto el cálculo, el diseño y la ejecución de los devanados de máquinas eléctricas nuevas, como la posterior reparación, el mantenimiento y rebobinado de las mismas, tanto en el ámbito doméstico como en el industrial.

El objetivo de esta obra es servir: tanto como manual o libro de texto para el aprendizaje de la profesión de reparador o bobinador de máquinas eléctricas, como de manual de consulta, en su quehacer diario, para este tipo de profesionales.

En el libro se pueden distinguir tres partes perfectamente diferenciadas. Los cuatro primeros capítulos se han dedicado a describir la constitución, los principios de funcionamiento y el mantenimiento de las máquinas eléctricas rotativas, empezando por las de corriente continua y terminando con las de corriente alterna, tanto trifásicas como monofásicas. En los ocho capítulos siguientes, se describe el cálculo, el diseño, y la ejecución práctica de los diferentes tipos de devanados eléctricos, empezando por los de corriente continua y terminando por los de corriente alterna. Por último, se ha incluido un apéndice, con 49 esquemas, ya calculados y dibujados, que pueden serles muy útiles tanto a los alumnos en su aprendizaje, como a los profesionales en el mantenimiento diario de las máquinas eléctricas rotativas.

Desde el punto de vista de la enseñanza de las profesiones y los oficios relacionados con la electricidad, esta obra, junto con las tituladas: *Tecnología Eléctrica* e *Instalaciones Eléctricas de Alumbrado e Industriales*, del mismo autor, contienen todos los conocimientos necesarios sobre la materia, pudiendo ser eminentemente útiles, tanto para el autoaprendizaje como para la enseñanza con profesor, ya que su redacción, muy práctica y amena, facilita enormemente el aprendizaje.

EL AUTOR





# 1

---

---

## MOTORES Y GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA

### 1.1. CONSTITUCIÓN GENERAL DE UNA MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA

Las máquinas eléctricas de corriente continua, ya sean motores o generadores –estos últimos también llamados dínamos– son siempre reversibles, o sea, que si a una máquina de corriente continua se le mete corriente, ésta gira como motor, mientras que si a la misma máquina se le hace girar su inducido o parte móvil de la misma, se comporta como un generador, produciendo corriente eléctrica.

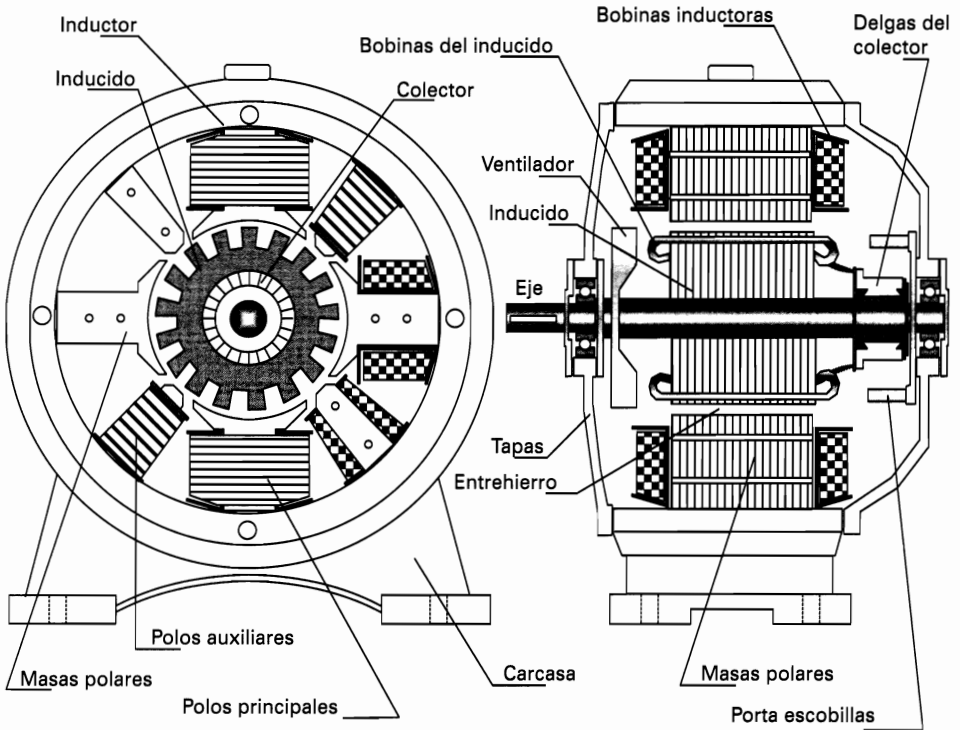
Toda máquina eléctrica de corriente continua se puede decir que consta de dos partes, desde el punto de vista constructivo, y que, aunque las dos forman parte de un todo, tienen funciones bien distintas y diferenciadas, como son: la parte mecánica y la parte electromagnética.

**La parte mecánica**, que es la encargada de dar uniformidad y funcionalidad a todo el conjunto, está formada por una parte estática, compuesta por: la carcasa, los escudos o las tapas laterales y los apoyos o las fijaciones de la máquina, y por otra parte móvil, llamada en estos casos inducido, que gira apoyada sobre cojinetes solidarios, por lo general, a los escudos antes mencionados.

**La parte electromagnética**, que es la que realmente nos interesa, desde el punto de vista del bobinador eléctrico, está en esencia formada: por un circuito magnético y dos circuitos eléctricos, perfectamente diferenciados. El circuito magnético está constituido por empilados de chapa magnética, que forman las masas polares del *inductor* o parte estática de la máquina y del *inducido* o parte que gira.

Al contrario que la parte magnética, que aunque formado por diversos elementos forma un solo circuito, la parte eléctrica está formada por dos devanados perfecta-

mente diferenciados y con funciones completamente distintas: el *devanado inductor*, formado generalmente por bobinas polares, que son solidarias a la carcasa de la máquina y el *devanado inducido*, que está colocado sobre ranuras en la parte que gira, pudiendo estar formados por hilos o pletinas, según cual sea la potencia de la máquina. Desde el punto de vista eléctrico, el devanado de inducido es el más importante, debido a su complejidad de cálculo y ejecución. En la figura 1.1 se aprecia con detalle todas las partes anteriormente mencionadas.



**Figura 1.1.** Constitución de una máquina eléctrica de corriente continua, con inductor de polos salientes.

## Inductor de una máquina de corriente continua

En la práctica el *inductor* (llamado estator en las máquinas de corriente alterna) es el conjunto de elementos destinados a crear y canalizar el flujo magnético principal ( $\Phi$ ), encargado de inducir las corrientes eléctricas en el inducido. El inductor en realidad está formado por: el circuito magnético, con sus bobinas principales y

auxiliares, y por la culata de hierro o acero que facilita el flujo entre dichas masas; esta última, la mayoría de las veces, forma un todo con la carcasa que cierra y da solidez al conjunto de la máquina. El circuito magnético puede estar formado por polos salientes, como todas las máquinas de corriente continua se fabricaban hasta hace poco tiempo, o bien se pueden alojar los bobinados principal y auxiliares en estatores ranurados y normalizados de motores trifásicos. En este último caso, las bobinas abrazan varias ranuras, según sea el ancho requerido por cada tipo de polo.

### Inducido de una máquina de corriente continua

El *inducido* (llamado rotor en las máquinas de corriente alterna), que está separado de las masas polares del inductor por el espacio llamado entrehierro, es en la práctica el conjunto formado por: el eje del motor, el empilado de chapas magnéticas y el bobinado de inducido. Este último, que puede ser de bobinas de hilo o pletina, generalmente de cobre, está alojado en ranuras apropiadas y conectadas sus bobinas a las delgas de colector.

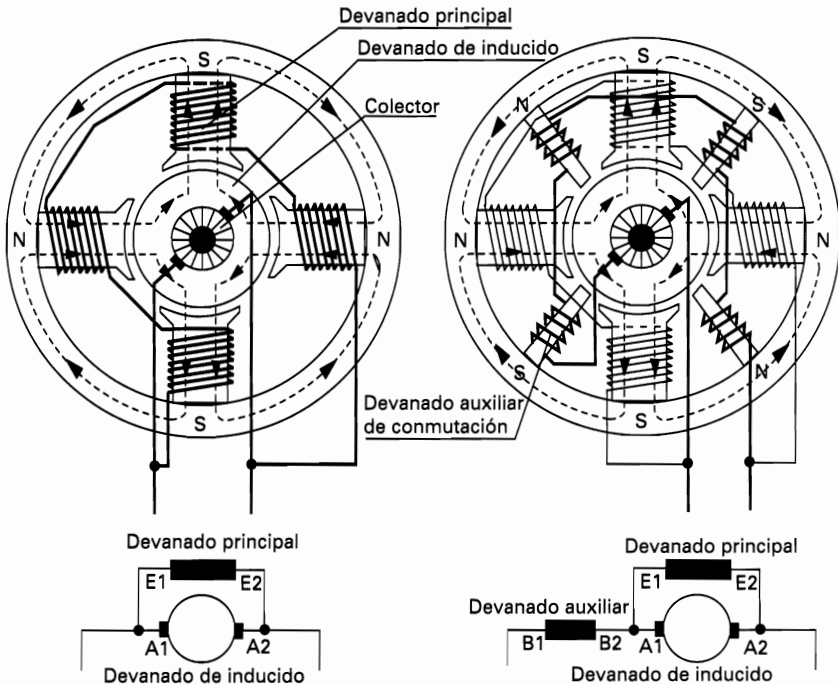


Figura 1.2. Conexión de los devanados en motores y generadores de corriente continua (ejemplo de máquina conectada en paralelo).

Las espiras del rotor, según cual sea la máquina de corriente continua, son las encargadas de producir, bien sea: el par electromagnético que da origen al giro de los motores, o de engendrar la fuerza electromotriz que da origen a la corriente eléctrica producida por los generadores o las máquinas. En el primero de los casos, cuando la máquina es un motor, la corriente eléctrica se aplica al colector, por medio de las escobillas, mientras que cuando la máquina es un generador, la corriente producida se recoge del colector, también por medio de las escobillas. En la figura 1.2 se aprecia con detalle la conexión interna de los devanados más comúnmente empleados de estos dos tipos de máquinas, referidos a máquinas tetrapolares conectadas en derivación, una sin polos auxiliares de conmutación y otra con ellos. No debemos olvidar que en la práctica, tanto si la máquina es un motor como si es un generador, pueden ser completamente iguales y reversibles, como ya se mencionó al comienzo de este capítulo.

## 1.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Cualquier generador eléctrico, por complicado que sea, puede ser representado simplificadaamente por una espira que gira en el seno de un campo magnético, como se aprecia en la figura 1.3, de forma tal que al girar y cortar líneas de campo,

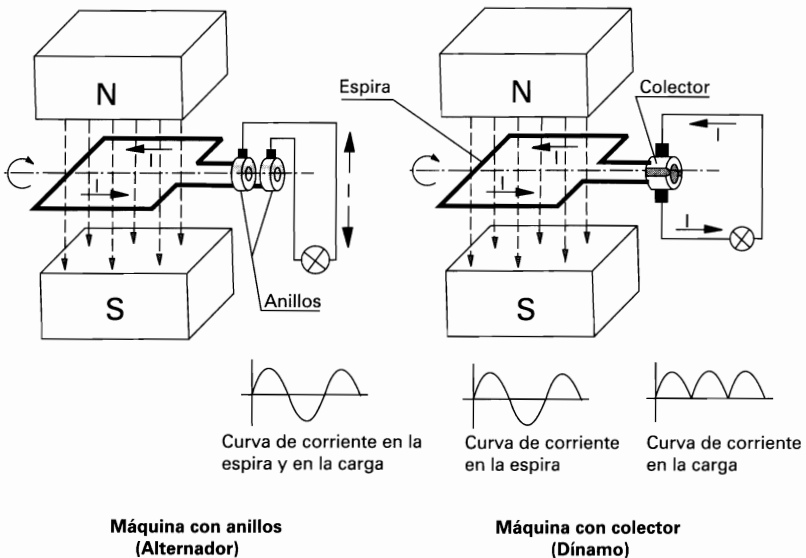


Figura 1.3. Principio de funcionamiento de un generador eléctrico.

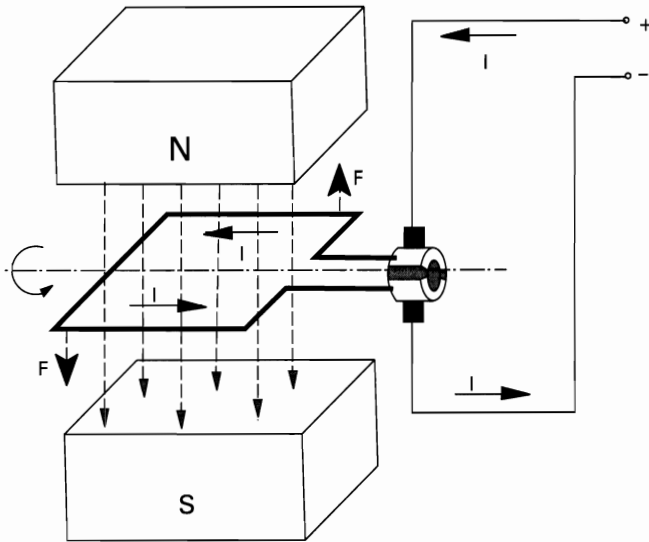
y de acuerdo con la Ley de Faraday, aparecen en ella tensiones inducidas, que han de ser proporcionales a la variación de flujo magnético cortado por ésta en su recorrido ( $f.e.m. = \beta l v$ ) y cuyo sentido se puede determinar por la *regla de la mano derecha*. Como a lo largo de una vuelta completa de la espira, en unos momentos se corta más flujo que en otros, y siempre que el campo magnético sea homogéneo, se obtiene en la misma una tensión senoidal. Además al dar la vuelta completa la espira, también varía el sentido del flujo a través de la misma y, por tanto, también variará el sentido de la corriente en la espira, según se puede comprobar por la *regla de la mano derecha*, con lo cual se obtendrá finalmente una tensión alterna de tipo senoidal.

Si ahora nos fijamos en el segundo dibujo de la figura 1.3, en el cual la tensión generada en la espira en vez de ser captada por unos anillos fijos en cada extremo de la espira se le aplica a un colector de dos delgas, se aprecia que, a pesar de ser alterna la tensión inducida en la bobina, la tensión en el circuito exterior es **continua**, ya que el colector, que se comporta como un conmutador, se encarga de rectificar la misma, al ir captando las escobillas en cada vuelta de la espira, la tensión generada en ambos lados activos de la misma, pero siempre en los momentos en que el sentido de la corriente por ellos es el mismo. Por tanto, podemos afirmar que en los generadores de corriente continua, llamados generalmente *dinamos*, el colector es el encargado de rectificar la corriente alterna inducida en el devanado del inducido.

En la práctica el devanado de inducido, bien sea de una *dinamo* o de un motor de corriente continua, se compone de varias bobinas con un gran número de espiras, situadas en las ranuras practicadas en su masa polar, que tienen sus extremos conectados a las múltiples delgas del colector, para así sumar sus efectos. Mientras que el campo magnético necesario para la inducción, en vez de ser aportado por imanes permanentes, se forma en los devanados del inductor, constituidos por dos o más polos, y que pueden estar ejecutados bien sea: por bobinas devanadas sobre masas polares salientes o sobre ranuras similares al estator de un motor de corriente alterna, y alimentadas por la propia corriente producida por el generador o bien por una fuente exterior.

**El funcionamiento de un motor** de corriente continua puede explicarse también con un montaje similar al empleado para explicar el generador, y que vemos en la figura 1.4. En este caso la corriente debe de ser aportada desde el exterior.

Cuando se aplique una tensión continua exterior a las escobillas, circulará una corriente por la bobina y, por estar ésta situada dentro de un campo magnético y de acuerdo con la *Ley de Lenz*, aparecerá en cada lado activo de la bobina una fuerza electromagnética  $F$  que se opone al campo magnético existente. Esta fuerza electromagnética es proporcional al campo y a la corriente que recorre el conductor ( $F = \beta I l$ ).



**Figura 1.4.** Principio de funcionamiento de un motor eléctrico de corriente continua.

El sentido de la fuerza en cada lado activo de la espira, que vemos representado en la figura 1.4, se puede determinar por medio de la *regla de la mano izquierda* y, como este par de fuerzas  $F$  está aplicado a una distancia  $r$  del eje de rotación, se forma un par electromagnético  $C$ , que da lugar al giro de la espira.

Al girar la espira, el colector se encarga de ir cambiando el sentido de la corriente que circula por cada uno de sus dos lados activos y, consecuentemente, las corrientes que circulan por dichos lados activos, cuando están situados debajo de un mismo polo, también tendrán siempre el mismo sentido y, por tanto, el par motor  $C$  también actuará siempre en la misma dirección, con lo cual el giro de la espira es continuo.

Como en la práctica el devanado del inducido está formado por muchas espiras, conectadas en serie o paralelo a las muchas delgas del colector, el par motor resultante  $C$  es la suma de los pares de fuerzas electromagnéticas de todas las espiras.

### 1.3. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Las características eléctricas más importantes de los motores y generadores de corriente continua, desde el punto de vista de las personas que se dedican a repararlas y rebobinarlas, son las que se describen a continuación:

## Fuerza electromotriz y contraelectromotriz

Como ya sabemos, cuando una bobina gira dentro de un campo magnético, se engendra en ella una **fuerza electromotriz (f.e.m.)**, que depende de la inducción magnética  $\beta$  y de la velocidad de giro  $n$  principalmente, cuyo valor, en el caso de un generador o dínamo, es aproximadamente el de su tensión en bornes en circuito abierto. Si, en vez de tratarse de un generador, nos referimos a un motor, esta fuerza electromotriz también se inducirá en los devanados o las barras del inducido, pero de forma tal que si aplicamos la *regla de la mano derecha*, tiene un sentido contrario al de la tensión aplicada al inducido  $U$  y por tal motivo se le denomina **fuerza contraelectromotriz (f.c.e.m.)**, cuyo valor se puede deducir de forma idéntica al de la fuerza electromotriz, a partir de las características físicas y eléctricas de la máquina, por medio de la fórmula siguiente:

$$\text{Fuerza electromotriz o contraelectromotriz: } E = \frac{p N}{10^8 \cdot 60 \cdot a} \Phi n$$

Como  $N$ ,  $p$ ,  $a$ ,  $10^8$  y  $60$  son valores constantes, propios de las características constructivas de la máquina, tenemos:

$$E = K \Phi n$$

Donde:  $E =$  **f.e.m.** ó **f.c.e.m.**, expresada en voltios

$\Phi =$  flujo de excitación de las bobinas inductoras, por polo, expresado en Weber

$n =$  velocidad del inducido, en revoluciones por minuto

$N =$  número total de espiras del inducido

$10^8 =$  constante para que el resultado nos sea dado en voltios

$60 =$  constante para poder expresar la velocidad  $n$  en r.p.m.

$p =$  número de pares de polos de la máquina

$a =$  número de ramas en paralelo del inducido

Del valor de la **f.c.e.m.** depende el valor de la corriente que circula por el inducido de un motor  $I_a$  cuyo valor expresado en amperios, ya con el motor en marcha, siendo  $R_a$  su resistencia interna y  $U$  la tensión aplicada en bornes será:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}; \text{ f.c.e.m.} = E = U - R_a I_a$$

Para que un motor de corriente continua tenga un buen rendimiento, ha de ser muy pequeña su resistencia de inducido  $R_a$ , con lo cual la corriente de inducido  $I_a$  en el momento del arranque será muy intensa, ya que no hay **f.c.e.m.** aun por estar parado el inducido, por lo que en este tipo de máquinas suele reducirse ésta, intercalando un reóstato de arranque en la alimentación. Al ser grande la intensidad de



arranque también lo será el par de arranque de la máquina  $C_a$ , con lo cual la velocidad de giro  $n$  crecerá muy rápidamente, hasta alcanzar su valor nominal.

Cuando el motor se carga, disminuye su velocidad y consecuentemente su **f.c.e.m.** y, por consiguiente, según la fórmula anterior, la corriente de inducido  $I_a$  crece hasta que el par motor  $C$  se iguale de nuevo al par resistente de la máquina.

### Par de arranque en motores de corriente continua

La mayoría de los motores de corriente continua, especialmente el motor serie, se caracteriza por tener un elevado par de arranque  $C_a$ , puesto que éste es proporcional a la corriente de inducido  $I_a$  y al flujo de excitación que recibe el inducido  $\Phi$ , cuyos valores en el momento del arranque van desde 1,5 a 2,4 veces su valor nominal. Su valor será igual al producto de una nueva constante  $K'$  (dependiente también de las características físicas de la máquina) por el producto de la corriente y el flujo principal de excitación.

$$\text{Par de arranque: } C_a = \frac{p N}{2 \cdot a} \Phi I_a = K' \Phi I_a = \text{newton metro}$$

### Velocidad del rotor en motores de corriente continua

Si de las fórmulas anteriores, que nos proporcionaban la fuerza electromotriz de una dínamo o la fuerza contraelectromotriz de un motor ( $E = K \Phi n$ ), despejamos el valor de la velocidad ( $n$ ), obtenemos las expresiones siguientes:

$$\text{Velocidad: } n = \frac{E}{K\Phi} = \frac{U - I_a R_a}{K\Phi} = \text{r.p.m.}$$

Al ser la expresión de la caída de tensión en el inducido ( $I_a R_a$ ) muy pequeña frente a la tensión aplicada en bornes ( $U$ ) –entre 1,5% y 3% generalmente–, una vez el motor en marcha, se puede decir sin error apreciable que “*en un motor de corriente continua alimentado a tensión constante, el producto de la velocidad ( $n$ ) por el flujo ( $\Phi$ ) se mantiene constante en todos los regímenes de marcha*”.

$$\text{Velocidad: } n \approx \frac{U}{\Phi} = \text{r.p.m.}$$

Por todo lo dicho anteriormente se deduce que: si a un motor de corriente continua le aumentamos la tensión de alimentación  $U$ , aumenta también su velocidad, por el contrario si aumenta el flujo de excitación  $\Phi$ , que es proporcional a la corriente de excitación  $I_e$  que circule por el devanado inductor, su velocidad dis-

minuye. Resumiendo podemos decir que para aumentar o disminuir la velocidad de un motor de corriente continua se puede actuar sobre cualquiera de las variables siguientes:

- **Aumento de la velocidad** { Si aumenta la tensión de alimentación  $U$ .  
Si disminuye el flujo  $\Phi$  (al reducir la corriente de excitación  $I_e$ ).
- **Reducción de la velocidad** { Si disminuye la tensión de alimentación  $U$ .  
Si aumenta el flujo  $\Phi$  (al aumentar la corriente de excitación  $I_e$ ).

### Sentido de giro en las máquinas de corriente continua

Según se aprecia en la figura 1.4, al aplicar *la regla de la mano izquierda*, el sentido del par de fuerzas que actúan sobre una espira, que es recorrida por una corriente eléctrica y está situada dentro de un campo magnético, depende de los sentidos de la corriente por el inducido y del campo magnético del inductor. Por tanto, al depender el campo magnético de la corriente de excitación  $I_e$ , que circula por los devanados de excitación, el sentido de giro del inducido dependerá de esta corriente  $I_e$  y de la corriente principal que circula por el inducido  $I_a$ .

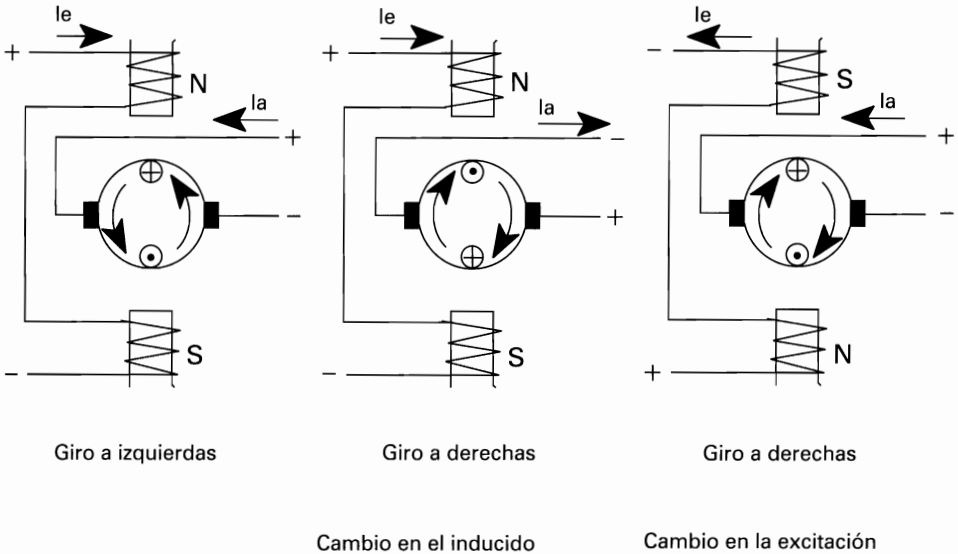


Figura 1.5. Inversión del sentido de giro en motores de corriente continua.

Por este motivo, podemos afirmar que *el sentido de giro de un motor de corriente continua puede invertirse cambiando el sentido de una de las dos corrientes que circulan por el inducido o por el inductor*. Esto se aprecia en la figura 1.5, donde se invierten ambas corrientes para cambiar el sentido de giro, en la segunda figura la corriente principal **I<sub>a</sub>** y en la tercera la corriente de excitación **I<sub>e</sub>**. No hay más que aplicar la regla de la mano izquierda para comprobarlo. Por el contrario también se aprecia que si se cambiara a la vez el sentido de las dos corrientes no se alteraría el sentido de giro.

Aunque a primera vista parecería más conveniente cambiar la corriente inductora **I<sub>e</sub>** por ser más pequeña, en las máquinas de mediana y gran potencia se suele cambiar siempre la corriente de inducido **I<sub>a</sub>**, ya que de ese modo se evitan las elevadas tensiones que aparecen por autoinducción cuando se invierte la corriente en el devanado de excitación, que pueden perforar los aislamientos de la máquina. También y con el mismo fin es conveniente realizar las maniobras de cambio de sentido de giro a motor parado y no en contramarcha.

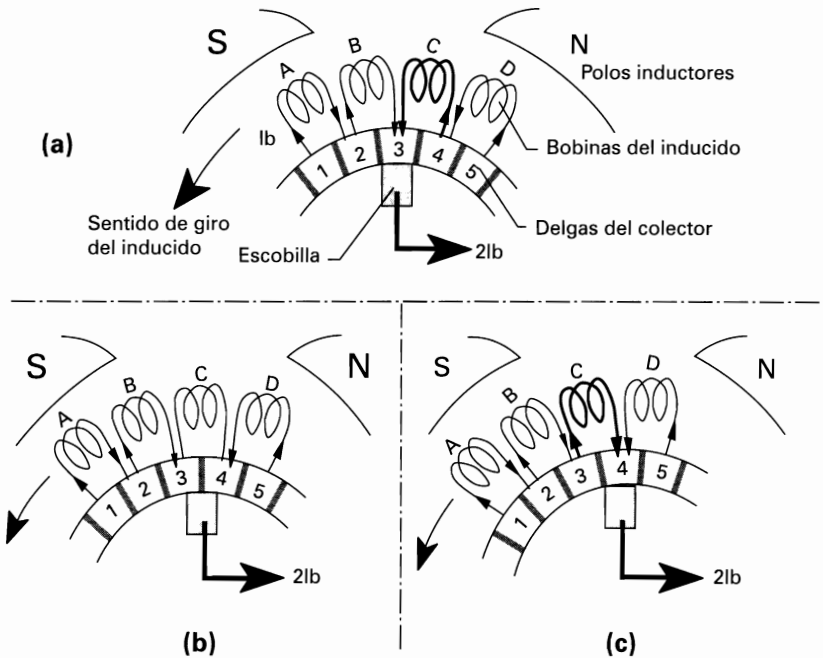
### 1.4. CONMUTACIÓN EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Según se aprecia en los dibujos de la figura 1.6, cuando los extremos de una bobina de inducido de una máquina de corriente continua, conectados a sus delgas respectivas, pasan por una escobilla, se invierte repentinamente el sentido de la corriente en esa bobina, tal como se aprecia en los dibujos con la bobina **C**, que está conectada a las delgas **3** y **4**. Esto es debido al giro del inducido, de forma tal que primero la escobilla toma la corriente por un extremo de la bobina (**a**), seguidamente la escobilla cortocircuita la bobina y, por tanto, no fluye corriente hacia ella (**b**) y, por último, la escobilla toma la corriente del otro extremo de la bobina (**c**).

El efecto de invertirse la corriente en la bobina, al pasar por las escobillas, es lo que se denomina **conmutación**. Cada vez que el sentido de la corriente se invierte en una bobina, se produce una chispa entre delga y escobilla, dando lugar a un continuo chisporroteo que deteriora el colector y las escobillas muy rápidamente. La causa principal de las chispas en las escobillas es la inductancia de la bobina o sección inducida cortocircuitada que, cada vez que se invierte el sentido de la corriente, da origen a una tensión de autoinducción que trata de mantener el sentido de la corriente, lo que finalmente se traduce en una chispa entre cada delga y escobilla.

Al construir una máquina de corriente continua, ya sea motor o generador, hay que tener muy en cuenta este grave inconveniente, que puede ser atajado de dos formas distintas:

1. Añadir **polos auxiliares** o de conmutación a la máquina.
2. Desplazar la posición de las escobillas.



**Figura 1.6.** Efecto de conmutación en una máquina de corriente continua.

## Polos auxiliares o de conmutación

Éste es el sistema más empleado actualmente para evitar el chisporroteo excesivo entre delgas y escobillas en una máquina de corriente continua, ya sea motor o generador, y consiste en añadirle al inductor de la máquina unos polos, denominados auxiliares o de conmutación, tal como se ve en las figuras 1.1, 1.2 y 1.7, cuya función es invertir la corriente de la bobina en el cortísimo instante en que ésta es cortocircuitada por la escobilla (ver instante **b** de la figura 1.6). Para ello se colocan estos pequeños polos, muy estrechos y sin expansión polar, entre los polos principales de excitación, de forma que coincidan con las líneas neutras, con las escobillas y también con las bobinas del inducido en el instante en que son cortocircuitadas por las escobillas. La polaridad de estos polos auxiliares ha de ser tal que se oponga a la polaridad que originó la corriente inducida en la bobina, en el caso de las máquinas, mientras que en el caso de los polos auxiliares de un motor,

éstos han de inducir una corriente igual pero de sentido opuesto a la que circula por la bobina cortocircuitada en ese momento. Según el tipo de máquina sus polaridades han de ser:

- **En una dínamo:** Opuesta a la del polo principal del cual viene la bobina al girar.
- **En motores:** Igual a la del polo principal del cual viene la bobina al girar.

Para que el campo magnético creado por los polos auxiliares pueda invertir correctamente la corriente en la bobina del inducido cortocircuitada, la corriente que lo produce ha de ser también proporcional en todo momento a la corriente principal del inducido **I<sub>a</sub>**, por lo cual los polos auxiliares se conectan en serie con el inducido de la máquina, según se aprecia en las figuras 1.2 y 1.7, para que así su flujo magnético se adapte automáticamente a la carga de la máquina, por lo que han de ser construidos de pocas espiras y con hilo o pletina de la misma sección que el devanado del rotor.

### **Máquinas sin polos auxiliares. Desplazamiento de las escobillas**

Como ya mencionamos anteriormente, en la actualidad la mayoría de las dínamos y los motores de corriente continua poseen polos auxiliares para mejorar la conmutación, pero puede darse el caso de máquinas antiguas o muy pequeñas que no los tengan. En estos casos se puede obtener una conmutación prácticamente libre de chispas, desplazando ligeramente las escobillas, adelantándolas en el sentido de rotación del inducido en las dínamos y retrasándolas cuando se trate de un motor.

Sin entrar en detalles podemos afirmar que la mejora de la conmutación en estos casos es debida a que los bordes de las expansiones polares de los propios polos principales realizan el cometido de los polos auxiliares ya que, al desplazar las escobillas, las espiras cortocircuitadas por éstas se hallan más cerca de dichos extremos polares. Además según el sentido de desplazamiento de las escobillas, antes mencionado, también se cumple la condición de polaridad, antes mencionada, que requerían los polos auxiliares, opuesta a la del polo principal del cual viene para las dínamos e igual a la del polo del cual viene para los motores.

El inconveniente de este sistema de mejora de la conmutación es que el flujo principal de excitación que realiza la misma es prácticamente constante y no se adapta automáticamente a la carga, como sucede en el caso de los polos auxiliares, por lo cual habría que variar el desplazamiento de las escobillas cada vez que variara la carga, para obtener la mejor de las conmutaciones, algo que en la práctica es difícil de hacer y, por tanto, poco empleado este sistema.

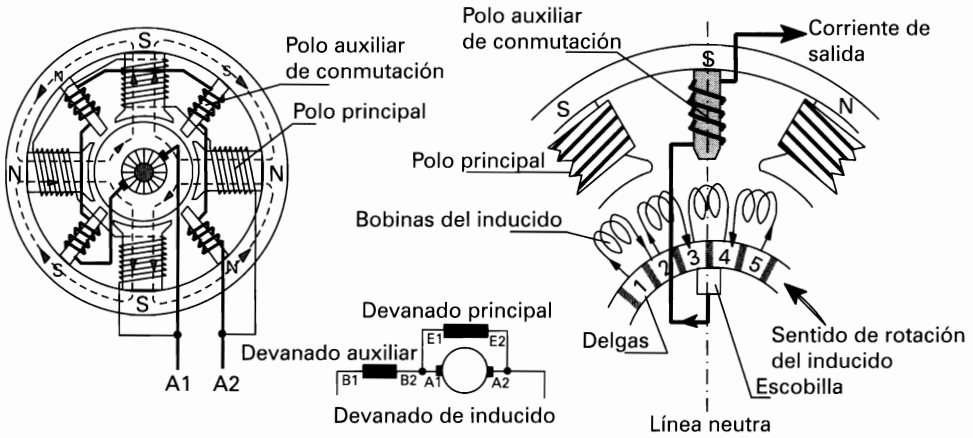


Figura 1.7. Situación y funcionamiento de los polos auxiliares o de conmutación (conexión para dínamo).

### 1.5. REACCIÓN DE INDUCIDO EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Otro problema que se presenta en las máquinas de corriente continua es la llamada **reacción de inducido**, que consiste en un desplazamiento o distorsión que sufre el flujo principal de excitación, debido al flujo transversal producido por las corrientes del inducido. La dirección del desplazamiento del flujo resultante, con respecto a la línea neutra teórica, será en uno u otro sentido, dependiendo de que la máquina sea un motor o una dínamo. En la figura 1.8 se aprecia con detalle este efecto, referido a una dínamo bipolar.

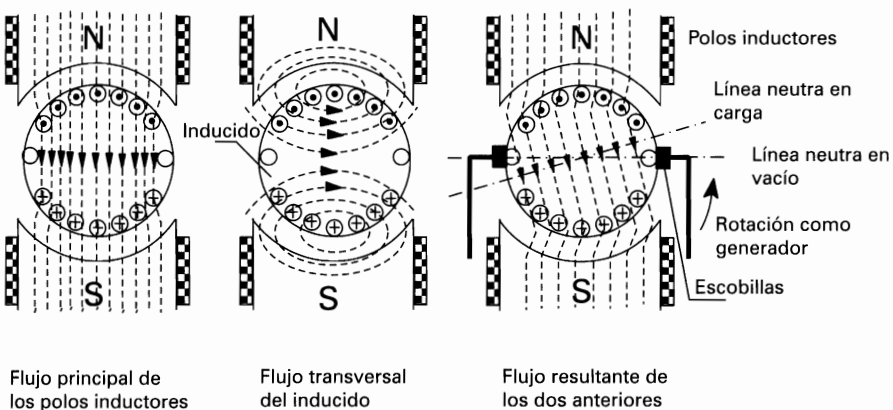


Figura 1.8. Efectos de la reacción de inducido, en una dínamo.

El flujo principal de excitación, creado por la corriente de excitación  $I_e$ , que es el único existente cuando la máquina está parada, es perpendicular a la línea neutra teórica, según se aprecia en la primera imagen. Cuando la máquina se carga, y debido a las corrientes del inducido  $I_a$ , aparece un nuevo flujo transversal, originado por estas corrientes, que se superpone al flujo principal, reforzándolo en un extremo de los polos y debilitándolo en el otro extremo, que por su sentido se suma o resta al flujo principal (segunda imagen). Como consecuencia y tal y como se aprecia en la tercera imagen, se obtiene un flujo resultante que no es perpendicular a la línea neutra teórica.

Ante este desplazamiento de la línea neutra, las escobillas situadas en dicha línea se encuentran en una zona en la que existen tensiones entre las delgas, lo que se traduce en un chisporroteo en el colector. En teoría este inconveniente podría subsanarse desplazando las escobillas hacia la línea neutra real, pero esta solución no es la ideal, según ya se vio en el apartado anterior, ya que la línea neutra real varía con la carga de la máquina.

La mejor solución a este problema es eliminar la reacción de inducido, para lo cual deberá compensarse el campo magnético transversal mediante otros campos magnéticos de igual intensidad pero de sentido opuesto. Esto se consigue con los ya mencionados **polos auxiliares o de conmutación**, único sistema empleado en la mayoría de las máquinas de corriente continua por motivos económicos, mientras que en las grandes máquinas, que trabajen con grandes sobrecargas, o a velocidades muy variables, o también en servicios de regulación de la velocidad, se añaden a las expansiones de los polos principales un nuevo devanado, denominado **devanado de compensación**.

### Devanados de compensación

Estos devanados están contruidos generalmente de pletinas, ya que por ellos ha de pasar también la corriente principal del rotor, y están alojados en ranuras o taladros practicados en la periferia de las masas polares, tal como se aprecia en la figura 1.9. Como la función de estos devanados es la de eliminar las distorsiones originadas por el campo transversal del inducido, se conectan en serie con éste y con los devanados de los polos auxiliares. Están devanados de tal forma que su flujo sea siempre igual y de sentido opuesto al del inducido, por lo cual se construyen con un número de espiras idéntico a las de este. En la figura 1.9 se aprecia esquemáticamente el sentido de las corrientes que en todo momento debe de existir entre los devanados de: inducido, compensación, polos principales y polos auxiliares.

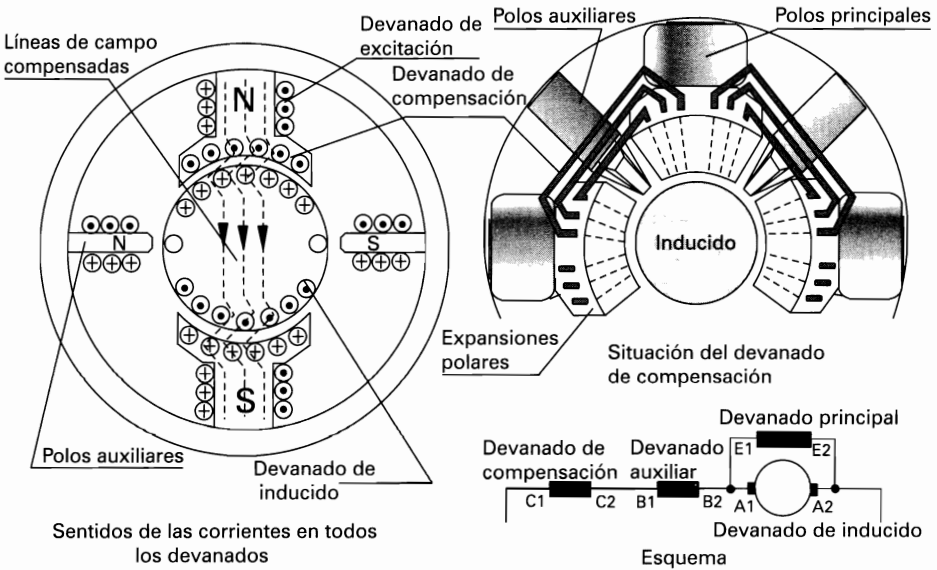


Figura 1.9. Construcción y sentido de las corrientes en los devanados de compensación.

Como ya se mencionó antes, el devanado de compensación aumenta mucho el coste de las máquinas y las pérdidas en el cobre, por lo cual suele montarse solamente en máquinas de gran potencia, ya sean dínamos o motores, que sufran continuas sobrecargas o se empleen en sistemas con variaciones de velocidad frecuentes. Esto es debido a que en la práctica suele ser suficiente el efecto de los devanados auxiliares de conmutación para eliminar los problemas creados por los efectos de conmutación y de reacción de inducido y, por tanto, para eliminar las chispas del colector en las máquinas de pequeña y mediana potencia.

## 1.6. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA E IDENTIFICACIÓN DE BORNES

Mientras que los devanados de compensación o auxiliares, que como ya mencionamos solamente son empleados en máquinas de tamaño medio o grande, se conectan siempre en serie con el inducido, ya sea la máquina motor o dínamo, los devanados principales de excitación se pueden conectar de muy diversas formas, según cual sea el uso al que se destina la máquina, ya que, según sea su tipo de conexión, las características de funcionamiento de la máquina varían grandemente.



De ahí que podamos clasificar las máquinas de corriente continua según sea el tipo de conexión entre el devanado inductor y el devanado inducido. Así en principio podemos hacer una primera clasificación como:

- **Máquinas de excitación independiente.**
- **Máquinas autoexcitadas.**

Las primeras son aquellas que llevan el devanado de los polos principales o de excitación, conectados a una fuente de alimentación distinta a la que alimenta o crea, según sea dínamo o motor, el devanado del inducido. Por el contrario, en las máquinas autoexcitadas tanto el circuito del inducido como el de los polos principales del inductor están conectados de alguna forma entre sí. En este último caso, cuando la máquina es un dínamo, la corriente producida por ella misma es la que se emplea como autoalimentación de los circuitos de excitación, por lo que el hierro de sus masas polares ha de mantener un cierto grado de magnetismo remanente, para poder iniciar su trabajo.

Según sea la relación de conexión entre los devanados de inducido y los de los polos principales de excitación, las máquinas autoexcitadas se clasifican en:

- a) **Máquinas en derivación.** Estas máquinas, también denominadas **shunt**, son las que tienen los circuitos de inducido y de excitación, conectados entre sí en paralelo.
- b) **Máquinas serie.** Cuando los devanados del inducido y de excitación están conectados en serie.
- c) **Máquinas compuestas.** Estas máquinas, también denominadas **compound**, tienen dos circuitos de excitación: uno conectado en serie con él y otro conectado en derivación con el inducido.

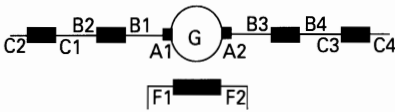
Antes de describir las conexiones y características principales de los sistemas de conexión anteriormente mencionados, y con la finalidad de dar coherencia y facilitar la identificación de sus diferentes partes, describiremos cómo la normativa actual aconseja designar sus bornes.

### Identificación de bornes

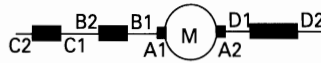
Para una mejor interpretación de los esquemas representativos de las máquinas eléctricas de corriente continua, ya sean dínamos o motores, las normas aconsejan identificar cada extremo o borne de sus diferentes devanados, con una letra seguida de un número correlativo. La letra identifica al devanado (inducido, principal, auxiliar, etc.), mientras que el número identifica correlativamente los extremos o bornes correspondientes a ese devanado, como se aprecia en los

ejemplos de la figura 1.10 y siguientes. A cada tipo de devanado se le asigna la letra identificativa siguiente:

<u>Devanado</u>	<u>Letra identificativa</u>
Del inducido .....	A
De los polos auxiliares .....	B
Del devanado de compensación .....	C
De excitación en serie .....	D
De excitación en derivación .....	E
De excitación independiente .....	F
Otros devanados .....	H, J



Ejemplo con devanados auxiliares y de compensación distribuidos



Ejemplo con devanados auxiliares y de compensación agrupados

**Figura 1.10.** Ejemplos de identificación de bornes, en máquinas de corriente continua.

Seguidamente pasamos a describir muy someramente: las conexiones, las características más importantes y las utilizations más comunes de las distintas máquinas de corriente continua. En los esquemas de conexión se omiten los devanados de conmutación y de compensación, aunque sí se consideran incluidos en la resistencia interna (**R<sub>i</sub>**), tampoco se han dibujado los reóstatos de arranque ni las protecciones.

### Máquinas con excitación independiente

Este tipo de máquinas, como ya se mencionó, se caracterizan por tener la alimentación de los circuitos o polos de excitación completamente independiente de los circuitos del inducido, tal como se aprecia en la figura 1.11, ya sean estos últimos circuitos de entrada o salida, según la máquina sea motor o generador.

Por lo general, los motores con excitación independiente se caracterizan por tener una velocidad muy constante, independiente de la carga, por lo cual se emplean para el accionamiento de máquinas que requieren un control de la velocidad muy preciso, como es el caso de los accionamientos Ward Leonard. La variación de la velocidad puede realizarse variando la tensión de inducido o bien la tensión de exci-

tación, por medio de reóstatos o grupos de tiristores. En el caso de grandes motores, la tensión de excitación suele ser menor que la tensión de servicio, ya que los sistemas de regulación son complejos y delicados.

Los generadores o dínamos, al producir una tensión muy estable, independientemente de la carga, se suelen emplear para instalaciones de emergencia y como excitatrices en el accionamiento de grandes motores.

Las características principales de este tipo de máquinas, además de las de par y velocidad mencionadas en el apartado 1.3, son las resumidas a continuación y en los gráficos de la figura 1.11. Para las definiciones siguientes hay que tener en cuenta que la resistencia interna de la máquina ( $R_i$ ) no es solamente la del devanado del inducido, sino que ésta es la suma de todas las resistencias que están en serie con éste, según cuál sea el tipo de máquina ( $R_i$  = resistencia del inducido + resistencia entre escobillas y colector + resistencia de los devanados de conmutación + resistencia de los devanados de compensación + resistencia de los devanados de excitación en serie).

Motores Dínamos

$$\text{Intensidad de arranque: } I = \frac{U}{R_i} \quad \text{Tensión en bornes: } U = U_0 - (I \cdot R_i)$$

Siendo:  $U$  la tensión en bornes,  $U_0$  la tensión en vacío,  $I$  la corriente total absorbida o producida y  $R_i$  la resistencia interna total.

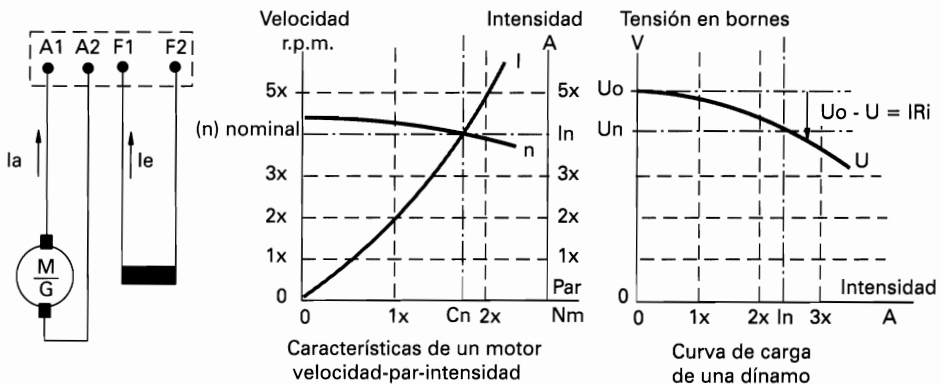


Figura 1.11. Máquinas con excitación independiente.

### Máquinas conectadas en derivación (shunt)

Este tipo de máquinas se caracteriza por tener los circuitos del inducido y del devanado de excitación conectados entre sí en paralelo, tal como se aprecia en la

figura 1.12. Sus características principales son muy similares a las de las máquinas de excitación independiente y, en el caso de los motores, se caracterizan también por ser muy estables, al tener una velocidad muy constante a pesar de las variaciones de carga, por lo cual es muy estimado este tipo de motor cuando se requiere una regulación muy precisa de la velocidad, al actuar sobre su circuito de excitación. Como característica negativa, este tipo de motores presenta la posibilidad de embalamiento, en el caso de que se corten los circuitos de excitación. Debido a su estabilidad de marcha y a que poseen un buen par de arranque ( $C_a = 1,4 \div 1,8 C_n$ ) suelen utilizarse para el accionamiento de máquinas herramientas e instalaciones fijas de transporte.

En el caso de que la máquina sea una dínamo, también presenta una estabilidad de funcionamiento muy aceptable, además de presentar una característica única de auto-protección ante los cortocircuitos. Cuando aparece un cortocircuito en su línea de salida, la corriente aumenta muy rápidamente, mientras la tensión en bornes tiende a cero, por tanto en uno o dos segundos la corriente de excitación  $I_e$  se anula ante la falta de tensión, quedando solamente la excitación debida al magnetismo remanente, con lo cual la tensión en bornes desaparece prácticamente y consecuentemente la corriente producida también. De ahí la curva de carga tan extraña dibujada la figura 1.12. Por todo esto las dínamos con excitación en derivación son muy utilizadas, principalmente, en instalaciones de emergencia y como excitatrices de grandes máquinas.

Las características principales de este tipo de máquinas, aparte de las del par y velocidad vistas en el apartado 1.3, son las resumidas a continuación y en los gráficos de la figura 1.12.

Motores

Dínamos

**Intensidad de arranque:**  $I = \frac{U}{R_i} + I_e$       **Tensión en bornes:**  $U = U_o - (I \cdot R_i)$

Siendo:  $I = I_a + I_e$ ,  $R_e$  la resistencia del devanado de excitación,  $I_e = U / R_e$

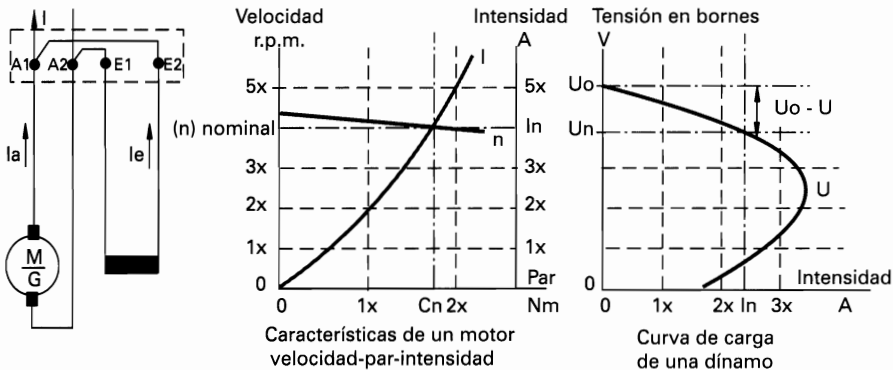


Figura 1.12. Máquinas con excitación en derivación (shunt).

## Máquinas conectadas en serie

Este tipo de máquinas, como ya se mencionó antes, tienen los circuitos de las bobinas inductoras y del inducido conectados en serie, tal como se aprecia en la figura 1.13. Los motores en serie se caracterizan por tener un gran par de arranque ( $C_a = 2,5 \div 4 C_n$ ), ya que es prácticamente proporcional al cuadrado de la intensidad **I**, por ser la intensidad principal la productora del flujo de excitación. También se caracterizan por tener una velocidad de giro muy dependiente de la carga. Como característica negativa podemos mencionar que este tipo de motor tiende a acelerarse en vacío, llegando a embalsarse, por lo cual este tipo de motores debe estar siempre sólidamente unido a la carga.

Por todo lo anteriormente expuesto estos motores son los más empleados en tracción eléctrica, en máquinas elevadoras que requieran un gran par de arranque y como motores de arranque de automóviles y camiones.

Como generador o dínamo, este tipo de máquinas apenas son empleadas debido a su poca estabilidad, si acaso se empleaban antiguamente para algunos fines especiales, como era el caso de la producción de la corriente de campo necesaria para el frenado regenerativo de las locomotoras de ferrocarril.

Las características principales de este tipo de máquinas, aparte de las mencionadas en el apartado 1.3, son las relacionadas a continuación y en los gráficos de la figura 1.13.

Motores	Dínamos
$\text{Intensidad de arranque : } I = \frac{U}{R_i}$	$\text{Tensión en bornes : } U = U_o - (I \cdot R_i)$

Siendo: **I** =  $I_a = I_e$  , **R<sub>i</sub>** la resistencia del inducido (**R<sub>a</sub>**) más la de la excitación en serie (**R<sub>s</sub>**)

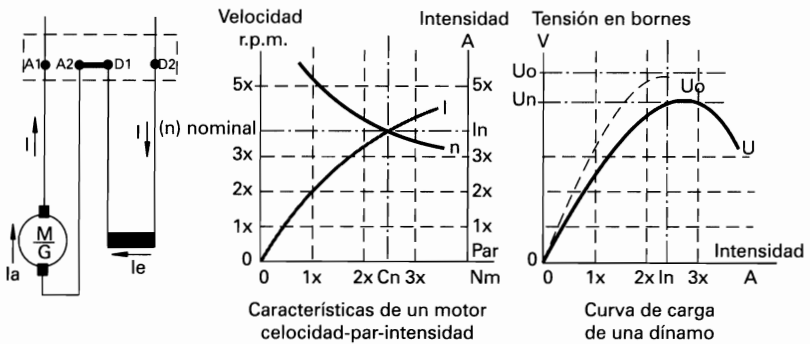


Figura 1.13. Máquinas con excitación en serie.

## Máquinas con conexión compuesta (compound)

Estas máquinas, como ya se mencionó con anterioridad, tienen dos circuitos de excitación: uno conectado en serie con el inducido y otro conectado en paralelo o derivación, tal como se aprecia en la figura 1.14, reuniendo de ese modo las propiedades de las máquinas conectadas en serie y en derivación.

En el caso de los motores, este tipo de máquinas puede llegar a tener una velocidad muy estable y un par de arranque mayor que el del motor en derivación, siempre que su composición diferencial sea la adecuada, pero son poco empleados ya que según predomine la composición serie o derivación pueden llegar a ser muy inestables. Un motor compound normal puede llegar a tener un par de arranque algo inferior al de un motor serie equivalente, mientras que al cargarlo su velocidad decrece algo más que el motor en derivación, y además no se embala en vacío. Se usa algo cuando hay que accionar masas pesadas, por ejemplo en prensas, punzonadoras, máquinas centrífugas, etc.

En el caso de las máquinas compound empleadas como generador, siempre que estén adecuadamente proyectadas, se caracterizan por tener una gran estabilidad de funcionamiento. Cuando el devanado de excitación en serie es el correcto, se obtiene una máquina **compound normal**, con una tensión en bornes  $U$  prácticamente constante e independiente de la carga. Por el contrario, cuando el devanado de excitación en serie tiene demasiadas espiras, se obtiene lo que se denomina una máquina con comportamiento **hipercompound**, en la cual la tensión crece al aumentar la carga. Si por el contrario el devanado en serie tiene pocas espiras, se obtiene una máquina **hipocompound**, que tiene un comportamiento similar al de las máquinas en derivación. Los generadores o las dínamos compuestas suelen emplearse muy poco, si acaso algo como excitatrices y antiguamente para soldadura por arco.

En este tipo de máquinas, si, por equivocación, las conexiones del devanado serie se permutan para que la corriente de la excitación en serie **I<sub>es</sub>** circule en sentido contrario, se obtiene lo que se denomina una máquina **anticompound** o **compound diferencial** con un comportamiento muy distinto de los anteriores. Si la máquina es un motor, adquiere una gran inestabilidad, ya que el flujo de los polos en serie se restará del de los polos en derivación, decreciendo el flujo total al aumentar la carga, con lo cual el motor en vez de aminorar su velocidad se acelera. Si por el contrario la máquina es un generador, al disminuir el flujo, su tensión disminuye muy rápidamente al aumentar la carga. Por todo esto debe extremarse mucho la correcta conexión entre los devanados de excitación en serie y en derivación en este tipo de máquinas.

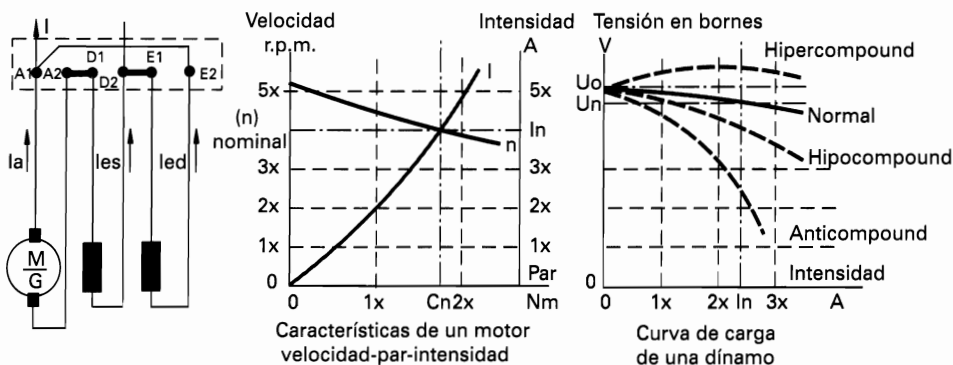
Las características principales de este tipo de máquinas son las relacionadas a continuación y en los gráficos de la figura 1.14.

Motores

Dínamos

**Intensidad de arranque:**  $I = \frac{U}{R_i} + I_{ed}$       **Tensión en bornes:**  $U = U_o - (I \cdot R_i)$

Siendo:  $R_i$  la resistencia total en serie que incluye la del devanado de excitación en serie ( $R_{es}$ ),  $I_a = I_{es}$ ,  $I = I_a + I_{ed}$ ,  $I_{ed} = U / R_{ed}$  y  $R_{ed}$  la resistencia de los devanados de excitación en derivación.



**Figura 1.14.** Máquinas con excitación compuesta (compound).

Los sistemas de arranque y regulación de la velocidad o tensión en este tipo de máquinas de corriente continua no se describen, ya que pueden llegar a ser muy variados y complejos, y por tanto se salen de los límites de esta obra.

# 2

---

---

## LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Cuando una máquina eléctrica de corriente continua no arranca o presenta alguna anomalía de funcionamiento, puede ser debido a alguno de los tres tipos de causas siguientes:

- Causas exteriores a la máquina: fusibles o relés de protección, la propia red, etc.
- Causas mecánicas: cojinetes, engrase, mala ventilación, nivelado, etc.
- Averías internas: bobinados, conexiones, colector, circuitos magnéticos, etc.

A este último tipo de averías va dedicado este capítulo y el análisis y los sistemas de localización de las distintas averías se realizará de la forma más sencilla posible, y empleando medios manuales o poco sofisticados que cualquier persona puede tener o improvisar en su taller de reparación. También queremos recordar aquí que cuando ocurre este tipo de averías, generalmente, es porque ha fallado alguno de los sistemas de protección que toda máquina eléctrica debe tener: protecciones contra sobrecargas, contra cortocircuitos y contra defectos a tierra, principalmente.

Las anomalías de tipo eléctrico más comunes, que pueden encontrarse en las máquinas eléctricas de corriente continua, aparte de la quemazón de los devanados, fácilmente reconocible, pueden clasificarse en los cinco apartados siguientes:

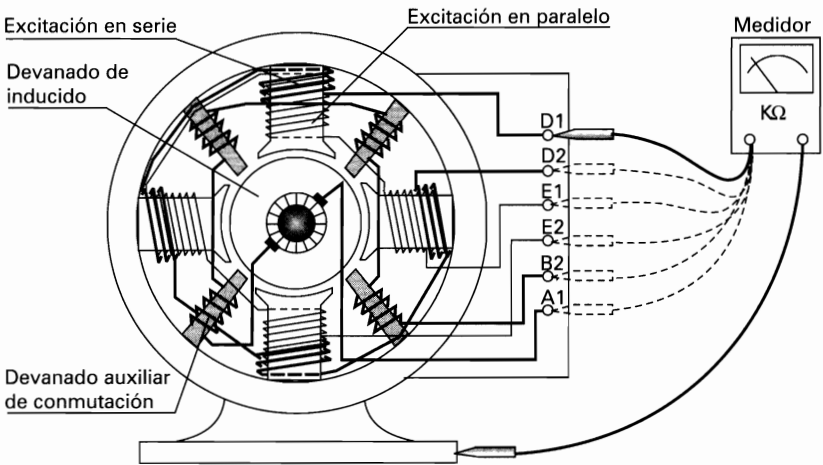
- Localización de contactos a masa.
- Localización de cortocircuitos.
- Localización de conductores cortados.
- Determinación de las polaridades correctas.
- Determinación de la posición correcta de las escobillas.



## 2.2. LOCALIZACIÓN DE CONTACTOS A MASA

De existir un solo contacto a masa, la máquina incluso podría seguir funcionando, siempre y cuando no lo desconectaran sus sistemas de protección, pero si representaría un peligro latente de electrocución, y si luego surge otro contacto a masa, en una fase distinta de la anterior, tendríamos un cortocircuito, con lo que la destrucción de los devanados sería casi instantánea.

En la figura 2.1 se ve, esquemáticamente, el proceso que hay que seguir para la locación de contactos a masa en los devanados de una máquina de corriente continua. Se ha dibujado una máquina en conexión compuesta o compound y con polos auxiliares, por ser uno de los tipos de constitución más complejo, aunque el procedimiento en otras máquinas con diferente número de devanados inductores sería el mismo.



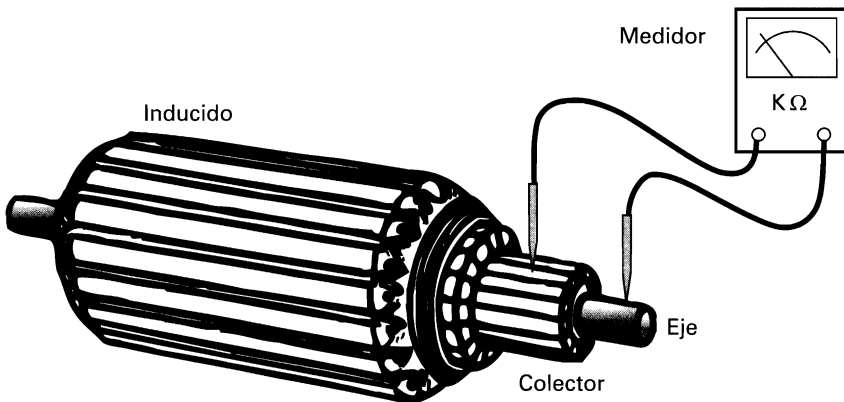
**Figura 2.1.** Esquema de localización de contactos a masa.

Se puede utilizar un polímetro, un comprobador de aislamiento o cualquier otro medidor de continuidad. Se comienza por independizar todos los devanados de la máquina, en la placa de bornes, desconectando y retirando puentes: a continuación se coloca una punta de prueba del medidor de continuidad en la carcasa de la máquina y con la otra punta se van tocando todos los bornes o terminales de los distintos devanados y si el medidor nos indica continuidad, ya sabemos que hay un contacto a tierra en ese devanado. Si el contacto lo tuviéramos sobre los bornes A o B, éste puede ser en el devanado de inducido o bien en las bobinas de los polos auxiliares, por lo que debemos proceder a independizarlos, bien sea desconectándolos o simplemente levantando las escobillas, para determinar en qué parte está realmente el contacto a masa.

## Localización de contactos a masa en el inducido

Si comprobamos que el contacto a masa es en el inducido, debemos desmontar el motor, y con el inducido ya extraído proceder a verificar en qué parte del mismo está la avería. Por lo general en los pequeños motores o dínamos se bobina sin más el inducido o bien se sustituye por otro nuevo y perfectamente equilibrado de fábrica, pero en las grandes máquinas de corriente continua puede repararse solamente la bobina o bobinas defectuosas. Una vez extraído el inducido, y si con una primera inspección ocular no se ve el defecto, para localizarlo procederemos como en las figuras 2.2 y 2.3.

Utilizando un medidor de continuidad (polímetro, medidor de aislamiento, etc.), se coloca un terminal sobre el eje o cualquier otra parte del circuito magnético y con el otro terminal se van tocando las delgas, una a una. Si en algún momento el medidor nos indica continuidad, una o varias bobinas del inducido están conectadas a masa. En caso contrario el defecto estaría en alguno de los polos auxiliares, conectados en serie con el inducido.



**Figura 2.2.** Verificación de contactos a masa, en el inducido, con polímetro.

Si al efectuar la prueba anterior se detecta que el contacto a masa corresponde a alguna bobina del inducido, siempre que nos interese la reparación parcial del mismo o simplemente por saber el lugar exacto de la avería, se puede localizar la bobina o bobinas puestas a masa, por medio de un milivoltímetro de corriente alterna (sirve el de un polímetro) y de un sencillo utensilio llamado **zumbador**, bien sea este último manual, si el inducido es de gran tamaño o de sobremesa, si éste fuera de pequeño tamaño; tal como se aprecia en la figura 2.3.

El zumbador, bien sea manual o de sobremesa –este último modelo es el representado en la figura 2.3– no es más que una bobina con núcleo de hierro y con el entrehierro en forma cilíndrica, para que se adapte a la curvatura del hierro de los inducidos. Por tanto, cuando se conecta el zumbador a la red de corriente alterna y se coloca en su entrehierro un inducido, en las bobinas de este último aparecen fuerzas electromotrices inducidas, que pueden ser medidas sobre las delgas del colector.

Por este motivo, si vamos girando el inducido sobre el zumbador, si éste es de sobremesa, o bien, si es manual, el zumbador sobre el inducido, y medimos la tensión existente entre cada delga y la parte de hierro del inducido, aparecerán pequeñas tensiones iguales en todas las delgas, excepto en la delga o delgas correspondientes a la bobina puesta a masa, en la cual la tensión medida será nula o mucho más baja que en las otras delgas. Una vez localizadas las bobinas averiadas ya se pueden sustituir por otras en buen estado.

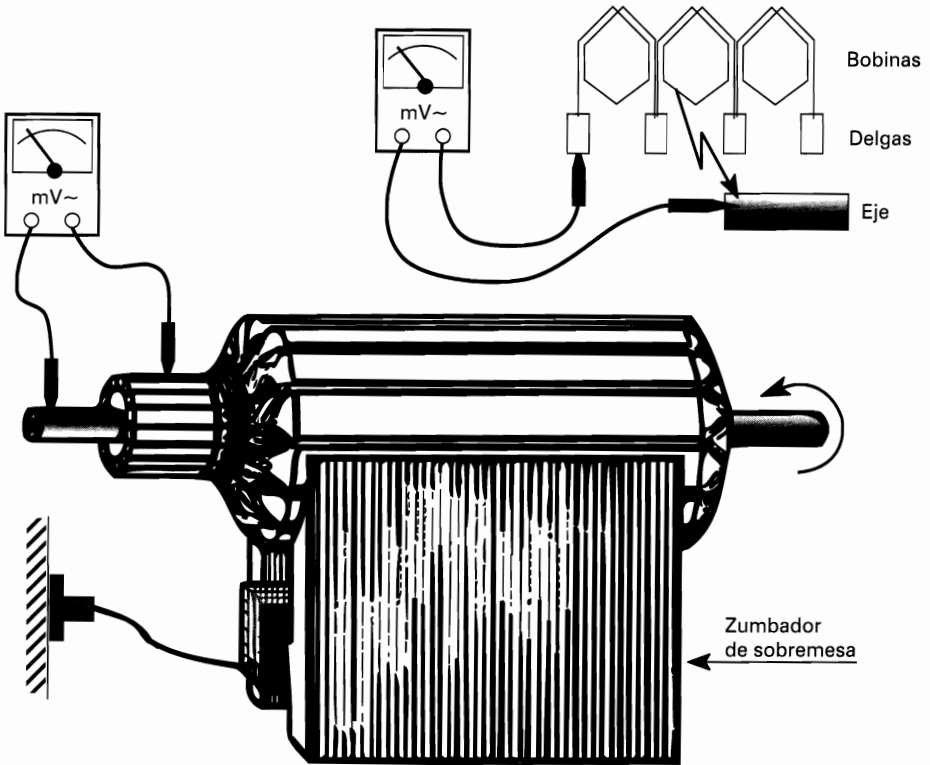


Figura 2.3. Localización de bobinas a masa, en el inducido.

## Localización de contactos a masa en los circuitos de excitación

Si una vez realizadas las pruebas, descritas al comienzo de este párrafo y en la figura 2.1, se detecta que el contacto a masa está en alguno de los circuitos de excitación y visualmente no detectamos la bobina puesta a masa, podemos localizarla por medio de un medidor de continuidad o mejor un medidor de aislamiento. Para ello hemos de proceder primero a verificar en qué circuito de bobinas inductoras está el defecto a masa (principales, auxiliares, de conmutación, etc.) tal como se vio al comienzo de este apartado 2.2.

Una vez localizado el circuito inductor defectuoso, para localizar la bobina puesta a masa, deberemos desconectar todas las bobinas del circuito defectuoso, para independizarlas unas de otras, tal como se aprecia en la figura 2.4, y una vez independizadas, mediremos el aislamiento entre un extremo de cada bobina y la carcasa de la máquina. Al aplicar el medidor sobre la bobina puesta a masa, éste nos indicará un aislamiento cero o mucho más bajo que el de las bobinas en buen estado. Una vez localizada la bobina defectuosa, ya se puede proceder a su reparación o sustitución.

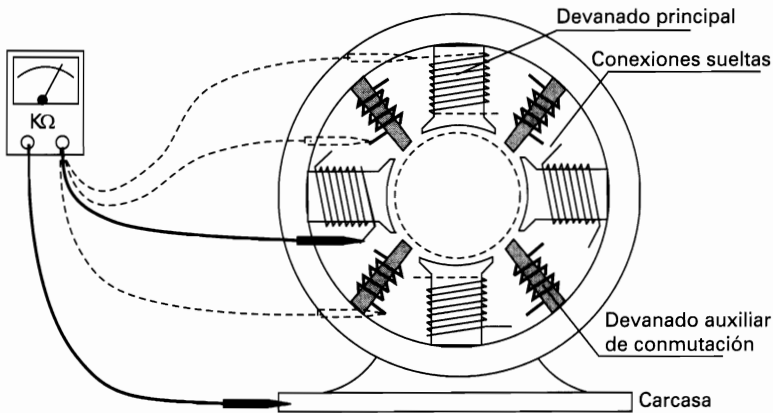


Figura 2.4. Localización de contactos a masa en los circuitos de excitación.

## 2.3. LOCALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITOS

Al igual que los defectos anteriormente estudiados, los cortocircuitos en una máquina de corriente continua pueden ser en el inducido o en alguno de los devanados de los circuitos de excitación o auxiliares de los inductores.

Si el cortocircuito es **en el inducido**, la máquina, si es un motor, no girará o lo hará muy lentamente, a la vez que se calentará en exceso o incluso puede aparecer humo u olor a quemado; por lo que, en muchos casos, puede localizarse la bobina defectuosa al tacto o bien por su aspecto quemado.

Si por el contrario el cortocircuito es **en los inductores**, además de un calentamiento general de la máquina, puede también manifestarse por un aumento de su velocidad, en el caso de que sea un motor, apreciable sobretodo si la máquina gira en vacío.

Si el cortocircuito es aun incipiente o de poca importancia, y no es apreciable a simple vista o al tacto, podremos emplear alguno de los métodos siguientes para localizarlo:

### **Localización de cortocircuitos, entre espiras, en el inducido**

Los cortocircuitos en el inducido pueden ser de muchas magnitudes ya que pueden aparecer: cuando dos espiras de una misma bobina o sección inducida hacen contacto entre sí por un defecto de aislamiento, o bien cuando una bobina o sección inducida hace contacto con otra contigua, bien sea dentro de una misma ranura o en las cabezas de dichas bobinas, o incluso puede ocurrir entre delgas contiguas del colector, bien sea por un contacto directo o por la suciedad que las escobillas dejan sobre el propio colector.

En los inducidos de máquinas pequeñas el procedimiento más empleado para localizar los cortocircuitos entre espiras se basa en el empleo del mismo zumbador empleado para la localización de los contactos a masa y una lámina de acero, que puede ser una hoja de sierra, tal como se aprecia en la figura 2.5. Para ello se coloca el inducido sobre el zumbador y se conecta éste a la red de alterna; seguidamente se coloca la hoja de sierra longitudinalmente sobre el inducido, manteniéndola en esa posición mientras se va girando el inducido sobre el zumbador. Cuando la lámina metálica empieza a vibrar, debido al campo magnético producido por las corrientes de fuga del cortocircuito, nos indica que la bobina o bobinas alojadas en esa ranura tiene espiras en cortocircuito.

Si el zumbador fuera de poca potencia o manual, al ir recorriendo el inducido, debemos procurar que la distancia entre el entrehierro del zumbador y la lámina metálica sea igual al ancho de bobina, para que se aprecie mejor el defecto.

En los **devanados ondulados** ya no resulta tan fácil detectar las bobinas con espiras en cortocircuito o incluso los cortocircuitos incipientes entre bobinas distintas o sobre las propias delgas del colector, ya que tal como se ve en la figura 2.6, la lámina metálica vibrará cuatro veces en el caso de que la máquina sea tetrapolar,

seis veces si es exapolar, etc. Esto es debido a que el flujo de fuga producido por la corriente del cortocircuito se manifiesta en todas las ranuras colindantes por donde pasan las dos series de espiras en cortocircuito.

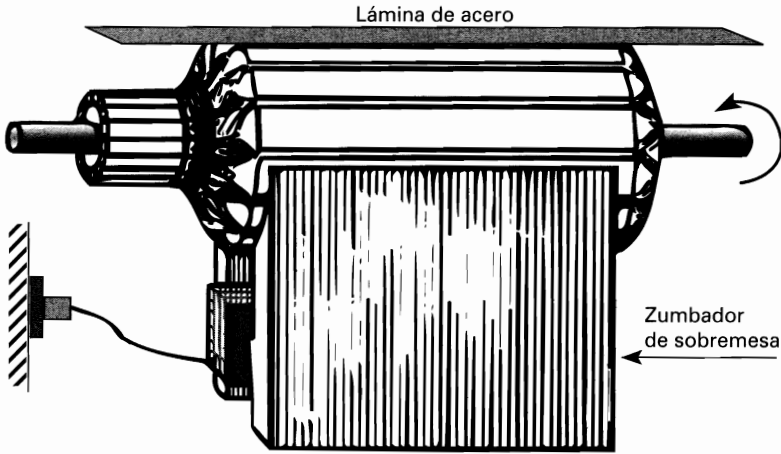


Figura 2.5. Localización de cortocircuitos, en el inducido.

Si queremos determinar la posición exacta de las bobinas en cortocircuito en este tipo de devanados, deberemos utilizar de nuevo el zumbador y un milivoltímetro de corriente alterna, de la forma y manera que se aprecia en la figura 2.7. Para ello se coloca el inducido sobre el zumbador, si éste es del tipo sobremesa, o viceversa si es de tipo manual y con el milivoltímetro se van midiendo, entre delgas consecutivas, las tensiones inducidas en las bobinas por el flujo del zumbador; y donde la tensión sea nula o inferior a las otras medidas nos señalará que el cortocircuito está entre las bobinas o secciones inducidas conectadas a esas delgas.

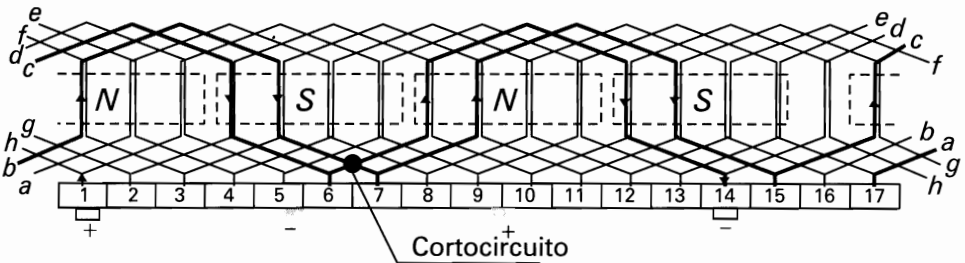


Figura 2.6. Cortocircuitos entre espiras en devanados ondulado.

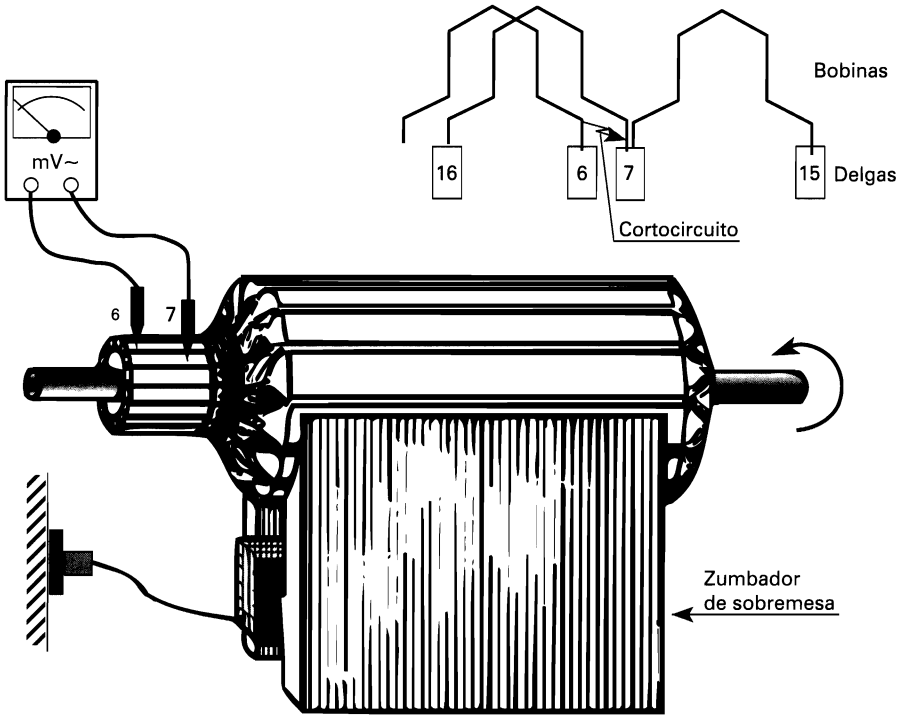


Figura 2.7. Localización de cortocircuitos entre espiras o bobinas en un devanado ondulado.

### Localización de espiras en cortocircuito, en los devanados inductores

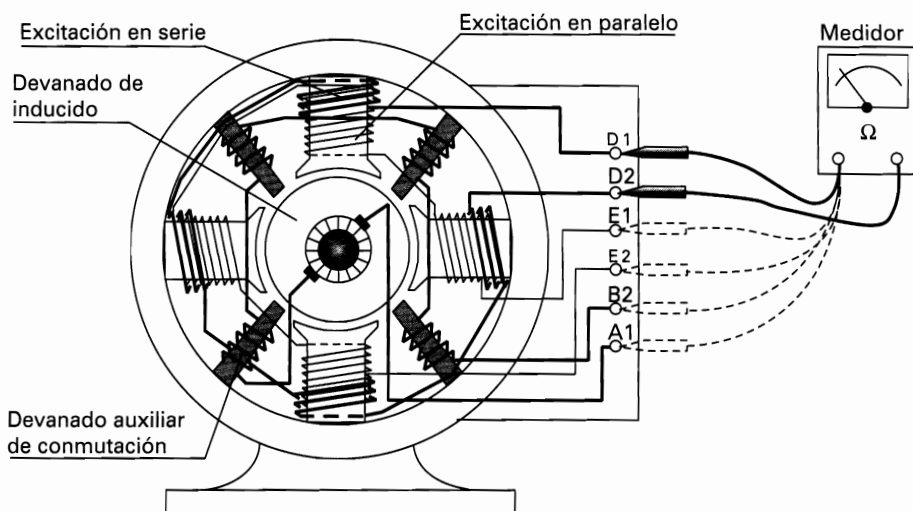
La localización de cortocircuitos en los diferentes devanados inductores y auxiliares suele hacerse de forma visual y clara, cuando éstos están originados en devanados de gran sección y, por tanto, por los que circula una gran intensidad, como es el caso de los devanados de excitación en serie o de los devanados auxiliares de conmutación, con sólo observar la quemazón de los aislantes. Pero cuando los cortocircuitos están sobre devanados de muchas espiras y de hilo fino, como es el caso de los devanados de excitación en paralelo, y sobre todo si éstos son entre espiras de una misma bobina, la localización ya es más difícil.

En estos tipos de devanados lo mejor es independizar las bobinas, como se ve en la figura 2.4 del apartado anterior, y con un medidor de aislamiento muy sensible ir midiendo la resistencia de las diferentes bobinas que forman el circuito excitador. Por supuesto la bobina con menor resistencia es la que tiene espiras en cortocircuito.

## 2.4. LOCALIZACIÓN DE CONDUCTORES CORTADOS

Cuando esto ocurre y, sobretodo, si la máquina es un motor, éste no arrancará. Por el contrario, si es un dínamo, no producirá corriente si la interrupción es en los devanados inductores de excitación, mientras que sí podrá producir algo de corriente cuando la avería esté localizada en el inducido o en los devanados auxiliares de conmutación o compensación. En estos últimos casos se producirán chispas excesivas en el colector. Según sea la localización de los conductores cortados en uno u otro circuito emplearemos distintos sistemas de localización.

Auxiliados por el esquema de la figura 2.8, vemos que si aplicamos un medidor de aislamiento o detector de continuidad a los distintos circuitos habidos en una máquina eléctrica, accesibles en la placa de bornes una vez retirados todos sus puentes, en todos ellos ha de darnos una continuidad total, siempre que éstos estén en perfectas condiciones. Cuando esto no es así, debemos suponer que el circuito en cuestión está cortado o interrumpido en alguna de sus bobinas, puentes de interconexión o accesorios que forman parte de él.



**Figura 2.8.** Esquema de localización de conductores cortados.

Para localizar el lugar de la interrupción, una vez detectado el circuito interrumpido y siempre que no sea en una bobina del propio inducido, se van comprobando bobina a bobina todas las del circuito, hasta detectar dónde está la interrupción para proceder a subsanarla.



### Localización de interrupciones en el inducido

Cuando la interrupción ha sido detectada en el circuito del inducido (bornes A1-B2 de la figura 2.8), hemos de suponer que la interrupción no solamente puede estar en las bobinas del inducido, sino que al ser el circuito en cuestión más complejo, puede ser debida a alguna de las causas siguientes:

- Una o varias bobinas del inducido cortadas.
- Contacto defectuoso de las escobillas sobre el colector, por estar éstas desgastadas o el colector muy sucio.
- Conexiones rotas en los portaescobillas.
- Defectuosa conexión entre las escobillas y los polos auxiliares.
- Alguna bobina de los polos auxiliares o sus puentes de conexión cortados.

Para localizar la mayoría de estos defectos, siempre que no sea una espira interior del inducido cortada, suele ser suficiente con una inspección visual, de los elementos o las partes antes mencionadas. Cuando esto no es suficiente, debemos verificar la continuidad de estos elementos, uno a uno hasta localizar el lugar exacto de la interrupción.

Cuando todas las comprobaciones anteriores no nos den el resultado apetecido, debemos suponer que la interrupción ha de estar en las propias bobinas del inducido. Cuando tengamos la certeza de que la interrupción está en el inducido y queramos detectar en qué bobina está, deberemos recurrir de nuevo al zumbador para detectarlo.

Para estos casos es conveniente que el zumbador sea de gran potencia y el procedimiento el de siempre. Se coloca el inducido sobre el zumbador y se conecta a la red de alterna, para que aparezcan tensiones inducidas en las bobinas del inducido y, bien sea midiendo estas pequeñas tensiones entre delgas del colector o si el inducido es pequeño, basta con ir cortocircuitando las delgas de dos en dos con un puente o una hoja de sierra; y cuando las bobinas o secciones inducidas conectadas entre dos delgas consecutivas estén en buen estado, detectaremos una pequeña tensión entre ellas, si la medimos, o bien saltará una pequeña chispa si empleamos el sistema del cortocircuito. De esta forma, girando el inducido vamos comprobando las bobinas o secciones inducidas una a una, y cuando no se detecte tensión o chispa alguna, en la sección o bobina conectada a ese par de delgas estará la interrupción.

### 2.5. DETERMINACIÓN DE LAS POLARIDADES CORRECTAS

La correcta polaridad de los distintos circuitos (inductores o inducidos) de una máquina eléctrica solamente puede verse alterada cuando se procede a su bobinado

total o parcial y no se conectan correctamente las bobinas entre sí. En estos casos las polaridades pueden estar alteradas en:

- Los polos inductores, ya sean estos serie o paralelo.
- En los polos auxiliares de conmutación o compensación.
- En el devanado del inducido.

Si la polaridad no fuera la correcta en los polos auxiliares de un motor, las escobillas chispearían fuertemente, mientras que si el defecto está en un circuito de excitación, el motor no podrá ni siquiera arrancar. Cuando el motor es del tipo **compound**, puede llegar a arrancar, sobretodo en vacío, y podemos saber si la alteración es en el circuito de excitación en serie o en el de excitación en paralelo según cual sea su comportamiento. Para ello cortocircuitamos el circuito de excitación en serie en la placa de bornes y, si la velocidad aumenta, nos indica que el circuito en serie está correctamente. Por el contrario, si la velocidad disminuye, nos indica que en el circuito serie está invertido alguno de sus polos. Si el motor no arrancara, sería síntoma de que la alteración de la polaridad está en el circuito de excitación en paralelo.

Si la alteración se debe a las incorrectas conexiones del inducido, se observará un chisporroteo irregular entre delgas y escobillas.

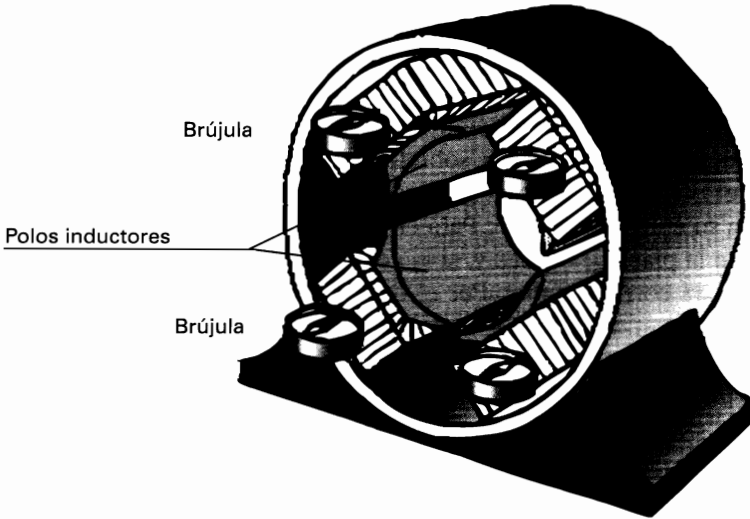
## Verificación de la polaridad en los polos inductores

Una forma sencilla y segura de verificar la polaridad de los circuitos inductores consiste en ir aplicándoles, uno a uno, una pequeña tensión continua –en la mayoría de los casos con una batería de 6 ó 12 voltios es suficiente– e ir verificando las polaridades por medio de una brújula, tal como se esquematiza en la figura 2.9. Si la aguja invierte su posición al pasar de un polo a otro, nos indica que la polaridad de ese circuito es la correcta. En caso contrario, debemos verificar sus conexiones para detectar la alteración, siendo lo más probable que haya que invertir los terminales de la bobina polar donde no cambió el sentido de la aguja.

Cuando realicemos estas comprobaciones, será muy importante tener en cuenta la relación de polaridad entre polos principales y auxiliares (ver apartado 1.4 de esta obra), que como sabemos no es la misma en una dínamo que en un motor.

En las máquinas pequeñas, a falta de brújula, podría emplearse un clavo o una pequeña varilla de hierro, de tal forma que si se coloca la cabeza o un extremo

del mismo en el extremo de una masa polar, el otro extremo ha de orientarse hacia el otro polo contiguo. En caso contrario las conexiones de un polo están invertidas.



**Figura 2.9.** Verificación de la polaridad correcta en los polos inductores o auxiliares.

### Verificación de la polaridad en el inducido

Para verificar las polaridades del inducido, podemos utilizar también el sistema de la brújula empleado para los devanados inductores, alimentándolo con una pequeña tensión continua, bien sea a través de dos portaescobillas de distinta polaridad o bien aplicando la tensión directamente a dos delgas, sobre las cuales coincidieran en todo momento dos escobillas de signo contrario, según se aprecia en la figura 2.10.

Seguidamente y ayudados del esquema del devanado del inducido, vamos colocando la brújula frente a cada ranura, verificando primero la polaridad de todas las ranuras que forman un polo, y al pasar a verificar las ranuras del polo siguiente, la aguja ha de girar invirtiendo su posición. Cuando esto no ocurra al pasar de un polo a otro o bien ocurra dentro de un mismo polo, nos indica que esa bobina o sección inducida está mal conectada, por lo cual debemos invertir sus extremos.

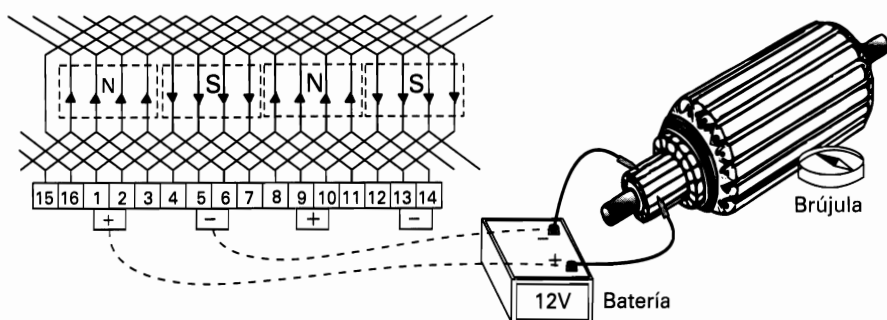


Figura 2.10. Verificación de la polaridad correcta en el inducido.

## 2.6. DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DE LAS ESCOBILLAS

En toda máquina de corriente continua, la posición correcta de las escobillas –también denominado calado– ha de ser sobre las líneas neutras, como ya mencionamos en el capítulo anterior. Cuando esto no es así, aumenta el chisporroteo entre delgas y escobillas con el consiguiente deterioro del colector.

A pesar de lo dicho anteriormente, la línea neutra real puede no coincidir siempre con la línea neutra teórica, ya que en algunas máquinas puede desplazarse con la carga. Por tanto, y recordando que la posición correcta de las escobillas debería ser la de la línea neutra real, recordamos aquí que:

- En máquinas provistas de polos auxiliares de conmutación, las líneas neutras reales (LNR) coinciden siempre con las líneas neutras teóricas (LNT) y, por tanto, con el eje geométrico de los polos auxiliares.
- En las máquinas pequeñas, carentes de polos auxiliares de conmutación, las líneas neutras reales se desplazan con la carga, un ángulo ( $\alpha$ ), respecto a la línea neutra teórica, según se aprecia en la figura 2.11. Dependiendo de que la máquina sea dínamo o motor su desplazamiento es:
  - Adelantado para los dínamos.
  - Retrasado para los motores.

La determinación de la posición correcta de las escobillas, en una máquina de corriente continua, puede fijarse poniendo ésta en marcha e ir girando el aro porta-escobillas hasta que éstas chispeen lo menos posible, o bien por medio de otros métodos sencillos, pero eficaces, realizados a motor parado. Uno de estos sencillos métodos, referido a máquinas con polos auxiliares, ya sean motores o dínamos, es el que se describe a continuación, ayudados por el esquema de la figura 2.12.

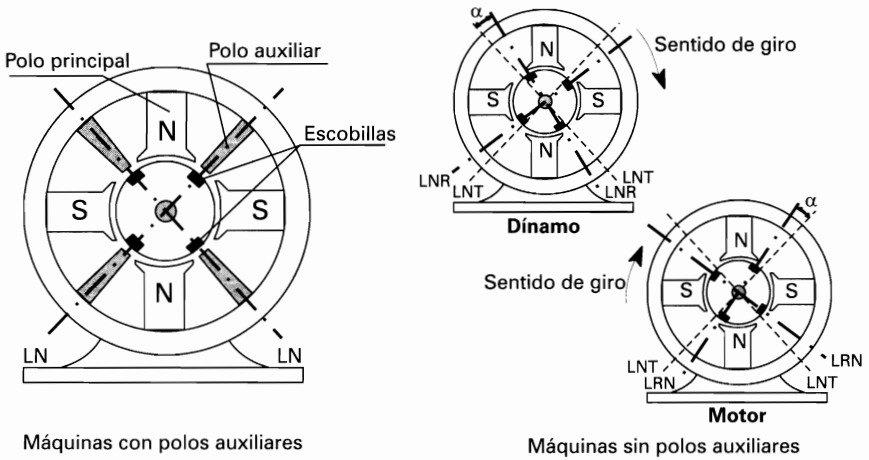


Figura 2.11. Posición de las líneas neutras reales.

Para ello basta con realizar el sencillo montaje de la figura 2.12, consistente en alimentar el circuito de inducido, una vez independizado del resto en su placa de bornes, con una batería o pequeña tensión continua, de 6 ó 12 voltios, previa intercalación de un interruptor o pulsador, que se pueda cerrar y abrir con facilidad. Sobre los bornes libres del circuito inductor se conecta un voltímetro, con una pequeña escala –de 25 ó 50 voltios suele ser suficiente–, a poder ser de doble escala y con cero central.

Una vez realizado el montaje, anteriormente descrito, se cierra y abre el interruptor repetidas veces para producir impulsos que puedan dar lugar a una tensión inducida en los devanados inductores, mientras se observan las indicaciones del voltímetro. La aguja de éste se desplazará más cuanto más alejadas estén las escobillas de la línea neutra.

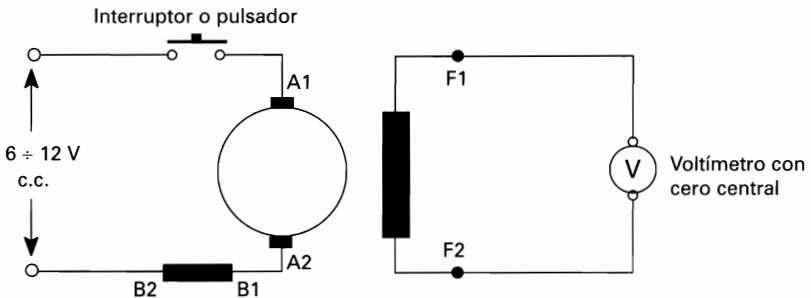


Figura 2.12. Montaje sencillo para la fijación correcta de las escobillas.

Seguidamente se van moviendo las escobillas, por medio del aro portaescobillas, hasta que la aguja del voltímetro deje de desplazarse y marque cero voltios. Cuando esto suceda, nos indica que la posición de las escobillas es la correcta; o sea que en ese momento están situadas sobre las líneas neutras de la máquina.

Para conseguir el calado correcto, en la mayoría de los casos debe repetirse el ensayo varias veces, antes de fijar la posición correcta de las escobillas. Si al arrancar la máquina todavía chispean estas, podemos retocar ligeramente su posición, sin detenerla hasta conseguir el calado correcto.

## 2.7. RESUMEN DE LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS

Seguidamente y como resumen de los temas tratados en este capítulo, se incluye un cuadro resumen de averías, donde se analizan las más comunes que se pueden dar en las máquinas de corriente continua. Aunque algunas son comunes a motores y dínamos, se describen por separado, para una mejor interpretación.

**TABLA RESUMEN PARA LA LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA**

<b>MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA</b>		
<b>Síntomas</b>	<b>Causas posibles</b>	<b>Verificación y soluciones</b>
1. El motor no arranca en vacío y no mete ruido alguno.	- La red no tiene tensión. - El circuito inducido está cortado.	- Comprobar tensión. - Verificar los circuitos incluyendo los reóstatos de arranque.
2. El motor arranca en vacío y se embala.	- Parte del circuito inductor está cortado.	- Comprobar circuitos, incluyendo reóstatos de arranque.
3. El motor va a tirones.	- Cortocircuito en el devanado de inducido o entre delgas.	- Limpiar colector y comprobar bobinas del inducido.
4. El motor arranca muy lentamente.	- Falta de excitación.	- Verificar que en el arranque todas las resistencias están metidas.
5. El motor arranca en sentido contrario.	- Conexiones de la excitación cambiadas.	- Cruzar conexiones.
6. El motor no aguanta la carga.	- Mala posición de las escobillas. - Bajada de tensión.	- Corregir posiciones de escobillas. - Verificar tensión.
7. El motor gira muy rápido y oscila en carga.	- Mala posición de las escobillas. - Circuito excitador interrumpido o conectado erróneamente.	- Corregir posiciones de escobillas. - Verificar circuitos inductores.

**TABLA RESUMEN PARA LA LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA (Continuación)**

8. El motor se calienta exageradamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Carga excesiva.</li> <li>- Cortocircuito en el inducido.</li> <li>- Mala ventilación.</li> <li>- Tensión muy baja.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducir carga.</li> <li>- Verificar devanado de inducido.</li> <li>- Limpiar circuitos de ventilación.</li> <li>- Localizar avería en la red.</li> </ul>
9. Chispas excesivas o fuego en el colector.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Colector sucio o mal ranurado.</li> <li>- Cortocircuito entre delgas.</li> <li>- Escobillas estropeadas.</li> <li>- Mala posición de las escobillas.</li> <li>- Polos auxiliares averiados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limpiar, ranurar, y torneear si es necesario.</li> <li>- Cambiar y asentar escobillas.</li> <li>- Corregir posición de escobillas.</li> <li>- Verificar continuidad y conexiones.</li> </ul>
10. Calentamiento de los cojinetes.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lubricante en mal estado.</li> <li>- Rodamientos estropeados.</li> <li>- Acoplamiento defectuoso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambiar el lubricante.</li> <li>- Sustituir cojinetes de bolas.</li> <li>- Verificar el acoplamiento entre motor y máquina accionada.</li> </ul>
<b>GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA (DÍNAMOS)</b>		
11. El generador no produce corriente alguna.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circuito de excitación cortado.</li> <li>- Cortocircuito en los inductores o en el inducido.</li> <li>- Escobillas cortadas o colgadas.</li> <li>- Reóstato de excitación cortado.</li> <li>- Conexiones incorrectas en los inductores, que anulan el magnetismo remanente.</li> <li>- El generador gira en sentido contrario.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar y reparar.</li> <li>- Comprobar bobinados y reparar.</li> <li>- Verificar y reparar o sustituir.</li> <li>- Verificar y reparar.</li> <li>- Cambiar conexiones y cebar de nuevo el generador.</li> <li>- Invertir el sentido de giro de la máquina o motor de arrastre.</li> </ul>
12. Disminuye notablemente la tensión al aumentar la carga.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exceso de carga.</li> <li>- Cortocircuito en el inducido.</li> <li>- Si la dínamo es Compound, pueden estar los circuitos de excitación conectados en oposición.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Disminuir la carga acoplada.</li> <li>- Comprobar devanado y reparar.</li> <li>- Comprobar conexiones e invertir estas en el circuito en derivación.</li> </ul>
13. La tensión no alcanza su valor nominal, ni aun en vacío.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escobillas mal situadas.</li> <li>- Cortocircuito en las bobinas del inducido o en las de excitación.</li> <li>- Reóstato de excitación averiado.</li> <li>- Velocidad de giro inferior a la normal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calar correctamente las escobillas.</li> <li>- Verificar y reparar.</li> <li>- Comprobar y sustituir.</li> <li>- Reparar la máquina de arrastre.</li> </ul>

# 3

## MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

### 3.1. GENERALIDADES Y TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

Se denomina motor eléctrico a toda máquina capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Por lo general, todo motor eléctrico está formado por tres partes principales, tal como se ve en la figura 3.1, a saber:

- **Carcasa.**
- **Estator** (llamado **inductor** en los motores de corriente continua).
- **Rotor** (llamado **inducido** en los motores de corriente continua).

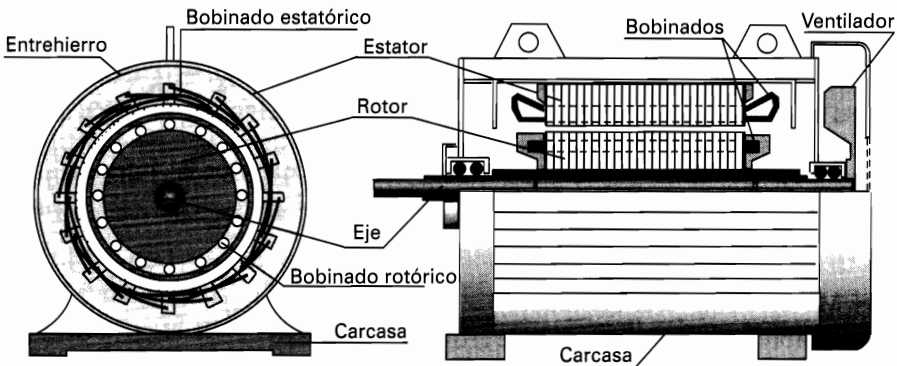


Figura 3.1. Motor eléctrico, asíncrono trifásico, dibujado en sección.

La **carcasa** o envolvente es la parte externa de los motores y puede estar construida en acero, hierro fundido o cualquier otra aleación metálica, como pueden ser las de aluminio y silicio.



El **estator** es la parte que está fija a la carcasa. Está formada por empilado de chapas magnéticas y sobre ella está alojado el bobinado fijo, llamado también **bobinado estatístico**.

El **rotor** es la parte que gira y sobre la cual está fijo el eje de salida del motor. Está también constituido por empilado de chapas magnéticas y contiene el bobinado móvil, llamado **bobinado rotórico**.

## Tipos de motores eléctricos, de corriente alterna

Existen muchos tipos de motores eléctricos de corriente alterna y aun tendrán que aparecer más en el mercado a medida que la tecnología eléctrica siga avanzando. Los más empleados hoy en día podemos clasificarlos en los tipos siguientes:

**Según la clase de corriente empleada**, pueden ser:

- Motores de corriente alterna.
- Motores universales. Pueden funcionar tanto con corriente alterna como continua y su velocidad es muy variable.

**Motores de corriente alterna solamente**. A su vez pueden clasificarse:

- **Según la velocidad de giro**, en:
  - **Motores síncronos**. Si la velocidad del rotor y del campo magnético del estator es la misma. Éstos a su vez pueden ser:
    - Motor síncrono trifásico.
    - Motor asíncrono sincronizado.
    - Motor con rotor de imán permanente.
  - **Motores asíncronos**. Cuando la velocidad del rotor es inferior a la del campo magnético del estator.
- **Según el tipo de rotor**, pueden ser:
  - Motores con rotor bobinado.
  - Motores con rotor en jaula de ardilla.
  - Motores con colector. Como es el caso de los universales.
- **Según el número de fases de alimentación**, pueden ser:
  - Motor monofásicos con bobinado auxiliar de arranque.
  - Motor monofásicos con bobinado auxiliar de arranque y condensador.
  - Motores bifásicos.

- Motores trifásicos. Que a su vez pueden ser:
  - Síncronos.
  - Asíncronos.
  - Asíncrono sincronizado.

El más empleado industrialmente es el **motor asíncrono trifásico de inducción, con rotor en jaula de ardilla**, y domésticamente y para el accionamiento de pequeñas máquinas herramientas, los más empleados son: los universales, accionados por corriente alterna, y los monofásicos con fase auxiliar de arranque y condensador.

Los motores **síncronos** se suelen emplear solamente en grandes máquinas, cuando la carga es muy variable y se requiere una velocidad muy constante. Por otra parte los motores de **corriente continua**, descritos en el primer capítulo de esta obra, se emplean mucho en locomoción, montacargas y, en general, en cualquier máquina grande o pequeña donde se requiera una variación de velocidad muy precisa.

### 3.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASÍNCRONO

El principio de funcionamiento de los **motores asíncronos** se fundamenta en la producción de un campo magnético giratorio. Si consideramos que el imán de la figura 3.2 con sus polos N-S puede girar sobre el eje X-Y y que un disco de cobre o aluminio, que se halla sometido al campo magnético del imán, también puede girar libremente sobre el mismo eje, entonces tenemos que, si giramos el imán, su campo magnético gira igualmente, barriendo el disco próximo a él, con lo cual el campo, que ahora es variable, es la causa de que según los principios de la inducción magnética, aparezcan en el disco unas corrientes inducidas. Estas corrientes reaccionan dando lugar a una fuerza magnetomotriz (**F**), con un par motor suficiente como para vencer el par resistente del eje y originar la rotación del disco.

Según la ley de Lenz, el sentido de rotación del disco tenderá a oponerse a la variación del campo magnético que dio origen a las f.e.m. inducidas, o sea el campo magnético del imán. El disco, por tanto, girará en el mismo sentido que el campo giratorio del imán, pero con una velocidad algo menor (la diferencia entre ambas velocidades se llama **deslizamiento**), lo que significa en realidad un sentido de giro relativo contrario al del imán.

Si el disco girase a la misma velocidad que el imán, no cortarían líneas de campo magnético y, por tanto, no se originarían en él corrientes inducidas y, como consecuencia, tampoco se originaría un par de giro.

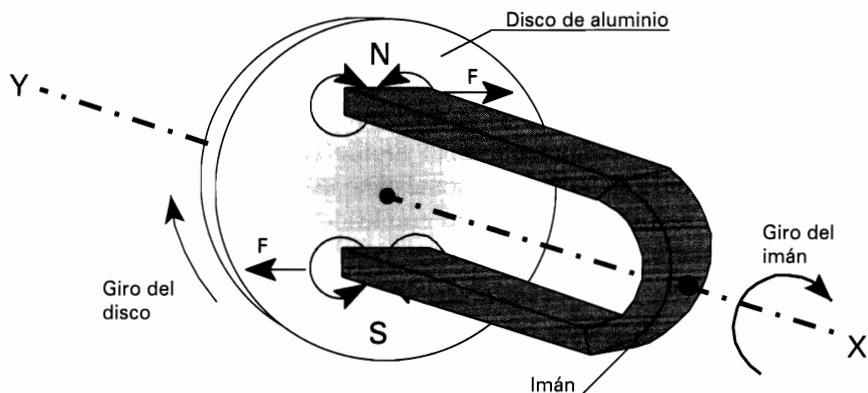


Figura 3.2. Principio de funcionamiento del motor asíncrono.

Como la velocidad del disco es inferior a la del campo magnético, a este tipo de motor se le denomina “**asíncrono**”, o sea que la velocidad del rotor o parte que gira no es igual a la velocidad de giro del campo magnético; en otras palabras que ambas velocidades no están en sincronismo.

### 3.3. CONSTITUCIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONO DE INDUCCIÓN

En la figura 3.3 vemos mejor la constitución y el principio de funcionamiento de los motores de inducción asíncronos. Se trata de un motor bipolar, cuyo **campo magnético es giratorio**, o sea que sus polos están cambiando constantemente de **norte a sur**.

El campo magnético giratorio puede estar producido por corrientes alternas bifásicas o trifásicas, como ya veremos más adelante.

Dentro del campo magnético del estator, se halla el **rotor**, que es un cilindro de chapas magnéticas que puede girar libremente sobre un eje; este cilindro está atravesado por barras de cobre o aluminio unidas por sus extremos, dando así lugar a un número determinado de espiras formado entre cada dos barras consecutivas del rotor.

El campo magnético giratorio, producido por el **estator** o parte fija del motor, corta las barras del rotor y engendra en ellas fuerzas electromotrices inducidas que, a su vez, originan la circulación de corrientes eléctricas por las barras del rotor (su sentido instantáneo está representado por puntos, cuando salen, y cruces cuando entran). Puesto que las barras del **rotor** se hallan sometidas a un campo magnético

y circula por ellas una corriente eléctrica, éstas están sometidas a una **fuerza magnetomotriz (F)**, que tiende a moverlas en dirección perpendicular al campo magnético, arrastrando en su movimiento al rotor del motor.

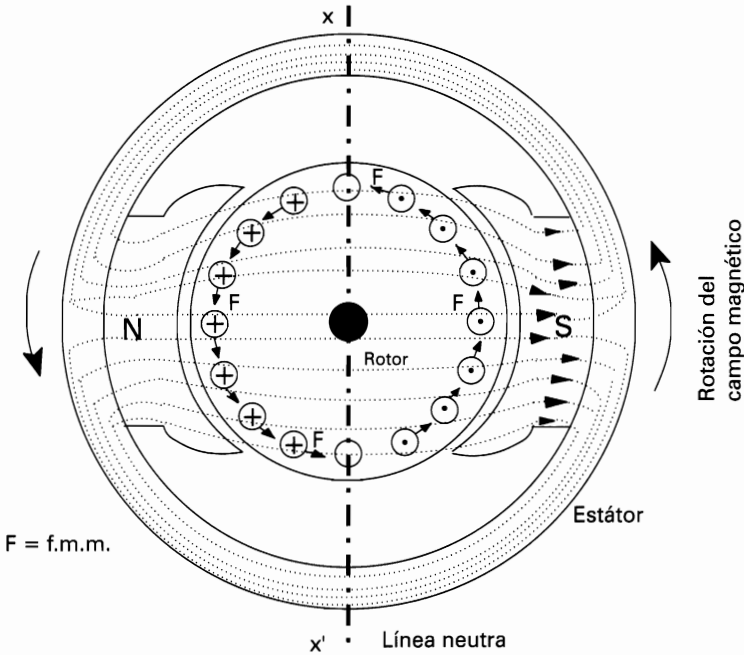


Figura 3.3. Motor de inducción bipolar.

Como el campo magnético está cambiando constantemente de sentido, también cambiará el sentido de las corrientes de las barras del rotor, permaneciendo invariable el sentido del movimiento.

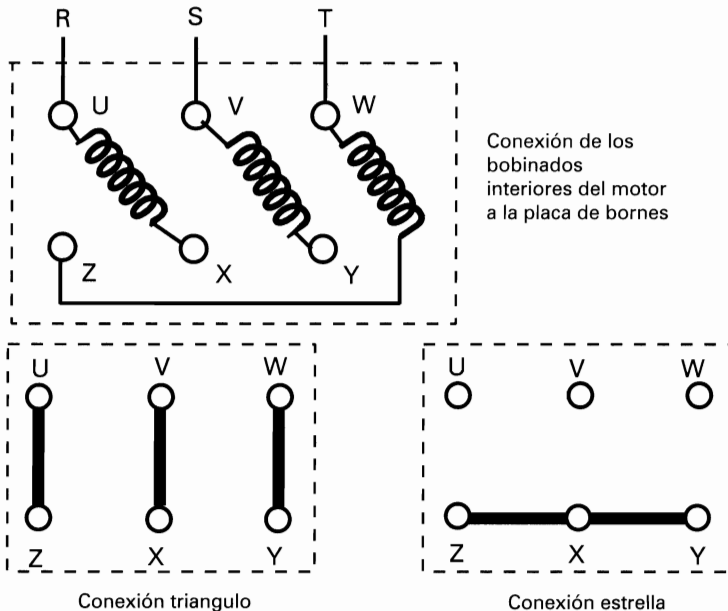
### 3.4. MOTOR ASÍNCRONO TRIFÁSICO

El **motor asíncrono trifásico**, que como ya hemos dicho es el más empleado industrialmente, es aquel que está alimentado por un sistema trifásico de corrientes alternas. Las características de éste tipo de motores quedan definidas por el fabricante en su **placa de características**, que es solidaria a la carcasa del motor. Como mínimo la placa de características ha de contener la siguiente información:

### 3 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

- Identificación del fabricante.
- Tipo de motor, con tamaño y forma.
- Número de fabricación.
- Clase de protección contra entrada de polvo y agua (**IP**).
- Potencia del motor, expresada en **KW** o **C.V.**
- Tensión de alimentación, expresada en **V** o **KV**.
- Frecuencia, expresada en **Hz**.
- Intensidad de corriente absorbida a plena carga, en **A**.
- Velocidad del motor, expresada en revoluciones por minuto.
- Factor de potencia del motor (Coseno de  $\phi$ ).
- Otras que el fabricante o la legislación estimen oportunas.

En cuanto a la tensión de alimentación, los motores trifásicos casi siempre indican dos tensiones en su placa de características (por ejemplo 125/220 V ó 220/380 V). Esto es debido a que un bobinado trifásico puede estar interconectado entre sí y con la red de alimentación en **estrella** o en **triángulo**, de tal forma que aunque las fases reciban la misma tensión, la de la red de alimentación puede ser distinta, tal como se aprecia en la figura 3.4.



**Figura 3.4.** Conexiones posibles de los devanados de un motor asíncrono trifásico.

**La tensión más pequeña** indicada en la placa se corresponde con la conexión **en triángulo** de los bobinados del motor, mientras que **la tensión más grande** se corresponde con la conexión estrella de los bobinados. Por ejemplo si en la placa de características figuran las tensiones 220/380 V, si el motor lo conectamos a una red de 220 V, hemos de conectar sus bobinados en triángulo, mientras que si queremos conectarlo a una línea de 380 V, deberemos conectar sus devanados en estrella.

El cambio de la conexión estrella a la conexión triángulo es muy fácil en un motor asíncrono trifásico, debido a una **caja o placa de conexión de seis bornes**, que todos ellos tienen y está construida de tal modo que basta con cambiar en ella tres puentes para pasar de un sistema de conexión a otro, tal como vemos en la figura 3.4, en la cual la primera parte del dibujo representa la conexión de las tres fases del motor a la placa de bornes y las otras dos figuras la forma en que deben puentearse los bornes de la caja de conexiones del motor, para conectarlo en estrella o en triángulo.

## Campo magnético giratorio

Cuando un devanado fijo, como el de la figura 3.3 por ejemplo, es recorrido por una corriente alterna monofásica, se genera un campo magnético alterno, cuya intensidad variará del mismo modo que lo hace la corriente que pasa por el devanado. Los dos polos se estarán alternando Norte-Sur, Norte-Sur, pero siempre con la misma orientación del campo magnético. Esto es lo que ocurre en los motores monofásicos de corriente alterna y es la causa de que éstos necesiten un bobinado auxiliar para el arranque.

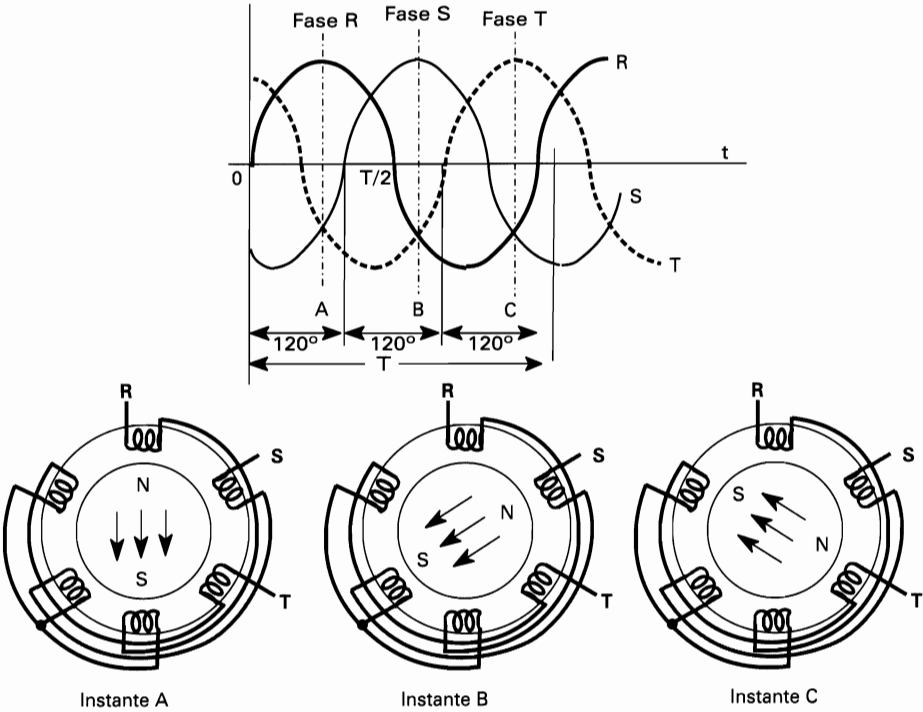
Por el contrario, cuando un **bobinado trifásico**, con bobinas desplazadas  $120^\circ$ , es conectado a una corriente alterna trifásica, automáticamente se va generando en el mismo un campo magnético giratorio y constante, es decir, la orientación Norte-Sur de los polos va girando constantemente alrededor de su eje. Para invertir el sentido de giro del campo hay que cambiar el orden de alimentación de sus fases.

Este campo magnético se forma por la combinación de cada uno de los campos magnéticos de los tres devanados monofásicos que forman el devanado trifásico del motor. Este campo giratorio, tal como ya hemos visto, induce en el devanado o barras del rotor una corriente, que es la encargada de que se produzca la fuerza magnetomotriz que da origen al movimiento. Veámoslo con más detalle en los gráficos de la figura 3.5.

Como la corriente de la *fase S* no crece hasta que disminuye la corriente de la *fase R*, el campo magnético generado por el *devanado R* prevalece sobre los otros "*Instante A*". Pero al crecer la corriente de la *fase S*, la orientación dominante del

campo magnético pasa a ser la del “*Instante B*”. Después decrece la corriente en el *devanado S* y aumenta en el *devanado T*, de tal modo que el campo magnético que prevalece es el del “*Instante C*”. A continuación decrece la corriente de la *fase T* y empieza a crecer de nuevo la de la *fase R*, con lo cual volvemos de nuevo al campo magnético del “*Instante A*” y así sucesivamente.

El resultado es que la orientación Norte-Sur del campo magnético gira constantemente, debido simplemente a la posición física de los tres devanados monofásicos en el motor y al desfase de  $120^\circ$  existente entre las tres fases de la red alterna trifásica. Luego el resto ya lo sabemos, este campo magnético giratorio induce en el devanado del rotor unas corrientes, que a su vez originan una fuerza magnetomotriz causante del giro del rotor.



**Figura 3.5.** Campo giratorio de un motor asíncrono trifásico de corriente alterna.

La velocidad del rotor siempre ha de ser menor que la del campo magnético giratorio ya que, en caso contrario, si el rotor girase a la misma velocidad que el flujo magnético, sus barras no lo cortarían y no se engendrarían en ellas f.e.m. inducidas, con lo cual la corriente en el rotor sería cero. En consecuencia las fuer-

zas electromotrices y el par también serían nulos. Por tanto, el rotor nunca deberá girar tan deprisa como el campo magnético del estator.

## Velocidad de los motores asíncronos

Al contrario que en los alternadores, al no ser estos motores máquinas síncronas, su velocidad no guarda exactamente la relación:

$$\text{Velocidad} = n = \frac{\text{Frecuencia} \times 60}{\text{N}^\circ \text{ pares de polos}} = \frac{f \cdot 60}{p} = \text{r.p.m.}$$

Aunque el valor de la frecuencia (**f**) se mantenga constante, el número de revoluciones (**n**), de un motor asíncrono trifásico no es constante, ya que varía algo con la carga del motor. Asimismo ya sabemos que siempre será algo menor la velocidad del rotor que la del campo magnético giratorio, (entre un 2% para los motores grandes y un 6% para los motores pequeños). La diferencia entre la velocidad del campo magnético giratorio y la del rotor se denomina **deslizamiento** y suele representarse con la letra (**s**).

El **deslizamiento** suele expresarse en tanto por ciento, entre la velocidad del campo magnético (**n**) o velocidad de sincronismo, y la velocidad real de giro del rotor (**n'**) o velocidad asíncrona y su valor es:

$$\text{Deslizamiento} = s = \frac{n - n'}{n} ; \quad s\% = \frac{n - n'}{n} 100 = \%$$

Por tanto, la velocidad real de un motor asíncrono será igual a la velocidad del campo magnético menos el deslizamiento del motor.

$$\text{Velocidad de deslizamiento} = n_s = n - n' ; \quad n' = n - n_s$$

Dado que en la mayoría de los países del mundo la frecuencia es de 50 Hz, la velocidad de sincronismo de un motor (**n**) dependerá solamente del número de pares de polos del mismo (**p**), siendo las más comunes las de 3.000 y 1.500 r.p.m. A más de 3.000 r.p.m. no puede girar el campo magnético del estator, dado que menos de dos polos no puede tener; por tanto, la máxima velocidad real de un motor asíncrono suele ser de unas 2.800 r.p.m.

## Par de arranque

Las fuerzas magnetomotrices que aparecen en los devanados o barras del rotor dan lugar a un par de fuerzas, denominado par motor (**C**), que son las causantes del giro del rotor. Su valor es:



$$\text{Par motor} = C = K \Phi I_2$$

Siendo: K = Constante, dependiente de las características constructivas de la máquina.

$\Phi$  = Flujo giratorio del estator, por polo.

$I_2$  = Corriente rotórica.

Es muy interesante observar que el par motor depende de las corrientes del rotor y que éstas, como veremos a continuación, son muy grandes en el momento del arranque y disminuyen al aumentar la velocidad, con lo cual en un motor podemos considerar siempre dos pares distintos:

- Par de arranque.
- Par normal o de régimen.

Al meter corriente para arrancar, cuando el rotor está aun parado, la frecuencia de las f.e.m. engendradas en el rotor, es la misma que la frecuencia de la tensión aplicada al estator (estator y rotor se comportan como un transformador) y, por tanto, las corrientes del estator y del rotor tienen la misma frecuencia.

$$\text{Frecuencia en el rotor} = f_2 = f \cdot s$$

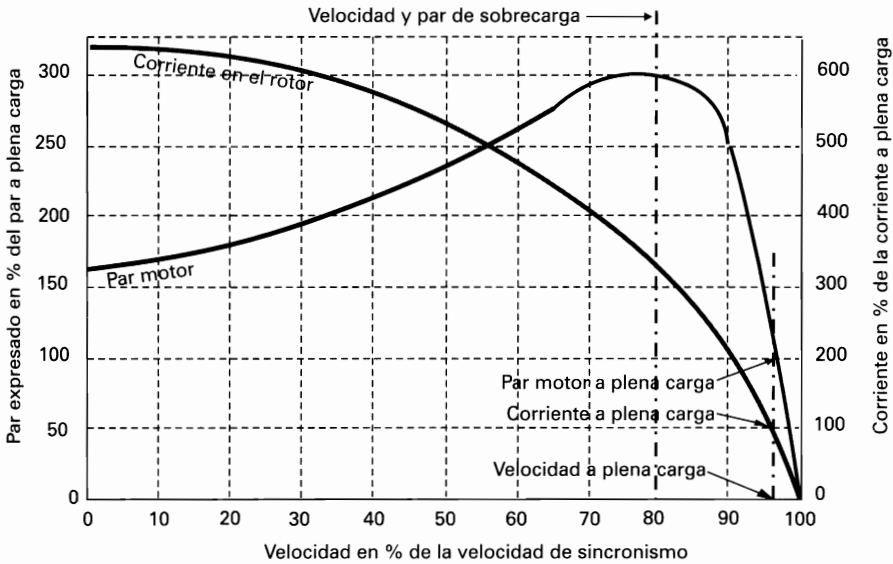
Ahora bien, la resistencia de las barras o el devanado del rotor es muy pequeña ( $R_2$ ); pero por estar rodeadas de hierro tienen mucha autoinducción y su reactancia ( $X_2$ ) es grande, comparada con su resistencia. El valor eficaz de las corrientes del rotor en el momento del arranque es muy grande, siendo su valor:

$$I_2 = \frac{\text{Tensión rotórica en reposo}}{\text{Impedancia rotórica}} = \frac{V_2}{Z_2} = \frac{V_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}$$

Al ir aumentando la velocidad del rotor, cada vez corta menos líneas de fuerza del estator y, por tanto, las f.e.m. inducidas en el rotor también van decreciendo, de tal forma que el valor y la frecuencia de las f.e.m. rotóricas también disminuyen al aumentar la velocidad del rotor. En consecuencia cuando el rotor acelera y las f.e.m. y sus frecuencias decrecen, también decrecen las corrientes rotóricas  $I_2$ , debido a que la reactancia inductiva del devanado del rotor también disminuye, por ser proporcional a la frecuencia ( $X_2 = \omega L = 2\pi fL$ ) y, por tanto, el par motor, que depende principalmente de las corrientes del rotor, también disminuye.

En un motor asíncrono el par de arranque puede llegar a ser tres veces mayor que el par normal a plena carga. Esto es muy interesante ya que facilita grandemente el arranque de los motores asíncronos, conectados a cargas difíciles.

En el gráfico de la figura 3.6 vemos las relaciones entre los valores de las corrientes rotóricas, el par y la velocidad, en un motor asíncrono, con rotor de doble jaula de ardilla, que podemos considerar típico para la mayoría de este tipo de motores.



**Figura 3.6.** Curvas características típicas de un motor asíncrono trifásico, con rotor de doble jaula de ardilla.

### 3.5. TIPOS DE ROTOR EN MOTORES ASÍNCRONOS DE CORRIENTE ALTERNA

A continuación veremos que la construcción del rotor, ya sea de jaula de ardilla o bobinado, puede influir mucho en el par de arranque de los motores, ya que cuanto menor sea la impedancia del devanado rotórico, tanto mayor serán las corrientes en él inducidas y, por tanto, mayor será el par de arranque de dicho motor.

Aunque los tipos de rotor pueden ser muy diversos, los más empleados en motores asíncronos de corriente alterna son los relacionados a continuación:

- a) Rotor de jaula de ardilla. De estos hay varios tipos, siendo los más utilizados los de:
  - Jaula simple.
  - Jaula doble.
  - De ranura profunda.

#### b) Rotor bobinado

A continuación se describe la forma constructiva y las características más importantes de cada tipo de rotor.

#### **Rotor de jaula de ardilla simple (resistencia elevada)**

Este tipo de rotor, de jaula de ardilla, está formado por una serie de barras de cobre o aluminio, situadas en la periferia de las chapas magnéticas, tal como se ve en la figura 3.7. Las barras pueden ser de forma cilíndrica o rectangular y en algunos casos incluso se colocan en ranuras abiertas o semiabiertas, para que queden más cerca aun de la periferia del rotor.

Este tipo de rotor se emplea para motores pequeños o cuyo arranque no sea muy exigente en cuanto a potencia requerida. En el momento del arranque suelen absorber de la red una gran intensidad, de 6 a 7 veces la nominal del motor, por lo que no es muy aconsejable en motores de gran potencia. Su par de arranque suele ser como máximo el 140% del par nominal.

Tiene un elevado deslizamiento y soporta muy mal las puntas de carga y su rendimiento a plena carga suele ser un 5% o un 6% inferior al de doble jaula de ardilla, que prácticamente lo está sustituyendo, sobre todo en potencias medias o grandes, donde se requeriría un arranque con tensión reducida, para disminuir la punta de corriente en el arranque, lo que a su vez acarrearía también una disminución del par de arranque.

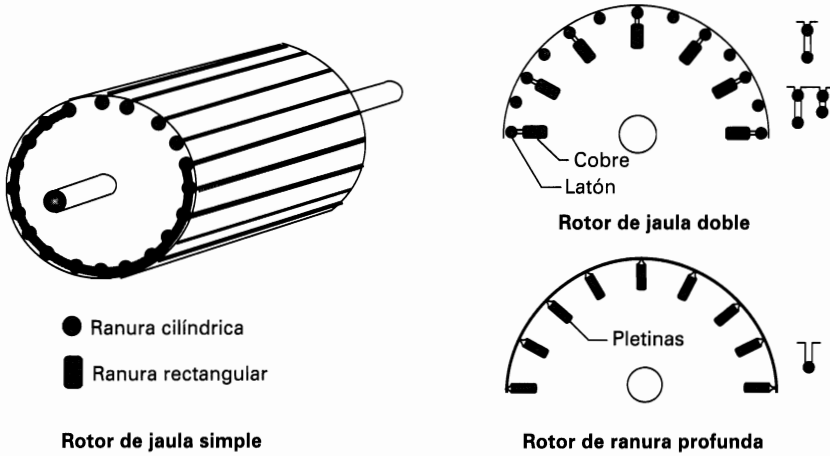
#### **Rotor de doble jaula de ardilla (reactancia elevada)**

Este tipo de rotor tiene la ventaja con respecto al anterior que en el momento del arranque la intensidad consumida es menor, no sobrepasando las 3 ó 5 veces la intensidad nominal, mientras que su par de arranque puede llegar hasta el 230% del par normal, en el momento de alcanzar su máxima velocidad. Por lo cual este tipo de rotor se emplea en motores que tienen que arrancar a plena carga o bien cuando no se quiere que la punta de arranque sea muy elevada, en realidad es el tipo de rotor más empleado actualmente.

Otra ventaja de este tipo de rotores es que son más estables en su marcha, aguantando mejor las sobrecargas sin disminuir la velocidad, siempre que dichas sobrecargas no sean muy superiores a la potencia nominal del motor.

La diferencia constructiva entre este tipo de rotor y el de jaula simple, se aprecia también en la figura 3.7, y consiste en que, según su nombre indica, poseen otra jaula de ardilla concéntrica a la anterior, pero más profunda. Entre una y otra

jaula el hierro del rotor está cortado con el fin de que en el momento del arranque prácticamente las barras exteriores sean las que transportan toda la corriente y consecuentemente aumente el par de arranque.



**Figura 3.7.** Tipos de rotor de jaula de ardilla.

Por lo general, las barras de la jaula externa suelen ser de latón y de menor sección, con lo cual tienen más resistencia que las interiores, con el fin de disminuir la corriente durante el arranque, mientras que la interna es de cobre e incluso de mayor sección, pero con una gran reactancia inductiva a la frecuencia de la línea, en el momento del arranque, por estar completamente rodeada de hierro. Sin embargo, al ir aumentando la velocidad del rotor la frecuencia de las corrientes rotóricas disminuye y, por consiguiente, también disminuye la reactancia de la jaula interior, con lo cual la corriente rotórica se distribuye por los dos devanados de jaula de ardilla durante su normal funcionamiento.

### Rotor de ranura profunda (de baja impedancia)

Ésta es una variante de los rotores de jaula simple. En esta variante la jaula de ardilla se construye con pletinas o varillas más metidas en el hierro del rotor, como se ve también en la figura 3.7, con el fin de que el devanado rotórico tenga menos impedancia en el arranque, consiguiéndose de esta forma un arranque más rápido.

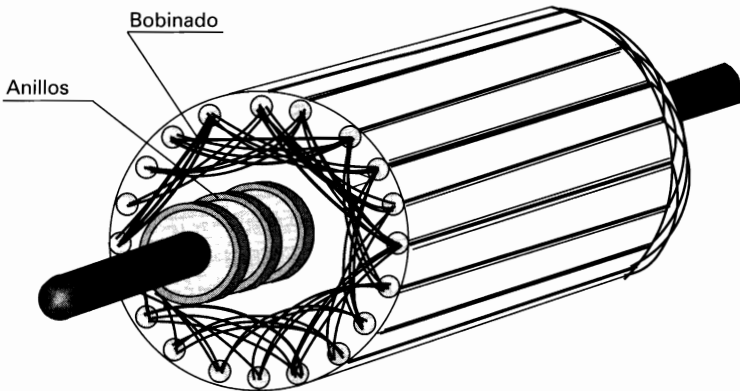
Sus características en cuanto a intensidad y par de arranque son similares a las de los rotores de jaula simple. Se suele emplear este tipo de rotor en motores que

requieran muchos arranques y paradas, con el fin de que lleguen primero a su velocidad de régimen. Pero como la corriente de arranque también es muy elevada, su uso está limitado a motores de pequeña potencia, ya que en caso contrario también tendrían que arrancarse con tensión reducida.

#### Rotor bobinado o de anillos rozantes

Este tipo de rotor suele emplearse cuando se requiere una variación de velocidad, en motores de corriente alterna, o bien un arranque progresivo, requerido por máquinas de gran potencia o con un arranque difícil, combinando de esa manera la ventaja del elevado par de arranque de un motor de alta resistencia con una menor corriente de arranque, así como la característica de poder variar su velocidad.

En este tipo de motores en las ranuras del rotor se aloja un bobinado de hilo o pletina de cobre, similar a los bobinados estáticos, como se ve en la figura 3.8. Éstos son generalmente trifásicos y conectados bien sea en estrella o en triángulo, luego sus tres extremos libres se conectan uno a cada anillo o aro de cobre o latón, situado sobre el eje del rotor y aislado convenientemente del mismo. Por este motivo también se llama rotor de anillos rozantes.

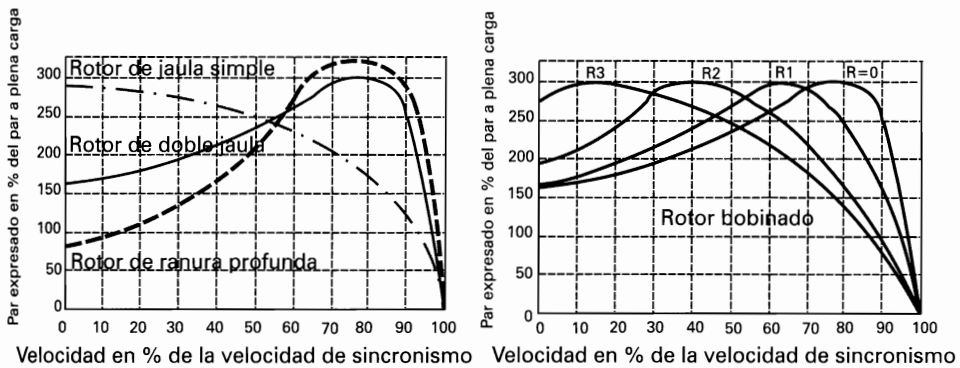


**Figura 3.8.** Rotor bobinado o de anillos rozantes.

De esta forma, los tres extremos o las fases del rotor se pueden sacar al exterior por medio de unos frotadores o escobillas de grafito que rozan sobre los anillos del rotor para ser conectadas a resistencias externas adicionales, que aumentan la resistencia del devanado rotórico. Así variando dichas resistencias externas se puede

variar el par de arranque entre el 150% y el 250% del par normal, aproximadamente, y reducir la corriente de arranque a 1,5 ó 2 veces la intensidad nominal. Si el proceso no se emplea para variar la velocidad del motor, al finalizar el arranque, los tres anillos del rotor se cortocircuitan para que siga funcionando como un motor con rotor en jaula de ardilla.

Como colofón, en la figura 3.9, vemos las curvas características del par y la velocidad, de los motores asíncronos trifásicos, en función de su tipo de rotor. En la primera gráfica están representados los tres tipos de rotor de jaula de ardilla y en la otra vemos las diferentes curvas del par, para un motor de anillos rozantes, con diferentes resistencias de arranque intercaladas.



**Figura 3.9.** Características par velocidad, en función del tipo de rotor.

### 3.6. RELACIONES ENTRE LOS BOBINADOS DE ROTOR Y ESTATOR

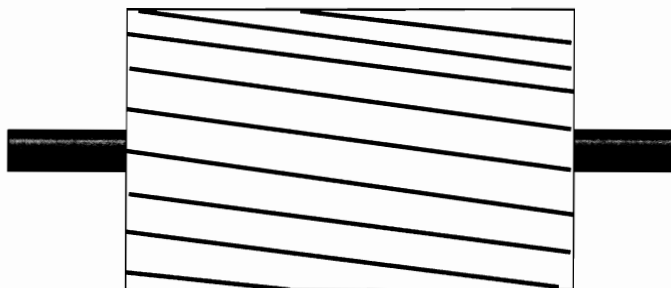
Para el mejor funcionamiento de los motores asíncronos deben existir algunas características, de coincidencia o diferenciación, entre los devanados del estator y del rotor, ya sea éste bobinado o de jaula de ardilla. Éstas son:

- a) *El número de polos del estator y del rotor ha de ser siempre el mismo*, con el fin de obtener un mejor par de arranque. En los rotores devanados esto se consigue al diseñar y ejecutar sus devanados, mientras que en los de jaula de ardilla, al poder considerar siempre dos barras como una bobina, aunque éstas no sean consecutivas, automáticamente ya se va formando en el rotor la misma polaridad que en el estator.

### 3 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

- b) *El número de fases en el rotor puede ser distinto al número de fases en el estator, ya que lo que realmente importa es el número de polos y no de fases. Los bobinados del rotor podrían ser bifásicos o exafásicos, pero por lo general son trifásicos, aunque el estator sea bifásico, ya que economizan más energía.*
- c) *El número de ranuras en el rotor debe ser distinto al número de ranuras del estator, con el fin de que al girar no coincidan nunca, ya que esto produciría inestabilidades en la marcha, como pueden ser:*
- Vibraciones y ruido, al coincidir las atracciones entre los dientes del estator y rotor simultáneamente en todos ellos y variar mucho la reluctancia, ya que sería mínima al coincidir exactamente los dientes y máxima en su posición intermedia.
  - Creación de puntos muertos, al quedar los dientes del rotor en las posiciones intermedias de los del estator, dando lugar a pequeñas variaciones en el par motor.

Para reducir aun más los posibles ruidos o las vibraciones en el motor, las ranuras del rotor suelen inclinarse un poco, sobre todo en los rotores de jaula de ardilla, tal como se ve en la figura 3.10, ya que ésta es la mejor forma de evitar puntos muertos entre el rotor y el estator.



**Figura 3.10.** Rotor de jaula de ardilla, con ranuras inclinadas.

### 3.7. BOBINADOS DEL ESTATOR EN LOS MOTORES ASÍNCRONOS

Aunque el hierro del estator puede hacerse con las masas polares salientes, por lo general, se construye de ranuras, igual que los rotores y los devanados se realizan bien sea en forma de bobinados concéntricos, con bobinas de distinta medida o bien con bobinas iguales y superpuestas, recibiendo estos últimos el nombre de

bobinados imbricados. En la figura 3.11, vemos esquemáticamente estos tipos de devanados estáticos.

Las bobinas pueden ser de hilo o de pletinas de cobre, según sea la potencia del motor, y los polos y las fases necesarias para su correcto funcionamiento se obtienen con las conexiones entre los grupos de bobinas, distribuidos de forma simétrica en toda la periferia del estator.

Por lo general, las bobinas se preparan sobre moldes apropiados a las dimensiones de las mismas, bien sea una a una o por grupos homogéneos y luego se introducen y fijan en las ranuras del estator, que han sido previamente aisladas. Por último, se conectan los grupos de bobinas entre sí, formando el número de polos y las polaridades correctas requeridas por el motor en cuestión, para su correcto funcionamiento.

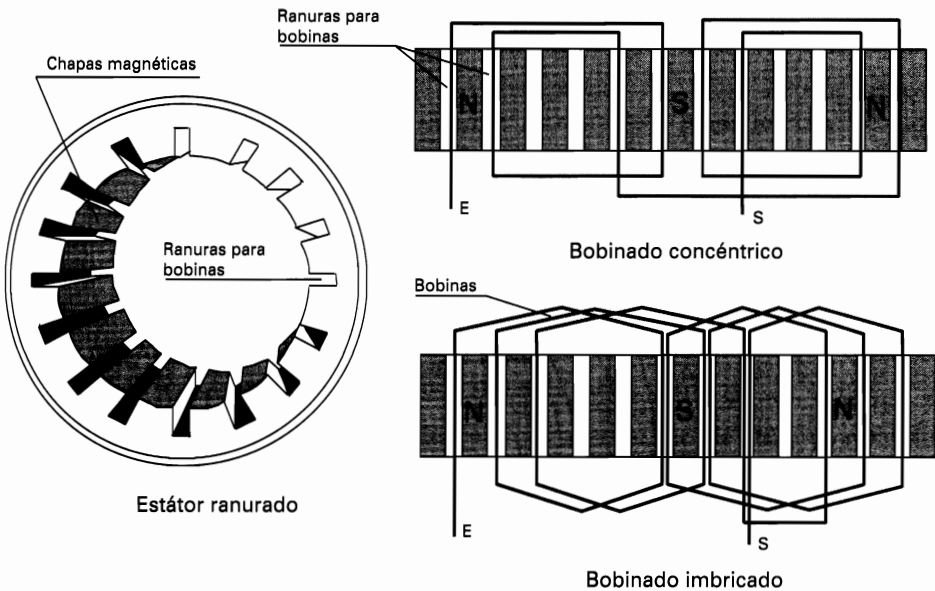


Figura 3.11. Esquemas simplificados de los devanados estáticos más empleados.

### 3.8. MOTORES MONOFÁSICOS. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En los apartados anteriores hemos empezado por describir el funcionamiento de los motores de corriente alterna de inducción trifásicos, por ser más fácil la com-



prensión de su principio de funcionamiento, ya que el campo magnético giratorio se forma por sí mismo, al estar la posición física de los tres devanados y las tres corrientes del sistema trifásico desfasadas entre sí  $120^\circ$ .

En los motores monofásicos ya no es tan fácil la creación del campo giratorio, por lo cual es necesario recurrir a algún artilugio para que, al menos, en el momento del arranque se pueda producir un par giratorio.

Si tenemos girando un motor trifásico y le quitamos una de sus fases, el motor sigue girando a la misma velocidad, aunque con menor potencia, lo cual recibe el nombre de marcha en bifásico. Pero lo que ocurre en estas circunstancias es que el devanado del estator ya no produce por sí mismo el campo magnético giratorio, sino que éste es consecuencia del campo del estator y las fuerzas electromotrices variables que se producen en las barras del rotor.

Veamos qué ocurre en un motor de inducción, con rotor en jaula de ardilla, que tiene un solo devanado monofásico bipolar (Fig. 3.12).

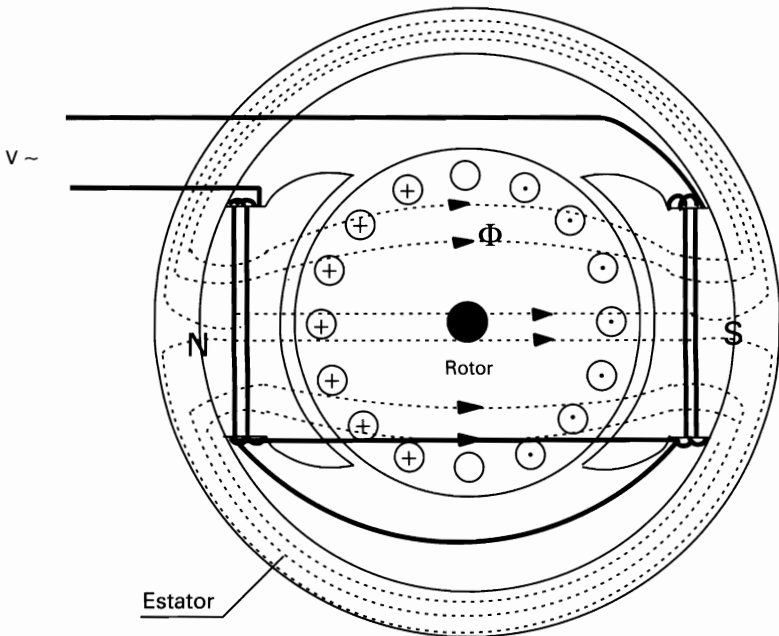


Figura 3.12. Motor monofásico de inducción.

Cuando le aplicamos una corriente alterna al bobinado del estator, se produce un flujo alterno  $\Phi$ , y al variar éste se inducen en las barras del rotor unas fuerzas

electromotrices alternas que dan lugar a las corrientes rotóricas. Si el rotor está parado, el flujo magnético originado por las corrientes del rotor será unas veces en un sentido y otras en otro, pero manteniendo siempre entre ambos flujos la misma posición relativa. En consecuencia, no se originará ningún par de arranque. Si ahora moviéramos manual o mecánicamente el eje del rotor, el motor comenzaría a girar por la aparición de un par de arranque en él, que luego se mantendría debido al movimiento.

Como el método de arrancar manualmente un motor monofásico no es muy práctico, debemos emplear algún método que nos produzca en el momento del arranque un flujo  $\Phi_2$ , desfasado con respecto al flujo principal, para que, de esta forma, se origine un par de arranque. Esto solamente sería necesario en el momento del arranque ya que, una vez arrancado, el par sería producido por las corrientes del rotor que, al estar girando e inducirse en él campos magnéticos variables, aparecerían en sus barras las fuerzas electromotrices causantes del par de giro.

Según cuál sea el sistema empleado para producir el flujo auxiliar necesario para iniciar el par de arranque, los motores monofásicos podemos clasificarlos en los grupos y tipos siguientes:

a) **Motores monofásicos de inducción**, cuyo principio de funcionamiento es el de los motores asíncronos de inducción, que vimos en los apartados anteriores. Éstos a su vez pueden ser:

- Motores monofásicos con bobinados auxiliares de arranque.
- Motores monofásicos con condensador.
- Motores con espira en cortocircuito o de polos partidos.

b) **Motores monofásicos de colector**, cuyo principio de funcionamiento es similar a los de corriente continua y que a su vez pueden ser:

- Motores universales (pueden funcionar con c.c. y c.a.).
- Motores de repulsión.

Seguidamente estudiaremos los cuatro primeros tipos, por ser los más universalmente empleados para pequeñas potencias. Por lo general, suelen ser potencias inferiores al Kilovatio, por tal motivo este tipo de motores también recibe el nombre de fraccionarios, por ser su potencia una fracción de Kilovatio.

### 3.9. MOTORES MONOFÁSICOS CON DEVANADOS AUXILIARES

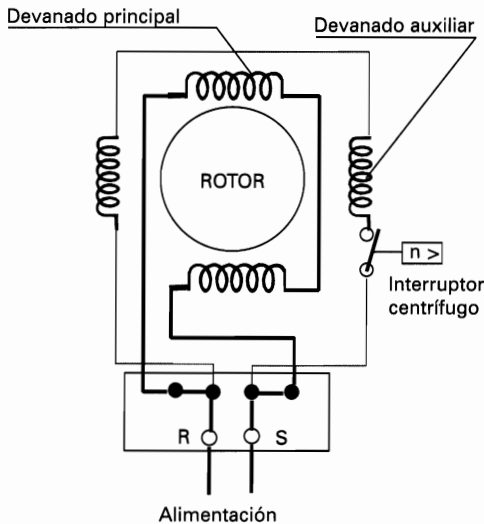
Los motores monofásicos de polos auxiliares, también llamados de fase partida, tal como su nombre indica poseen un **bobinado auxiliar de arranque**, que es el

encargado de producir al principio el flujo necesario para la creación del par de arranque. Por tanto, tienen dos devanados independientes, llamados:

- **Devanado principal** o de trabajo, y
- **Devanado auxiliar** o de arranque.

El devanado auxiliar tiene la misión de producir durante el arranque un flujo  $\Phi_2$  desfasado con respecto al del devanado principal  $\Phi$ , con lo cual tienen durante el arranque un devanado bifásico. Como la corriente en el devanado auxiliar está algo desfasada, con respecto a la corriente principal, debido a la mayor impedancia del mismo y a que están desplazados físicamente el uno del otro, se origina ahora un campo magnético elíptico que da lugar al momento de giro. Al ir acelerándose el rotor el momento de giro o par motor es cada vez mayor, de tal forma que cuando su velocidad está próxima a la de sincronismo, el campo magnético es casi circular y el par motor es casi tan grande como en un motor trifásico.

Una vez producido el arranque, el devanado auxiliar se desconecta, aproximadamente al 75% de su velocidad de sincronismo, por medio de un interruptor centrífugo y el motor sigue funcionando solamente con el devanado principal. En la figura 3.13 vemos esquemáticamente la colocación y conexión de los dos devanados, así como la del interruptor centrífugo.



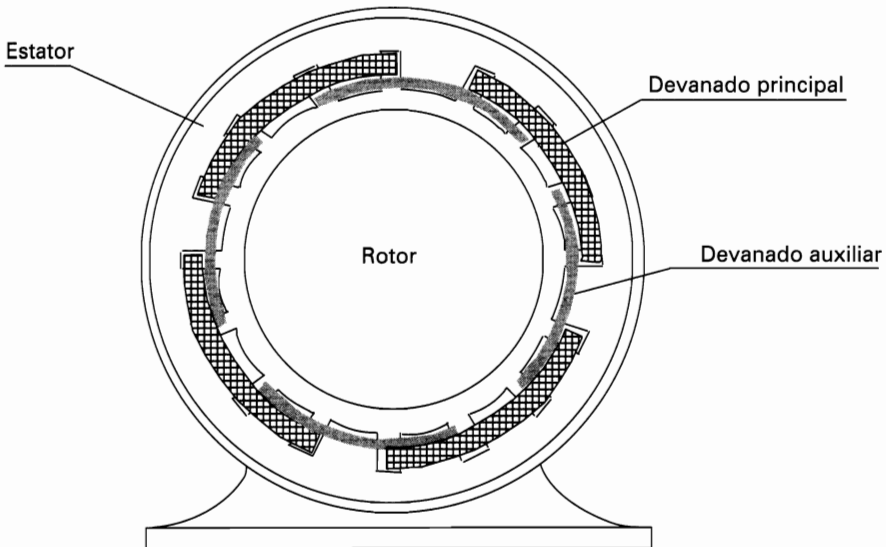
**Figura 3.13.** Motor monofásico de polos auxiliares.

En este tipo de motores, el estator es de ranuras y el rotor de jaula de ardilla, igual al de cualquier motor trifásico.

El bobinado auxiliar se realiza con hilo de menor sección que el del bobinado principal y físicamente se coloca a  $90^\circ$  eléctricos del principal. Ambos bobinados están conectados en paralelo, sobre la línea de alimentación, mientras que el interruptor centrífugo está conectado en serie sobre el bobinado auxiliar. Todas las conexiones se realizan en la placa de bornes que el motor lleva al efecto.

En esta clase de motores se puede invertir el sentido de giro, permutando en la placa de bornes los terminales de uno sólo de sus devanados, el principal o el auxiliar, ya que de esa forma se cambia el sentido del campo giratorio inicial y el rotor tiende a iniciar el giro en el otro sentido.

En la figura 3.14 vemos la disposición física de las bobinas en un motor monofásico de fase partida y de cuatro polos (correspondientes a una velocidad síncrona de 1.500 r.p.m.), en el cual el devanado más profundo siempre es el principal, de hilo más grueso y el más superficial el auxiliar o de arranque, de hilo más fino y, por lo general, también de menos espiras, debido a que solamente está alimentado unos segundos durante el arranque. Si el devanado auxiliar no se desconectara después del arranque, habría que construirlo con las mismas espiras y del mismo hilo que el de arranque.



**Figura 3.14.** Disposición de las bobinas en un motor monofásico con devanado auxiliar de arranque.

### 3 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA

El par de arranque de estos motores no es elevado, varía entre 1 y 2 dos veces el par a plena carga y se suelen fabricar para velocidades síncronas de 1.500 y 3.000 r.p.m., lo cual corresponde a cuatro o dos polos respectivamente y las tensiones de alimentación suelen ser de 220 y 380 voltios.

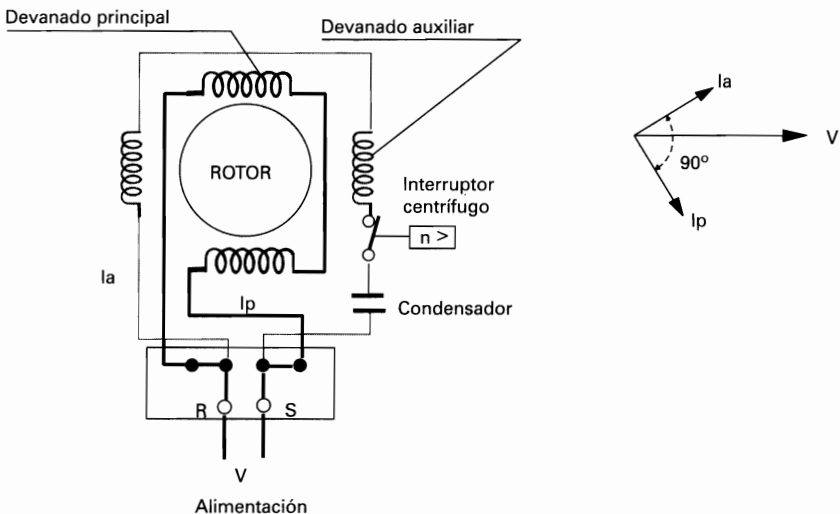
Si llamamos  **$I_p$**  a la corriente del devanado principal,  **$I_a$**  a la corriente del devanado auxiliar,  **$\alpha$**  al ángulo de desfase entre ambas corrientes y  **$K$**  a una constante que englobe a todas las características constructivas de los devanados, el par de arranque  **$C_a$**  valdrá:

$$\text{Par de arranque} = C_a = K \cdot I_p \cdot I_a \cdot \text{sen } \alpha$$

**La velocidad** es prácticamente constante, aunque su deslizamiento es algo mayor que en los motores trifásicos y, al igual que cualquier motor de inducción, tiende a disminuir cuando aumenta la carga, por encima de la nominal del motor. Ésta no se puede variar a no ser con un conmutador de polos, que nos pase de dos a cuatro polos la conexión del motor o viceversa.

### 3.10. MOTORES MONOFÁSICOS DE CONDENSADOR

El motor monofásico de inducción con condensador, en lo que respecta a su construcción, es el mismo que el de polos auxiliares o de fase partida, con la única diferencia de que sobre el devanado de arranque se conecta un condensador en serie (figura 3.15), con el fin de aumentar el par de arranque (puede llegar a ser de



**Figura 3.15.** Motor monofásico con condensador.

entre 2 y 4 veces el par nominal), ya que con un condensador apropiado se consigue un desfase mayor, o sea un adelanto del campo magnético del bobinado auxiliar de arranque de aproximadamente  $90^\circ$ , con respecto al campo magnético del bobinado principal, obteniéndose así un arranque mucho mejor.

Por el mismo motivo se consigue que el motor tenga un factor de potencia próximo al 100%, ya que el retraso de corriente originado por la reactancia inductiva del bobinado queda compensado por la reactancia capacitiva del condensador.

Como vemos en la gráfica de corrientes, de la figura 3.15, y debido al condensador, la corriente que circula por el devanado de arranque  $I_a$  está adelantada  $90^\circ$ , con respecto a la intensidad  $I_p$ , que circula por el devanado principal, lo cual originará este mismo desfase en sus campos magnéticos, dando origen a un mejor y más rápido par de arranque.

Si se desea trabajar con motores de mayor potencia, pueden conectarse dos condensadores en serie y una vez el motor en marcha desconectar, por medio de un interruptor centrífugo o cualquier otro mecanismo, uno de ellos, dejando el otro y el devanado de arranque en funcionamiento. De esta forma, podrían conseguirse potencias de hasta 2 ó 3 C.V., aunque en este caso sería mejor el empleo de un motor trifásico.

Estos motores se emplean, al igual que los de fase partida, en electrodomésticos y pequeñas máquinas herramientas o industriales, y el cambio de sentido de giro se hace como en los anteriores, o sea, permutando la conexión de uno sólo de sus devanados.

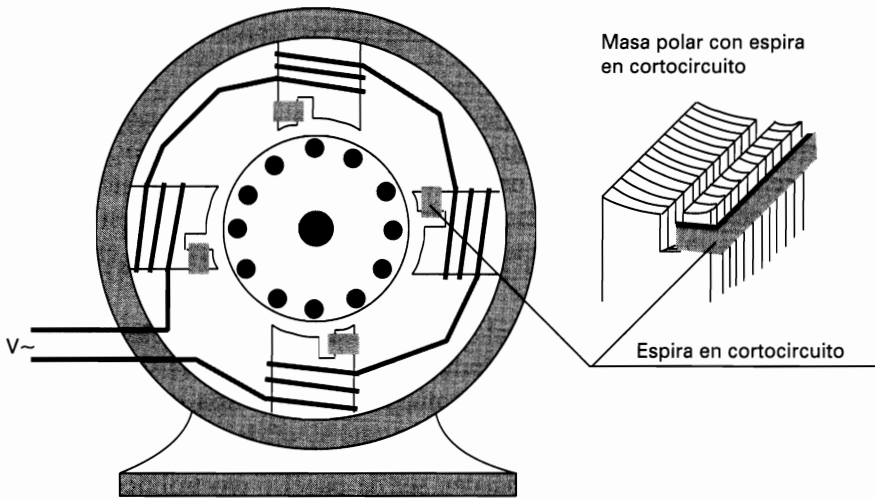
Los condensadores empleados pueden ser de papel o electrolíticos, pero siempre protegidos por una resistente envoltura de plástico o metálica y provistos de bornes apropiados para su fácil conexión.

### **3.11. MOTORES MONOFÁSICOS CON ESPIRA EN CORTOCIRCUITO O POLOS PARTIDOS**

Este tipo de motores monofásicos, en lugar del bobinado auxiliar, emplean para la obtención de su par de arranque una bobina en cortocircuito, generalmente de una sola espira, colocada alrededor de una parte de sus masas polares, por lo general abarcando un tercio del arco polar, tal como indica la figura 3.16. Como vemos en la misma figura el estator es de polos salientes y el rotor es de jaula de ardilla, al igual que en los de fase partida.

Al alimentar el bobinado del motor, el flujo principal induce en todas las espiras en cortocircuito una corriente, que da lugar a un flujo bastante retrasado del

flujo principal. Este retraso siempre es menor de  $90^\circ$ , pero no obstante el flujo resultante es giratorio y produce un par de arranque, suficientemente grande como para producir el arranque del motor. El par de arranque es mucho menor que en los motores de fase partida, aproximadamente el 60% del par a plena carga y su velocidad es la normal en cualquier motor de inducción, o sea, que depende del número de polos, pero es muy constante. Su rendimiento y factor de potencia podría mejorarse abriendo las espiras en cortocircuito, después de producirse el arranque, pero el costo del mecanismo necesario sería antieconómico, para motores de tan pequeña potencia, por lo cual nunca se utiliza.



**Figura 3.16.** Motor monofásico con espira en cortocircuito.

Se fabrican para potencias muy pequeñas, generalmente inferiores a  $1/4$  de C.V. y para dos o cuatro polos y, si se quiere cambiar su sentido de giro, debe desmontarse el motor y darle vuelta al eje del mismo. Debido a su pequeña potencia y a su bajo par de arranque es un tipo de motor muy poco empleado.

### 3.12. MOTORES UNIVERSALES

Se denomina **motor universal** al que puede funcionar indistintamente con corriente alterna o continua, sin que sus características principales, como pueden ser la velocidad o el par, varíen significativamente. Aquí lo analizaremos desde el punto de vista de su funcionamiento en corriente alterna, que es como normalmente se utilizan.

Este tipo de motores se fabrica mucho para potencias inferiores a 1 C.V., para su empleo en máquinas herramientas manuales o electrodomésticos (taladradoras, amoladoras, molinillos, maquinillas de afeitar, etc.), pero también se fabrican de grandes potencias, para ser empleados en locomotoras de ferrocarriles principalmente.

La construcción de los motores universales es muy parecida a la de los motores serie de corriente continua y, al igual que los primeros, los circuitos magnéticos de rotor y estator se fabrican de empilado de chapas, para evitar los calentamientos adicionales producidos por las corrientes de Foucault, cuando la tensión de alimentación es alterna.

Tal como vemos en la figura 3.17, constan de un estator bobinado y de un rotor (que podemos llamar inducido), también bobinado y provisto de un colector dotado de sus correspondientes escobillas de alimentación. El bobinado del estator y el del rotor o inducido están conectados en serie, a través de las escobillas.

En los motores pequeños el estator es generalmente de polos salientes, parecidos a los motores de corriente continua, pero en los grandes motores éste es de ranuras, al igual que cualquier motor trifásico de inducción.

En la doble figura 3.17 vemos cómo la corriente circula en el mismo sentido tanto por el bobinado del rotor como del estator, pero en cada semiciclo cambia de sentido en ambos devanados, al igual que lo hacen los sentidos de los flujos de rotor y estator, originando la componente de ambos flujos un par de giro, cuyo sentido no varía.

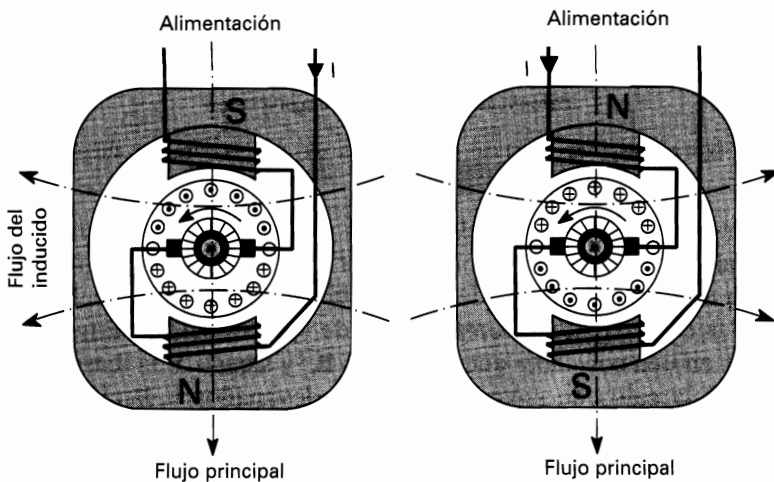


Figura 3.17. Construcción y funcionamiento del motor universal.



Estos motores tienen unas características parecidas a los de corriente continua en serie. El par de arranque es muy elevado, entre 2 y 3 veces el par normal, y la velocidad es muy variable con la carga, ya que disminuye grandemente al aumentar el par motor. Además existe la posibilidad real de embalamiento cuando la carga es nula, por tal motivo, los motores universales se emplean rígidamente acoplados a la carga.

En la figura 3.18 vemos un gráfico tipo con las características de par y velocidad, las más importantes de este tipo de motor.

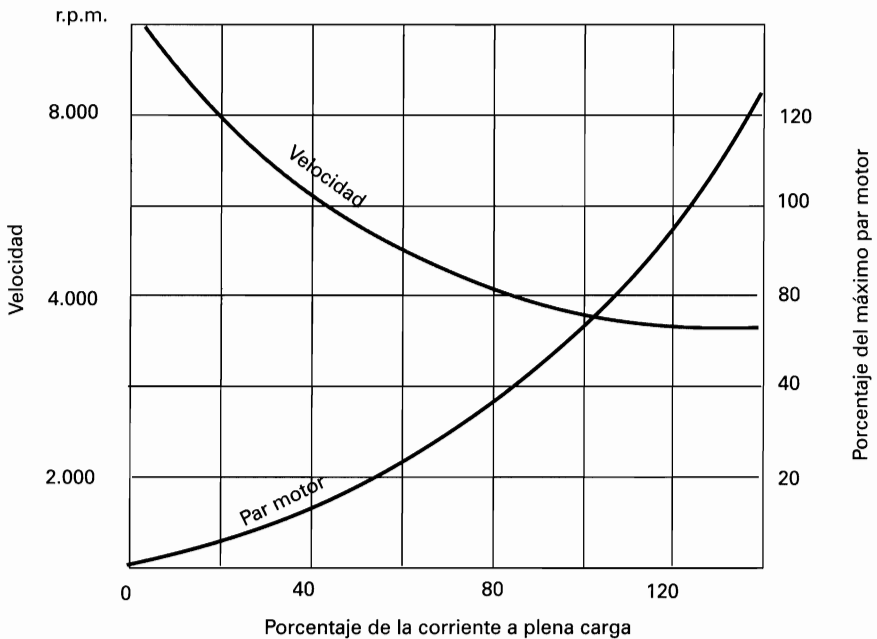


Figura 3.18. Características del motor universal, para corriente alterna.

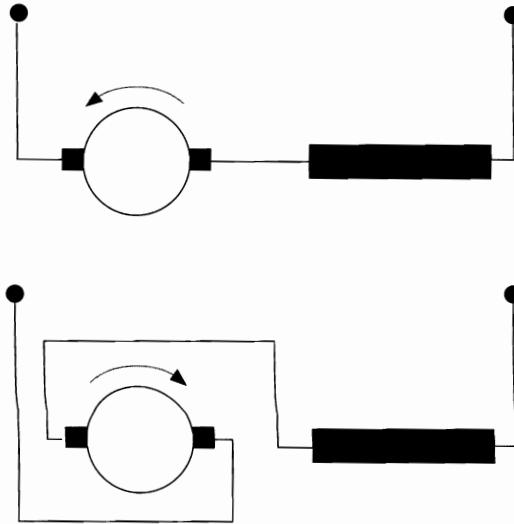
En los motores universales la velocidad ya no depende del número de polos del bobinado estatórico, como en cualquier motor de inducción, sino que ésta es proporcional a la tensión y, al igual que en los motores de corriente continua, también depende de las características constructivas de sus bobinados. Englobando estas características en una constante que llamamos **K** y siendo **V** la tensión de alimentación, (**Zt · I**) la caída de tensión en ambos devanados y **Φ** el flujo por polo, expresado en Webers, la expresión de la velocidad será:

$$Velocidad = n = K \frac{V - (Zt \cdot I)}{\Phi} = r.p.m.$$

Para mejorar el funcionamiento de este tipo de motores, se construyen generalmente para velocidades muy elevadas, hasta 12.000 r.p.m., aunque lo normal es de 3.000 a 8.000 r.p.m., y de polos salientes (dos generalmente), lo cual ofrece la ventaja de que: su funcionamiento apenas dependa de la frecuencia de la red, se disminuye el volumen y el peso del mismo y, además, se aumenta su potencia, al ser ésta proporcional a la velocidad. Las bobinas polares, como ya se dijo, se conectan en serie y con el inducido en medio, no llevando nunca estos motores devanados de compensación ni conmutación.

La velocidad se puede regular variando la tensión de alimentación y el método más empleado consiste en intercalar un reóstato o resistencia variable, en serie con el motor, o bien un regulador de tensión a tiristores.

Para invertir el sentido de giro en los motores universales, deberemos cambiar la polaridad del estator o del rotor, una solamente, para lo cual basta con cambiar las entradas de uno sólo de sus bobinados, el del estator o el del rotor, como vemos esquemáticamente en la figura 3.19.



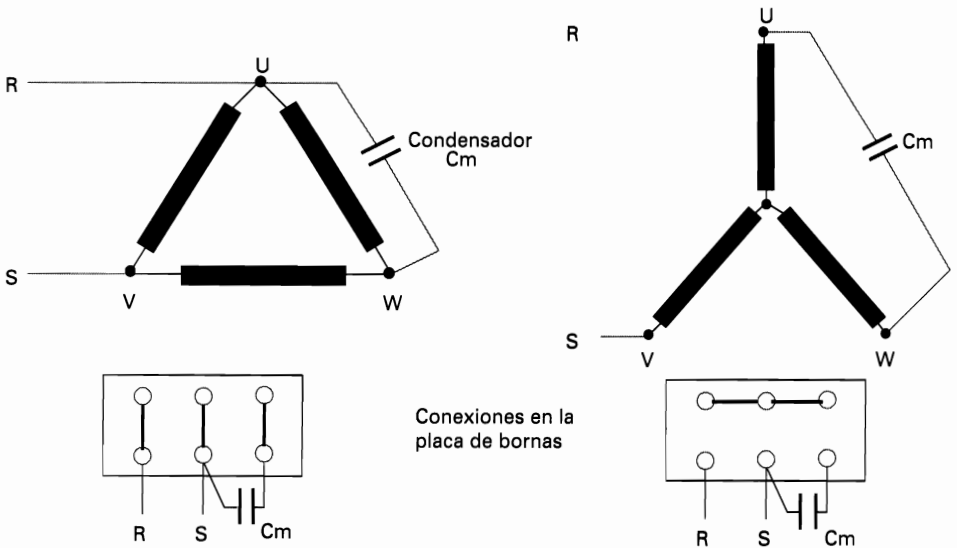
**Figura 3.19.** Inversión del sentido de giro.

### 3.13. MOTOR TRIFÁSICO TRABAJANDO EN MONOFÁSICO

Es posible hacer trabajar los motores asíncronos trifásicos como monofásicos. Para ello conectamos dos fases a la red y entre una de estas fases y la otra

que queda libre conectamos un condensador de marcha apropiado ( $C_m$ ). Este tipo de conexión, que vemos en la figura 3.20, se denomina “conexión Steinmetz”. Este tipo de funcionamiento resulta mejor en motores de jaula de ardilla simple, ya que con otros tipos de rotor no se consiguen tan buenos resultados.

Como vemos en la figura 3.20 y refiriéndonos a la conexión en triángulo, la fase **u-v** funciona como devanado principal o de trabajo, al recibir toda la tensión de la red, mientras que las otras dos fases **u-w-v**, conectadas en serie, funcionan como devanado auxiliar. El condensador es necesario para producir el desfase necesario entre ambos devanados, ya que al no estar físicamente desfasados  $90^\circ$ , como es el caso de los motores monofásicos, necesitan el adelanto de la corriente que el condensador origina sobre una fase, para que se produzca el suficiente par de giro necesario para el arranque.



**Figura 3.20.** Arranque de un motor trifásico en monofásico.

El funcionamiento sería el mismo si el motor estuviera conectado en estrella, ya que en este caso dos fases quedarían conectadas en serie y funcionarían como devanado principal y la otra libre estaría alimentada en adelanto, por medio del condensador.

Como vemos en los dibujos de la figura 3.20 si el motor está conectado en triángulo, la tensión del condensador ha de ser la misma que la de la línea ( $V_c = V_l$ ),

mientras que si el motor está conectado en estrella, su tensión ha de ser la de la línea multiplicada por  $\sqrt{3}$  ( $V_c = V_l \cdot \sqrt{3}$ ).

Por supuesto que este tipo de accionamiento de los motores trifásicos solamente se puede hacer en motores de pequeña potencia, generalmente inferiores a 2 KW, y más como aprovechamiento de pequeños motores trifásicos ya existentes que como práctica habitual de conexión. La potencia obtenida con este tipo de arranque suele ser del 80% y su par de arranque del 70% de la que el mismo motor tendría funcionando en trifásico.

Aunque el par de arranque es bastante bueno, dependiendo de la capacidad del condensador de marcha empleado (**Cm**), se puede mejorar conectando otro condensador de arranque (**Ca**) solamente durante la puesta en marcha del mismo, conectado en paralelo con el de marcha permanente, y para que su par de arranque sea igual al de funcionamiento en trifásico, su capacidad ha de ser: **Ca = 2 Cm**.

La capacidad del condensador de marcha (**Cm**), expresada en microfaradios, se puede obtener por medio de la tabla 3.1 o también por medio de la fórmula empírica siguiente:

**TABLA 3.1.** Capacidad del condensador de marcha (Cm)

Tensión de la red, en V	125	220	380
Capacidad en $\mu F$ , por cada KW de potencia	200	70	20

$$\text{Capacidad del condensador} = C_m = 50 P \left( \frac{220}{V_l} \right)^2 \frac{5}{f} = \mu F$$

siendo **Vl** la tensión de línea, **f** la frecuencia de la red y **P** la potencia del motor, expresada en C.V. Resumiendo podemos decir que se necesitan 50  $\mu F$  por C.V. o 68  $\mu F$  por KW de potencia aproximadamente, para motores de 220 V.

El sentido de giro se puede variar permutando la conexión del condensador a la otra fase de alimentación.

### 3.14. GRADOS DE PROTECCIÓN DE LAS ENVOLVENTES

Cuando utilizamos un motor, o cualquier otro aparellaje eléctrico, no solamente debemos tener en cuenta las condiciones de servicio, sino también las condiciones ambientales en las cuales ha de trabajar.

Con el fin de que los motores y el aparellaje eléctrico en general puedan soportar las duras condiciones de trabajo, según cuál sea su lugar de utilización, se ha definido lo que se denomina “**Grados o clase de protección de las envolventes**”, que definen las características constructivas que éstos han de tener para que puedan trabajar de forma segura.

La clase o el grado de protección, de acuerdo con las normas UNE 20.324 y EN 60.529 principalmente, se definen por dos letras características y dos o tres cifras, que nos indican lo siguiente:

- *IP*            Letras características de la norma.
- *1ª cifra*      Protección contra la entrada de cuerpos sólidos.
- *2ª cifra*      Protección contra la entrada de agua.

Algunas veces se puede emplear una 3ª cifra, que nos define la robustez mecánica de la carcasa o envoltente, pero casi nunca se utiliza.

Las características de protección, tanto para sólidos como líquidos, o la tercera cifra de robustez mecánica, simbolizadas por cada cifra, quedan resumidas en la tabla 3.2.

**TABLA 3.2.** Índices de protección IP X1-X2-X3  
Según normas UNE 20.323-93 y EN 60.529-91/93


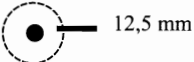
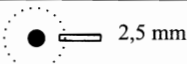
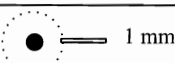












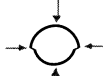

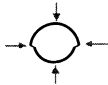




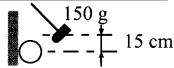
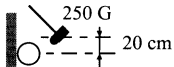
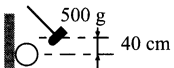
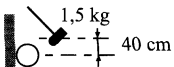
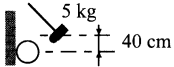
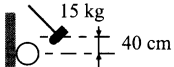
<b>1ª cifra - Protección contra la entrada de cuerpos sólidos (X1)</b>			
<b>IP</b>	<b>Símbolo CEE</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Características</b>
0			Sin protección.
1		 50 mm	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 50 mm.
2		 12,5 mm	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 12,5 mm.
3		 2,5 mm	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 2,5 mm.
4		 1 mm	Protección contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm.
5			Protección contra los sedimentos de polvo y total contra contactos.
6			Protección total contra el polvo y contra contactos.

TABLA 3.2. Índices de protección IP X1-X2-X3

2ª cifra - Protección contra la entrada de líquidos (X2)			
0			Sin protección.
1			Protección contra la caída vertical de gotas de agua (condensación).
2			Protección de la caída de agua hasta 15° de la vertical.
3			Protección contra el agua de lluvia hasta 60° de la vertical.
4			Protección contra las proyecciones de agua en todas las direcciones.
5			Protegido contra chorros de agua en todas direcciones.
6			Protegido contra el lanzamiento de agua en todas direcciones, similares a los golpes de mar.
7			Protegido contra la inmersión sin presión (estanco al agua).
8			Protegido contra la inmersión prolongada, (con presión).

3ª cifra - Protección contra los choques mecánicos (X3)		
IP	Ensayo	Características
0		Sin protección.
1		Energía de choque 0,225 julios.
3		Energía de choque 0,500 julios.
5		Energía de choque 2 julios.
7		Energía de choque 6 julios.
9		Energía de choque 20 julios.
11		Energía de choque 60 julios.

Refiriéndonos al grado de protección de los motores eléctricos diremos que pueden existir con cualquier tipo de protección, de las anteriormente mencionadas, dependiendo de su lugar de trabajo. Incluso es muy frecuente encontrarlos con protección mixta, por ejemplo la carcasa con una protección IP 44 y la caja de bornes con una IP 23, etc.

Cuando se repara un motor eléctrico, además de sus partes eléctricas, debe extremarse también el cuidado, para que su carcasa, cajas de bornes y cualquier parte mecánica queden en perfecto estado, encargando su reparación a personal experto si fuera necesario, de tal forma que sus grados de protección no se vean alterados.

# 4

---

---

## LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA

### 4.1. INTRODUCCIÓN

Al igual que ocurría en las máquinas de corriente continua, según se aprecia en el capítulo 2 de esta obra, las anomalías más frecuentes en las máquinas de corriente alterna son las relacionadas a continuación:

- Localización de contactos a masa.
- Localización de cortocircuitos.
- Localización de conductores cortados.
- Determinación de la polaridad correcta.

Seguidamente pasaremos a analizar la localización de estos cuatro tipos de averías, referidas a motores asíncronos trifásicos de corriente alterna, ya sean con rotor de jaula de ardilla o bobinado, por ser los más utilizados industrialmente. Todo ello se analizará de forma sencilla y sin el empleo de aparatos o sistemas sofisticados, de tal forma que cualquier profesional pueda realizarlo en su taller, bien sea con herramientas tradicionales de electricista o deducidas directamente con el solo empleo del sentido común.

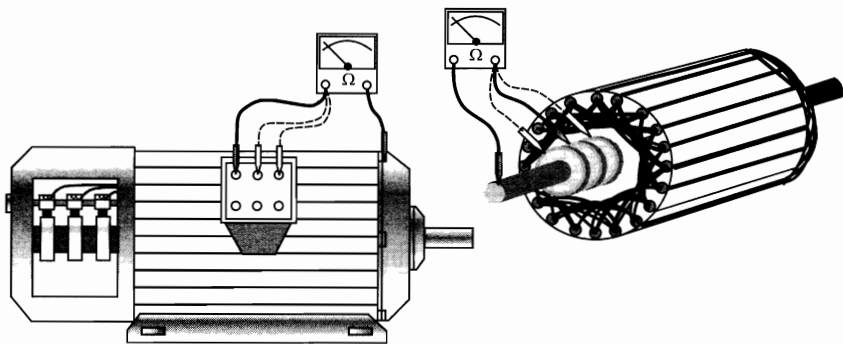
### 4.2. LOCALIZACIÓN DE CONTACTOS A MASA

Este tipo de anomalía puede presentarse tanto en estatores como en rotores bobinados, de cualquier máquina de corriente alterna. Y la mejor forma de no llegar a esta situación que puede ser peligrosa desde sus comienzos, en cuanto a electrocución se refiere, y degenerar con el tiempo en un cortocircuito y la consiguiente destrucción de los devanados, es la de medir periódicamente el aislamiento a masa de sus devanados,



que según la normativa actual ha de ser como mínimo de  $2U + 1.000$  voltios, con un mínimo de 1.500 voltios, siendo  $U$  su tensión nominal.

Para verificar la existencia de contactos a masa en el **estator** de los motores, procederemos como se aprecia en la figura 4.1, retirando primeramente los puentes de la placa de bornes, para medir a continuación el aislamiento entre cada una de las fases y la carcasa del motor, bien sea con el medidor de aislamiento de un polímetro o con un medidor de aislamiento apropiado. La fase que acuse continuidad es la que tiene el defecto. Luego, como mas adelante veremos, hay que localizar la bobina o bobinas puestas a masa, para su posterior aislamiento o sustitución.



**Figura 4.1.** Localización de la fase puesta a masa, en estator y rotor.

Como ya se mencionó, cuando el **rotor** es de anillos rozantes, éste puede presentar en él la misma anomalía que en el estator y la verificación puede realizarse tanto desmontado éste como sin desmontarlo, siempre que aislemos correctamente sus escobillas de los anillos rotóricos. La comprobación se realiza de igual forma que en el estator, midiendo la continuidad entre el eje y cada uno de los tres anillos del rotor. En principio solamente detectamos si una fase está puesta a masa; por el contrario, si queremos saber qué fase es la dañada, debemos desconectar las tres fases del punto de la estrella del devanado y verificar las fases una a una.

Una vez localizada la fase averiada, para determinar qué bobina o bobinas están puestas a masa, hay que desconectar todos los puentes de conexión entre grupos de bobinas, de dicha fase, e ir comprobando la continuidad entre cada una de las bobinas y masa (figura 4.2). Una vez localizada la bobina averiada, se puede extraer y aislar convenientemente o bien sustituirla por otra nueva, siempre que el tamaño del motor y los tipos de bobinas lo hagan posible o bien sustituir el grupo al que pertenece la bobina averiada, e incluso toda la fase averiada o el devanado completo, como suele hacerse en los motores de pequeña potencia.

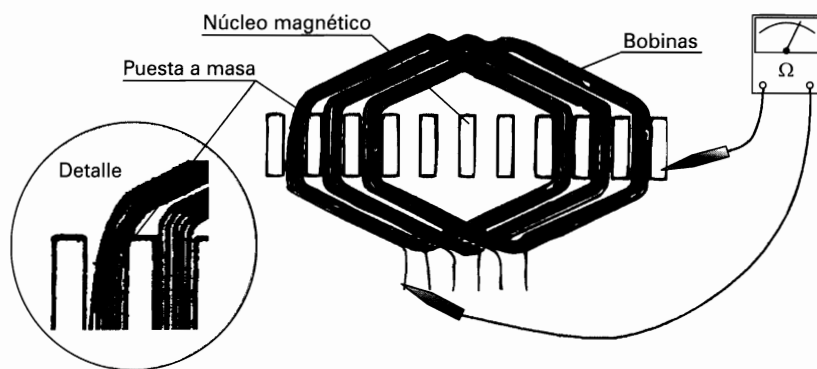


Figura 4.2. Localización de la bobina o grupo de bobinas puesta a masa.

### 4.3. LOCALIZACIÓN DE CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos en los devanados de corriente alterna se suelen producir siempre que: los aislamientos fallen, debido a quemazón por sobrecargas frecuentes, o bien debido al empleo de materiales de aislamiento e impregnación de baja calidad, que fallan debido a las vibraciones del propio motor y a la degradación de los mismos. Los cortocircuitos en el interior de un motor pueden ser de muy distinta magnitud, de tal forma que para su estudio los clasificamos en dos apartados, a saber:

- Cortocircuitos entre dos fases distintas.
- Cortocircuitos entre espiras de una misma fase.

Los primeros suelen ser muy radicales, siempre que sean directos entre fases. Éstos son detectados por las protecciones del motor y éste se queda instantáneamente fuera de servicio. En otros casos, ya sean del primer o segundo tipo, su grado de peligrosidad puede variar, dependiendo de las espiras que queden cortocircuitadas, lo que puede originar: desde ningún síntoma apreciable cuando son pocas espiras de una misma fase, a una intensidad absorbida exagerada cuando las espiras eliminadas son muchas, o bien un calentamiento excesivo y la quema posterior del propio motor en los casos extremos.

#### Cortocircuito entre fases

En estos casos, si el cortocircuito es franco (ejemplo A-B de la figura 4.3), lo normal es que los fusibles o relés de protección contra cortocircuitos salten, el

motor se desconecta y la avería no pase a tener mayores consecuencias. Pero otras veces, cuando el cortocircuito es entre bobinas de distinta fase y éste no es franco, debido a la impedancia de las muchas espiras intercaladas, como es el caso C-D de la figura 4.3, el motor puede llegar a arrancar, calentarse exageradamente, e incluso llegar a quemarse sin que sus protecciones lo desconecten.

Por tanto, cuando un motor no sobrecargado se calienta exageradamente y sus protecciones no saltan, hay que suponer un cortocircuito incipiente entre fases, con una gran impedancia, debido a las muchas espiras que quedan intercaladas (ejemplo C-D). En estos casos para detectarlo hay que desmontar el motor y, si una observación visual no es suficiente para detectarlo, hay que proceder a retirar los puentes de la placa de bornes y verificar el aislamiento entre las fases, por medio de un polímetro o un medidor de aislamiento. Tal como se aprecia en la figura 4.3 como es natural las fases cortocircuitadas acusarán más continuidad entre ellas, siendo ésta mayor o menor dependiendo del tipo e impedancia del cortocircuito.

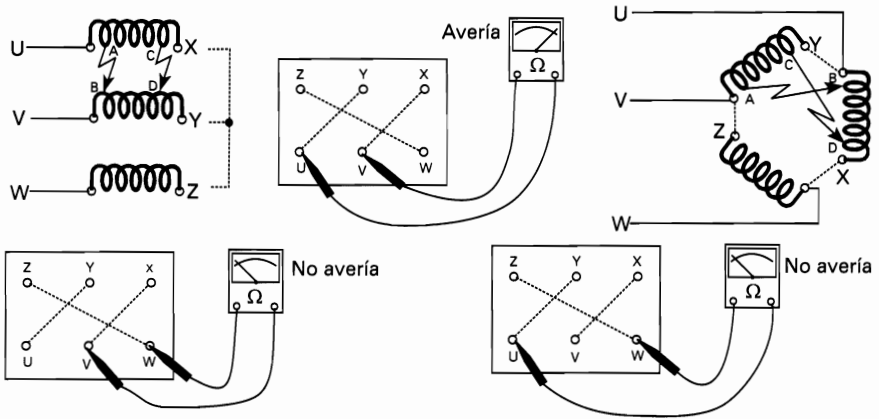


Figura 4.3. Localización de cortocircuitos entre fases.

### Cortocircuito entre espiras de una misma fase

En estos casos, si el cortocircuito es en el devanado del **estator**, puede darse el caso de que el motor no pueda llegar a arrancar. Por el contrario, si al aparecer el cortocircuito el motor está en marcha, puede seguir girando, aunque empezará a roncar y aumentará su calentamiento. En este caso también aumentará la corriente de la fase defectuosa, defecto que puede ser suficiente para que un relé de sobrecarga, del tipo diferencial pueda llegar a desconectar el motor.

Si las espiras cortocircuitadas pertenecen al **rotor** de un motor de anillos, el motor, si está parado, puede llegar a arrancar, pero lo hará con brusquedad y metiendo mucho ruido, a la vez que la corriente absorbida de la red oscilará durante el arranque.

En estos casos, tanto si el defecto es en el rotor como en el estator, y si visualmente no logramos detectar la bobina con espiras en cortocircuito, la mejor forma de localizarla es como se hacía en los devanados de corriente continua, o sea, empleando un zumbador, manual o de sobremesa, y una lámina metálica u hoja de sierra, tal como se aprecia en la figura 4.4. Al ir recorriendo el devanado con el zumbador, la lámina metálica vibrará cuando ésta esté situada sobre la bobina defectuosa.

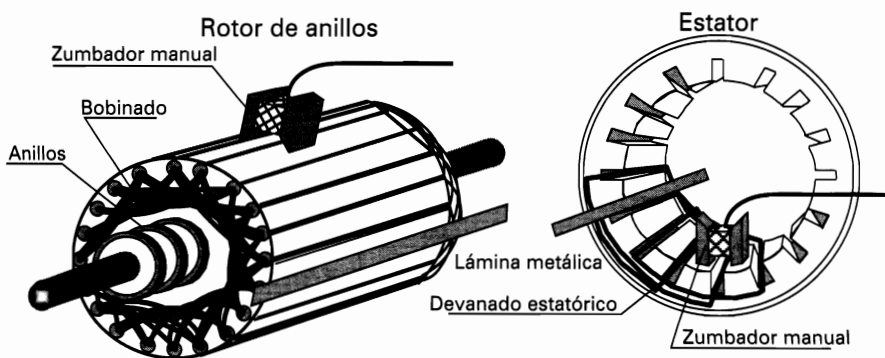


Figura 4.4. Localización de espiras en cortocircuito, en estator y rotor.

Recordamos una vez más, como ya lo hacíamos en el capítulo 2, que para la mejor detección de la bobina con espiras en cortocircuito hay que mantener una distancia entre el entrehierro del zumbador y la lámina metálica igual al ancho de bobina del devanado.

Si antes de desmontar el motor sospechamos que el defecto está en el rotor, podemos detectar la fase con la bobina defectuosa sin desmontarlo. Para ello se levantan las escobillas y, ya con el devanado del rotor abierto, se le aplica tensión al estator (si es posible inferior a la nominal) y se miden las tensiones entre los tres anillos del rotor. Si las tres tensiones son iguales, nos indica que no hay espiras en cortocircuito en el rotor, en caso contrario, si una de ellas es nula o inferior a las otras, nos indica que en esa fase existen espiras en cortocircuito.

Por medio del zumbador también podríamos detectar si en un **rotor de jaula de ardilla** hay alguna barra desoldada o cortada. Para ello procedemos como anteriormente se explicó, para un rotor devanado, observando que la lámina

vibra en cada barra del inducido, excepto en la que está interrumpida. Este defecto se manifiesta normalmente por medio de: ruidos anormales, arranques dificultosos, e incluso pueden aparecer chispas entre las barras del rotor y sus discos de cortocircuito.

### 4.4. LOCALIZACIÓN DE CONDUCTORES CORTADOS

Estas anomalías, tanto si el devanado es de rotor como si es de estator, se manifiestan con arranques dificultosos, el motor no logra alcanzar su velocidad nominal, ronca y se achica con la carga, o incluso no logra arrancar; todo ello debido a su alimentación en bifásico, como se aprecia en los esquemas de la figura 4.5. Si el devanado está ejecutado con circuitos en paralelo y es uno solo de esos circuitos el interrumpido, el motor presenta los mismos síntomas que si la fase completa estuviera cortada.

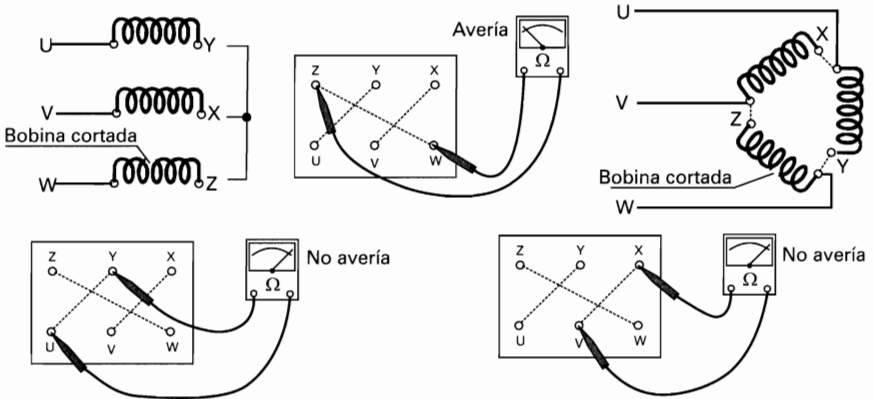


Figura 4.5. Localización de conductores cortados.

Primeramente debemos observar los conductores que van a la placa de bornes, ya que con frecuencia, y bien sea debido a las vibraciones, al envejecimiento del aislamiento o de las soldaduras de los terminales, se sueltan o cortan en la propia placa de bornes.

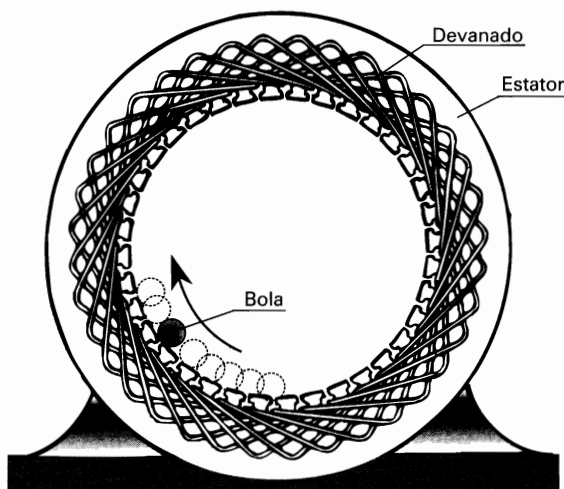
Luego para localizar las interrupciones en el devanado del **estator**, debemos comprobar la continuidad de cada fase por separado. Para ello retiramos los puentes de la placa de bornes, ya estén en estrella o en triángulo y con un medidor de continuidad (polímetro o medidor de aislamiento) verificamos una a una las fases del motor, tal como se aprecia en la figura 4.5.

Para localizar las interrupciones en un **rotor** de anillos rozantes, empezaremos por aislar los anillos rotóricos, bien sea levantando las escobillas o colocando un aislante entre aros y escobillas. Seguidamente procedemos a medir la continuidad entre cada dos anillos o entre cada anillo y el punto de la estrella del devanado, si éste es accesible, como si de un devanado de estator se tratara.

Otra forma de localizar la fase cortada del rotor, una vez aislados los anillos rotóricos, consiste en alimentar el estator (si es posible a tensión reducida) y medir la tensión existente entre cada dos anillos. Si una fase está cortada, no nos dará tensión alguna con ninguna de las otras dos. Esto es debido a que en estas condiciones el rotor se comporta como el secundario de un transformador, en el que se inducen tensiones debido al flujo estatórico.

#### 4.5. DETERMINACIÓN DE LA POLARIDAD CORRECTA

Si alguna de las conexiones entre grupos de bobinas no se conecta correctamente, o bien se han equivocado algunas entradas (U, V, W) con salidas (X, Y, Z), el campo magnético no será completamente giratorio y, en consecuencia, la máquina no podrá arrancar o lo hará con mucha dificultad.



**Figura 4.6.** Determinación de la polaridad correcta de un estator.

La localización de las bobinas o los grupos de bobinas conectados incorrectamente, podría hacerse por medio de la brújula, como veíamos en el apartado 2.5 de

esta obra para las máquinas de corriente continua, pero en la práctica, y sobre todo para motores que no sean de gran tamaño, existe un procedimiento mucho más fácil y rápido, **aplicable a los estatores** de las máquinas de corriente alterna, que es el reflejado en la figura 4.6.

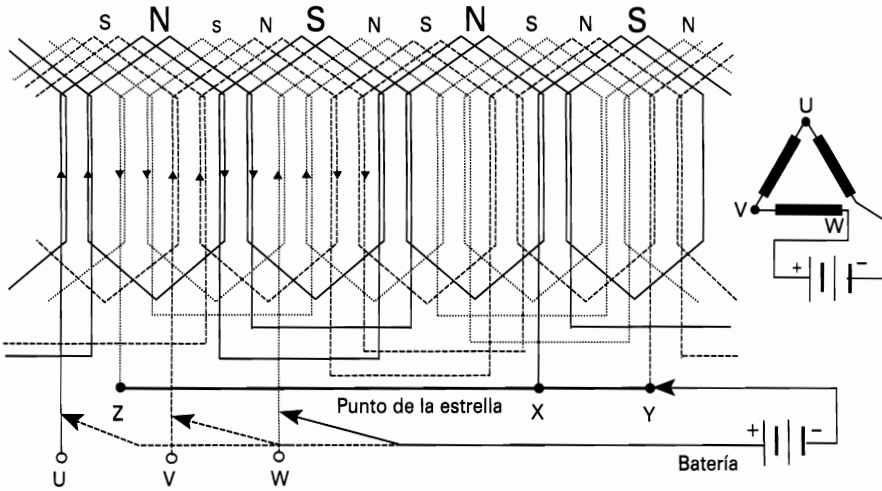
Este sistema de comprobación de la polaridad correcta consiste en aplicarle tensión alterna al estator, desmontado, al que se le ha introducido previamente una bola de acero en su interior –de un cojinete de bolas o similar–, tal como se aprecia en la figura 4.6. Si las conexiones están correctamente realizadas, la bola rodará por el interior del estator perfectamente, arrastrada por el campo magnético giratorio. Si existiera alguna conexión equivocada, la bola permanecería en reposo u oscilaría, debido a la deformación del campo magnético.

Para realizar esta comprobación en los motores de mediana o gran potencia, es mejor hacerlo con una tensión inferior a la nominal de la máquina, siempre que ésta sea alterna, ya que el campo magnético se forma perfectamente y es mucho más segura la prueba.

Si deseamos verificar la polaridad en un **rotor devanado**, lo mejor es emplear el sistema de la brújula, tal como se hace con los inducidos de las máquinas de corriente continua. Para ello se aplica tensión continua entre cada anillo rozante y el punto de la estrella del devanado, mientras se va verificando, con la brújula, la polaridad fase a fase, comprobando que en cada una de ellas su número de polos es igual al de polos del estator y que a su vez estará desplazado entre sí el mismo número de ranuras, obteniendo además tres series de polaridades completas.

Si vamos marcando los polos, al final del ensayo habremos comprobado que se obtiene un número de polos tres veces mayor que el del motor y que, además, todos estos polos tendrán alternativamente sentido contrario, ya que cada fase alimentada independientemente forma la polaridad completa, tal como se aprecia en la figura 4.7. Así para un devanado tetrapolar obtendremos doce polaridades con el sentido siguiente: N-S-N-S-N-S-N-S-N-S-N-S. Esto por supuesto no va a ocurrir en funcionamiento normal, cuando sea alimentado con corriente alterna, ya que en este caso esas polaridades se van manifestando una después de otra, dando así lugar al campo magnético giratorio.

Aunque no es normal que los devanados de rotor estén conectados en triángulo, si éste fuera el caso, la tensión continua se aplicará de una sola vez a todo el devanado, abriendo la conexión triángulo en uno de sus vértices y conectando éstos a la fuente de corriente continua, tal como se aprecia en el pequeño dibujo de la figura 4.7. De esta forma, todas las fases quedan en serie y al ir comprobando la polaridad con la brújula, obtendremos la misma serie de polaridades descrita para la conexión estrella.



**Figura 4.7.** Verificación de la polaridad correcta en un rotor devanado, conectado en estrella.

Cuando verificamos con la brújula un rotor devanado, según cuál sea el defecto, quedará manifestado por las secuencias de polaridad de los ejemplos siguientes:

- Si en el ejemplo de la figura 4.7 obtuviéramos las polaridades: N-S-N-N-N-S-N-S-N-S-N-S, nos indicará que un grupo de bobinas está mal conectado. En este caso será el cuarto grupo, que deberemos corregir permutando las conexiones de dicho grupo.
- Si por el contrario la secuencia fuera: N-N-N-S-S-S-N-N-N-S-S-S, nos indicaría que una fase completa está invertida. En este caso la segunda fase, que debemos de corregir cambiando su entrada por su salida.
- Si un grupo completo no manifiesta polaridad alguna, nos indicará que está completamente cortocircuitado.

## 4.6. RESUMEN DE LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS

Seguidamente y como resumen de los temas tratados en este capítulo, se incluye un cuadro resumen de averías, donde se analizan las más comunes que se pueden dar en máquinas de corriente alterna.



**TABLA RESUMEN, PARA LA LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA**

<b>Síntomas</b>	<b>Causas posibles</b>	<b>Verificación y soluciones</b>
1. El motor no arranca.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No le llega corriente al motor.</li> <li>- Si el motor ronca y no llega a arrancar, le falta una fase.</li> <li>- Tensión insuficiente o carga excesiva.</li> <li>- Si el motor es de anillos y el ruido es normal y no arranca, el circuito rotórico está mal. Circuito exterior o devanado cortado.</li> <li>- Devanado a masa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar tensiones en la red fusibles, contactos, conexiones del motor.</li> <li>- Verificar la correcta conexión, extrella o triángulo, en su placa de bornes y la carga del motor.</li> <li>- Verificar tensiones rotóricas, contacto de las escobillas y circuito de las resistencias de arranque (conductores y resistencias)</li> <li>- Verificar aislamiento de los devanados.</li> </ul>
2. El motor arranca, pero no alcanza la velocidad nominal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensión insuficiente o caída de tensión excesiva.</li> <li>- Fase del estator cortada.</li> <li>- Si el motor es de anillos, han quedado resistencias intercaladas.</li> <li>- Si el motor es de anillos, ruptura del circuito de arranque rotórico.</li> <li>- Cortocircuito o devanado a masa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar tensión de red y sección de línea.</li> <li>- Verificar tensión y devanado.</li> <li>- Verificar circuitos de arranque.</li> <li>- Verificar conexiones, resistencias, escobillas y devanado.</li> <li>- Verificar devanados y reparar.</li> </ul>
3. La corriente absorbida en funcionamiento es excesiva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquina accionada agarrada o carga excesiva.</li> <li>- Si el motor ronca y las intensidades de las tres fases son desiguales, cortocircuito en el estator.</li> <li>- Si el motor es de anillos, cortocircuito en el circuito rotórico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar carga y sustituir motor si éste es pequeño.</li> <li>- Verificar aislamiento y reparar o rebobinar el motor.</li> <li>- Verificar anillos, escobillas y circuito de resistencias. Verificar devanado rotórico y reparar.</li> </ul>
4. La corriente absorbida en el arranque es excesiva.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Par resistente muy grande.</li> <li>- Si el motor es de anillos, resistencias rotóricas mal calculadas o cortocircuitadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar la carga del motor.</li> <li>- Verificar resistencias y posibles cortocircuitos en resistencias y devanado rotórico.</li> </ul>

**TABLA RESUMEN, PARA LA LOCALIZACIÓN DE AVERÍAS EN MÁQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA (Continuación)**

<b>Sintomas</b>	<b>Causas posibles</b>	<b>Verificación y soluciones</b>
5. El motor se calienta exageradamente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Motor sobrecargado.</li> <li>- Ventilación incorrecta.</li> <li>- Si el motor se calienta en vacío, conexión defectuosa.</li> <li>- Cortocircuito en el estator.</li> <li>- Tensión de red excesiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar carga.</li> <li>- Verificar y limpiar rejillas y ranuras de ventilación.</li> <li>- Verificar las conexiones de la placa de bornes.</li> <li>- Verificar devanado estático.</li> <li>- Verificar tensión y corregir.</li> </ul>
6. El motor humea y se quema.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cortocircuito directo o de un número excesivo de espiras en cualquiera de sus devanados.</li> <li>- Mala ventilación del motor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verificar devanados y reparar o rebobinar.</li> <li>- Mantener siempre limpios los circuitos de ventilación.</li> </ul>
7. El motor produce demasiado ruido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibraciones de ciertos órganos.</li> <li>- Si el ruido es solamente en reposo y no en marcha, cortocircuito en el rotor.</li> <li>- Si el ruido cesa al cortar la corriente, entrehierro irregular.</li> <li>- Barra del rotor desoldada o rota.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lanzar y desconectar el motor y si el ruido persiste, verificar fijaciones y cojinetes.</li> <li>- Verificar devanado rotórico y reparar.</li> <li>- Verificar cojinetes y rotor</li> <li>- Verificar barras del rotor.</li> </ul>



# 5

## DEFINICIONES EMPLEADAS EN LOS DEVANADOS ELÉCTRICOS

Al calcular o ejecutar un devanado o bobinado, como también se denominan, tanto de corriente continua como de corriente alterna, es muy necesario tener en cuenta las definiciones usuales, imprescindibles para la ejecución de los mismos, que se describen a continuación:

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
<b>2a</b>	Número de ramas en paralelo	<b>B</b>	Número total de bobinas del devanado
<b>D</b>	Número total de delgas del colector	<b>d</b>	Diámetro del entrehierro
<b>G</b>	Número total de grupos de bobinas	<b>Gf</b>	Número de grupos de bobinas por fase
<b>GR</b>	Grupos de repetición (en devanados fraccionarios)	<b>K</b>	Número total de ranuras
<b>Kpq</b>	Número de ranuras por polo y fase	<b>m</b>	Amplitud de grupo, en devanados concéntricos
<b>ma</b>	Amplitud de grupo, del devanado auxiliar	<b>N</b>	Número total de espiras de una bobina
<b>N<sub>B</sub></b>	Número de espiras por sección inducida	<b>Neq</b>	Número de conexiones equipotenciales
<b>p</b>	Número de pares de polos de la máquina	<b>2p</b>	Número total de polos de la máquina
<b>Pp</b>	Paso polar, medido en longitud de arco	<b>q</b>	Número de fases
<b>S</b>	Número total de secciones inducidas	<b>U</b>	Número de secciones inducidas por bobina
<b>Ua</b>	Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar	<b>Up</b>	Número de bobinas por grupo, del devanado principal

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
<b>Ug</b>	Número de bobinas por grupo, en devanados trifásicos	<b>Y</b>	Paso resultante, medido en número de secciones inducidas
<b>Y1</b>	Ancho de sección, medido en secciones inducidas	<b>Y2</b>	Paso de conexión, medido en secciones inducidas
<b>Ycol</b>	Paso de colector, medido en número de delgas	<b>Yeq</b>	Paso de bobina equipotencial
<b>Yk</b>	Paso de ranura o ancho de bobina (Yk ≈ Pp)	<b>Yq</b>	Distancia entre principios de fase

### 5.1. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE CONTINUA

Las características principales a tener en cuenta para el cálculo y la ejecución de los devanados de corriente continua son las siguientes:

#### Paso polar (Pp) y paso de ranura (Yk)

El paso polar **Pp** es la distancia medida entre los ejes de dos polos consecutivos, tomada sobre el arco de circunferencia del entrehierro (Fig 5.1), o sea:

$$Pp = \frac{\pi d}{2p}$$

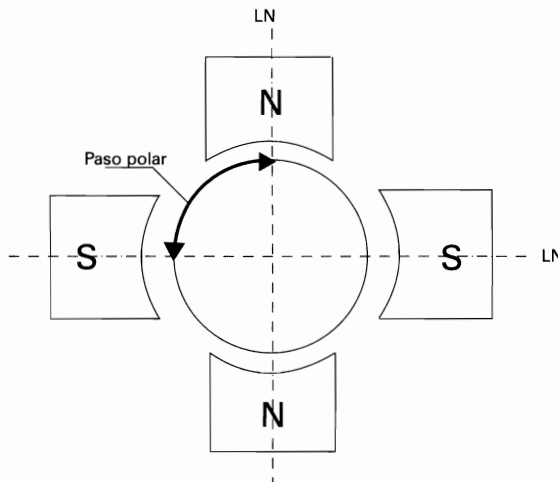


Figura 5.1. Definición de paso polar.

En la práctica, para poder ejecutar los devanados, el paso polar ha de tomarse en número entero de ranuras, denominándose **paso de ranura** o **ancho de bobina**, según la expresión:

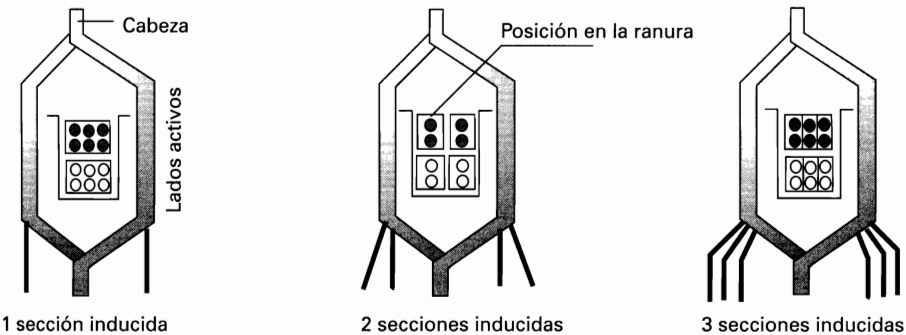
$$\text{Paso de ranura o ancho de bobina} = Yk = \frac{K}{2p} \simeq Pp$$

Cuando por la fórmula anterior no se obtenga un número entero, ha de redondearse éste por exceso o por defecto, para que sea posible la ejecución del devanado, denominándose en estos casos:

- Ancho de bobina acortado, o
- Ancho de bobina alargado.

### Secciones inducidas o bobinas elementales (U), en devanados de inducido

Recibe este nombre el conjunto de espiras de una misma bobina, comprendidas entre dos delgas consecutivas del colector. Cada sección inducida puede tener cualquier número de espiras, aunque siempre las mismas dentro de una misma bobina, pero solamente tendrá dos extremos, uno de entrada y otro de salida. Por tanto, el número de secciones inducidas **U** de una bobina será siempre la mitad de los extremos libres que tiene dicha bobina (Fig. 5.2).



**Figura 5.2.** Constitución de las bobinas y secciones inducidas.

Si tenemos en cuenta que en un devanado normal de dos capas por ranura, el número de bobinas ha de ser igual al número de ranuras ( $B = K$ ), y siendo **U** el número de secciones inducidas por bobina, el número total de secciones inducidas del devanado será:

$$\text{Número total de secciones inducidas} = S = B \cdot U = K \cdot U$$

### Número de delgas del colector (D)

Se denomina **delga** a cada una de las partes o láminas, aisladas unas de otras, que forman el colector de los inducidos. A las delgas del colector se conectan las secciones inducidas de las bobinas, por tanto el número de delgas del colector ha de ser igual al total de secciones inducidas de su devanado.

$$\text{Número de delgas} = D = S = K \cdot U$$

Por lo general, el número de delgas de un inducido siempre es múltiplo del número de pares de polos de la máquina.

### Número de líneas de escobillas y separación entre ellas

Las escobillas, que frotan sobre las delgas del colector, deben ser colocadas sobre delgas conectadas sobre una línea neutra. Por tanto, como en una máquina multipolar entre cada dos polos existe una línea o zona neutra, ésta tendrá tantas líneas neutras como pares de polos tenga la máquina y, por consiguiente, dicha máquina deberá tener tantas escobillas o líneas de escobillas como número de polos tenga la máquina.

Como debido a lo anteriormente expuesto, las escobillas o líneas de escobillas han de estar equidistantes unas de otras, la separación entre éstas ha de ser:

$$\text{Separación en grados} = \frac{360^\circ}{2p}$$

$$\text{Separación en delgas} = \frac{D}{2p}$$

### Ancho de sección o paso de bobina (Y1)

Se denomina así a la distancia, medida en número de secciones inducidas, existente entre las dos ramas o haces activos de una misma sección inducida. Por tanto y según se aprecia en la figura 5.3, su valor, que será siempre un número entero, se obtiene de la siguiente forma:

$$\text{Ancho de sección} = Y1 = Yk \cdot U = \frac{S}{2p}$$

Donde:  $Y_k$  = paso de ranura  
 $U$  = número de secciones inducidas por bobina  
 $S$  = número total de secciones inducidas del bobinado

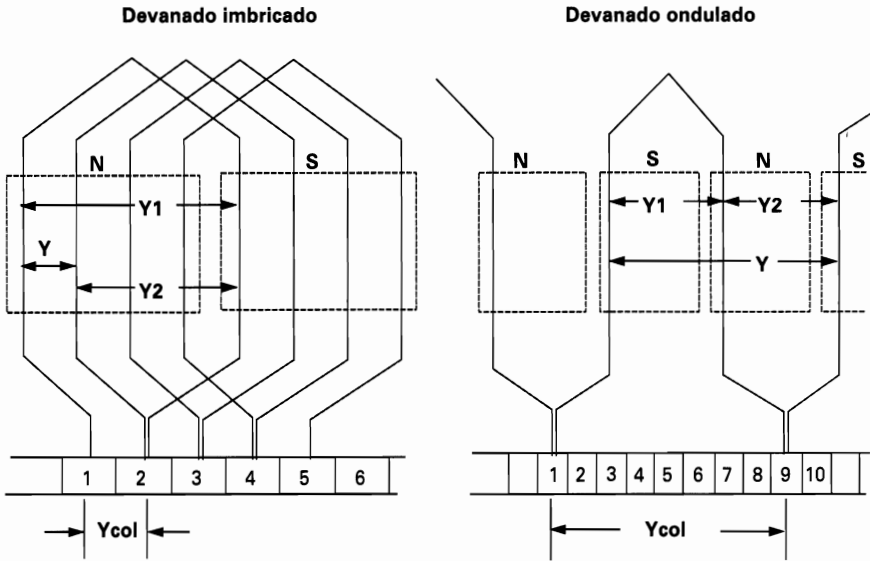


Figura 5.3. Definiciones principales en los devanados imbricados y ondulados.

### Paso de conexión ( $Y_2$ )

Se denomina paso de conexión al número de secciones inducidas existente entre el final de una sección inducida y el principio de la siguiente, siguiendo el curso del devanado. Según el tipo de devanado empleado, este paso puede ser de avance o de retroceso (positivo o negativo); así en los denominados **bobinados imbricados** será de retroceso o negativo, mientras que en los **devanados ondulados** será de avance o positivo, tal como se aprecia en la figura 5.3.

El valor del paso de conexión  $Y_2$ , por depender del tipo de devanado, se obtiene despejándolo del paso resultante  $Y$  o del paso de colector  $Y_{col}$  y, por su naturaleza, será siempre un número entero. Así tendremos:

*Para devanados imbricados:*  $Y_2 = Y_1 - Y = Y_1 - Y_{col}$

*Para devanados ondulados:*  $Y_2 = Y - Y_1 = Y_{col} - Y_1$



## Paso resultante (Y)

Se denomina **paso resultante** al número de secciones inducidas existentes entre los principios de dos secciones inducidas consecutivas, ya sean de una misma bobina o de bobinas distintas, pero siguiendo siempre la dirección del devanado. Por tanto y como según sea el tipo de devanado su avance puede ser: positivo (devanados ondulados) o negativo (devanados imbricados), el cálculo del paso resultante será distinto para cada tipo de devanado. Así y a la vista de la figura 5.3, su valor podrá ser:

$$\text{Para devanados imbricados: } Y = Y1 - Y2 = \pm 1 \begin{cases} - 1 \text{ devanado cruzado} \\ + 1 \text{ devanado sin cruzar} \end{cases}$$

$$\text{Para devanados ondulados: } Y = Y1 + Y2 = \frac{S \pm 1}{p} \begin{cases} + 1 \text{ devanado cruzado} \\ - 1 \text{ devanado sin cruzar} \end{cases}$$

El signo  $\pm$  lo comprenderemos mejor después de la siguiente definición (paso de colector) y es debido a que tanto los devanados imbricados como los ondulados se pueden ejecutar hacia adelante o hacia atrás, siguiendo las ranuras del rotor. Por tanto, en cuanto a su ejecución práctica los devanados pueden ser: **progresivos** o **regresivos** y también **cruzados** o **sin cruzar**. En la figura 5.4 se aprecia mejor la diferencia entre estas denominaciones y según se ve, una u otra denominación no representa lo mismo, para los devanados imbricados u ondulados.

## Paso de colector (Ycol)

Recibe este nombre el número de delgas de colector existente entre los principios de dos secciones inducidas consecutivas, siguiendo el curso del devanado, dicho de otro modo es el número de delgas que hay que saltar para ir, desde la delga de principio de una sección inducida, hasta la delga de principio de la sección inducida siguiente, siempre en la dirección del devanado. Por tanto, en cualquier tipo de devanado **el paso de colector siempre será igual al paso resultante**.

$$Y_{col} = Y$$

Y según que la ejecución de los devanado sea hacia adelante o hacia atrás, algebraicamente su valor será:

$$- \text{Devanados imbricados: } Y_{col} = Y1 - Y2 = Y = \pm 1$$

- *Devanados ondulados*:  $Y_{col} = Y1 + Y2 = Y = \frac{D \pm 1}{p}$

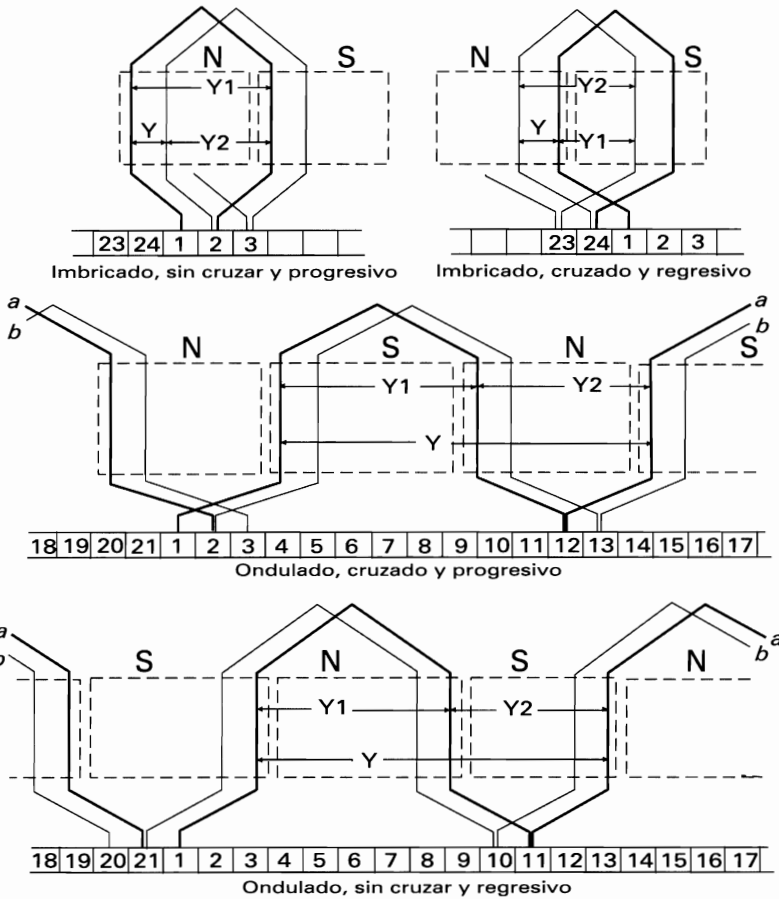


Figura 5.4. Representación esquemática de los devanados cruzados y sin cruzar.

Como en los **devanados imbricados** sin cruzar o progresivos:  $Y2 < Y1$ , tendremos:  $Y_{col} = + 1$ , mientras que en los cruzados o regresivos:  $Y2 > Y1$ , tendremos  $Y_{col} = -1$ .

Por el contrario los **devanados ondulados** sin cruzar serán regresivos, siendo:

$$Y_{col} = \frac{D - 1}{p}$$

mientras que los devanados cruzados serán progresivos y por tanto:

$$Y_{col} = \frac{D + 1}{p}$$

### Número de ramas en paralelo (2a)

Se denomina así al número de veces que la corriente eléctrica cambia de sentido al recorrer un devanado de corriente continua. Según se aprecia en la figura 5.5, en los devanados imbricados, esto ocurre cada vez que al recorrer el devanado se ha completado el espacio correspondiente a un paso polar, de forma tal que los haces activos de las bobinas quedan conectados en serie, desde una línea de escobillas de un signo a otra de signo contrario.

En los devanados imbricados simples o sencillos, como el de la figura 5.5, existen tantas ramas en paralelo como número de polos tiene la máquina, y también el mismo número de líneas neutras y de escobillas que ésta tiene; pero como existen muchos tipos de devanados, el número de ramas en paralelo varía de un tipo a otro, siendo éste:

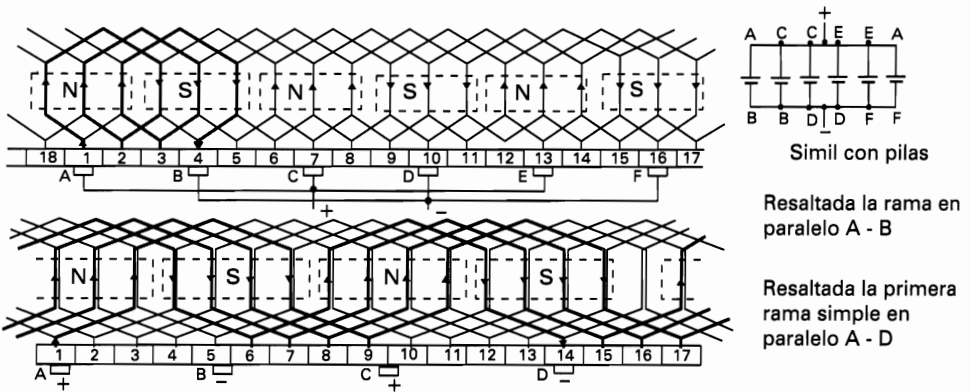


Figura 5.5. Definición de ramas en paralelo, en los devanados.

### Devanados imbricados

- Imbricado simple:  $2a = 2p$ .
- Imbricado múltiple:  $2a = 2p \cdot (\text{número de devanados simples})$ .

## Devanados ondulados

- *Ondulados simples o sencillos:  $2a = 2$ .*
- *Ondulados múltiples:  $2a = 2 \cdot (\text{número de devanados simples})$ .*

En un devanado ondulado simple o sencillo solamente hay dos ramas en paralelo y, tal como se aprecia en la figura 5.5, la primera va desde la delga **1** a la **14** y la segunda desde la delga **14** hasta la **1**; mientras que en un devanado ondulado múltiple hay más, por estar formado en realidad por varios devanados simples ejecutados sobre un mismo inducido. El número de líneas de escobillas, en los devanados ondulados, también pueden ser tantas como números de polos tiene la máquina aunque, como se aprecia en la figura 5.5, podría ser suficiente con dos líneas de escobillas en cada devanado (la **A** y la **D** en nuestro caso), bien sean estos simples o múltiples y cualquiera que fuese su número de polos.

## 5.2. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

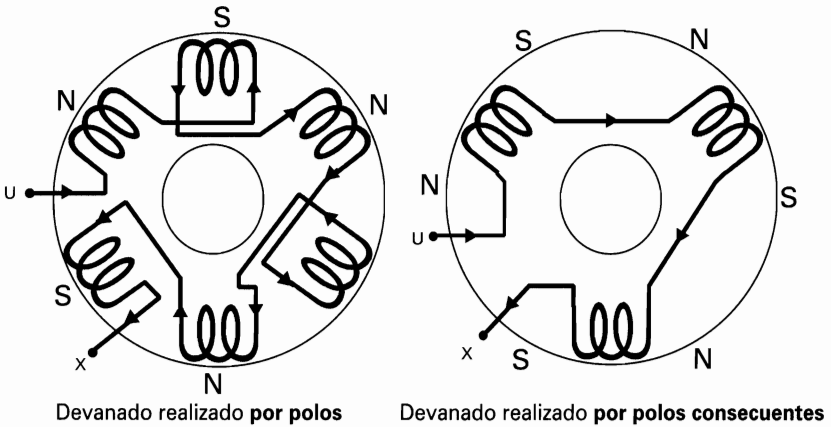
### Devanados “por polos” y devanados “por polos consecuentes”

Cuando formamos un electroimán, por medio de una bobina y un núcleo de hierro, no tenemos que devanar la mitad de la bobina en un sentido y la otra mitad en otro o bien colocar dos bobinas devanadas en sentido contrario para formar sus dos polos, debido a que siempre que exista un polo norte consecuentemente ha de existir un polo sur, ya que nunca puede existir el uno sin el otro. Algo parecido sucede cuando se diseña el devanado de un motor, ya que se puede realizar con un grupo de bobinas para cada polo, tanto los norte como los sur, o bien conectar los grupos de bobinas para formar un solo tipo de polos, bien sean el norte o el sur, ya que, en este último caso, al formar una sola polaridad, consecuentemente se formará también la otra. Estos dos tipos de devanados se suelen emplear en corriente alterna, pudiéndose obtener así, para un mismo motor, los dos tipos de devanados de la figura 5.6, relacionados a continuación:

- Devanados “*por polos*”.
- Devanados “*por polos consecuentes*”.

Como los devanados de corriente alterna pueden ser monofásicos o trifásicos y cada fase se forma generalmente por medio de grupos de bobinas (**Gf**), conectadas entre sí de forma tal que el sentido de la corriente al recorrer sus lados activos vaya formando los distintos polos, podemos decir que:

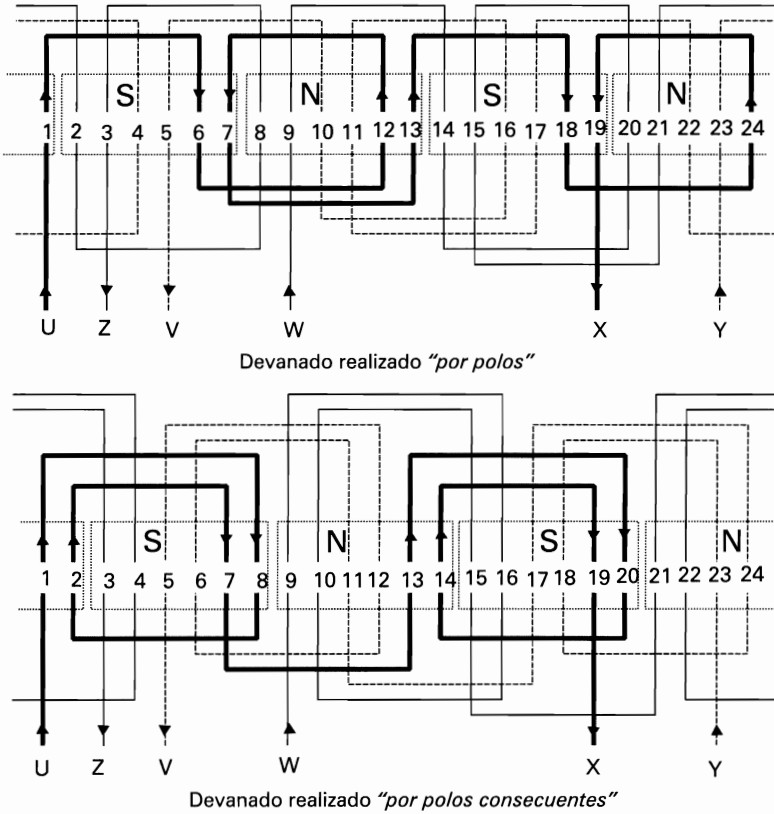
- Un devanado está realizado **por polos**, cuando cada una de sus fases tiene tantos grupos de bobinas ( $G_f$ ) como número de polos ( $2p$ ) tiene la máquina.
- Un devanado está realizado **por polos consecuentes**, cuando cada una de sus fases está formada por tantos grupos de bobinas ( $G_f$ ) como número de pares de polos ( $p$ ) tiene la máquina.



**Figura 5.6.** Principio de ejecución de los devanados “por polos” y “por polos consecuentes”. Representada una sola fase.

En consecuencia, un motor tendrá el doble de grupos de bobinas cuando su devanado está realizado por polos, que cuando está realizado por polos consecuentes, pero el número de bobinas por fase y, por tanto, el número de espiras de dichas bobinas han de ser los mismos en ambos tipos de devanados.

En la figura 5.7 se ven los esquemas de dos devanados tetrapolares de 24 ranuras para un mismo motor, realizados con ambos tipos de diseño, apreciándose que el número de bobinas por fase y total es el mismo en ambos devanados. Sin embargo, en el devanado **por polos** los grupos son de una sola bobina y cada fase está formada por cuatro grupos, mientras que en el devanado ejecutado **por polos consecuentes** cada grupo está formado por dos bobinas y cada fase está formada solamente por dos grupos de bobinas. También se aprecia, por medio de las flechas que indican el sentido instantáneo de la corriente, en la fase resaltada, que en ambos devanados se forman los mismos cuatro polos.



**Figura 5.7.** Esquema del devanado de un motor, realizado "por polos" y "por polos consecuentes".

### Grupos de bobinas por fase ( $G_f$ ) y número total de grupos ( $G$ )

De acuerdo con las definiciones anteriores, el número total de grupos de bobinas que ha de tener cada fase de un devanado ( $G_f$ ), así como el número total de grupos de bobinas que hay que preparar para ejecutar todo el devanado ( $G$ ), serán las siguientes:

- Para bobinados ejecutados **por polos**

$$\text{Grupos por fase} = G_f = 2p \qquad \text{Grupos totales} = G = 2p \cdot q$$

- Para devanados ejecutados **por polos consecuentes**

$$\text{Grupos por fase} = G_f = p \qquad \text{Grupos totales} = G = p \cdot q$$

Siendo:  $p$  = número de pares de polos;  $2p$  = número total de polos y  $q$  = número de fases.

Se aprecia una vez más que los devanados ejecutados **por polos** llevan el doble de grupos de bobinas que los realizados por **polos consecuentes**; aunque para un mismo motor siempre ha de existir igual número de bobinas y espiras por fase.

### Número de ranuras por polo y fase ( $K_{pq}$ )

Tanto para los devanados ejecutados por polos como para los ejecutados por polos consecuentes, recibe este nombre el cociente que se obtiene al dividir el número total de ranuras de la armadura, por el producto entre el número de polos ( $p$ ) de la máquina y su número de fases ( $q$ ).

$$\text{Número de ranuras por polo y fase} = K_{pq} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

Cuando el devanado se realiza **por polos**, este valor ha de ser forzosamente un número entero y, si su valor es **par**, cada grupo tendrá el mismo número de bobinas, mientras que si dicho valor es **impar**, se debe recurrir bien sea: a realizar grupos con distinto número de bobinas, o bien bobinas con distinto número de espiras, como ya se verá en el capítulo 8.

Cuando el devanado sea realizado **por polos consecuentes**, lo ideal sería que también el número de ranuras por polo y fase fuera un número entero, para que todos los grupos tuvieran el mismo número y tipo de bobinas. No obstante, para este tipo de ejecución se puede admitir que el número de ranuras por polo y fase sea un número entero más media unidad. En este último caso deben realizarse algunas bobinas con la mitad del número de espiras, como también se verá en el capítulo 8.

En la tabla 5.1, se dan los valores ideales, tanto para número de ranuras como de polos ha de tener un motor, para que resulte entero el número de ranuras por polo y fase ( $K_{pq}$ ); haciendo la observación una vez más, que para la ejecución por polos es mejor que este valor sea par y en ambos casos es mejor que sea número entero que fraccionario.

TABLA 5.1. Número de ranuras por polo y fase (Kpq), para un motor trifásico.

Número de polos (2p) y ranuras (K) de la armadura					Nº de ranuras por polo y fase (Kpq)
2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	10 polos	
K=6	12	18	24	30	1
12	24	36	48	60	2
18	36	54	72	90	3
24	48	72	96	120	4
30	60	90	120	150	5
36	72	108	144	180	6
42	84	126	168	210	7
48	96	144	192	240	8

### Número total de bobinas (B) y de bobinas por grupo (Ug)

Los devanados de corriente alterna pueden ser ejecutados en una o dos capas por ranura, o lo que es lo mismo que cada bobina ocupe íntegramente dos ranuras completas o solamente dos mitades, superponiéndose en una misma ranura los lados activos de dos bobinas distintas. Por tanto, según cuál sea el tipo de ejecución, el número de bobinas que se requieren para su ejecución será distinto, a saber:

– *Devanados de dos capas:*  $B = K$

– *Devanados de una capa:*  $B = \frac{K}{2}$

siendo **K** el número de ranuras de la armadura y **B** el número total de bobinas.

Una vez determinado el número total de bobinas requeridas **B** y el número de grupos de bobinas que ha de tener el devanado **G**, ya se puede determinar fácilmente el número de bobinas que ha de tener cada grupo **Ug** :

$$\text{Número de bobinas por grupo} = U_g = \frac{B}{G}$$

En la práctica es más útil expresarlo según el número de ranuras de la armadura; por tanto, en función del tipo de devanado que se va a realizar tendremos:



a) Devanados ejecutados *por polos*

$$- \text{De dos capas: } U_g = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p \cdot q}; \quad - \text{De una capa: } U_g = \frac{B}{G} = \frac{K}{4p \cdot q}$$

b) Devanados ejecutados *por polos consecuentes*

$$- \text{De dos capas: } U_g = \frac{B}{G} = \frac{K}{p \cdot q}; \quad - \text{De una capa: } U_g = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p \cdot q}$$

**Distancia entre principios de fases ( $Y_q$ ). Ángulo eléctrico**

En todo devanado de corriente alterna, es imprescindible que las distintas fases que conforman dicho devanado generen fuerzas electromotrices desfasadas entre sí el mismo ángulo, con el fin de que el campo magnético creado sea giratorio y uniforme. Para ello es necesario y suficiente que los principios de sus fases estén situados en ranuras que por su separación proporcionen el ángulo eléctrico requerido por el sistema de devanado empleado.

De acuerdo con esto, como a cada vuelta completa del rotor de una máquina le corresponden tantos ciclos eléctricos como pares de polos tiene la máquina, y como cada ciclo representa  $360^\circ$ , resulta que a cada vuelta del inducido le corresponden  $p \cdot 360$  grados eléctricos.

Por otra parte, como en los sistemas bifásicos las corrientes están desfasadas  $90^\circ$  y en los trifásicos  $120^\circ$ , la distancia entre los principios de las fases, expresada en número de ranuras será:

$$- \text{Devanado bifásico: } Y_q = \frac{K}{4p} = \text{ranuras}$$

$$- \text{Devanado trifásico: } Y_q = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

Dado que las reglas anteriores pueden cumplirse para varias ranuras por fase, a lo largo de la armadura, lo que se hace en la práctica es realizar una tabla, similar a la 5.2, con tres columnas, una por cada fase, siempre que el devanado sea trifásico, donde se ponen todas las ranuras, que separadas una distancia  $Y_q$  pueden ser principios de una fase. Luego se elige como principio una ranura por cada fase, que pueden ser las más próximas o no, aunque esta elección conviene hacerla según los criterios siguientes:

- **En estatores:** Suelen elegirse los principios de fase que requieran cables más cortos; por tanto, éstos serán los que estén más cerca de los orificios de salida hacia la placa de bornes.

- **En rotores:** Es conveniente elegir los principios de fase que estén situados lo más simétricamente posible, con el objeto de mejorar el equilibrio dinámico de los rotores. Lo mejor sería poder elegir como principios de fase, ranuras separadas  $120^\circ$  para devanados trifásicos.

Veámoslo todo con un ejemplo: Sea el devanado trifásico, tetrapolar, de 24 ranuras y ejecutado *por polos*, dibujado en la figura 5.7.

$$\text{Principios de fase: } Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \cdot 2} = 4$$

TABLA 5.2. Principios de fase en trifásico.

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21

A la vista del esquema de la figura 5.7 se aprecia que igual que se escogieron como principios de fase las ranuras 1, 5 y 9, podrían haberse escogido las ranuras: 13, 17 y 21, o bien 13, 5 y 21; 1, 17 y 9; etc.

**En los devanados bifásicos**, aunque prácticamente no son empleados, el tema se complica un poco, ya que al tener que estar sus principios de fase, desfasados  $90^\circ$ , si se desea calcular más de un principio de fase, debe construirse la tabla empleando la fórmula general de principios de fase, para los dos primeros principios y luego separar el resto 360 grados eléctricos, mediante el denominado **paso de ciclo**, expresado en ranuras según la fórmula siguiente:

$$\text{– Paso de ciclo: } Y_{360^\circ} = \frac{K}{p}$$

Para el ejemplo del devanado anterior, ejecutado en bifásico, obtendríamos los principios de fase siguientes:

$$\text{– Principios de fase: } Yq = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \cdot 2} = 3 \text{ ranuras}$$

$$\text{– Paso de ciclo: } Y_{360^\circ} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$$

Según el resultado obtenido, podríamos coger como ranuras de principio de fase todas las combinaciones siguientes: 1 y 4; 13 y 16; 1 y 16; y, 4 y 13.

En la tabla 5.3, se ve el resultado obtenido:

Paso de ciclo $Y_{360^\circ}$	Fase W	Fase V
	1	4
13	16	
Paso de principios $Y_q$		

TABLA 5.3. Principios de fase, en bifásico.

Como ya se dijo, los devanados bifásicos no se emplean en la práctica, pero si se emplean bastante los **devanados monofásicos**, para motores pequeños, de forma tal que entre sus dos devanados principal y auxiliar se comportan como si de un devanado bifásico se tratara. En el esquema de la figura 5.8 se ve un devanado monofásico, tetrapolar de 24 ranuras, cuyos principios de fases pueden estar en las ranuras que se han calculado en la tabla 5.3.

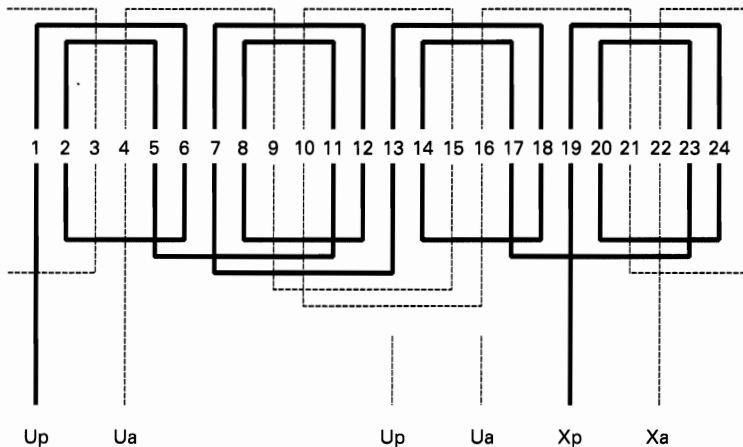


Figura 5.8. Entradas de fase en un devanado monofásico.

### Amplitud de grupo (m), en los devanados concéntricos trifásicos

En los devanados concéntricos de corriente alterna, se denomina **amplitud de grupo** al número de ranuras que han de quedar libres en el interior de un grupo de

bobinas, con el fin de poder alojar a los grupos de bobinas de las otras fases. En general su valor, expresado en número de ranuras, es:

$$\text{Amplitud de grupo: } m = (q - 1) Kpq$$

siendo: **q** el número de fases y **Kpq** el número de ranuras por polo y fase.

Como este tipo de devanados suele ejecutarse en una sola capa, la expresión anterior puede realizarse a partir del número de bobinas por polo y fase **Ug**, y según el tipo de devanado tendremos:

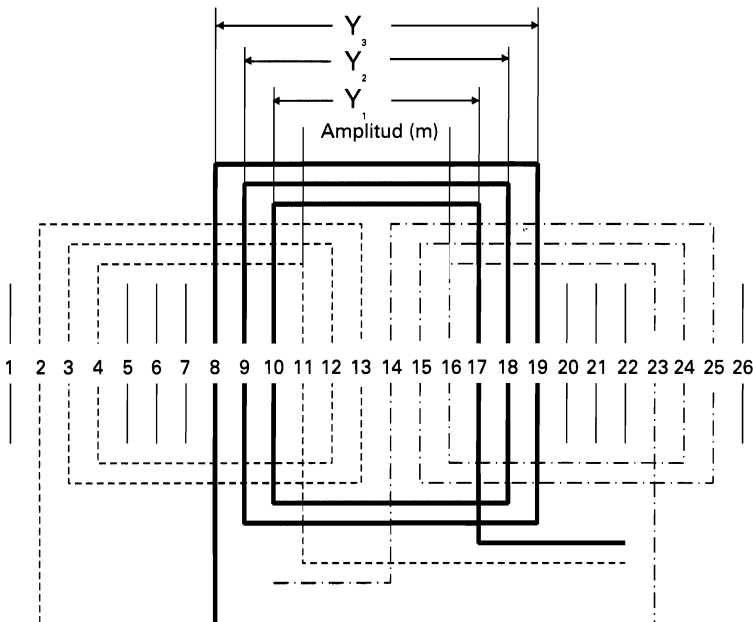
$$\text{– Para devanados por polos consecuentes: } m = (q - 1) Ug$$

$$\text{– Para devanados por polos: } m = (q - 1) 2 Ug$$

Estos cálculos se pueden emplear para los devanados trifásicos, pero **no son válidos para los motores monofásicos**, ya que en estos es más complejo como veremos seguidamente.

Siguiendo con los devanados concéntricos trifásicos, y a la vista de la figura 5.9, obtenemos lo que se denomina **ancho de bobina**, cuyo valor será diferente para cada bobina del grupo, siendo sus valores: -

$$Y_1 = m + 1; \quad Y_2 = m + 3; \quad Y_3 = m + 5; \quad Y_4 = m + 7; \quad \text{Etc.}$$



**Figura 5.9.** Amplitud de grupo y ancho de bobina, en devanados concéntricos.

Para este tipo de devanados algunas veces es interesante calcular el **ancho medio de bobina** ( $Yk$ ), que ha de ser coincidente con el paso polar, siendo su valor:

$$\text{Ancho medio de bobina: } Yk = m + U_g$$

### Amplitud de grupo ( $m$ ), en los devanados concéntricos monofásicos

Las fórmulas anteriores, empleadas para determinar la amplitud de grupo, en los devanados trifásicos, **no son válidas para los devanados monofásicos**, ya que al tener que contener la armadura dos devanados distintos (el principal y el auxiliar), ninguno de ellos ocupa la totalidad de las ranuras (ver figura 5.8), siendo la proporción de ranuras ocupadas por cada devanado:

- **Dos tercios** para el devanado principal.
- **Un tercio** para el devanado auxiliar.

Por tanto, si llamamos  $U_p$  y  $U_a$  al número de bobinas por grupo del devanado principal y auxiliar respectivamente, y  $m_p$  y  $m_a$  a sus amplitudes de grupo, y sabiendo que al ser el doble el número de bobinas del devanado principal ( $2/3$ ) que las del auxiliar ( $1/3$ ), sus amplitudes de grupo han de ser a la inversa, o sea la amplitud del devanado auxiliar ha de ser el doble que la del devanado principal. Por tanto, para ambos devanados y siempre que estén ejecutados a una capa (una bobina por ranura), tendremos:

$$\begin{aligned} \text{– Amplitud de grupo del devanado principal: } m_p &= \frac{1}{3} \cdot \frac{K}{2p} = \frac{K}{6p} = U_p \\ \text{– Amplitud de grupo del devanado auxiliar: } m_a &= \frac{2}{3} \cdot \frac{K}{2p} = \frac{K}{3p} \end{aligned}$$

Cuando los devanados son de doble capa o bobinas superpuestas (dos bobinas por ranura), el cálculo de la amplitud de grupo se complica un poco más. Todo esto se verá con más detalle en el capítulo 10, concerniente a los devanados monofásicos de corriente alterna.

# 6

## MATERIALES EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DE DEVANADOS ELÉCTRICOS

### 6.1. MATERIALES CONDUCTORES PARA DEVANADOS

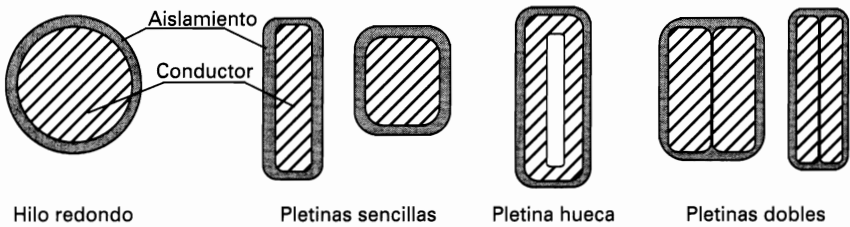
Por lo general, el cobre, obtenido electrolíticamente, es el único material empleado como conductor en la ejecución de los devanados de motores y generadores eléctricos, en cuanto a devanados de estatores e inducidos se refiere. Antiguamente se llegó a emplear algo el aluminio, en los devanados de estatores, pero debido a su menor conductividad, que traía consigo un mayor volumen del motor, está prácticamente desechado en la actualidad, a pesar de tener otras ventajas, como es la de su menor peso, como se aprecia en la tabla 6.1. En la actualidad el aluminio se suele usar para algún devanado de: pequeños transformadores, equipos de soldadura, electrofrenos, reactancias de fluorescentes y poco más.

TABLA 6.1. Comparación de las propiedades eléctricas del cobre y del aluminio.

Propiedades	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)
Densidad o peso específico en: $\text{g/cm}^3$	8,9	2,7
Resistividad eléctrica a 20 °C, en: $(\Omega \text{ mm}^2)/\text{m}$	0,0172	0,0277
Conductividad eléctrica a 20 °C, en: $\text{m}/(\Omega \text{ mm}^2)$	58	36
Temperatura de fusión en: °C	1083	660
Relación de secciones a igual conductividad	1	1,66
Relación de diámetros a igual conductividad	1	1,29
Relación de pesos a igual conductividad	1	0,5
Relación de pesos a igual sección	1	0,3

Por lo general el cobre se emplea en forma de hilos de sección circular, para el devanado de máquinas de pequeña y mediana potencia y en forma de pletinas, de muy diversas secciones, para el devanado de máquinas de mediana y gran potencia, tanto en devanados de rotor como en devanados de estator, según se aprecia en la figura 6.1. Incluso para grandes máquinas se emplean pletinas construidas de hilos trenzados.

Pero el aluminio aun se sigue empleando mucho para las barras de los rotores de jaula de ardilla, bien sea fundido e inyectado en las propias ranuras del rotor o bien introducido en ellas en forma de barras. El aluminio en estos casos también es sustituido en algunos tipos de rotor por barras de cobre o latón y, en algunos casos, como ocurre en los rotores de doble ranura, un devanado de la jaula es de aluminio y el otro de cobre o latón, para que tengan distinta impedancia.



**Figura 6.1.** Tipos de conductores para devanados.

Como los conductores empleados en la ejecución de los bobinados eléctricos pueden ser de muy diversas formas, se definen por lo general por: su sección, tipo de aislamiento y clase térmica, con la excepción de los hilos de sección circular, empleados en máquinas de pequeña y mediana potencia que, por lo general, se definen por su diámetro en vez de su sección, expresado en milímetros o décimas de milímetro. En la tabla 6.2 se aprecian los diámetros de los hilos más utilizados, con su correspondiente sección y su peso, que nos servirá de ayuda en el acopio del material necesario para la ejecución de la mayoría de los devanados.

**TABLA 6.2.** Características de los hilos redondos de cobre para devanados eléctricos.

Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m	Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m	Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m
0,10	0,007	0,0699	1,25	1,227	10,921	2,90	6,605	58,786
0,15	0,017	0,1572	1,30	1,327	11,813	3,00	7,069	62,910
0,20	0,031	0,2795	1,40	1,539	13,700	3,20	8,042	71,582
0,25	0,049	0,4368	1,50	1,767	15,727	3,50	9,621	85,628

TABLA 6.2. Características de los hilos redondos de cobre para devanados eléctricos. (cont.)

Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m	Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m	Diámetro desnudo, en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Peso, en kg/km o g/m
0,30	0,070	0,6290	1,60	2,011	17,894	3,70	10,75	97,750
0,40	0,125	1,1183	1,70	2,270	20,201	3,80	11,34	103,60
0,50	0,196	1,7475	1,80	2,545	22,647	3,90	11,95	106,35
0,60	0,283	2,5163	1,90	2,835	25,234	4,00	12,57	111,84
0,70	0,385	3,4250	2,00	3,142	27,960	4,50	15,90	141,54
0,80	0,503	4,473	2,20	3,801	33,821	5,00	19,63	174,75
0,90	0,636	5,661	2,30	4,155	36,977	5,50	23,76	211,44
1,00	0,785	6,990	2,40	4,539	40,262	6,00	28,27	251,64
1,05	0,866	7,706	2,50	4,909	43,687	6,50	33,18	295,33
1,10	0,950	8,457	2,60	5,309	47,252	7,00	38,48	342,51
1,15	1,039	9,244	2,70	5,725	50,957	7,50	44,17	393,19
1,20	1,131	10,065	2,80	6,157	54,802	8,00	50,27	447,36

Cuando el diámetro de los hilos va aumentando, el doblado de los mismos, para la confección de las bobinas, se va haciendo más difícil, por lo cual en la práctica se recurre al empleo de varios hilos en paralelo para la confección de las mismas, o sea, se sustituye el hilo grueso requerido por el bobinado por dos o más hilos, más delgados, que en conjunto tengan una sección equivalente. En la tabla 6.3 están reflejadas estas equivalencias de sección, para hilos de uno o más milímetros cuadrados, que pueden ser sustituidos por: dos, tres o cuatro hilos más delgados, que en conjunto tengan la misma sección.

TABLA 6.3. Diámetro que han de tener los hilos, para obtener la misma sección de cobre.

Sección en mm <sup>2</sup>	Diámetro, en mm				Sección en mm <sup>2</sup>	Diámetro, en mm			
	1 hilo	2 hilos	3 hilos	4 hilos		1 hilo	2 hilos	3 hilos	4 hilos
0,785	1,00	0,75	0,60	0,50	9,621	3,50	2,50	2,05	1,75
1,767	1,50	1,10	0,90	0,75	10,75	3,70	2,65	2,15	1,85
3,142	2,00	1,45	1,20	1,00	12,57	4,00	2,85	2,35	2,00
3,801	2,20	1,60	1,30	1,10	13,85	4,20	3,00	2,45	2,10
4,155	2,30	1,65	1,35	1,15	15,90	4,50	3,20	2,60	2,25



TABLA 6.3. Diámetro que han de tener los hilos, para obtener la misma sección de cobre. (cont.)

Sección en mm <sup>2</sup>	Diámetro, en mm				Sección en mm <sup>2</sup>	Diámetro, en mm			
	1 hilo	2 hilos	3 hilos	4 hilos		1 hilo	2 hilos	3 hilos	4 hilos
4,539	2,40	1,70	1,40	1,20	17,34	4,70	3,35	2,75	2,35
4,909	2,50	1,80	1,45	1,25	19,63	5,00	3,60	2,85	2,50
5,309	2,60	1,85	1,55	1,30	23,76	5,50	3,85	3,20	2,75
5,725	2,70	1,95	1,60	1,35	28,27	6,00	4,25	3,45	3,00
6,157	2,80	2,00	1,65	1,40	33,18	6,50	4,55	3,75	3,25
6,605	2,90	2,05	1,70	1,45	38,48	7,00	4,80	4,20	3,50
7,069	3,00	2,15	1,75	1,50	44,17	7,50	5,20	4,35	3,75
8,042	3,20	2,30	1,90	1,60	50,27	8,00	5,70	4,60	4,00

Así por la tabla 6.3 vemos por ejemplo, que cuando para la confección de las bobinas de un devanado necesitemos una sección de hilo de 28,25 mm<sup>2</sup>, podremos emplear para la confección de las mismas cualquiera de las variantes siguientes:

- Un solo hilo de 6 mm de diámetro.
- Dos hilos en paralelo, de 4,25 mm de diámetro.
- Tres hilos en paralelo, de 3,45 mm de diámetro.
- Cuatro hilos en paralelo de 3 mm de diámetro.

La misma tabla 6.3, además de ayudarnos a elegir un conjunto de hilos con una sección equivalente, puede servirnos también para sustituir el hilo que necesitamos para devanar una máquina, pero que no poseemos en ese momento, por varios de diámetro distinto que sí tenemos, y que en conjunto tienen la misma sección.

## 6.2. MATERIALES AISLANTES PARA DEVANADOS

En la ejecución de los devanados eléctricos se suelen emplear muchos tipos de materiales aislantes, definidos por sus características mecánicas y por la temperatura máxima que pueden soportar sin alterarse, pero todos ellos podemos clasificarlos en los tres grupos que analizaremos con detalle a continuación y que son los siguientes:

- Materiales aislantes para conductores.
- Materiales aislantes para ranuras y fases.
- Barnices y resinas de: impregnación, relleno y acabado.

No obstante, antes de su descripción, nos detendremos a analizar lo que la legislación actual denomina “*Clasificación térmica de los materiales aislantes*”, que agrupa a estos en siete apartados, de acuerdo con la temperatura máxima que pueden soportar sin deteriorarse, bajo las condiciones normales en todo trabajo industrial. No obstante, su envejecimiento y duración real en servicio va a depender también de las condiciones particulares de empleo, que pueden variar mucho según cuales sean: las circunstancias ambientales, el tipo de máquina, los ciclos de trabajo, las sobrecargas, etc.

## Clasificación térmica de los materiales aislantes

Atendiendo a lo anteriormente expuesto, los materiales aislantes se clasifican en las siete clases, definidas por las letras: **Y, A, E, B, F, H** y **C**, que vemos en la tabla 6.4. En esta misma tabla se especifica también el tipo de aglomerante o impregnante que llevan los aislantes compuestos, así como su campo de aplicación, referido a los bobinados de máquinas eléctricas.

**TABLA 6.4.** Clasificación térmica de los materiales aislantes, para devanados eléctricos.

Clase y temperatura máx.	Material aislante	Agglomerante o impregnante	Aplicaciones más usuales
<b>Y</b> (90 °C)	- Algodón, seda, papel, rayón, derivados del papel. Plásticos como: cloruro de polivinilo, polietileno y poliamida.	- Ninguno.	- Recubrimiento de conductores y aislado de ranuras y bobinas.
	- Esmaltes de poliestireno.		- Barnices de impregnación.
<b>A</b> (105 °C)	- Algodón, seda, rayón y papel impregnado o sumergido. Poliamida, acetato de celulosa.	- Barnices naturales y sintéticas. Aceite aislante.	- Recubrimiento de conductores y ranuras. Tubos flexibles.
	- Esmaltes de resinas de poliéster.		- Recubrimiento de conductores.
<b>E</b> (120 °C)	- Papel baquelizado, hojas de poliéster reticulado y polietileno, materiales estratificados y modelados con: algodón, papel y resinas, papel Presspan con polietileno.	- Barnices sintéticos, resinas de poliéster reticulado, epoxicas y de fenol-formaldehído.	- Aislamiento de ranuras y fases, recubrimiento de bobinas, cierre de ranuras, piezas de soporte.
	- Esmaltes de resinas de acetato de polivinilo. Fibras de vidrio, etc.		- Recubrimiento de conductores e impregnación de devanados.

TABLA 6.4. Clasificación térmica de los materiales aislantes, para devanados eléctricos. (cont.)

Clase y temperatura máx.	Material aislante	Aglomerante o impregnante	Aplicaciones más usuales
<b>B</b> (130 °C)	- Tejidos de fibra de vidrio y amianto, solos o impregnados. Mica, sola o con soporte de papel.	- Barnices y resinas a base de: epóxidos, melamina, poliéster reticulado. Goma laca.	- Aislamiento de ranuras y bobinas. Separadores de delgas de colector.
	- Esmaltes a base de: poliuretanos y polivinilos. Caucho etileno-propileno. Cintas de fibra de vidrio y mica.		- Recubrimiento de conductores e impregnación de devanados.
<b>F</b> (155 °C)	- Tejidos de fibra de vidrio barnizados. Papeles de mica y amianto. Compuestos basados en poliamida.	- Barnices y resinas a base de: poliéster, poliuretano y epoxicas.	- Recubrimiento de hilos y ranuras. Zunchado de rotores. Cuñas de cierre.
	- Esmaltes y barnices a base de: poliéster modificado, polietileno, poliuretano, poliamida. Resinas epoxi.		- Recubrimiento de conductores e impregnación de devanados.
<b>H</b> (180 °C)	- Tejidos y estratificados de fibra de vidrio, amianto y mica, impregnados o aglomerados con silicona.	- Resinas de silicona.	- Recubrimiento de bobinas y ranuras. Tubos flexibles.
	- Fibras de vidrio y caucho silicona. Esmaltes de silicona, poliéster, poliuretano y poliesterimida.		- Recubrimiento de hilos e impregnación de devanados.
<b>C</b> (>180 °C)	- Mica o amianto y estratificados de papel-mica. Vidrio, cuarzo, porcelana y materiales cerámicos. Esmaltes de poliesterimida o poliamida-imida.	- Resinas de silicona o aglutinantes inorgánicos.	- Aislamiento de ranuras y bobinas. Recubrimiento de conductores. Aisladores y soportes diversos.

## Materiales aislantes para conductores

Los conductores de todos los arrollamientos de una máquina eléctrica han de ir recubiertos por un material aislante, que sea capaz de soportar una tensión y temperatura superiores a la crítica de funcionamiento de la máquina. Actualmente los recubrimientos de conductores más utilizados para la ejecución de devanados eléctricos son los siguientes:

- **Hilos o pletinas recubiertos de algodón o seda.** Una fina capa de hilos de algodón o seda recubre el conductor, que luego ha de ser impregnado convenientemente con un barniz apropiado. Tiene una excelente resistencia mecánica y una buena flexibilidad.

Sus mayores inconvenientes son: su excesivo grosor y su baja clase térmica (**Y** 90 °C, sin impregnación y **A** 105 °C, con impregnación), por lo cual están prácticamente en desuso.

- **Hilos o pletinas esmaltadas.** Están recubiertos de una o dos capas de barniz aislante, de gran elasticidad y dureza, realizados principalmente a base de: poliéster, poliuretano, poliamida y silicona.

Son los más utilizados hoy en día para máquinas de pequeña y mediana potencia, debido a su menor grosor y a sus buenas propiedades térmicas. Dependiendo del tipo de barniz empleado, su clase térmica puede llegar hasta la **C** (>180 °C).

- **Hilos y pletinas recubiertos de alta resistencia térmica.** Son conductores, desnudos o esmaltados, recubiertos de una o más capas a base de cintas de: fibras de vidrio, poliéster o poliamida, y también de mica o amianto, que pueden incluso estar tratados con resinas de silicona y esmaltes de poliéster o de polietileno.

Son poco flexibles y difíciles de manejar, pero su clase térmica puede llegar hasta la **H** (180 °C); empleándose generalmente para máquinas de gran potencia y alta tensión, y también en los devanados de rotores e inducidos.

## **Materiales aislantes para ranuras, bobinas y fases**

Dentro de una misma ranura pueden existir muchos tipos de aislamientos y no solamente atendiendo a la tensión, potencia y temperatura de servicio de la máquina, sino atendiendo también al tipo y la forma de la ranura, al tipo de devanado (de una o dos capas), al tipo de conductor empleado, etc. Resumiendo puede decirse que en el aislamiento de las ranuras y bobinas de un devanado puede ser tan variado como se ve en la figura 6.2.

1. Aislamiento entre conductores o capas de una misma bobina.
2. Aislamiento conjunto de la bobina.
3. Aislamiento entre bobinas, situadas en la misma ranura.
4. Aislamiento de la ranura. Aísla del hierro todo el arrollamiento.
5. Cierre de ranura. Una vez introducidas las bobinas, impide que éstas salgan de la ranura.
6. Impregnación y recubrimiento del devanado. Una vez terminado se impregna de barniz o resina todo el devanado, para mejorar sus cualidades dieléctricas y mecánicas.

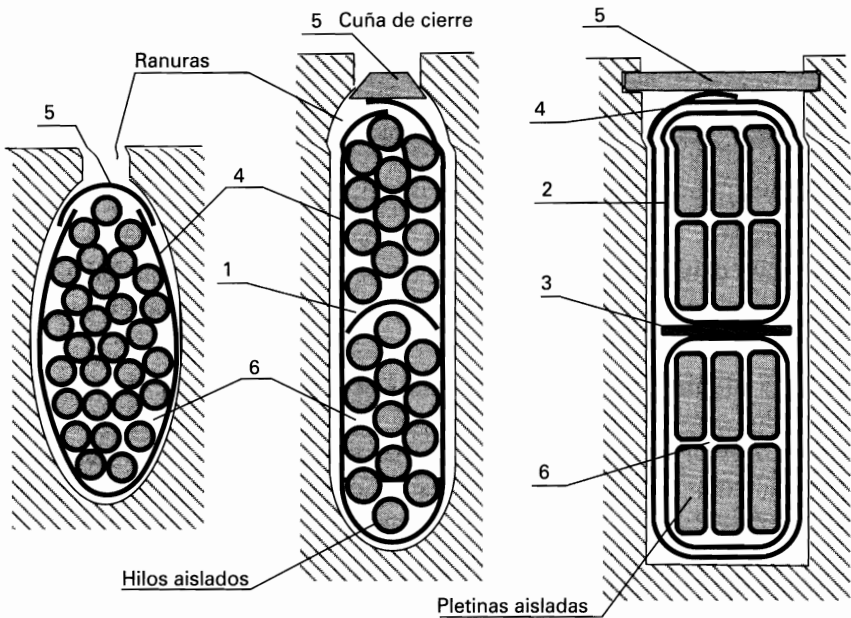


Figura 6.2. Aislamientos de ranuras, bobinas y fases.

En general el aislamiento de las ranuras, las bobinas y los conductores de las fases de salida e interconexión de un devanado eléctrico está formado por: laminados, cintas y tubos aislantes, de distinta clasificación térmica, fabricados principalmente a base de:

- Laminados y estratificados de mica y papel, de algodón y poliéster, de papel Kraff y poliéster, de cartón Presspan y poliéster, etc., con clase térmica **B** (130 °C).
- Laminados y estratificados de poliéster y fibras de Dracón, de poliéster y papel Nomex, y de tejidos de fibra de vidrio impregnados, con clase térmica **F** (155 °C) o **H** (180 °C), dependiendo de la impregnación que lleven.
- Laminados y estratificados de poliamida y fibras de vidrio, que pueden llegar hasta la clase térmica **C** (>180 °C).
- Cintas y tubos de: tejidos de fibra de vidrio, impregnados y sin impregnar, de fibra de vidrio y poliéster, de fibra de vidrio y algodón, etc., que según el material de impregnación utilizado, pueden llegar hasta la clase térmica **C**.
- Cuñas de cierre, que pueden estar construidas de: madera (clase **B**), poliéster (clase **B**), fibra de vidrio con resinas epoxicas (clase **F**), etc.

Los productos laminados y estratificados se fabrican generalmente en forma de hojas, de diferentes tamaños y grosores, que pueden ser cortadas con tijera o cizalla, para posteriormente ser adaptadas a la ranura de la máquina, bien sea en frío, o en el menor de los casos moldeadas en caliente.

Las cintas y los tubos aislantes se fabrican de diferentes anchos y diferentes diámetros, con lo cual se facilita mucho el aislamiento de las bobinas y de los conductores de interconexión y salida de las mismas.

Las cuñas de cierre, por el contrario, suelen fabricarse en tiras de un metro de largo, con diferentes secciones, que puedan ser adaptadas a todo tipo de ranuras.

### **Barnices y resinas de: impregnación, relleno y acabado**

Una vez que se ha realizado el bobinado de una máquina eléctrica, y con el fin de aumentar sus propiedades dieléctricas y mecánicas, deben impregnarse con barnices o resinas apropiadas, de acuerdo con la clase térmica que se le quiere dar a la máquina. Los barnices pueden ir desde la clase térmica **B** hasta la clase térmica **F**, mientras que cierto tipo de resinas pueden llegar hasta la clase térmica **C**. Los barnices, que son generalmente los más utilizados, pueden ser aplicados directamente por goteo o en cubas de vacío, pudiendo ser clasificados en:

- Barnices de secado al aire.
- Barnices de secado al horno.

Los barnices de secado al aire, que suelen estar elaborados a base de resinas sintéticas, se emplean muy poco en el rebobinado de máquinas eléctricas, pero sí en las reparaciones de las mismas, cuando éstas se realizan a pie de obra, también se utilizan para la impregnación de bobinas y conductores en general.

Los barnices de secado al horno, elaborados generalmente a base de resinas: epóxicas, de silicona, poliéster o poliuretano, son los empleados generalmente para la impregnación de toda clase de máquinas eléctricas, una vez que han sido devanadas. Su aplicación suele hacerse en tres fases: primero se seca la máquina previamente devanada en un horno, calentado progresivamente hasta los 110 °C, para quitarle la humedad residual; a continuación, con el devanado a 50 °C o 60 °C, se impregna correctamente, bien sea por goteo, por inmersión o al vacío en un autoclave o máquina apropiada y, por último, se seca y cura el barniz en el horno, durante un tiempo prolongado y a temperaturas que pueden oscilar entre 110 °C y 160 °C, dependiendo todo del tipo de barniz empleado.



# 7

---

---

## CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS DE CORRIENTE CONTINUA

En la práctica, para la construcción de las **máquinas de corriente continua**, pueden emplearse todos los tipos de devanados definidos en el capítulo 5 de esta obra. Por tanto, en este capítulo describiremos el cálculo de todos ellos, seguidos de uno o varios ejemplos prácticos, realizados para motores y dínamos con características muy comunes en este tipo de máquinas. Estos tipos de devanados, que describiremos con detalle a continuación, son los siguientes:

- Bobinados imbricados simples.
- Bobinados imbricados múltiples.
- Bobinados ondulados simples.
- Bobinados ondulados múltiples.

### 7.1. BOBINADOS IMBRICADOS SIMPLES

Los devanados se denominan imbricados, cuando al ejecutarlos, después de haber recorrido una sección inducida, se retrocede por la cara anterior de la armadura o núcleo magnético para iniciar el principio de la sección inducida siguiente. A su vez los devanados imbricados son **simples**, cuando todas sus secciones inducidas están unidas entre sí de forma directa y consecutiva. De ahí que su paso de colector pueda ser  $+1$  o  $-1$ , denominándose respectivamente, *bobinados sin cruzar* o *bobinados cruzados*.

$$\text{Paso de colector} = Y_{col} = Y_1 - Y_2 = \pm 1 \begin{cases} + 1 \text{ bobinado imbricado sin cruzar} \\ - 1 \text{ bobinado imbricado cruzado} \end{cases}$$



Este tipo de devanados tendrá además tantas ramas en paralelo como número de polos tiene la máquina ( $2a = 2p$ ) y su paso resultante siempre vale uno ( $Y = \pm 1$ ). En la figura 7.1 se aprecian mejor todas las características de este tipo de devanados.

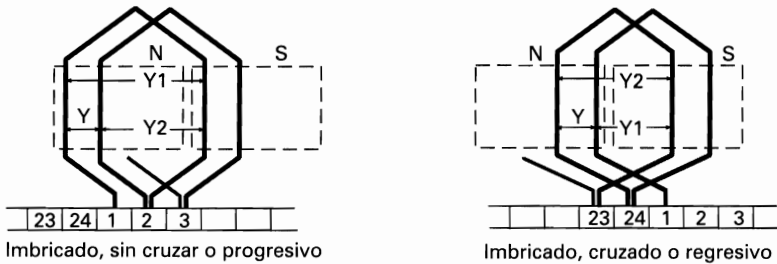


Figura 7.1. Representación esquemática de los devanados imbricados.

### Proceso de cálculo de un devanado imbricado simple

Para proceder al cálculo de este tipo de devanados, deberemos conocer al menos las siguientes características de la máquina:

- Número de polos de la máquina =  $2p$ .
- Número de ranuras de la armadura =  $K$ .
- Uno de los tres valores siguientes: número de secciones inducidas por bobina ( $U$ ), número total de secciones inducidas ( $S$ ) o número de delgas del colector ( $D$ ).

Con estos datos, comenzaremos el cálculo del devanado, comprobando previamente las condiciones de simetría o la posibilidad de ejecución del mismo, que en este caso deben ser: que el número de ranuras de la armadura ( $K$ ) debe ser múltiplo del número de ramas en paralelo ( $2a$ ) y del número de pares de polos ( $p$ ).

$$2a = 2p \quad \text{y por tanto} \quad \frac{2K}{2a} = \frac{K}{a} = \frac{K}{p} = \text{número entero}$$

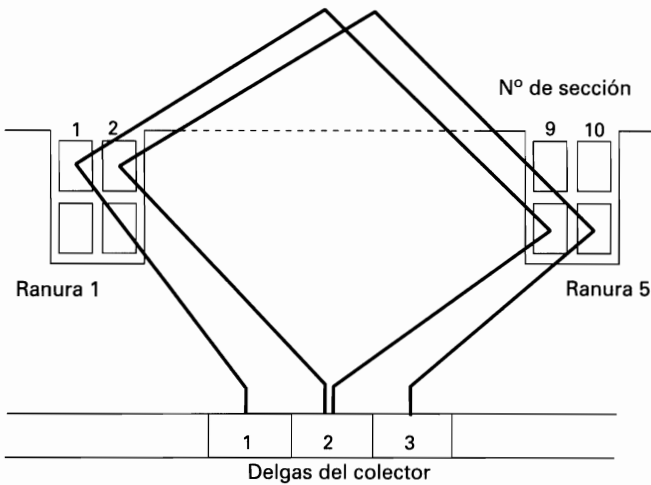
En la mayoría de las máquinas este tipo de bobinados se ejecuta sin cruzar o progresivos y, por tanto, tomando como paso de colector  $Y_{col} = 1$ , calculamos seguidamente:

– *El paso de ranura o ancho de bobina:*  $Y_k = \frac{K}{2p}$ , que se suele acortar si es fraccionario

– **El ancho de sección:**  $Y1 = Yk \cdot U$

– **El paso de conexión:**  $Y2 = Y1 - Y = Y1 - Y_{col} = Y1 \pm 1$ , (se pone +1 si el devanado es sin cruzar y -1 si es cruzado)

Una vez obtenidos todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema del devanado, bien sea completo como el de figura 7.3 o simplificado como el de la figura 7.2. Este último tipo lo suelen utilizar personas con mucha práctica en la ejecución de devanados, de forma tal que solamente se dibujan las dos ranuras donde se aloja una de las bobinas, el número de secciones inducidas que contiene y las delgas a donde van conectados los extremos de dichas secciones.



**Figura 7.2.** Esquema simplificado de un devanado imbricado sin cruzar.

**Ejemplo 7.1.** Dibujar el esquema de un devanado imbricado simple, para el inducido de un motor tetrapolar, que tiene 16 ranuras en su armadura y 32 delgas en el colector.

Por tener doble número de delgas que de ranuras sabemos que cada bobina tiene dos secciones inducidas, ya que  $D = S = K \cdot U = 16 \times 2 = 32$ .

Seguidamente vemos que el devanado será correcto, porque resulta entera la relación siguiente:

$$\frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8 \text{ (número entero)}$$

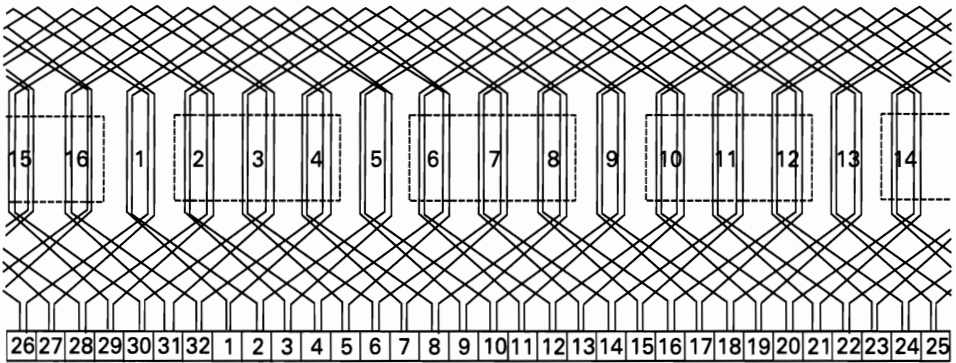
Con los datos del enunciado realizamos ya los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, que se ve en la figura 7.3.

*Paso de colector:  $Y_{col} = 1$  (Por desear un devanado sin cruzar)*

*Paso de ranura o ancho de bobina:  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{16}{4} = 4$  ranuras*

*Ancho de sección:  $Y_l = Y_k \cdot U = 4 \times 2 = 8$  secciones inducidas*

*Paso de conexión:  $Y_2 = Y_l - Y_{col} = 8 - 1 = 7$  secciones inducidas*



**Figura 7.3.** Esquema del devanado imbricado simple, del ejemplo 7.1.

Otro ejemplo nos ayudará a comprender mejor este tipo de devanados.

**Ejemplo 7.2.** Dibujar el esquema de un devanado imbricado simple, para el inducido de una máquina tetrapolar de corriente continua que tiene: 18 ranuras en su armadura y 36 delgas en el colector. Dibujaremos un devanado cruzado y regresivo como ejemplo, aunque no se utiliza mucho.

Por tener doble número de delgas que de ranuras sabemos ya que cada bobina tiene dos secciones inducidas, por que  $D = S = K \cdot U = 18 \times 2 = 36$ .

Seguidamente vemos que el devanado será correcto, ya que resulta entera la relación siguiente:

$$\frac{K}{p} = \frac{18}{2} = 9 \text{ (número entero)}$$

Con los datos del enunciado realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, que se ve en la figura 7.4.

Paso de colector:  $Y_{col} = -1$  (Por desear un devanado cruzado y regresivo)

Paso de ranura o ancho de bobina:  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{18}{4} = 4,5$  ranuras

Por salir el paso fraccionario, tomaremos un **paso de bobina acortado a 4 ranuras**.

Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \times 2 = 8$  secciones inducidas

Paso de conexión:  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 8 - (-1) = 9$  secciones inducidas

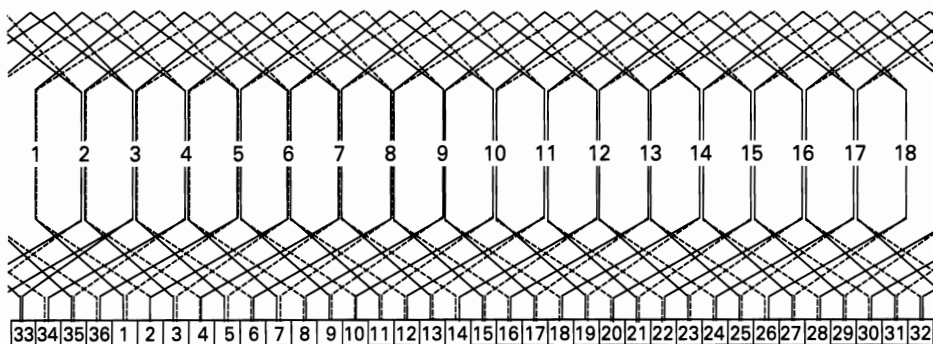


Figura 7.4. Esquema del devanado imbricado simple, del ejemplo 7.2.

## 7.2. BOBINADOS IMBRICADOS MÚLTIPLES

Con el fin de reducir la intensidad que ha de circular por las ramas del devanado de una máquina de corriente continua y mejorar su rendimiento, cuando éstas son de gran potencia y requieren una gran intensidad de corriente, se ejecutan sus devanados de la forma que denominamos *imbricado múltiple*.

Este tipo de devanado se distingue del imbricado simple estudiado anteriormente en que, en los devanados imbricados múltiples es necesario dar varias vueltas alrededor de la armadura para terminar de recorrer todas sus secciones inducidas, mientras que en los devanados imbricados simples quedaban recorridas todas las secciones inducidas al completar una vuelta alrededor de la armadura.

Según cuál sea el número de vueltas que hay que dar alrededor de la armadura, este tipo de devanados recibe el nombre de: *dobles*, si hay que dar dos vueltas, *triples*, si hay que dar tres vueltas, etc.

Sus características constructivas son las reflejadas en la figura 7.5 y que resumimos a continuación.

En este tipo de devanados el paso de colector  $Y_{col}$  dependerá siempre del número de vueltas que haya que dar a la armadura para recorrer todo el devanado. Por tanto, éste podrá ser:

$$\text{Paso de colector : } Y_{col} = Y_1 - Y_2 = \begin{cases} \pm 2 \text{ si es doble} \\ \pm 3 \text{ si es triple} \\ \pm 4 \text{ si es cuádruple} \end{cases}$$

En la práctica podemos decir que casi el único empleado es el devanado imbricado doble y progresivo o sin cruzar, por tanto, con paso de colector:  $Y_{col} = 2$ .

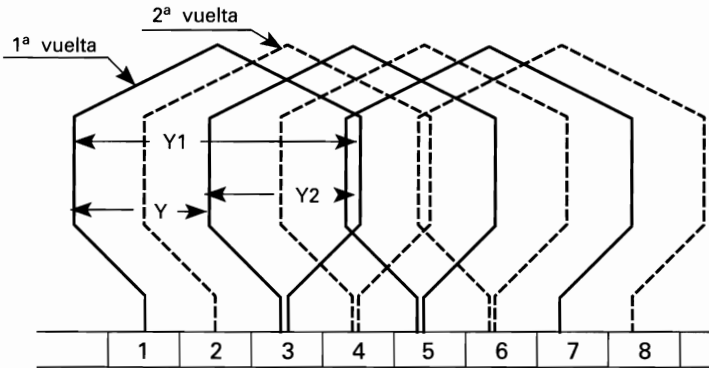


Figura 7.5. Características de un devanado imbricado doble.

Asimismo en este tipo de devanados, no se cumple que su número de ramas en paralelo ( $2a$ ) es igual a su número de polos ( $2p$ ), como ocurre en los devanados imbricados simples, sino que en los devanados imbricados múltiples, el número de ramas en paralelo también dependerá del número de vueltas que haya que dar a la armadura para recorrer todo el devanado, ya que en realidad, cada vuelta que damos al devanado podemos considerarla como un devanado imbricado simple independiente. Por tanto tendremos:

**Número total de ramas en paralelo:  $2a = 2p \cdot (\text{n}^\circ \text{ de devanados simples})$**

Así tendremos:  $2a = 4p$ , para un devanado doble;  $2a = 6p$ , para un devanado triple; etc.

Por lo general, solamente se construyen devanados imbricados dobles, por ser los únicos que pueden darnos una distribución perfectamente simétrica, al coincidir siempre una sección inducida de cada uno de sus dos devanados simples bajo el

mismo campo magnético en cada polo. Por tanto, en la práctica siempre serán el número de ramas en paralelo doble que su número de polos.

## Proceso de cálculo de un devanado imbricado múltiple

Para determinar sus características constructivas o de ejecución, procederemos siempre como se hacía para los devanados imbricados simples, pero teniendo en cuenta los nuevos valores de: paso de colector  $Y_{col}$  y de paso de conexión  $Y_2$ . El primero ya fue mencionado líneas arriba, y el nuevo valor del segundo puede ser:

- **Paso de conexión:**  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = \pm 2$  si el devanado es doble.
- **Paso de conexión**  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = \pm 3$  si el devanado es triple, etc.

Como ya se mencionó, por lo general se ejecutan los devanados sin cruzar y dobles, con lo cual casi siempre tendremos un valor de  $Y_2 = 2$ .

Recordando que un devanado imbricado múltiple equivale a varios devanados simples, y para que pueda ser ejecutado correctamente, cada uno de sus devanados deberá cumplir con las condiciones de simetría exigidas a los devanados imbricados simples. Por tanto, en este tipo de devanados debe cumplirse que el número de ranuras de la armadura debe ser múltiplo del número de pares de polos de la máquina ( $K/p = \text{número entero}$ ).

Una vez obtenidos todos los datos anteriormente mencionados ya se puede dibujar el esquema completo, como es el caso del de las figuras 7.6 y 7.7, que son el resultado de los ejemplos 7.3 y 7.4, que veremos a continuación.

**Ejemplo 7.3.** Dibujar el esquema de un devanado imbricado doble, para el inducido de una máquina tetrapolar de corriente continua, que tiene: 20 ranuras en su armadura y 20 delgas en el colector.

Al tener el mismo número de ranuras que de delgas sabemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida. ( $D = S = K \cdot U = 20 \times 1 = 20$ )

Seguidamente vemos que el devanado será correcto, ya que resulta entera la relación siguiente:

$$\frac{K}{p} = \frac{20}{2} = 10 \text{ (número entero)}$$

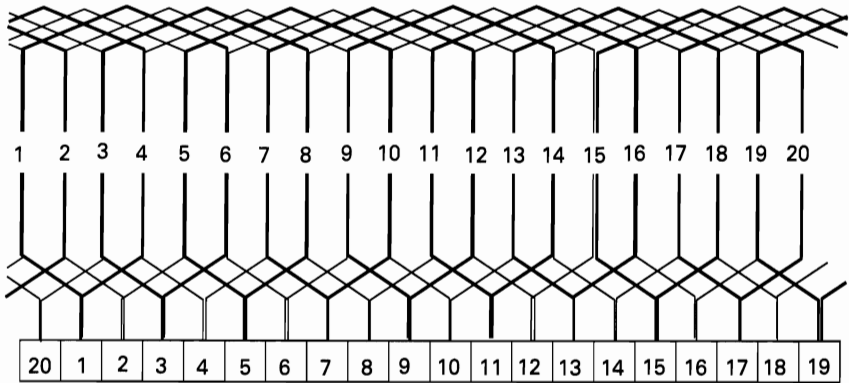
Con los datos del enunciado realizamos ya los cálculos necesarios para el trazo correcto del esquema, que se ve en la figura 7.6.

*Paso de colector:*  $Y_{col} = 2$  (Por ser un devanado doble y quererlo sin cruzar)

$$\text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{20}{4} = 5 \text{ ranuras}$$

$$\text{Ancho de sección: } Y_1 = Y_k \cdot U = 5 \times 1 = 5 \text{ secciones inducidas}$$

$$\text{Paso de conexión: } Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 5 - 2 = 3 \text{ secciones inducidas}$$



**Figura 7.6.** Esquema del devanado imbricado doble, del ejemplo 7.3.

**Ejemplo 7.4.** Dibujar el esquema de un devanado imbricado doble, para el inducido de una máquina tetrapolar de corriente continua, que tiene: 16 ranuras en su armadura y 32 delgas en el colector.

Al tener doble número de ranuras que de delgas sabemos que cada bobina está formada por dos secciones inducidas, ya que ha de cumplirse que:  $D = S = K \cdot U = 16 \times 2 = 32$ .

Seguidamente vemos que el devanado será correcto, porque resulta entera la relación siguiente:

$$\frac{K}{p} = \frac{16}{2} = 8 \text{ (número entero)}$$

Con los datos del enunciado realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, que se ve en la figura 7.7.

*Paso de colector:  $Y_{col} = 2$  (Por ser un devanado doble y quererlo sin cruzar)*

$$\text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{16}{4} = 4 \text{ ranuras}$$

Ancho de sección:  $Y1 = Yk \cdot U = 4 \times 2 = 8$  secciones inducidas

Paso de conexión:  $Y2 = Y1 - Ycol = 8 - 2 = 6$  secciones inducidas

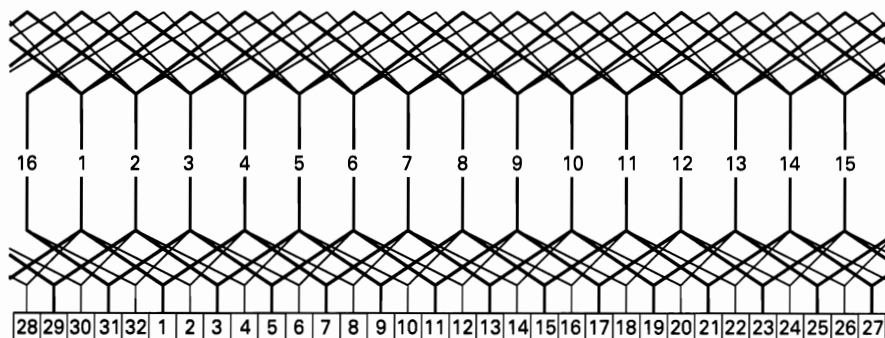


Figura 7.7. Esquema del devanado imbricado doble, del ejemplo 7.4.

### 7.3. BOBINADOS ONDULADOS EN SERIE, SIMPLES O SENCILLOS

Cuando la tensión en las escobillas o bornes de un inducido es muy elevada, lo mejor que podemos hacer es conectar en serie el mayor número posible de bobinas de su devanado, con el fin de reducir la tensión soportada por cada bobina, mejorando así su aislamiento. Si recordamos que en un devanado de inducido se pueden formar como mínimo dos circuitos o ramas en paralelo ( $2a = 2$ ), el resultado es que conectando las bobinas en dos series distintas, se consigue el mayor número de bobinas en serie.

Cuando la totalidad de las bobinas de un devanado de inducido se conectan en dos únicas series o ramas en paralelo, este tipo de devanado se le denomina *ondulado en serie o sencillo*. La diferencia constructiva entre este tipo de devanados y los imbricados, anteriormente descritos, se aprecia claramente en la figura 7.8, en la cual vemos que para un mismo inducido, con devanado tetrapolar: si se ejecuta éste como *imbricado*, solamente quedan conectadas *cuatro bobinas en serie*, lo que da lugar a seis ramas en paralelo ( $2a = 4$ ), mientras que si se ejecuta como *ondulado sencillo*, quedan conectadas *ocho bobinas en serie*, distribuidas en dos ramas en paralelo ( $2a = 2$ ).



Además de los devanados ondulados, denominados en serie o sencillos, existen otros denominados **ondulados múltiples o en series paralelas**, que describiremos más adelante, cuyo inducido puede tener varios pares de ramas en paralelo, ya que están formados por varios devanados ondulados sencillos, tal como ocurre en los devanados imbricados múltiples, con respecto a los imbricados simples. Así obtenemos:

- Devanados ondulados en serie o sencillo:  $2a = 2$
- Devanados ondulados múltiples:  $2a = 2 \cdot (n^\circ \text{ de devanados múltiples})$

Tal como se aprecia en la figura 7.8, un devanado es ondulado cuando, al ir recorriendo la armadura se avanza, a lo largo de su periferia, tanto por su cara anterior como posterior; recorriendo todo el inducido dos o más veces hasta completar la conexión de todas sus bobinas.

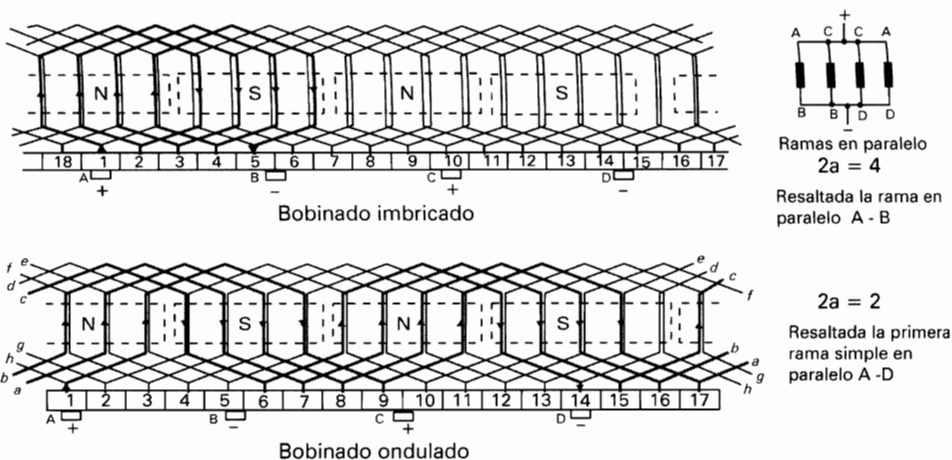


Figura 7.8. Diferencias constructivas entre devanados imbricados y ondulados.

### Proceso de cálculo de un devanado ondulado simple

Aparte de las condiciones de simetría, necesarias para los devanados imbricados, para que se pueda ejecutar correctamente un devanado ondulado sencillo, es muy importante que su número de ranuras (**K**) y de secciones inducidas por bobina (**U**) sean primos (no divisibles) con respecto a su número de pares de polos (**p**).

Estas condiciones nos limitan la ejecución de los devanados ondulados, ya que no pueden ser completos o normales para cualquier número de secciones

inducidas, sino para aquellas que nos den un valor entero para el paso resultante ( $Y = Y1 + Y2 = (S \pm 1) / p$ ). En la tabla 7.1 se aprecian, según cuál sea el número de pares de polos ( $p$ ) de la máquina, las posibles secciones inducidas ( $U$ ) que puede tener cada bobina, para que se pueda obtener correctamente un devanado ondulado simple completo.

**TABLA 7.1.** Secciones inducidas posibles, según el número de polos de la máquina.

Nº de pares de polos ( $p$ )	Nº de secciones inducidas por bobina ( $U$ )
2	1, 3, 5
3	1, 2, 4, 5
4	1, 3, 5
5	1, 2, 3, 4
6	1, 5
7	1, 2, 3, 4, 5
8	1, 3, 5

No obstante, y sobre todo en máquinas pequeñas, cuando no se cumplen todas las condiciones anteriores, pueden llegar a ejecutarse los devanados ondulados, empleando **una sección muerta** o un **cierre artificial**, como más adelante veremos.

Tal como ya se describió en el apartado 5.1, de esta obra, los devanados ondulados también pueden ejecutarse: **cruzados** y **sin cruzar**, de forma tal que su paso de colector pueda tener los siguientes valores:

$$- \text{Paso de colector: } Y_{col} = Y1 + Y2 = \frac{D \pm 1}{p} \begin{cases} + 1 \text{ para devanados cruzados o} \\ \text{progresivos} \\ -1 \text{ para devanados sin cruzar o} \\ \text{regresivo} \end{cases}$$

Seguidamente pasamos a describir, uno a uno, los pasos a seguir para el cálculo y posterior dibujo del esquema de un devanado ondulado simple o sencillo. Para ello y al igual que para los devanados imbricados, debemos partir de los datos conocidos siguientes:

- Número de polos de la máquina ( $2p$ ).
- Número de ranuras del inducido ( $K$ ).
- Uno de los tres valores siguientes:
  - Número de secciones inducidas por bobina ( $U$ ).
  - Número total de secciones inducidas ( $S$ ).
  - Número total de delgas del colector ( $D$ )

A continuación se comprobarán las condiciones de simetría o posibilidad de ejecución, principalmente las de la tabla 7.1, recordando además que en este tipo de devanados el número máximo de ramas en paralelo son dos ( $2a = 2$ ).

Y, por último, pasaremos a calcular los valores siguientes:

– **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2p} = \text{ranuras}$

– **Ancho de sección:**  $Y1 = Yk \cdot U = \text{secciones inducidas}$

– **Paso de colector:**  $Ycol = Y1 + Y2 = \frac{D \pm 1}{p} = \text{delgas}$

– **Paso de conexión:**  $Y2 = Ycol - Y1 = \text{secciones inducidas}$

Una vez obtenidos estos datos, y teniendo en cuenta que hemos de tomar como paso de colector: ( $Ycol = -1$ ) si queremos un devanado sin cruzar o regresivo, y ( $Ycol = 1$ ) si queremos un devanado cruzado o progresivo, ya se puede dibujar el esquema del devanado, como es el caso de las figuras 7.8 y 7.9, que son el resultado de los ejemplos 7.5 y 7.6, que vemos a continuación.

**Ejemplo 7.5.** Dibujar el esquema de un devanado ondulado sencillo, sin cruzar o regresivo, para el inducido de una máquina tetrapolar de corriente continua, que tiene: 17 ranuras en su armadura y 17 delgas en el colector.

Por tener el mismo número de ranuras que de delgas, vemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida ( $U = 1$ ). A su vez al ser  $K = 17$  y  $U = 1$  primos con el número de pares de polos  $p = 2$ , vemos que el devanado es perfectamente ejecutable; mientras que por la tabla 7.1 podemos verificarlo también, al ser posible el empleo de una sola sección inducida por bobina para un devanado de dos pares de polos.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, que son los siguientes:

– **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{17}{4} = 4,25 \text{ ranuras}$

Por salir un paso fraccionario, tomaremos este acortado a 4 ranuras.

– **Ancho de sección:**  $Y1 = Yk \cdot U = 4 \times 1 = 4 \text{ secciones inducidas}$

– **Paso de colector:**  $Ycol = \frac{D - 1}{p} = \frac{17 - 1}{2} = 8 \text{ delgas}$  ( $-1$  por querer el devanado sin cruzar)

– **Paso de conexión:**  $Y2 = Ycol - Y1 = 8 - 4 = 4 \text{ secciones inducidas}$

Con los datos obtenidos dibujamos el esquema, que no es otro que el ondulado representado anteriormente en la figura 7.8.

**Ejemplo 7.6.** Dibujar el esquema de un devanado ondulado simple, regresivo o sin cruzar, para el inducido de una máquina exapolar que tiene: 17 ranuras en su armadura y 34 delgas en su colector.

Por tener doble número de delgas que de ranuras, vemos que cada bobina está formada por dos secciones inducidas ( $U = 2$ ). A su vez al ser  $K = 17$  y  $U = 2$  primos con el número de pares de polos  $p = 3$ , vemos que el devanado es perfectamente ejecutable; mientras que por la tabla 7.1 lo podemos verificar también, al ser posible el empleo de dos secciones inducidas por bobina para un devanado de tres pares de polos.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, que son los siguientes:

- **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{17}{6} = 2,8 \text{ ranuras}$

Por salir un paso fraccionario, tomaremos este acortado a 2 ranuras.

- **Ancho de sección:**  $Y_1 = Y_k \cdot U = 2 \times 2 = 4 \text{ secciones inducidas}$

- **Paso de colector:**  $Y_{col} = \frac{D-1}{p} = \frac{34-1}{3} = 11 \text{ delgas } (-1 \text{ por querer el devanado sin cruzar})$

- **Paso de conexión:**  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 11 - 4 = 7 \text{ secciones inducidas}$

Con los datos obtenidos dibujamos el esquema, que no es otro que el ondulado representado en la figura 7.9.

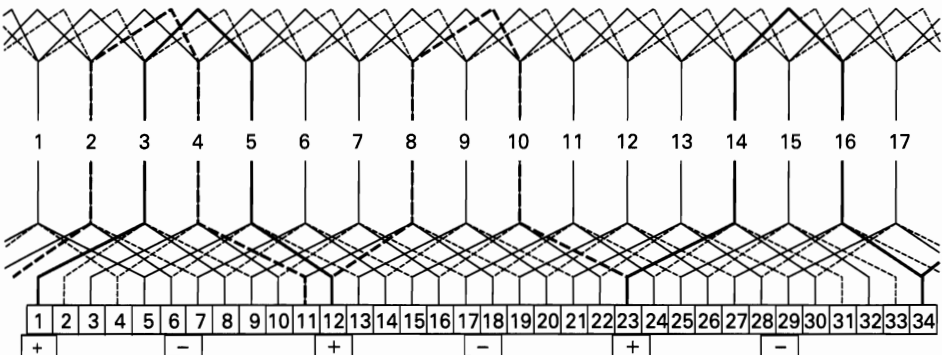


Figura 7.9. Esquema del devanado ondulado simple, del ejemplo 7.6.

Al seguir el esquema de la figura 7.9 puede parecer que los avances del devanado son distintos, pero recordamos aquí que esto es debido a que el paso de ranura  $Y_k$  se expresa en ranuras y en este caso está acortado, mientras que el paso de conexión  $Y_2$  se expresa en secciones inducidas, y su avance siempre es el mismo.

## Devanados ondulados con una sección muerta

Cuando el número de ranuras  $K$  o el número de secciones inducidas por bobina  $U$ , ya sea por separado o las dos a la vez, no sean primos con el número de pares de polos  $p$ , se puede llegar a ejecutar el devanado, **suprimiendo una sección inducida y una delga del colector**, con lo cual tampoco son múltiplos el número de delgas útiles  $D$  y el número total de secciones  $S$ , tal como se aprecia en la figura 7.10. Con la eliminación de una sección inducida se consigue que el total de secciones inducidas  $S$  y de delgas  $D$  reales ya sean primos con el número de pares de polos  $p$  y, por tanto, pueda ejecutarse el devanado como si de un ondulado simple y completo se tratara. La sección eliminada recibe el nombre de **sección muerta**.

Por tanto, en estos casos, cuando se realicen los cálculos para poder realizar el esquema del devanado, hemos de tener en cuenta que el número de delgas  $D$  o el total de secciones inducidas  $S$ , hemos de tomarlo disminuido en una unidad.

$$- \textit{Devanados ondulados con una sección muerta: } D = S = (K \cdot U) - 1$$

Aunque este tipo de devanados se usa con frecuencia, sobretodo para máquinas pequeñas, no es recomendable su uso, ya que presentan problemas de conmutación y consecuentemente aumentan las chispas en el colector.

A continuación vemos los cálculos y el esquema correspondiente a uno de estos devanados, por medio del ejemplo 7.7 y la figura 7.10.

**Ejemplo 7.7.** Dibujar el esquema de un devanado ondulado simple, progresivo o cruzado, para el inducido de una máquina exapolar que tiene: 18 ranuras en su armadura, dos secciones inducidas por bobina y 35 delgas en su colector.

Vemos que ni el número de ranuras  $K = 18$  ni el número de secciones inducidas  $U = 2$  son primos con el número de pares de polos  $p = 3$  y, por tanto, el devanado no se puede ejecutar completo, **debiendo de recurrir al empleo de una sección muerta**.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema, teniendo en cuenta que para los mismos hemos de tomar:  $D = S = (K \cdot U) - 1 = 35$ .

- Paso de ranura o ancho de bobina:  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{18}{6} = 3 \text{ ranuras}$

- Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 3 \times 2 = 6 \text{ secciones inducidas}$

- Paso de colector:  $Y_{col} = \frac{D+1}{p} = \frac{35+1}{3} = 12 \text{ delgas (+ 1 por querer el devanado cruzado)}$

- Paso de conexión:  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 12 - 6 = 6 \text{ secciones inducidas}$

Con los datos obtenidos dibujamos el esquema, representado en la figura 7.10.

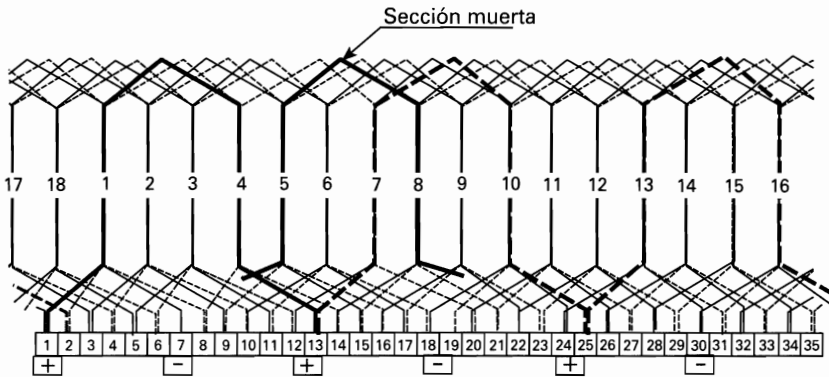


Figura 7.10. Esquema del devanado ondulado simple, con una sección muerta, del ejemplo 7.7.

## Devanados ondulados con cierre artificial

Algunas veces, aunque nunca es recomendable, puede llegar a ocurrir que un inducido tenga un número de delgas **D**, que no sea primo con el número de pares de polos **p** y, por tanto, tampoco el número de ranuras **K** y el número de secciones inducidas **U** serán primos del número de pares de polos, con lo cual no será posible la ejecución de un devanado ondulado normal. Si a pesar de todo esto nos interesa realizar un devanado ondulado simple, para poder realizarlo no queda más remedio que ejecutar el devanado con lo que se denomina **cierre artificial**.

Un devanado ondulado con cierre artificial no es más que una variante del devanado ondulado con una sección muerta. La diferencia estriba en que al tener el colector una delga más de las necesarias para ejecutarlo como devanado ondulado normal, debemos incluir en él la sección que en otro caso tendría que ser muerta. En otras palabras, es como si un devanado normal tuviera una sección inducida de más, que fuera necesario conectar al colector.

La sección inducida que hemos de cerrar artificialmente no puede ser una cualquiera sino que ésta ha de ser una, por el lado del colector, contigua a la que en otro caso debería ser sección muerta. Con esto se consigue que dicha sección quede intercalada al devanado entre dos vueltas consecutivas del mismo, teniendo el devanado en esta vuelta una sección menos, que ha sido avanzada por el cierre artificial.

En este tipo de devanados ha de cumplirse que  $D = S = K \cdot U$ , al igual que en los ondulados normales. Además se ejecutarán siempre sin cruzar o regresivos, con lo cual ha de cumplirse para el paso de colector :

$$- \text{Paso de colector normal: } Y_{col} = \frac{(D - 1) - 1}{p} = \text{delgas}$$

Éste es el llamado **paso de colector normal**, ya que cuando en el paso de colector está incluida la sección que tiene el cierre artificial, su valor tiene una unidad más que la calculada. En este último caso se le denomina **paso de colector alargado o anormal**.

De lo anteriormente expresado para el paso de colector se desprende que también tiene que haber dos pasos de conexión; uno que llamaremos normal y otro una unidad mayor que denominaremos anormal o alargado:

$$- \text{Paso de conexión normal: } Y_2 = Y_{col} - Y_1 = \text{secciones inducidas}$$

$$- \text{Paso de conexión alargado: } Y_2 = (Y_{col} - Y_1) + 1 = \text{secciones inducidas}$$

A continuación, por medio del ejemplo 7.8 y su esquema correspondiente (figura 7.11), terminaremos con este tema, concerniente a los devanados ondulados con cierre artificial.

**Ejemplo 7.8.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado simple, para el inducido de una máquina tetrapolar que tiene: 12 ranuras en su armadura y 24 delgas en su colector.

Por tener doble número de delgas que de ranuras, vemos que cada bobina está formada por dos secciones inducidas ( $U = 2$ ). A su vez vemos que ni  $K = 12$  ni  $U = 2$  son primos con el número de pares de polos  $p = 2$  y, por tanto, el devanado no se puede ejecutar completo, debiendo de recurrir al empleo de una sección muerta, pero como el colector tiene 24 delgas, para no prescindir de ninguna, lo mejor es **ejecutar el devanado con cierre artificial**.

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{12}{4} = 3 \text{ ranuras}$$

– **Ancho de sección:**  $Y1 = Yk \cdot U = 3 \times 2 = 6$  secciones inducidas

– **Paso normal de colector:**  $Ycol = \frac{(D - 1) - 1}{p} = \frac{(24 - 1) - 1}{2} = 11$  delgas

El paso de colector alargado o anormal valdrá una unidad más, o sea, 12 delgas, que utilizaremos para los pasos anteriores al cierre artificial, del esquema.

– **Paso normal de conexión:**  $Y2 = Ycol - Y1 = 11 - 6 = 5$  secciones inducidas

El paso de conexión anormal o alargado tiene una unidad más, o sea, 6 secciones inducidas, con este paso de conexión realizamos los avances del esquema antes del cierre artificial. El esquema es el representado en la figura 7.11.

La sección destacada en el esquema sería la equivalente a la sección muerta, que ahora se ha incluido y completado con el cierre artificial.

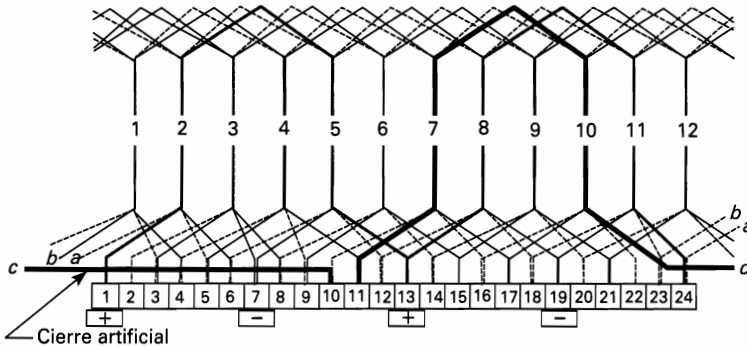


Figura 7.11. Esquema del devanado ondulado simple, con cierre artificial, correspondiente al ejemplo 7.8.

## 7.4. BOBINADOS ONDULADOS MÚLTIPLES

Aunque son poco empleados, debido a su deficiente conmutación, los **devanados ondulados múltiples, también llamados en series paralelas**, suelen utilizarse para reducir la sección de los conductores, cuando las corrientes que circularían por las bobinas de un devanado ondulado simple fueran muy intensas, lo cual conllevaría al empleo de barras o pletinas conductoras muy gruesas y poco manejables, reduciéndose de esta forma la sección de dichos conductores y facilitando así la construcción de las bobinas.

En la práctica, los devanados ondulados múltiples están formados por varios devanados ondulados simples, ejecutados sobre un mismo inducido. Este tipo de devanados, al igual que ocurre con los imbricados múltiples, pueden ser: dobles, triples, etc.,



según que después de la primera vuelta del devanado se vayan dejando libres: una sección inducida si son dobles, dos secciones si son triples, etc. Consecuentemente también se dejará libre el mismo número de delgas del colector para ser ocupadas por las secciones inducidas dejadas libres, en las vueltas siguientes del devanado.

En este tipo de devanados el número de ramas en paralelo **2a** será igual al doble del número de devanados simples que lo formen:

- **Devanado ondulado doble:**  $2a = 2 \times 2 = 4$  ramas en paralelo
- **Devanado ondulado triple:**  $2a = 2 \times 3 = 6$  ramas en paralelo
- Etc.

En consecuencia, si llamamos (**a**) al número de bobinados simples o al número de secciones inducidas que separan el final de una vuelta del principio de la siguiente, para los devanados ondulados múltiples tendremos un paso de colector de:

$$- \text{Paso de colector: } Y_{col} = \frac{D \pm a}{p} \begin{cases} + a, & \text{para un devanado cruzado} \\ - a, & \text{para un devanado sin cruzar} \end{cases}$$

En este tipo de devanados, para que sean perfectamente ejecutables, debe cumplirse la condición de que el número de pares de polos de la máquina (**p**) sea múltiplo exacto del número de devanados simples (**a**), lo que conlleva a que sean primos entre sí: (**p/a**) y **U**, con la finalidad de que sean iguales las **f.e.m** generadas en cada una de sus ramas simples, eliminando así las corrientes internas de compensación entre ellas. Esto implica que también han de ser perfectamente divisibles entre sí, dando por resultado un número entero, las relaciones siguientes: **S/a**, **D/a**, **K/a** y **2p/a**. La tabla 7.2 nos resume las principales condiciones que ha de tener uno de estos devanados, para que sea perfectamente ejecutable.

**TABLA 7.2.** Relaciones necesarias para la ejecución de devanados ondulados múltiples.

Pares de polos (p)	Pares de ramas (a)	Relación (p/a)	Secciones por bobina (U)
2	2	1	1, 2, 3, 4
3	3	1	1, 2, 3, 4
4	2	2	1, 3, 5
	4	1	1, 2, 3, 4
6	2	3	1, 2, 4, 5
	3	2	1, 3, 5
8	2	4	1, 3, 5
	4	2	1, 3, 5

## Proceso de cálculo de un devanado ondulado múltiple

El proceso de cálculo, aparte de las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución específicas de este tipo de devanados, es similar al realizado para los tipos de devanados anteriormente descritos, principalmente para los ondulosos simples. Para ello partiremos siempre de los datos conocidos siguientes:

- Número de polos de la máquina:  $2p$
- Número de ranuras del inducido:  $K$
- Número de devanados simples:  $a = 2a/2$
- Uno de los tres valores siguientes:  $U, S, D$

Primeramente verificamos que se cumplen las condiciones de simetría necesarias para la correcta ejecución del devanado, principalmente las relacionadas en la tabla 7.2; pasando seguidamente a calcular:

- *El ancho de bobina o paso de ranura:*  $Y_k = \frac{K}{2p} = \text{ranuras}$
- *El ancho de sección:*  $Y_1 = Y_k \cdot U = \text{secciones inducidas}$
- *El paso de colector:*  $Y_{col} = \frac{D \pm a}{p} = \text{delgas}$
- *El paso de conexión:*  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = \text{secciones inducidas}$

Una vez obtenidos estos valores, y recordando que para el paso de colector tomaremos ( $-a$ ) si queremos un devanado sin cruzar y ( $+a$ ) si lo queremos cruzado, ya se puede dibujar el esquema completo, como es el caso de la figura 7.12, correspondiente al ejemplo 7.9 que vemos a continuación.

**Ejemplo 7.9.** Dibujar el esquema de un devanado ondulado doble, sin cruzar, para el inducido de una máquina tetrapolar, que tiene 18 ranuras y 18 delgas en su colector.

Al tener el mismo número de ranuras que de delgas, sabemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida ( $D = S = K \cdot U = 18$ ).

A continuación verificamos la correcta ejecución del devanado, al cumplirse las relaciones siguientes y las condiciones de la tabla 7.2.

*Condiciones de simetría:*  $\frac{K}{a} = \frac{S}{a} = \frac{D}{a} = \frac{K \cdot U}{a} = \frac{18 \times 1}{2} = 9 =$   
número entero

*Y también:*  $\frac{2p}{a} = \frac{4}{2} = 2 = \text{número entero}$

Por la tabla 7.2 también vemos que la ejecución es correcta, al cumplirse:  $p = 2$ ,  $a = 2$ ,  $p/a = 1$ ,  $U = 1$ .

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

– **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{18}{4} = 4,5 \text{ ranuras}$

Al ser fraccionario el resultado tomaremos un paso acortado:  **$Y_k = 4$**

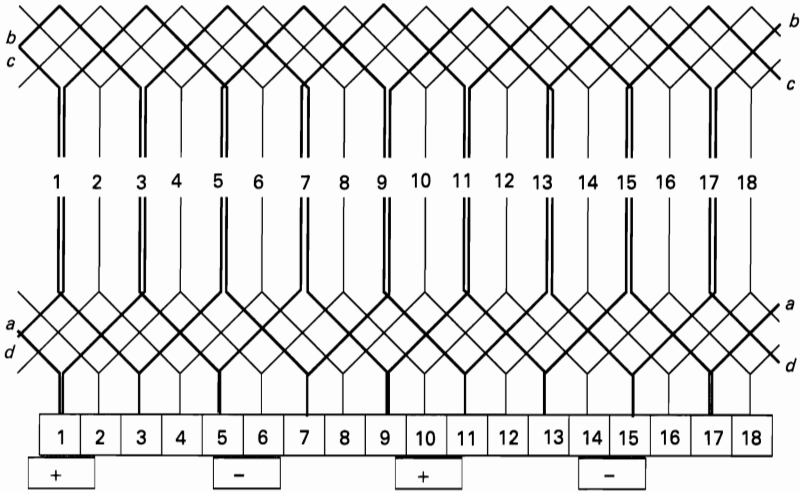
– **Ancho de sección:**  $Y_1 = Y_k \cdot U = 4 \times 1 = 4 \text{ secciones inducidas}$

Como deseamos un devanado sin cruzar, tomamos (**-a**) para el paso de colector

– **Paso de colector:**  $Y_{col} = \frac{(D-a)}{p} = \frac{(18-2)}{2} = 8 \text{ delgas}$

– **Paso de conexión:**  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 8 - 4 = 4 \text{ secciones inducidas}$

Con estos datos realizamos ya el esquema completo, que es el representado en la figura 7.12.



**Figura 7.12.** Esquema del devanado ondulado doble, del ejemplo 7.9.

Terminaremos el estudio de los devanados ondulados múltiples con el nuevo ejemplo 7.10 y el dibujo de su correspondiente esquema, en la figura 7.13.

**Ejemplo 7.10.** Dibujar el esquema de un devanado ondulado triple, sin cruzar, para el inducido de una dínamo exapolar, que tiene 36 ranuras y 36 delgas en su colector.

Al tener el mismo número de ranuras que de delgas, sabemos que cada bobina está formada por una sola sección inducida ( $D = S = K \cdot U = 36$ ).

A continuación verificamos que el devanado es perfectamente ejecutable, al cumplirse las relaciones siguientes y las condiciones de la tabla 7.2.

Condiciones de simetría:  $\frac{K}{a} = \frac{S}{a} = \frac{D}{a} = \frac{K \cdot U}{a} = \frac{36 \times 1}{3} = 12 = \text{número entero}$

Y también:  $\frac{2p}{a} = \frac{6}{3} = 2 = \text{número entero}$

Por la tabla también vemos que la ejecución es correcta, al cumplirse:  $p = 3$ ,  $a = 3$ ,  $p/a = 1$ ,  $U = 1$

Seguidamente realizamos los cálculos necesarios para el trazado correcto del esquema.

- Paso de ranura o ancho de bobina:  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \text{ ranuras}$

- Ancho de sección:  $Y_1 = Y_k \cdot U = 6 \times 1 = 6 \text{ secciones inducidas}$

Como deseamos un devanado sin cruzar, tomamos (-a) para el paso de colector.

- Paso de colector:  $Y_{col} = \frac{(D - a)}{p} = \frac{(36 - 3)}{3} = 11 \text{ delgas}$

- Paso de conexión:  $Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 11 - 6 = 5 \text{ secciones inducidas}$

Con estos datos realizamos ya el esquema completo, que es el representado en la figura 7.13.

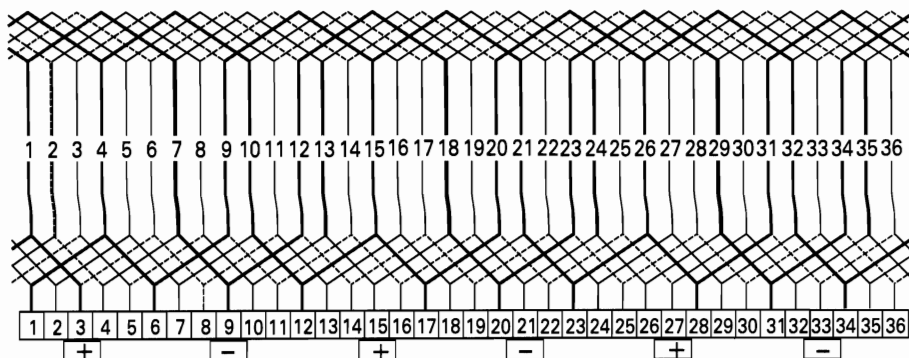


Figura 7.13 . Esquema del devanado ondulado triple, del ejemplo 7.10.

## Resumen de los devanados ondulados de corriente continua

Seguidamente, y como compendio de los dos apartados anteriores, se resumen las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución, estudiadas anteriormente, para todo tipo de devanado ondulado:

- El número de ranuras  $K$  y el de secciones inducidas  $U$  son primos (no divisibles) respecto del número de pares de polos  $p$ . Se puede ejecutar un *devanado ondulado simple normal*.
- El número de ranuras  $K$  y el número de secciones inducidas  $U$ , ya sean los dos a la vez o uno solo, no son primos del número de pares de polos  $p$ . Se puede ejecutar un *devanado ondulado simple con una sección muerta*.
- El número de ranuras  $K$ , el de secciones inducidas  $U$  y el de delgas del colector  $D$  no son primos del número de pares de polos  $p$ . Se puede ejecutar un *devanado ondulado simple con cierre artificial*.
- Las relaciones del número de pares de polos  $p$  y del número de ranuras  $K$  con el número de devanados simples  $a$  son múltiplos exactos ( $p/a$  y  $K/a$  igual a número entero). Se puede ejecutar un *devanado ondulado múltiple o en series paralelas*.

## 7.5. CONEXIONES EQUIPOTENCIALES, PARA DEVANADOS DE CORRIENTE CONTINUA

Aparte de las condiciones de simetría o de posibilidad de ejecución, expuestas en los apartados anteriores, los devanados para dínamos de corriente continua deben cumplir otras dos condiciones muy importantes, como son:

- Que las fuerzas electromotrices (**f.e.m.**) totales, generadas en los distintos circuitos en paralelo, deben ser iguales en todos ellos, para que no existan corrientes internas de circulación, entre sus distintas ramas, que aumenten el calentamiento y las pérdidas de potencia de la máquina.
- Que las resistencias internas de todos sus circuitos en paralelo sean completamente iguales, para que la carga se distribuya por igual en todas las ramas en paralelo, evitando así calentamientos excesivos en determinadas bobinas.

Para que puedan cumplirse las dos condiciones anteriores es preciso que en todo devanado, ya sea imbricado u ondulado, sencillo o múltiple, se cumplan también escrupulosamente las condiciones siguientes:

- Que todas las ramas en paralelo, que conforman el devanado, tengan el mismo número de lados activos.

- Que todas las bobinas tengan el mismo número de secciones inducidas y éstas el mismo número de espiras cada una.
- Que todas las bobinas tengan exactamente igual longitud en sus lados activos e igual longitud total de conductor. Para ello deben ejecutarse todas sobre un mismo molde.

Aun cumpliéndose todas estas condiciones se observa, sobretudo en las máquinas de mediana y gran potencia, que las **f.e.m.** generadas en las distintas ramas en paralelo de un devanado son desiguales, debido a que los flujos de los distintos circuitos magnéticos no son exactamente iguales, debido a alguna de las causas siguientes:

- Existen pequeñas diferencias en el entrehierro, entre las diferentes masas polares y el inducido, debido a un defecto mecánico: bien sea del inductor, del inducido o de los cojinetes de la máquina.
- Existen pequeñas diferencias entre la reluctancia de sus circuitos magnéticos, debido al empleo de chapas magnéticas de diferentes calidades o bien con porosidades o defectos de fabricación significativos.
- Las **f.e.m.** de los distintos circuitos de excitación de la máquina no son iguales en todos sus polos, debido sobre todo a que: las espiras no son iguales en todas las bobinas, existen espiras en cortocircuito en alguna de ellas, etc.

## Conexiones equipotenciales de primera clase

Debido a todo lo anteriormente expuesto, para que sean idénticas las **f.e.m.** en todas las ramas en paralelo, sobretudo en las máquinas de mediana y gran potencia, es necesario dotar a los devanados de inducido de las denominadas **conexiones equipotenciales**, que como su propio nombre indica han de unir puntos del devanado que teóricamente deberían tener igual potencial eléctrico. Estos puntos equipotenciales se corresponden con las bobinas o secciones inducidas que, en todo momento, ocupen posiciones relativas exactamente iguales bajo polos del mismo nombre, o sea separadas entre sí un doble paso polar, tal como se ve en los dibujos de la figura 7.14.

Según se aprecia en la figura 7.14, los puntos o ranuras **A**, **A'**, **A''** y **A'''**, por ejemplo, ocuparán siempre, entre sí, la misma posición relativa, ya sea bajo polos norte o polos sur, durante todo el giro del inducido. Por tanto, serán siempre puntos equipotenciales que pueden ser conectados entre sí. De igual forma todas las ranuras o secciones inducidas, que ocupen posiciones similares a las del ejemplo, son susceptibles de ser unidas entre sí con conexiones equipotenciales.

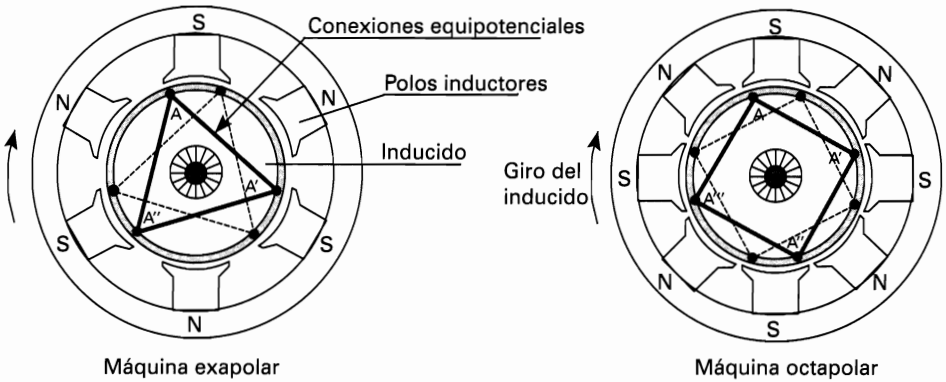


Figura 7.14. Posición correcta de las conexiones equipotenciales de 1ª clase.

Con las conexiones equipotenciales, esquematizadas en la figura 7.14 y denominadas **conexiones equipotenciales de primera clase**, se consigue que de existir corrientes internas de compensación, entre las diferentes ramas en paralelo de un devanado, éstas se cierran a través de dichas conexiones, sin pasar por las escobillas, para que de esta forma las corrientes y chispas elevadas no las deterioren prematuramente. Si la máquina no estuviera descompensada, debido a su esmerada construcción, ningún daño pueden hacerle las conexiones equipotenciales, ya que éstas se colocan lo más cortas posibles y se fabrican de una gran sección, para que la pérdida de potencia que puedan originar en la máquina sea inapreciable.

Las conexiones equipotenciales se colocan en las cabezas de las bobinas, ya sea por la parte del colector o por su parte posterior, conectadas a las secciones inducidas correspondientes. En la práctica suelen colocarse:

- Soldadas a las delgas del colector, por lo general en la parte interna de las mismas. Este sistema suele emplearse cuando las bobinas están realizadas con hilo y las delgas del colector son suficientemente gruesas.
- Conectadas a los casquillos posteriores que completan las secciones inducidas, cuando el devanado está ejecutado con pletinas y con una única espira por sección inducida generalmente.

**Los devanados ondulados simple** o sencillos no necesitan conexiones equipotenciales, debido a su particular constitución de poseer siempre dos únicas ramas en paralelo que, a su vez, podrían tener solamente dos escobillas, una de entrada y

otra de salida, con lo cual no puede existir entre ellas corriente alguna de compensación interna. En general, siempre que el devanado no tenga más de dos ramas en paralelo, no necesita conexiones equipotenciales. Por tal motivo, tampoco las necesitan los devanados imbricados simples bipolares.

## Número y paso de las conexiones equipotenciales, de primera clase

Dado que este tipo de conexiones equipotenciales deben unir puntos del devanado con igual potencial, situados bajo los distintos circuitos magnéticos o polos inductores de la máquina, por la figura 7.14 vemos que dichos puntos son los que en todo momento se hallan situados en posición homóloga bajo polos inductores del mismo nombre.

Así en dicha figura se aprecia que en una máquina tetrapolar los puntos equipotenciales existirán en grupos de dos, en la exapolar en grupos de tres, en la octapolar en grupos de cuatro, etc. Con todo esto es fácil deducir que solamente se pueden unir, mediante una conexión equipotencial, tantos puntos como pares de polos ( $p$ ) tiene la máquina.

En la práctica se ha comprobado que no es necesario unir todas las secciones inducidas, mediante conexiones equipotenciales y, por tanto, se suele unir, como máximo, una sola sección inducida por bobina o ranura. Como cada conexión equipotencial ha de unir tantos puntos como pares de polos, el número total de conexiones equipotenciales ( $Neq$ ) de un devanado será:

$$\text{Número de conexiones equipotenciales: } Neq = \frac{K}{p}$$

Y su paso de conexión, según se realice sobre delgas o por la parte posterior de las bobinas, se puede obtener con alguna de las expresiones siguientes:

$$\text{Para devanados imbricados: } Yeq = \frac{K}{p} = \frac{D}{a} = \frac{S}{a} = \text{ranuras, delgas o secciones}$$

$$\text{Para devanados ondulados múltiples: } Yeq = \frac{K}{a} = \text{ranuras}$$

A continuación y para terminar este tema, vemos tres ejemplos de devanados de inducido provistos de conexiones equipotenciales de primera clase, dos ejecutados sobre las cabezas posteriores de las bobinas (7.15 y 7.16) y el otro ejecutado por delante, sobre las propias delgas del colector (7.17).



$N_{eq} = K/p = 18/2 = 9$  conexiones equipotenciales

$Y_{eq} = K/p = 18/2 = 9$  ranuras

Conexiones equipotenciales de 1ª clase

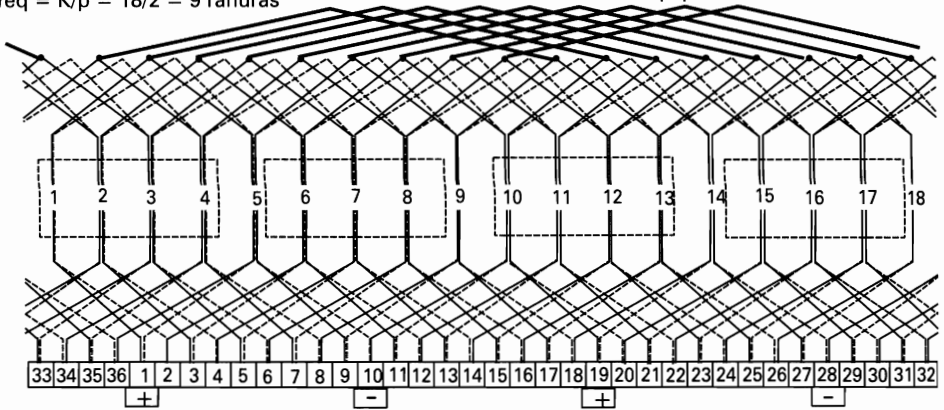


Figura 7.15. Esquema del devanado imbricado simple tetrapolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las cabezas posteriores de las bobinas.

$N_{eq} = K/p = 36/3 = 12$  conexiones

$Y_{eq} = K/a = 36/3 = 12$  ranuras

Conexiones equipotenciales de 1ª clase (dibujadas la tercera parte)

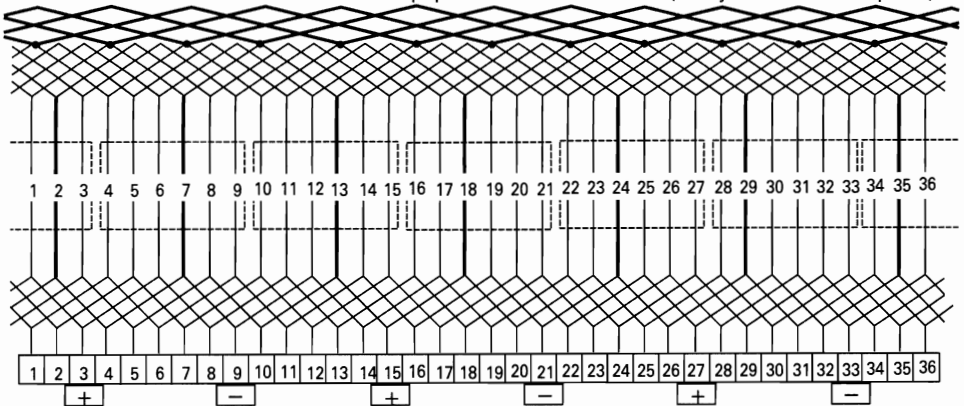
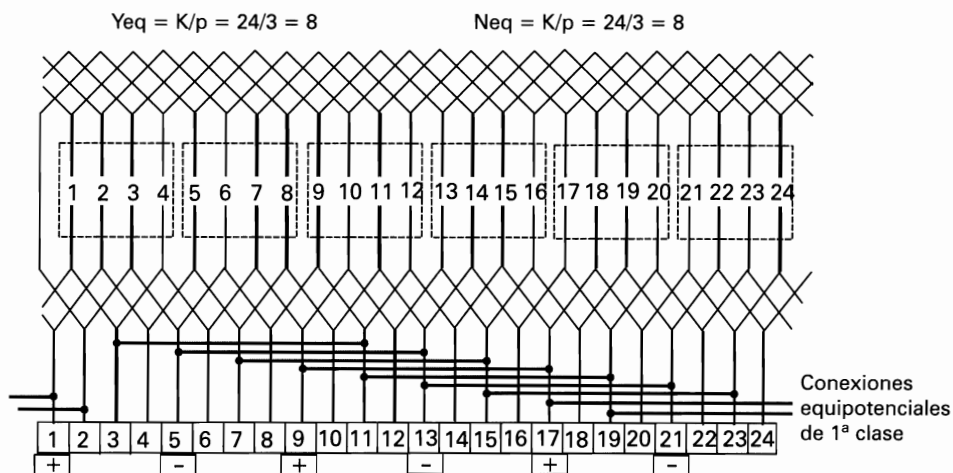


Figura 7.16. Esquema del devanado ondulado triple, expolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las cabezas posteriores de las bobinas.



**Figura 7.17.** Esquema del devanado imbricado simple exapolar, con conexiones equipotenciales de primera clase, sobre las delgas del colector.

### Conexiones equipotenciales de segunda clase

Además de las conexiones equipotenciales de primera clase, en los devanados múltiples de máquinas de mediana o gran potencia, ya sean imbricados u ondulados, deben colocarse otras denominadas **conexiones equipotenciales de segunda clase**. Estas conexiones han de unir entre sí los diferentes devanados simples, que componen el devanado múltiple, con el fin de compensar también las **f.e.m.** de los distintos devanados, evitando de ese modo que a través de las escobillas circulen grandes corrientes de compensación interna. Este tipo de conexiones equipotenciales también son muy importantes ya que, como este tipo de circuitos suele ser recorrido por corrientes muy altas, podrían originar caídas de tensión importantes, muy desiguales entre las ramas o los circuitos simples en paralelo del devanado.

Hay que tener muy presente también que para poder colocar en un devanado múltiple este tipo de conexiones, **ha de poseer un número par de secciones inducidas por bobina**, con el fin de que las secciones inducidas de distinta rama conectadas entre sí, pertenezcan a la misma ranura y estén sometidas en todo momento al mismo flujo magnético de los polos inductores ya que, en caso contrario, no serían totalmente equipotenciales.

Las conexiones equipotenciales de **segunda clase** se colocan, por lo general, en las cabezas posteriores de las bobinas, conectando entre sí las secciones inducidas de una misma bobina (ver figuras 7.18 y 7.19) y, aunque en los esquemas de las figuras se han dibujado todas las conexiones equipotenciales posibles, en la prácti-

ca, al igual que ocurría con las de primera clase, tampoco es necesario colocar todas las conexiones equipotenciales de segunda clase. Cuando el número de ramas en paralelo o secciones inducidas por bobina es muy elevado, basta con repartir algunas de ellas, simétricamente distribuidas por la periferia del inducido.

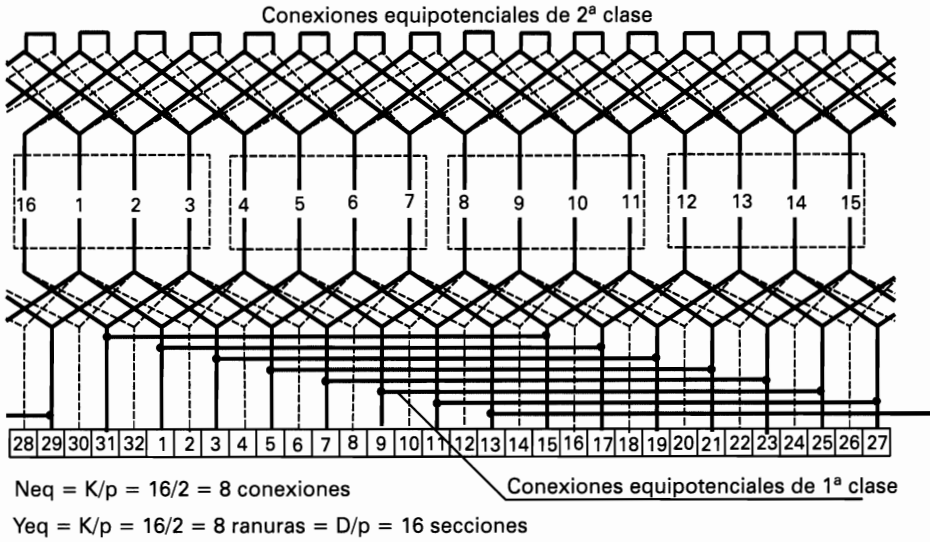


Figura 7.18. Esquema del devanado imbricado doble, con conexiones equipotenciales: de 1ª clase sobre delgas del colector y de 2ª clase sobre cabezas posteriores.

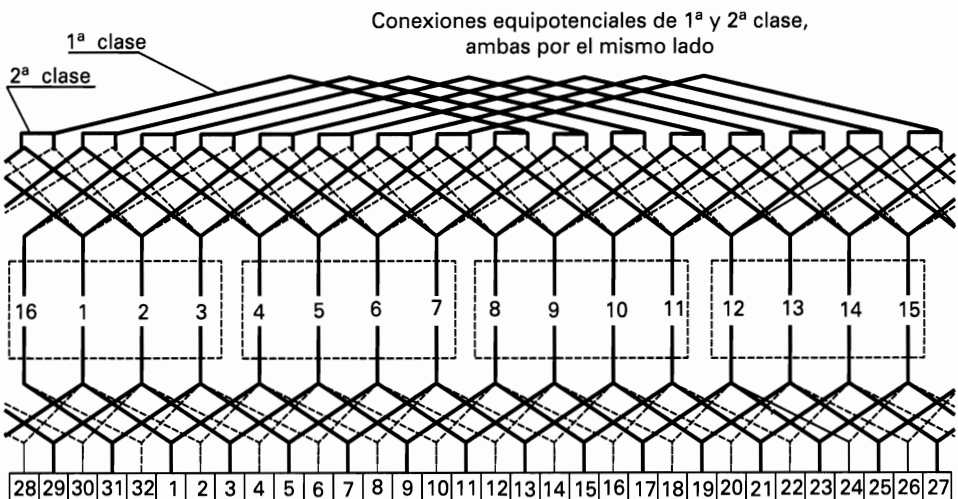


Figura 7.19. El mismo esquema del devanado imbricado doble, de la figura 7.18, con los dos tipos de conexiones equipotenciales sobre las cabezas posteriores de las bobinas.

# 8

---

---

## CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

### 8.1. DEVANADOS CONCÉNTRICOS TRIFÁSICOS

Según se mencionó ya en el capítulo 5 de esta obra, los devanados empleados en las máquinas de corriente alterna pueden ser ejecutados de muy diversas formas, al igual que los de corriente continua, pudiendo ser estos:

- **Concéntricos.**
- **Excéntricos.** Estos a su vez pueden ser:
  - Imbricados (enteros y fraccionarios).
  - Ondulados (enteros y fraccionarios).

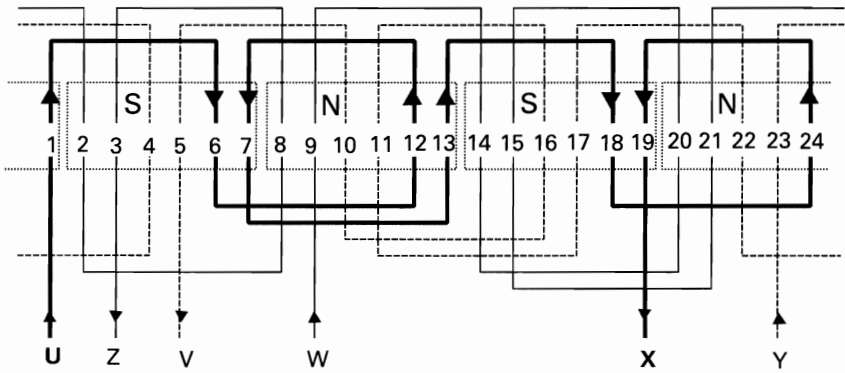
Un devanado de corriente alterna es *concéntrico* cuando los lados activos de una misma fase, situados en ranuras que estén frente a polos consecutivos, son unidos entre sí mediante conexiones o cabezas de bobina concéntricas, como si las bobinas situadas en ranuras consecutivas, pertenecientes a un mismo grupo, fueran parte de una sola bobina, concéntricamente distribuida en varias ranuras, tal como se aprecia en la figura 8.1 y siguientes.

Como ya se mencionó en el apartado 5.2 de esta obra, y se aprecia en la figura 8.1, los devanados concéntricos de corriente alterna pueden ser ejecutados *por polos* o *por polos consecuentes*, consiguiendo con ambos tipos el mismo fin. No obstante, se suelen emplear más los devanados ejecutados **por polos**, cuando se trata de devanados monofásicos o bifásicos, debido a que sus cabezas de bobina son más pequeñas y se ahorra en el cobre conductor; mientras que en los devanados de motores trifásicos se suele emplear más el sistema de **polos consecuentes**, ya que se reduce el número de modelos de cabezas de bobina, lo que redundaría en su mejor colocación en la periferia de los núcleos magnéticos.

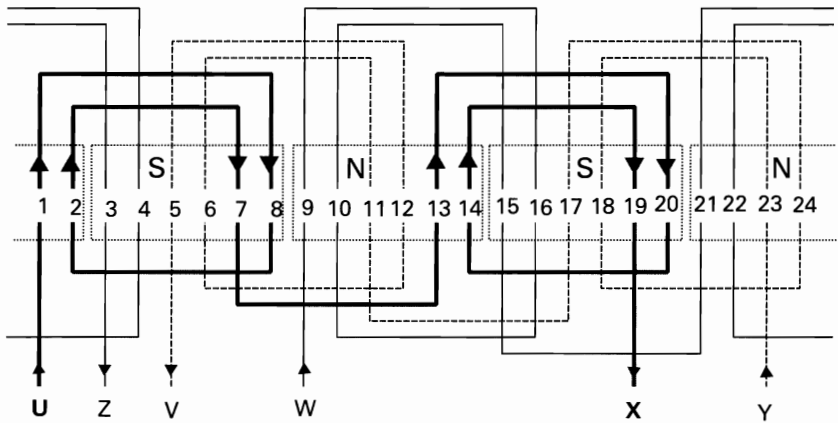
Salvo raras excepciones, los devanados concéntricos de corriente alterna se ejecutan de una capa por ranura, o sea, que en cada ranura solamente se colocan los lados activos de una sola bobina. Consecuentemente el número de bobinas que forman un grupo  $Ug$  será el doble, si está ejecutado por polos consecuentes que si lo está por polos, o sea:

- *Devanados por polos:* 
$$Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \text{bobinas}$$

- *Devanados por polos consecuentes:* 
$$Ug = \frac{K}{2p \cdot q} = \text{bobinas}$$



Devanado realizado "por polos"



Devanado realizado "por polos consecuentes"

**Figura 8.1.** Esquema de un mismo devanado concéntrico, realizado "por polos" y "por polos consecuentes".

## Proceso de cálculo de un devanado concéntrico trifásico.

Como las definiciones de las magnitudes necesarias para el cálculo y posterior dibujo del esquema de este tipo de devanados ya se describieron en el capítulo 5 de esta obra, en lo que sigue nos limitaremos a describir el proceso y el mejor orden a seguir en este tipo de trabajos, seguido de unos ejemplos prácticos de cálculo y dibujado del esquema de motores reales, muy comúnmente empleados en la industria.

El proceso de cálculo a seguir para este tipo de devanados, concéntricos, trifásicos, de corriente alterna, lo podemos descomponer en seis fases perfectamente diferenciadas, a saber:

1. Atendiendo al número de fases ( $q$ ), al de polos ( $2p$ ) de la máquina y a la dificultad de ejecución o colocación de las conexiones y cabezas de bobina, se elegirá el tipo de devanado, bien sea *por polos* o *por polos consecuentes*.
2. Se comprobará la **posibilidad de ejecución**, teniendo en cuenta que para este tipo de devanados de corriente alterna, según cuál sea su tipo, debe cumplirse:
  - *Por polos consecuentes*. El número de ranuras por polo y fase ( $K_{pq} = K / 2p \cdot q$ ) debería ser un número entero. Si fuera el resultado *entero mas 1/2*, se debe ejecutar un *devanado concéntrico mixto*, bien sea: realizando la bobina exterior de cada grupo con la mitad de espiras y colocando en algunas ranuras dos medias bobinas, o bien haciendo la mitad de los grupos con una bobina de menos.
  - *Por polos*. El número de ranuras por polo y fase ( $K_{pq} = K / 2p \cdot q$ ) debería ser un número entero. Si su valor es **par**, todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y de espiras, mientras que **si su valor es impar**, se puede hacer un devanado mixto, de forma similar a los de polos consecuentes: bien sea ejecutando la mitad de los grupos con una bobina menos, o haciendo grupos iguales con la bobina exterior de la mitad de espiras y colocando dos de estas medias bobinas en la misma ranura.
3. Se calcula el número de grupos de bobinas ( $G$ ) que ha de tener el devanado. Recordando que según sean éstos ejecutados *por polos* o *por polos consecuentes* su valor será:
  - *Por polos*: Grupos por fase =  $G_f = 2p$  ; Grupos totales =  $G = 2p \cdot q$
  - *Por polos consecuentes*: Grupos por fase =  $G_f = p$ ; Grupos totales =  $G = p \cdot q$
4. Seguidamente se calcula el **número de bobinas** que compone cada grupo ( $U_g$ ), que también dependerá del tipo de devanado que se desea ejecutar, así tendremos:

$$\begin{aligned}
 - \text{ Por polos: } U_g &= \frac{B}{G} = \begin{cases} \frac{K}{2p \cdot q} & \text{Para devanados de dos capas} \\ \frac{K}{4p \cdot q} & \text{Para devanados de una sola capa} \end{cases} \\
 - \text{ Por polos consecuentes: } U_g &= \frac{B}{G} = \begin{cases} \frac{K}{p \cdot q} & \text{Para devanados de dos} \\ & \text{capas} \\ \frac{K}{2p \cdot q} & \text{Para devanados de una} \\ & \text{capa} \end{cases}
 \end{aligned}$$

5. Una vez determinado el número de bobinas por grupo ( $U_g$ ) que, por lo general, serán a una capa, ya se puede determinar la **amplitud de grupo** ( $m$ ) y el ancho de cada bobina, cuyo valor también dependerá del tipo de devanado elegido;

- *Devanado por polos:*  $m = (q - 1) 2 U_g = \text{ranuras libres}$

- *Devanado por polos consecuentes:*  $m = (q - 1) U_g = \text{ranuras libres}$

Ancho de las bobinas:  $Y_1 = m + 1$ ;  $Y_2 = m + 3$ ;  $Y_3 = m + 5$ ; etc = ranuras

6. Por último, se calcula la **distancia entre principios de fases** ( $Y_q$ ) y se realiza la tabla de entradas correspondiente, descrita en el apartado 5.2, que para devanados trifásicos, ya sean ejecutados por polos o por polos consecuentes, tendrá un valor de:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Y_q = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$

Una vez obtenidos todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, procurando diferenciar las bobinas y las conexiones de las distintas fases, bien sea con distintos colores o trazos, marcando además las entradas y salidas de cada fase, las ranuras y cualquier otra indicación que fuera necesaria, para facilitar la posterior ejecución práctica del devanado. Para los tres principios de fase se elegirán de la tabla los más apropiados, que serán en la práctica los que requieran cables más cortos hasta la placa de bornes de la máquina.

A continuación realizaremos cuatro ejemplos prácticos, de cálculo y dibujo del esquema correspondiente. Dos de ellos referidos al mismo motor (ejemplos 8.1 y 8.2), pero ejecutado el primero por polos consecuentes (*figura 8.2*) y el segundo por polos (*figuras 8.3 y 8.4*). El tercero (ejemplo 8.3), que es un devanado concéntrico por polos consecuentes, por ser fraccionario su número de ranuras por polo y fase, se realizará mixto con grupos de distinto número de bobinas. Por último, el ejemplo 8.4, que es un devanado por polos, pero con

número de ranuras por polo y fase impar, se realizará con grupos de bobinas de distinto número de espiras.

Los esquemas se han dibujado de tres formas, con grupos y cabezas de bobinas distintos, para poder apreciar mejor las distintas posibilidades de representación de este tipo de devanados.

**Ejemplo 8.1.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente de un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para un motor de 48 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Primeramente comprobamos que es posible su ejecución completa, ya que se cumple que el número de ranuras por polo y fase **Kpq** es un número entero.

$$\text{Número de ranuras por polo y fase: } Kpq = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \text{ (número entero)}$$

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas, comprobando que por ser un número par todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras:

$$\text{Número de grupos de bobinas: } G = p \cdot q = 2 \times 3 = 6 \text{ grupos de bobinas}$$

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

$$\text{Número de bobinas por grupo: } U_g = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \text{ bobinas por grupo}$$

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

$$\text{Amplitud de grupo: } m = (q - 1) U_g = (3 - 1) 4 = 8 \text{ ranuras libres}$$

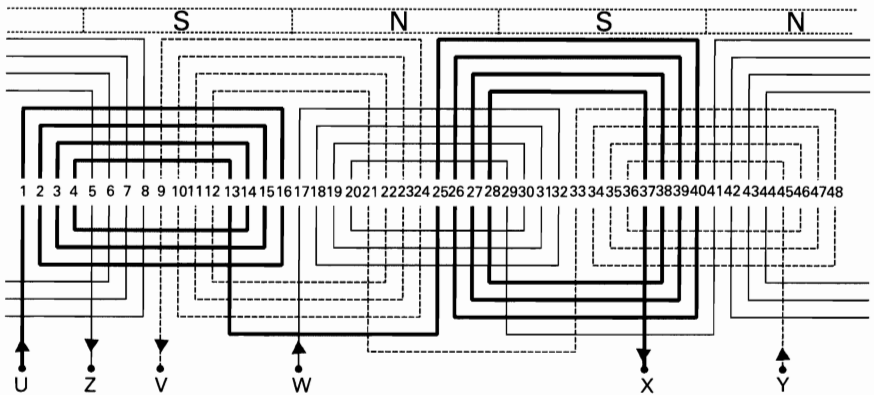
Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

$$\text{Distancia entre principios de fases: } Y_q = \frac{K}{3p} = \frac{48}{3 \times 2} = 8 \text{ ranuras}$$

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17
25	33	41

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.2) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17.





**Figura 8.2.** Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos consecuentes, del ejemplo 8.1.

**Ejemplo 8.2.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para el motor de 48 ranuras del ejemplo anterior, pero ejecutado ahora *por polos* y a una capa.

Primeramente comprobamos que también es posible su ejecución completa, ya que se cumple que el número de ranuras por polo y fase **Kpq** es un número entero y par.

**Número de ranuras por polo y fase:** 
$$Kpq = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{48}{4 \times 3} = 4 \text{ (número entero y par)}$$

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas, comprobando que por ser un número par todos los grupos tendrán el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras:

**Número de grupos de bobinas:** 
$$G = 2p \cdot q = 2 \times 2 \times 3 = 12 \text{ grupos de bobinas}$$

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

**Número de bobinas por grupo:** 
$$Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{48}{8 \times 3} = 2 \text{ bobinas por grupo}$$

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

**Amplitud de grupo:** 
$$m = (q - 1) 2 Ug = (3 - 1) 4 = 8 \text{ ranuras libres}$$

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

**Distancia entre principios de fases:** 
$$Yq = \frac{K}{3p} = \frac{48}{3 \times 2} = 8 \text{ ranuras}$$

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17
25	33	41

Para dibujar el esquema correspondiente (figuras 8.3 y 8.4) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17, igual que en el ejemplo anterior.

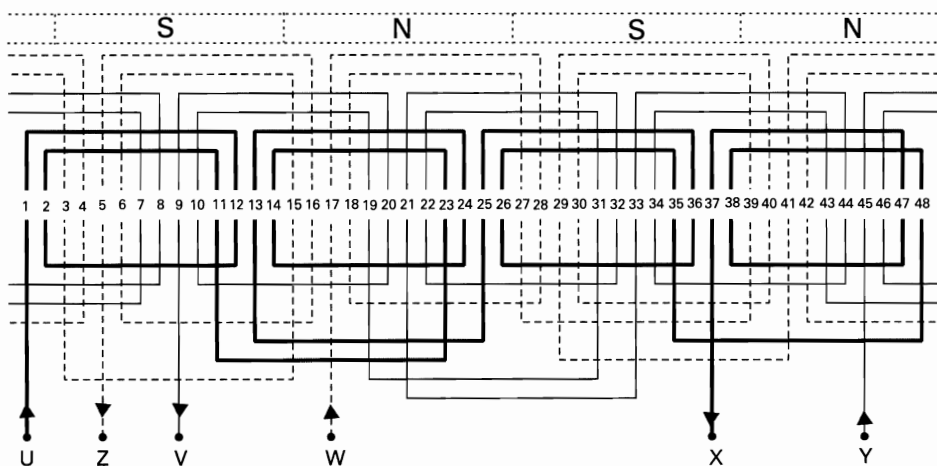


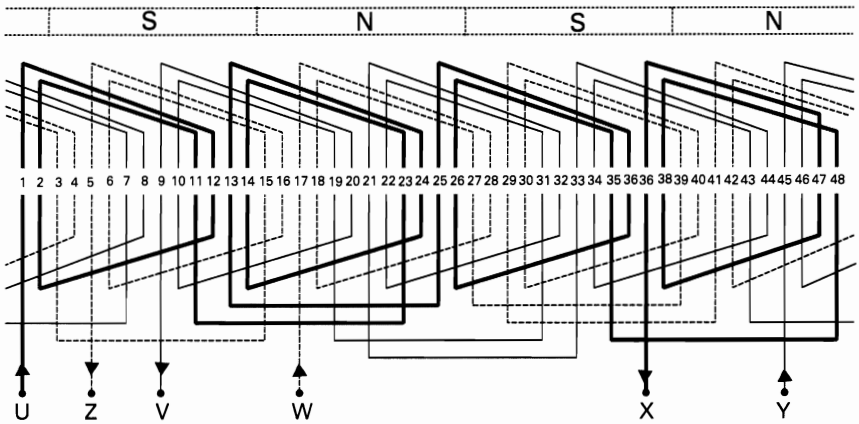
Figura 8.3. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.2.

**Observación:** Según se aprecia en los dos ejemplos anteriores (figuras 8.2 y 8.3), según sea el tipo de devanado y para que se formen correctamente las polaridades, las conexiones entre los grupos de bobinas de una misma fase se realizarán siempre:

- **Devanados por polos.** Se conectará siempre, *salida con salida y entrada con entrada.*
- **Devanados por polos consecuentes.** Se conectará siempre, *salida con entrada y entrada con salida.*

Una vez terminados los devanados, para que pueda funcionar la máquina, han de realizarse las conexiones de sus entradas (U, V, W) y sus salidas (X, Y, Z), en *estrella* o *triángulo*, de acuerdo con su tensión de trabajo. Esto puede hacerse dentro del propio motor o mejor en la placa de bornes del mismo, una vez se hayan sacado las tres entradas y las tres salidas, a sus bornes correspondientes.

En la figura 8.4 se ha dibujado una representación diferente del esquema correspondiente al ejemplo 8.2, ejecutado de tal forma que todos los grupos de bobinas sean iguales, con un solo modelo de cabezas, facilitando así su construcción. Este sistema de representación se utiliza bastante, ya que necesita menos espacio y es muy representativo y fácil de seguir.



**Figura 8.4.** Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.2. Con un solo modelo de cabezas de bobina

**Ejemplo 8.3.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, octapolar, para un motor de 60 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Primeramente comprobamos que no es posible su ejecución completa, ya que no se cumple que el número de ranuras por polo y fase  $Kpq$  sea un número entero.

**Número de ranuras por polo y fase:**  $Kpq = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{60}{8 \times 3} = 2,5$  (número fraccionario)

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas:

**Número de grupos de bobinas:**  $G = p \cdot q = 4 \times 3 = 12$  grupos de bobinas

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

**Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{60}{8 \times 3} = 2,5$  bobinas por grupo

Por tanto, al ser un devanado *por polos consecuentes* y salir el número de bobinas por polo y fase y el número de bobinas por grupo, entero más media unidad, deberá ejecutarse como mixto. En este caso se ejecutará con grupos de distinto número de bobinas; o sea, grupos de dos y de tres bobinas alternativamente:

$U_{g_1} = 2$  y  $U_{g_2} = 3$ . Podrían realizarse también todos los grupos con dos bobinas y media, colocando dos medias bobinas en una misma ranura.

Calculamos ahora la amplitud de grupo, que será distinto para los grupos de dos o de tres bobinas, pudiendo determinar así el ancho de cada bobina:

**Amplitud de grupo:**  $m_1 = (q - 1) U_{g_1} = (3 - 1) 2 = 4$  ranuras libres

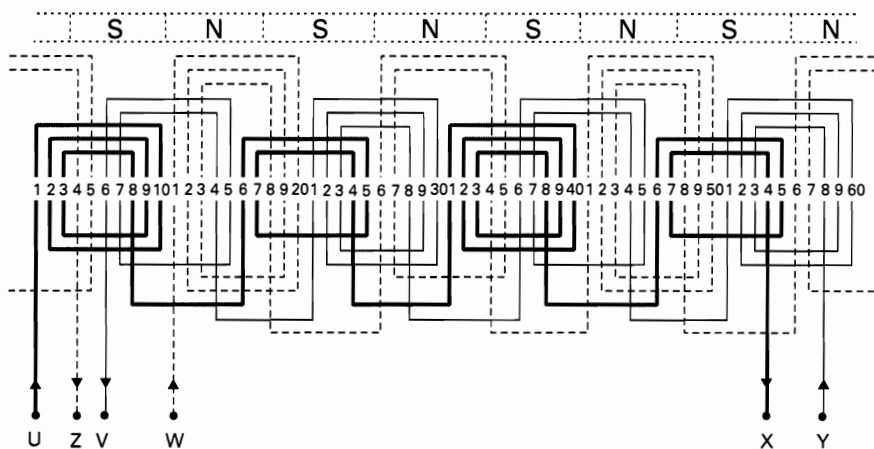
**Amplitud de grupo:**  $m_2 = (q - 1) U_{g_2} = (3 - 1) 3 = 6$  ranuras libres

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

**Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{60}{3 \times 4} = 5$  ranuras

Fase U	Fase V	Fase W
1	6	11
16	21	26
31	36	41
46	51	56

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.5) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 6 y 11, aunque podríamos haber tomado cualesquiera otras de la tabla, siempre que fuera una de cada columna, tal como se describió en el capítulo 5 de esta obra.



**Figura 8.5.** Esquema del devanado concéntrico, trifásico, octapolar, ejecutado por polos consecuentes, del ejemplo 8.3.

**Ejemplo 8.4.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, tetrapolar, para un motor de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Primeramente comprobamos que no es posible su ejecución completa, ya que, al ser un devanado *por polos*, no se cumple que el número de ranuras por polo y fase  $Kpq$  sea un número *entero* y *par*.

**Número de ranuras por polo y fase:**  $Kpq = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$  (número *entero*, *impar*)

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas:

**Número de grupos de bobinas:**  $G = 2p \cdot q = 4 \times 3 = 12$  grupos de bobinas

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo:

**Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{36}{8 \times 3} = 1,5$  bobinas por grupo

Al ser el número de ranuras por polo y fase  $Kpq$  impar y el número de bobinas por grupo  $Ug$  fraccionario, y deseando una ejecución *por polos*, no se puede hacer un devanado completo, sino que ha de ser mixto. En este caso se ejecutará con medias bobinas, o sea, cada grupo de bobinas se ejecutará con la bobina exterior de la mitad de espiras que la otra y estas medias bobinas se colocarán dos a dos, de la misma fase, en una misma ranura, en dos capas superpuestas. También podría ejecutarse como el del ejemplo anterior, con grupos desiguales de una y dos bobinas.

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina:

**Amplitud de grupo:**  $m = (q - 1) 2 Ug = (3 - 1) 2 \times 1,5 = 6$  ranuras libres

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases y elaboramos la tabla correspondiente:

**Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 2} = 6$  ranuras

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 8.6) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 7 y 13. Las ranuras a doble capa son: 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31 y 34.

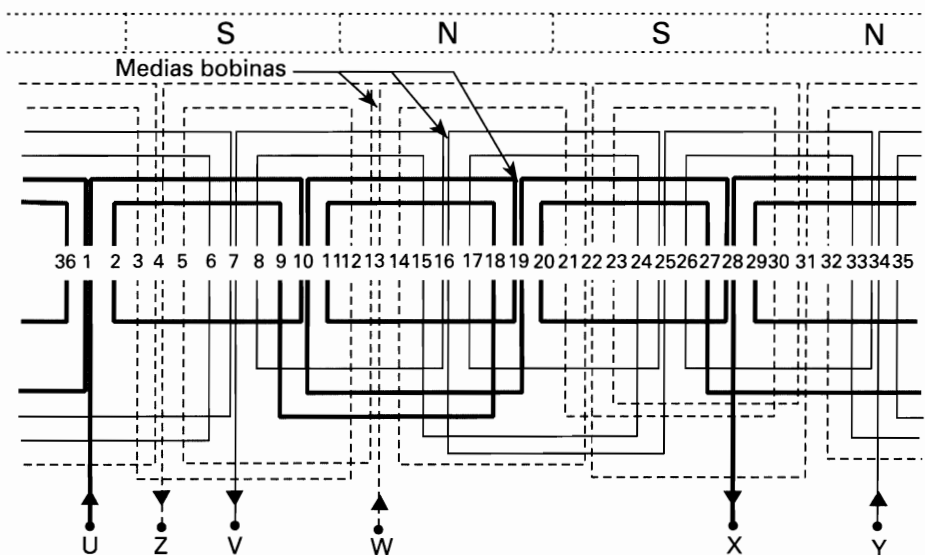


Figura 8.6. Esquema del devanado concéntrico, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos, del ejemplo 8.4.

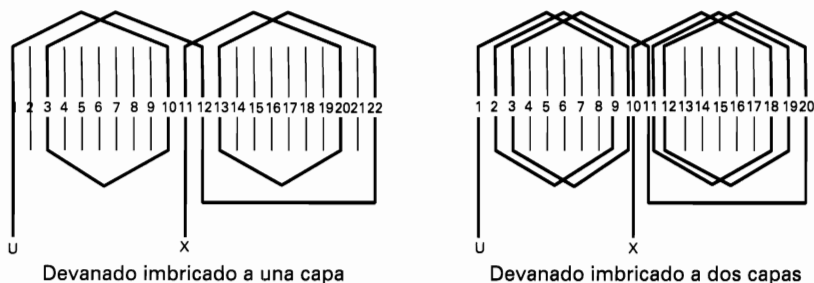
## 8.2. DEVANADOS IMBRICADOS, TRIFÁSICOS

Se dice que **un devanado es excéntrico** cuando todas sus bobinas son iguales, tal como ocurre en los devanados de inducido de corriente continua. Como ya se mencionó al comienzo de este capítulo, los devanados excéntricos pueden ser:

- **Imbricados** (enteros y fraccionarios).
  - De una capa por ranura.
  - De dos capas por ranura.
- **Ondulados** (enteros y fraccionarios).

Los devanados excéntricos, por lo general, son ejecutados **por polos**, por tanto cada fase tendrá tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina ( $Gf = 2p$ ).

Un devanado excéntrico es **imbricado**, cuando al ejecutarlo se avanza por una cara de la armadura y se retrocede a continuación por la otra cara, de igual forma que en los devanados imbricados de corriente continua, tal como se aprecia en la figura 8.7. Los devanados imbricados son los más utilizados en estatores de corriente alterna, debido a que solamente utilizan un tipo de bobinas, facilitando así su construcción, bien sea haciendo éstas una a una, sobre un molde único, o bien haciéndolas por grupos de bobinas, sobre un molde múltiple.



**Figura 8.7.** Ejecución de devanados imbricados.

Los devanados imbricados a su vez pueden ser: *enteros* o *fraccionarios*, según cuál sea el valor del número de bobinas por grupo  $Ug$  que tengan. Un devanado imbricado es *entero* cuando se cumple que el número de bobinas por grupo es un valor entero, por el contrario cuando este valor es fraccionario, el devanado será imbricado *fraccionario*. Según se describió en el apartado 5.2 de esta obra, y atendiendo al tipo de devanado elegido, su valor, para devanados ejecutados *por polos* será:

- *Devanado imbricado de dos capas:*  $Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p \cdot q} = \text{valor entero o fraccionario}$
- *Devanado imbricado de una capa:*  $Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{4p \cdot q} = \text{valor entero o fraccionario}$

Seguidamente pasamos a describir los devanados imbricados, comenzando por los ejecutados enteros y a una capa, para pasar a continuación a los enteros de dos capas y a los fraccionarios.

### **Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados enteros y a una capa**

En los devanados imbricados ejecutados a una capa, como cada bobina ha de ocupar dos ranuras completas, veremos que los dos lados activos de cada bobina han de ocupar una ranura par y otra impar. Por tanto, la mejor forma de que se cumpla esta condición es que el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$  tenga un **valor impar**.

Por tanto, para que se cumpla la condición anterior, y teniendo en cuenta que el paso de ranura debe ser, aproximadamente, igual al paso polar, en la práctica debemos tener siempre muy en cuenta que:

- En devanados de una capa, trifásicos, **con paso polar impar**, se elegirá un ancho de bobina o paso de ranura  $Yk$ , igual al paso polar.
- En devanados de una capa, trifásicos, **con paso polar par**, se elegirá un ancho de bobina o paso de ranura  $Yk$ , igual al paso polar acortado en un número impar de ranuras.

A continuación pasamos a detallar el proceso y orden a seguir para el cálculo y posterior dibujado del esquema de este tipo de **devanados imbricados de una capa**.

Para ello, partimos de los datos necesarios como: número de ranuras de la armadura  $K$ , número de polos ( $2p$ ) y número de fases ( $q$ ). Teniendo además en cuenta que, por ser el *devanado por polos y a una capa*, el número de bobinas será la mitad del número de ranuras ( $B = K / 2$ ), el número de grupos de bobinas por fase ha de ser igual al número de polos de la máquina ( $Gf = 2p$ ) y el número total de grupos ( $G = 2p \cdot q$ ), seguiremos el proceso de cálculo siguiente:

1. Primeramente se determinará el número de bobinas que forman un grupo  $Ug$  y que, como ya mencionamos que este tipo de devanados se ejecutan siempre por polos, lo obtendremos de la fórmula siguiente:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{4p \cdot q} = \text{bobinas}$$

2. Seguidamente se determinará el **ancho de bobina** o paso de ranura  $Yk$ , de igual forma que para un devanado de corriente continua. Teniendo en cuenta que si éste resulta par, hemos de acortarlo en un número impar de unidades para que resulte un valor **impar**:

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \text{ranuras (valor impar)}$$

3. A continuación se determina la **distancia entre principios de fase**  $Yq$  y se realiza la tabla de entradas correspondiente. Por ser un devanado trifásico su valor será:

$$- \text{Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

4. Por último, empleando los valores anteriormente obtenidos, se procede al dibujo del esquema completo del devanado. Pero para ello se debe tener en cuenta que:

- Los lados activos de una misma fase, dirigidos en el mismo sentido, deben agruparse en número igual al de bobinas por grupo  $Ug$ .
- Los lados activos situados en ranuras sucesivas (par e impar) deben tener sus cabezas dirigidas en sentido contrario.



- Como este tipo de devanados se ejecuta generalmente por polos, los grupos de bobinas de una misma fase se unirán entre sí: *final con final* y *principio con principio*.

Seguidamente se realizarán dos ejemplos prácticos, de cálculo y dibujado posterior del esquema de un *devanado imbricado, a una capa*, para un motor trifásico.

**Ejemplo 8.5.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, bipolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Al ser un devanado ejecutado *por polos* y a una capa, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

- **Número de bobinas:**  $B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18 \text{ bobinas};$

- **Grupos de bobinas por fase:**  $Gf = 2p = 2 \text{ grupos}$

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

- **Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ bobinas por grupo}$

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina, que debería ser impar:

- **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{2} = 18 \text{ ranuras}$

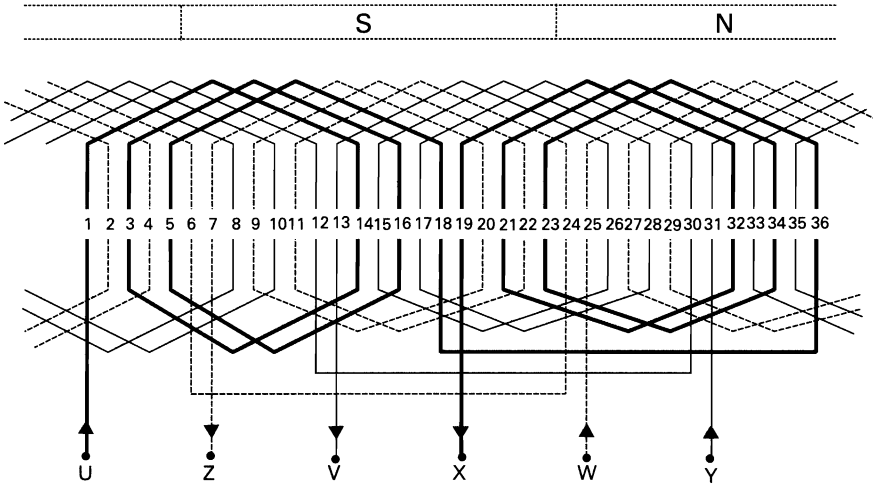
Como el valor del paso de ranura ha salido par, debe acortarse en un número impar de ranuras (1, 3, 5, etc.). En este caso y como ejemplo extremo lo acortamos en cinco unidades; tomando, por tanto,  **$Yk = 13 \text{ ranuras}$**  para el trazado del esquema y posterior ejecución del devanado.

Por último, calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

- **Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 1} = 12 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	13	25

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.8.



**Figura 8.8.** Esquema del devanado imbricado, trifásico, bipolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.5

**Ejemplo 8.6.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, exapolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa.

Al ser un devanado ejecutado *por polos* y *a una capa*, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

- **Número de bobinas:**  $B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18 \text{ bobinas};$

- **Grupos de bobinas por fase:**  $Gf = 2p = 6 \text{ grupos}$

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

- **Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{K}{4p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3 \times 3} = 1 \text{ bobinas por grupo}$

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina, que debería ser impar:

- **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \text{ ranuras}$

Como el valor del paso de ranura ha salido par, debe acortarse en un número impar de ranuras (1, 3, 5, etc.). En este caso lo acortamos en una unidad; tomando, por tanto,  $Yk = 5 \text{ ranuras}$ .

Por último calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 3} = 4 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21
25	29	33

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.9, en el que hemos tomado como entradas de fase las ranuras 1, 5 y 9.

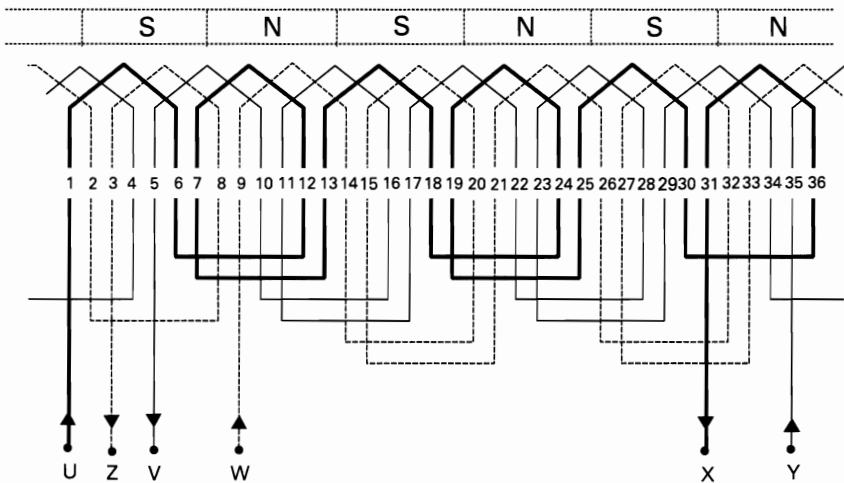


Figura 8.9. Esquema del devanado imbricado, trifásico, exapolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.6.

### Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados enteros y a dos capas

En este tipo de devanado imbricado de corriente alterna, como su propio nombre indica, cada ranura será ocupada por los lados activos de dos bobinas distintas

(dos capas o bobinas por ranura), según se aprecia en la figura 8.7 y, por tal motivo, el número total de bobinas del devanado es el mismo que el número de ranuras de la armadura ( $B = K$ ). Por tanto, el valor del número de bobinas por grupo se calculará ahora a partir de estos nuevos valores:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } U_g = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p \cdot q} = \text{bobinas}$$

Al no tener que dejar ninguna ranura libre mientras se va ejecutando el devanado, tampoco existe ninguna limitación que condicione el valor del ancho de bobina, siendo éste ( $Yk = K / 2p$ ); que puede ser acortado en cualquier número de ranuras. Sobre todo se suele hacer en los devanados bipolares, para reducir el ancho de las bobinas, facilitando así su colocación.

Este tipo de devanados imbricados a dos capas también se ejecuta siempre *por polos*, al igual que los de una capa.

Como entre las dos bobinas superpuestas en una misma ranura puede haber una considerable diferencia de potencial, ya sean éstas de la misma o distinta fase, en la ejecución práctica del devanado hay que extremar el aislamiento entre una y otra capa del devanado.

El proceso de cálculo a seguir con este tipo de devanados es el mismo que para los devanados imbricados de una capa, aunque partiendo para el cálculo de doble número de bobinas ( $B = K$ ), que condiciona el número de bobinas por grupo  $U_g$ , como ya se mencionó más arriba y, por tanto, no lo describiremos de nuevo. Nos limitaremos a realizar dos ejemplos prácticos, para dar por terminado este tema, de los *devanados imbricados, ejecutados a dos capas* por ranura.

**Ejemplo 8.7.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, tetrapolar, para un motor asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser un devanado ejecutado *por polos* y a dos capas, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

$$- \text{Número de bobinas: } B = K = 36 \text{ bobinas;}$$

$$- \text{Grupos de bobinas por fase: } G_f = 2p = 4 \text{ grupos}$$

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } U_g = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{36}{4 \times 3} = 3 \text{ bobinas por grupo}$$

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina que, como ya describimos, en estos devanados a dos capas puede ser par o impar:

- *Paso de ranura o ancho de bobina:*  $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{4} = 9 \text{ ranuras}$

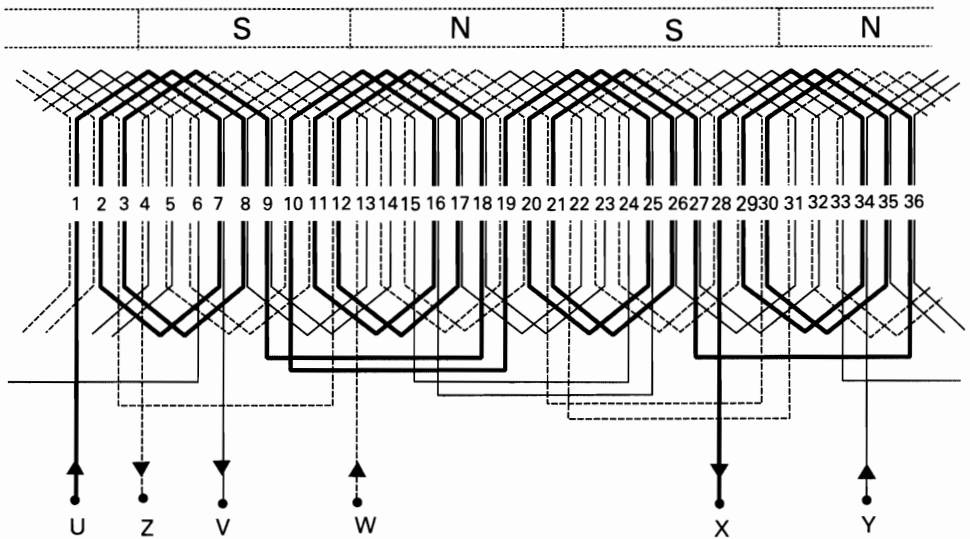
En este caso, para que las bobinas nos salgan más cortas y sea más fácil su ejecución, lo acortamos en tres unidades; tomando, por tanto,  **$Yk = 6 \text{ ranuras}$** .

Por último, calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 2} = 6 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.10, en el que hemos tomado como entradas de fase las ranuras 1, 7 y 13.



**Figura 8.10.** Esquema del devanado imbricado, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a dos capas, del ejemplo 8.7.

**Ejemplo 8.8.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado, bipolar, para un motor asíncrono trifásico de 24 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser un devanado ejecutado *por polos* y a dos capas, el número de bobinas y de grupos de bobinas será:

- **Número de bobinas:**  $B = K = 24$  bobinas;
- **Grupos de bobinas por fase:**  $Gf = 2p = 2$  grupos

Calculamos, a continuación, el número de bobinas por grupo:

$$\text{- Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{2 \times 3} = 4 \text{ bobinas por grupo}$$

Seguidamente determinamos el paso de ranura o ancho de bobina que, como ya describimos, en estos devanados a dos capas puede ser par o impar:

$$\text{- Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$$

En este caso, al ser el devanado bipolar, para que las bobinas nos salgan más cortas y sea más fácil su ejecución, lo acortamos en dos unidades; tomando, por tanto,  $Yk = 10$  ranuras.

Por último calculamos la distancia entre principios de fases y realizamos la tabla de entradas correspondiente:

$$\text{- Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 1} = 8 \text{ ranuras}$$

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17

Con todos estos datos, ya se puede dibujar el esquema completo, que es el correspondiente a la figura 8.11, en el que hemos tomado como entradas de fase las únicas ranuras posibles: 1, 9 y 17.

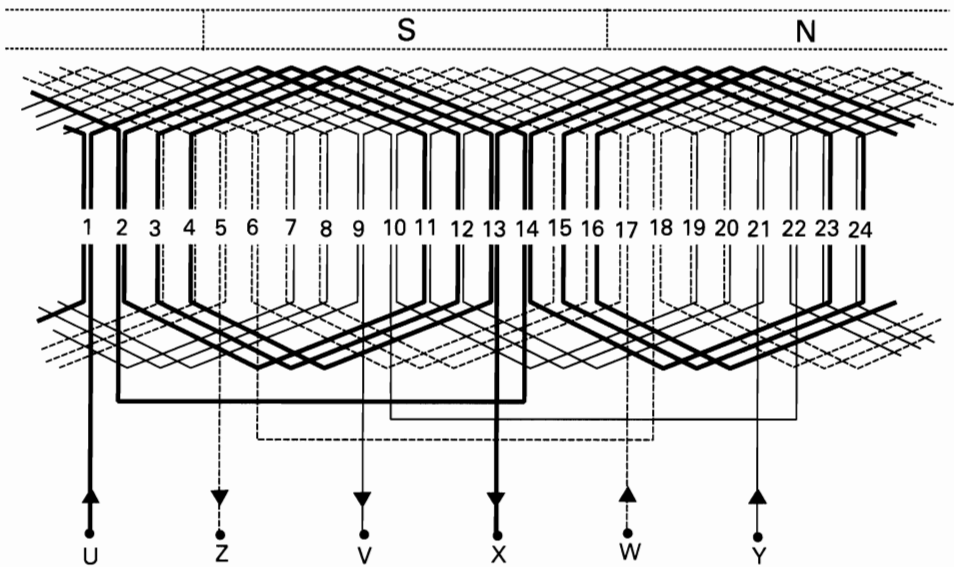


Figura 8.11. Esquema del devanado imbricado, trifásico, bipolar, ejecutado por polos y a dos capa, del ejemplo 8.8.

### Definición y proceso de cálculo de devanados imbricados fraccionarios regulares

Un devanado imbricado es fraccionario cuando el número de bobinas por grupo  $U_g$  no es un número entero.

- *Número de bobinas por fase:* 
$$U_g = \frac{B}{G} = \frac{B}{2p \cdot q} = \text{número fraccionario}$$

Al obtener un valor fraccionario, al igual que ocurría en los devanados concéntricos mixtos con su número de ranuras por polo y fase, debemos comprender que lo que realmente significa esta expresión fraccionaria es que los grupos sucesivos de bobinas de una misma fase no tendrán todos el mismo número de bobinas, sino que algunos grupos tendrán una bobina más que los otros.

Si, por ejemplo, nos sale  $U_g = 3,5$ , quiere decir que los grupos de bobinas de cada fase tendrán alternativamente tres y cuatro bobinas. También hemos de tener presente que cuando el resultado no es un número entero más media unidad (por ejemplo: 1,3; 3,6; etc.), no tienen que ser la mitad de los grupos con una bobina más que los otros, sino que será distinto el número de grupos grandes y pequeños de bobinas, ya que su valor dependerá de la fracción obtenida.

Estos devanados, *imbricados fraccionarios regulares*, se pueden realizar a una o dos capas por ranura y se ejecutan *por polos* generalmente. Se emplean con preferencia en la construcción de alternadores ya que, cuando están perfectamente diseñados, se consigue una fuerza electromotriz lo más aproximada posible a una curva senoidal y un ángulo de desfase más preciso.

Los devanados fraccionarios pueden ser *regulares o simétricos* y también *irregulares o asimétricos*, dependiendo de que las fuerzas electromotrices de sus distintas fases sean exactamente iguales y estén desfasadas el ángulo característico del sistema, como ocurrirá en el caso de los simétricos o que sus fuerzas electromotrices y ángulos de desfase no sean exactamente iguales, como ocurre en los asimétricos. Los devanados fraccionarios asimétricos son complicados y difíciles de ejecutar, por lo cual deben evitarse siempre que sea posible.

Debido a lo anteriormente expuesto, no siempre es posible que todos los grupos tengan el mismo número de bobinas y tampoco es posible distribuir estos grupos de forma arbitraria, sino que debe hacerse con una cierta uniformidad o simetría. En los devanados fraccionarios regulares o simétricos, se pueden distribuir estos grupos de bobinas lo más simétricamente posible, empleando lo que denominamos *grupos de repetición*. Los **grupos de repetición GR** son conjuntos formados por grupos de bobinas que se repiten una o más veces en cada fase a lo largo del devanado.

Para que un devanado fraccionario pueda ser perfectamente ejecutado, ha de cumplir con ciertas **condiciones de simetría**, como son que el número total de bobinas del devanado **B**, dividido por la denominada **constante propia CP**, valor que depende del número de polos y de fases de la máquina, nos dé por resultado un número entero. La tabla 8.1 nos da las posibilidades de ejecución para conseguir una perfecta simetría, en cuanto a la distribución de los grupos de bobinas, en función del tipo de máquina y su constante propia.

– **Condiciones de simetría:**  $\frac{B}{CP} = \text{número entero}$

**TABLA 8.1.** Condiciones de simetría, en los devanados imbricados fraccionarios.

Nº de polos (2p)	Constante propia CP	
	Bifásica	Trifásica
2	4	3
4	8	3
6	4	9
8	16	3
10	4	3
12	8	9
14	4	3



Seguidamente pasaremos a calcular este tipo de devanados, *fraccionarios y regulares*, labor mucho más compleja que para los devanados imbricados enteros. Hemos de tener presente que, debido a la complejidad que el mismo podría alcanzar en algunos devanados, emplearemos para ello un **método simplificado de cálculo** –basado en el denominado método del mínimo común múltiplo–, pero que puede ser suficiente en la mayoría de los casos que se nos presenten.

El proceso a seguir, partiendo del número de ranuras  $K$ , del número de bobinas totales  $B$  (para ver si el devanado es a una o dos capas), del número de polos  $2p$  y fases  $q$ , y del sistema de ejecución (por polos generalmente) es el siguiente:

1. Se comienza por calcular el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$ . Éste también suele ser acortado, como en los devanados imbricados enteros ya que, sobre todo en los devanados de generadores, este acortamiento facilita la perfección de la onda senoidal, de la **f.e.m.** obtenida:

$$- \text{Paso de ranura: } Yk = \frac{K}{2p} = \text{ranuras}$$

2. A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $Ug$ , partiendo siempre de la fórmula general utilizada para los devanados *por polos y a dos capas*. No obstante, por partir del número de bobinas  $B$ , en vez del número de ranuras  $K$ , esta misma fórmula también es válida para los devanados de una capa.

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \text{número fraccionario}$$

Al no salir el número de bobinas por grupo un valor entero, se observa inmediatamente que se trata de un devanado fraccionario, por tanto, procederemos seguidamente a verificar sus condiciones de simetría o posibilidad de ejecución ( $B / CP = \text{número entero}$ ), como **devanado imbricado fraccionario regular o simétrico**, por medio de la tabla 8.1, para más adelante poder preparar un cuadro de distribución de grupos de bobinas.

3. De los resultados del número fraccionario de bobinas por grupo  $Ug$ , obtenidos en el punto anterior, y como paso previo a la distribución de los grupos de bobinas que componen cada fase, prepararemos la expresión en forma de número mixto:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = E + \frac{D}{d}$$

Expresión final, cuyos términos interpretamos de la forma siguiente:

$E$  = Número de bobinas que forman un grupo pequeño.

$E + I$  = Número de bobinas que forman un grupo grande.

$D$  = Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición  $GR$  y fase.

$d - D$  = Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición  $GR$  y fase.

4. Con los resultados de la expresión anterior, y al indicarnos el valor del divisor ( $d$ ) el número de grupos polares que forma cada grupo de repetición, ya se puede calcular el número de grupos de repetición  $GR$  que tendrá el devanado fraccionario:

$$- \text{Número de grupos de repetición del devanado: } GR = \frac{2p}{d}$$

5. A continuación se procederá a la distribución de los grupos de bobinas, a lo largo de todo el devanado, por cada grupo de repetición  $GR$ , bien sea, aplicando las definiciones del punto tres (valores:  $E$ ,  $E + I$ ,  $D$  y  $d$ ), o más fácilmente ayudándonos de la tabla 8.2, que ha sido obtenida por el mismo método, y en la cual por cada valor del número de bobinas por grupo  $Ug$ , se representa un grupo de repetición. El resto de grupos de repetición del devanado serán iguales al primero.

Para la interpretación de la tabla 8.2, vemos que, en la primera columna tenemos el valor del número de bobinas por grupo obtenido por cálculo, según el apartado dos, en la forma fraccionaria:  $Ug = E + (D / d)$ , una vez reducida la fracción a su mínima expresión. En las restantes columnas y a continuación del valor que representa  $Ug$ , vemos el número de bobinas y la distribución de las mismas que ha de tener cada grupo de repetición  $GR$ , estando éstas ya asignadas a las tres fases, que denominamos **A**, **B** y **C**.

Recordamos una vez más que: cuando al seguir la tabla encontramos  $E$ , quiere decir que ese grupo polar tendrá tantas bobinas como indica la parte entera de la expresión fraccional del número de bobinas por grupo  $Ug$ . La expresión  $E + I$  nos indica que ese grupo tendrá una bobina más.

6. Seguidamente se calculan las distancias entre principios de fases  $Yq$ , que también puede ser fraccionario; por lo cual una vez confeccionada la tabla se elegirá la combinación de principios más conveniente.

$$- \text{Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

7. Por último, con los datos obtenidos, dibujamos el esquema de acuerdo con la distribución de bobinas deducida del cálculo para los grupos de repetición y teniendo en cuenta que al ser ejecutado *por polos*, los grupos de bobinas de las diferentes fases se irán conectando entre sí: *final con final* y *principio con principio*.

Primer grupo de repetición, en función de polos y de las tres fases de la máquina																								
Ug	Grupo polar 1°			Grupo polar 2°			Grupo polar 3°			Grupo polar 4°			Grupo polar 5°			Grupo polar 6°			Grupo polar 7°			Grupo polar 8°		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
E+1/8	E+1	E	E	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E
E+3/8	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E
E+5/8	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E	E+1	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E+1
E+7/8	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E+1
E+1/5	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+2/5	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E+1	E	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+3/5	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+4/5	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1	E	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+1/4	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+3/4	E+1	E+1	E+1	E	E+1	E+1	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E
E+1/2	E+1	E	E+1	E	E+1	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E

TABLA 8.2. Formación de los grupos de repetición en los devanados fraccionarios regulares.

Para finalizar lo veremos todo de nuevo con dos ejemplos desarrollados muy minuciosamente.

**Ejemplo 8.9.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para un motor tetrapolar, asíncrono trifásico de 36 ranuras, ejecutado *por polos* y a una capa

Al ser el devanado de una capa, el número de bobinas será la mitad del número de ranuras:  $B = K / 2 = 36 / 2 = 18$  bobinas.

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina  $Y_k$ :

- **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{36}{4} = 9$  ranuras

Para una mejor ejecución del devanado acortaremos el ancho de bobina en dos unidades, quedando  $Y_k = 7$  ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $U_g$ :

- **Número de bobinas por grupo:**  $U_g = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{18}{4 \times 3} = 1,5$  bobinas

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

- **Número de bobinas por grupo:**  $U_g = \frac{18}{12} = 1,5 = E + \frac{D}{d} = 1 + \frac{1}{2}$

Los términos de la expresión final de  $U_g$  los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño =  $E = 1$
- Número de bobinas que tiene un grupo grande =  $E+1 = 1+1 = 2$
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $D = 1$
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $(d - D) = 2 - 1 = 1$

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición  $GR$  que tendrá el devanado:

- **Número de grupos de repetición:**  $GR = \frac{2p}{d} = \frac{4}{2} = 2$  grupos de repetición

Por medio de la tabla 8.1, comprobamos también que el devanado fraccionario es perfectamente ejecutable por reunir las condiciones de simetría:

- **Condiciones de simetría:**  $\frac{B}{CP} = \frac{18}{3} = 6 = \text{número entero}$

Con los datos obtenidos del número de bobinas por grupo  $Ug = 1,5 = 1 + 1/2$ , ya se puede proceder a la formación de los grupos de repetición, bien sea directamente o ayudados por la tabla 8.2.

- Directamente: AA - B - CC ; A - BB - C | AA - B - CC ; A - BB - C (dos grupos de repetición)
- Por la tabla 8.2: E+1 - E - E+1 ; E - E+1 - E = AA - B - CC ; A - BB - C (más otro grupo igual)

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases  $Yq$  y realizamos la tabla de posibles entradas:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{3 \times 2} = 6 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	7	13
19	25	31

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.12, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras: 1, 7 y 13, así como el paso de ranura  $Yk$  acortado en dos unidades, como más arriba se mencionó.

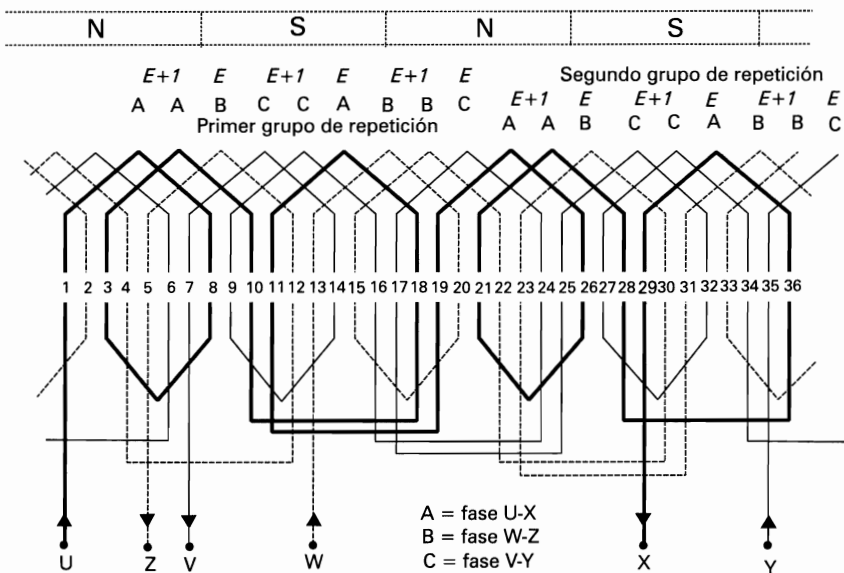


Figura 8.12. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a una capa, del ejemplo 8.9

**Ejemplo 8.10.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para un motor octapolar, asíncrono trifásico de 33 ranuras, ejecutado *por polos* y a dos capas.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras:  $B = K = 33$  bobinas.

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$ :

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \frac{33}{8} = 4,125 \text{ ranuras.}$$

Para la correcta ejecución del devanado, acortaremos el ancho de bobina, quedando  $Yk = 4$  ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $Ug$ :

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{33}{8 \times 3} = 1,375 = (1+3/8) \text{ bobinas}$$

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{33}{24} = 1,375 = E + \frac{D}{d} = 1 + \frac{3}{8}$$

Los términos de la expresión final los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño =  $E = 1$
- Número de bobinas que tiene un grupo grande =  $E+1 = 1+1 = 2$
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $D = 3$
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $(d - D) = 8 - 3 = 5$

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición  $GR$ , que tendrá el devanado:

$$- \text{Número de grupos de repetición: } GR = \frac{2p}{d} = \frac{8}{8} = 1 \text{ grupo de repetición}$$

Por medio de la tabla 8.1, comprobamos también que el devanado fraccionario es perfectamente ejecutable por reunir las condiciones de simetría siguientes:

$$- \text{Condiciones de simetría: } \frac{B}{CP} = \frac{33}{3} = 11 = \text{número entero}$$

Con los datos obtenidos del número de bobinas por grupo  $Ug = 1,375 = 1 + 3/8$ , ya se puede realizar la formación del único grupo de repetición  $GR$ , que tiene este devanado, bien sea directamente o ayudados por la tabla 8.2.

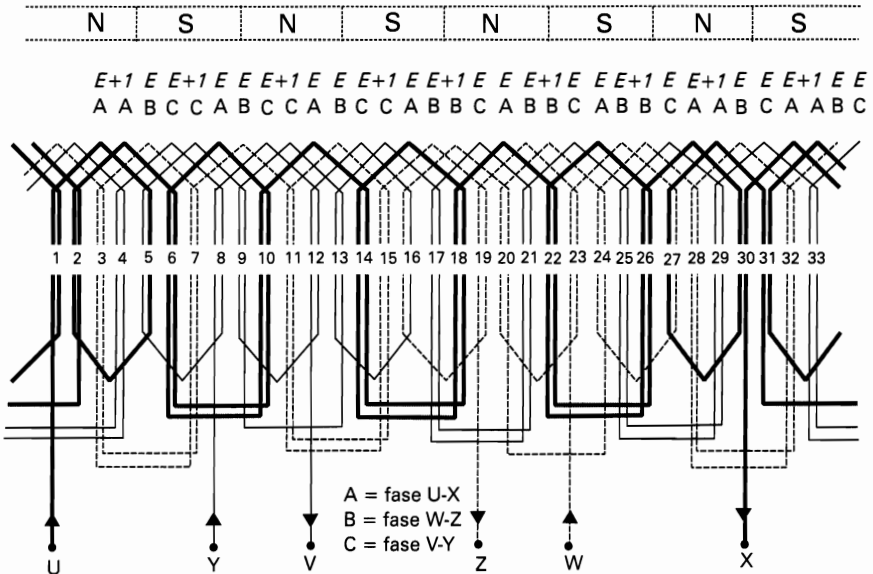
- Directamente:  $GR = 1 = AA-B-CC ; A-B-CC ; A-B-CC ; A-BB-C ; A-BB-C ; A-BB-C ; AA-B-C ; AA-B-C$
- Por la tabla 8.2:  $E+1-E-E+1 ; E-E-E+1 ; E-E-E+1 ; E-E+1-E ; E-E+1-E ; E-E+1-E ; E+1-E-E ; E+1-E-E = AA-B-CC ; A-B-CC ; A-B-CC ; A-BB-C ; A-BB-C ; A-BB-C ; AA-B-C ; AA-B-C$

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases  $Yq$  y se realiza la tabla de entradas correspondiente:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{33}{3 \times 4} = 2,75 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	3,75	6,5
9,25	12	14,75
17,5	20,25	23
25,75	28,5	31,25

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.13, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras de valor entero, que son: 1, 12 y 23, así como el paso de ranura  $Yk = 4$  acortado en 0,125 unidades, como más arriba se mencionó.



**Figura 8.13.** Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, octopolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.10.

## Devanados imbricados fraccionarios irregulares

Cuando en un devanado fraccionario, al determinar sus condiciones de simetría, dividiendo el número de bobinas del devanado  $B$  por su constante propia  $CP$ , no nos da como resultado un número entero, decimos que es un *devanado fraccionario irregular o asimétrico*.

No obstante, **en los devanados trifásicos de seis y doce polos**, en los que su número de bobinas  $B$  no es divisible por su constante propia  $CP$  (en este caso, según la tabla 8.1,  $CP = 9$ ) pero sí son divisibles por **3**, es posible ejecutar estos devanados por medio de un *devanado imbricado irregular*, que resultará suficientemente equilibrado en su funcionamiento, tanto para motores asíncronos de jaula de ardilla como para generadores de corriente alterna.

En este tipo de devanados no es posible una distribución regular de las bobinas, por medio del método del mínimo común múltiplo, como ocurría en los devanados fraccionarios regulares. No obstante, se ha comprobado en la práctica que este tipo de máquinas, de seis y doce polos, funciona correctamente con una distribución de bobinas como la reflejada en la tabla 8.3.

**TABLA 8.3.** Formación de los grupos de repetición en los devanados fraccionarios irregulares, de seis y doce polos.

Primer grupo de repetición, en función del número de polos y de las tres fases de la máquina									
Ug	Grupo polar 1°			Grupo polar 2°			Grupo polar 3°		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
E+1/3	E+1	E	E	E	E	E+1	E	E+1	E
E+2/3	E+1	E+1	E	E+1	E	E+1	E	E+1	E+1

El proceso de cálculo de este tipo de devanados, con excepción de la distribución de las bobinas por grupo  $Ug$ , para formar los grupos de repetición, cuyos valores más comunes son los de la tabla 8.3, es similar al seguido para los devanados imbricados regulares. Por tanto, no lo volveremos a repetir. El ejemplo siguiente nos terminará de aclarar este tema.

**Ejemplo 8.11.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina exapolar, asíncrona trifásica de 30 ranuras, ejecutando su devanado *por polos* y a doble capa.



Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras:  $B = K = 30$  bobinas.

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$ :

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \frac{30}{6} = 5 \text{ ranuras}$$

Ejecutaremos el devanado, con este mismo paso de ranura, que es igual a su paso polar.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $Ug$ :

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{30}{6 \times 3} = 1,666 = (1 + 2/3) \text{ bobinas}$$

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como *imbricado fraccionario*, con las características siguientes deducidas de la fórmula anterior:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{30}{18} = 1,666 = E + \frac{D}{d} = 1 + \frac{2}{3}$$

Los términos de la expresión final los interpretaremos como sigue:

- Número de bobinas que tiene un grupo pequeño =  $E = 1$
- Número de bobinas que tiene un grupo grande =  $E+I = 1+1 = 2$
- Número de grupos grandes de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $D = 2$
- Número de grupos pequeños de bobinas, por cada grupo de repetición y fase =  $(d - D) = 3 - 2 = 1$

Con estos datos ya podemos calcular el número de grupos de repetición  $GR$  que tendrá el devanado:

$$- \text{Número de grupos de repetición: } GR = \frac{2p}{d} = \frac{6}{3} = 2 \text{ grupos de repetición}$$

Pero al ir a verificar su simetría por medio de la tabla 8.1, comprobamos que el devanado fraccionario no es regular y simétrico por no ser entera la siguiente relación:

$$- \text{Condiciones de simetría: } \frac{B}{CP} = \frac{30}{9} = 3,333 = (\text{al no ser entero el devanado no puede ser regular})$$

Por tanto, al ser un devanado de seis polos, *la única posibilidad de ejecución es como devanado fraccionario irregular o asimétrico* (recordamos que solamente es posible esto en máquinas de 6 y 12 polos). Por tanto, para la distribución correcta de las bobinas, en la formación de los grupos de repetición, hemos de hacer uso de la tabla 8.3, tomando como punto de partida el valor  $Ug = 1,666 = 1 + 2/3$ .

- Directamente:  $GR = 2 = AA - BB - C ; AA - B - CC ; A - BB - CC$  (mas otro grupo de repetición igual)
- Por la tabla 8.3:  $E+1 - E+1 - E ; E+1 - E - E+1 ; E - E+1 - E+1 = AA - BB - C ; AA - B - CC ; A - BB - CC$  (más otro grupo igual)

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases  $Yq$  y se realiza la tabla de entradas correspondiente que, en este caso, tendrá pocas posibilidades de elección ya que muchos valores no son enteros:

- *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{30}{3 \times 3} = 3,333 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	4,333	7,666
10,999	14,332	17,665
20,998	24,331	27,664

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.14, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras de valor entero más aproximadas a los valores fraccionarios obtenidos en la tabla y mejor distribuidas, como son: 1, 8 y 14.

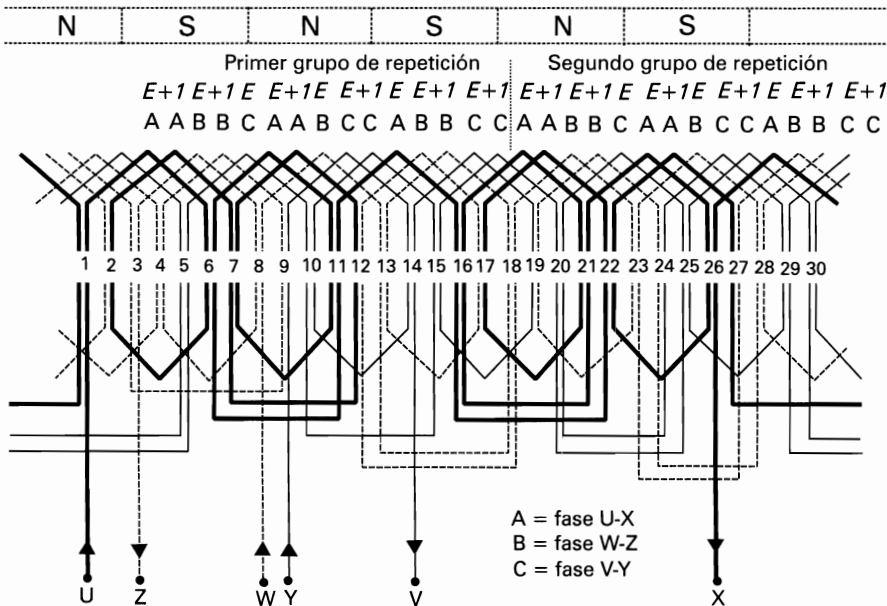


Figura 8.14. Esquema del devanado imbricado fraccionario irregular, trifásico, exapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.11.

## Devanados imbricados fraccionarios con tres bobinas muertas

Algunas veces se nos pueden presentar armaduras, con un número de ranuras tal que al realizar los cálculos para la ejecución de su devanado, se obtiene uno con las características de un devanado fraccionario irregular, pero en los que por el simple hecho de eliminar del mismo tres bobinas, **se puede conseguir ejecutar un devanado imbricado entero**. Por supuesto, este sistema solamente es realizable cuando, al eliminar las tres bobinas, con el resto ( $B-3$ ), se puede conseguir un devanado imbricado entero, por resultar entero el valor del número de bobinas por grupo  $U_g$ .

$$- \text{Posibilidad de ejecución: } U_g = \frac{B-3}{G} = \frac{B-3}{2p \cdot q} = \text{número entero}$$

Las tres bobinas, que denominamos **bobinas muertas**, no pueden elegirse de tres ranuras cualesquiera, sino que han de estar separadas unas de otras  $120^\circ$  eléctricos, y corresponder una bobina a cada fase.

Se comprende fácilmente que: cuando el número de polos de la máquina *no es múltiplo de tres*, las tres bobinas muertas se pueden colocar perfectamente separadas entre sí  $120^\circ$  geométricos, quedando equidistantemente distribuidas en la periferia de la armadura. Por el contrario, cuando el número de polos de la máquina *es múltiplo de tres*, la posición de las tres bobinas muertas ya no podrá ser equidistante entre sí, por lo cual se deben elegir como bobinas muertas, tres bobinas, una de cada fase, lo más equidistantemente posible entre sí. Una buena forma de conseguir una distribución lo más simétrica y equidistante posible de estas bobinas muertas, cuando el número de polos no es múltiplo de tres, es la de elegir como principios de fases, tres ranuras lo más equidistante posibles en la periferia de la armadura y, si el devanado es a doble capa, elegir como bobinas muertas tres que coincidan con las ranuras de principio de fases.

La inserción o no de las tres bobinas muertas en la armadura de la máquina siempre puede ser discutible, ya que no se conectan y no cumplen función eléctrica alguna. No obstante, es recomendable colocarlas siempre que el devanado corresponda a una armadura giratoria o rotor, con el fin de conseguir un mejor equilibrio dinámico de éste. Por el contrario, cuando el devanado no es giratorio, por corresponder a un estator de motor o generador, puede prescindirse de ellas, pero colocando en su lugar, dentro de las ranuras, un relleno apropiado, de material aislante, para la perfecta sujeción del devanado.

A continuación veremos dos ejemplos de cálculo y distribución de bobinas de este tipo de devanados. Uno de ellos es tetrapolar y, por tanto, no es múltiplo de tres, mientras que el otro es exapolar y, por tanto, múltiplo de tres, lo que como ya hemos dicho influye en la disposición de las bobinas muertas.

**Ejemplo 8.12.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina tetrapolar, asíncrona trifásica, de 39 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa.

Al ser el devanado de dos capas, en principio, el número de bobinas debería ser el mismo que su número de ranuras:  $B = K = 39$  bobinas.

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$ :

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \frac{39}{4} = 9,75 \text{ ranuras}$$

Para la mejor ejecución del devanado, lo realizaremos con un paso de bobina acortado de  $Yk = 7$  ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $Ug$ :

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{39}{4 \times 3} = 3,25 \text{ bobinas (valor fraccionario)}$$

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser imbricado entero, por tanto, deberemos, ejecutarlo como imbricado fraccionario. No obstante, **si le quitamos tres bobinas o las dejamos muertas**, puede ser perfectamente ejecutado como *devanado imbricado entero* ya que, de este modo, conseguimos un número de bobinas por grupo de valor entero, como vemos a continuación:

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \frac{B - 3}{2p \cdot q} = \frac{39 - 3}{4 \times 3} = 3 \text{ bobina por grupo (valor entero)}$$

Seguidamente se calcula la distancia entre principios de fases  $Yq$  y se realiza la tabla de entradas correspondiente.

$$- \text{Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \frac{39}{3 \times 2} = 6,5 \text{ ranuras}$$

Fase U	Fase V	Fase W
1	7,5	14
20,5	27	33,5

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.15, para el que hemos tomado como entradas de fases las tres ranuras con valor entero: 1, 14 y 27. Las bobinas muertas pueden ser distribuidas a  $120^\circ$  geométricos, por no ser el número de polos de la máquina múltiplo de tres y, por tanto, se distribuirán separadas entre sí esta distancia y tomando una de cada fase:

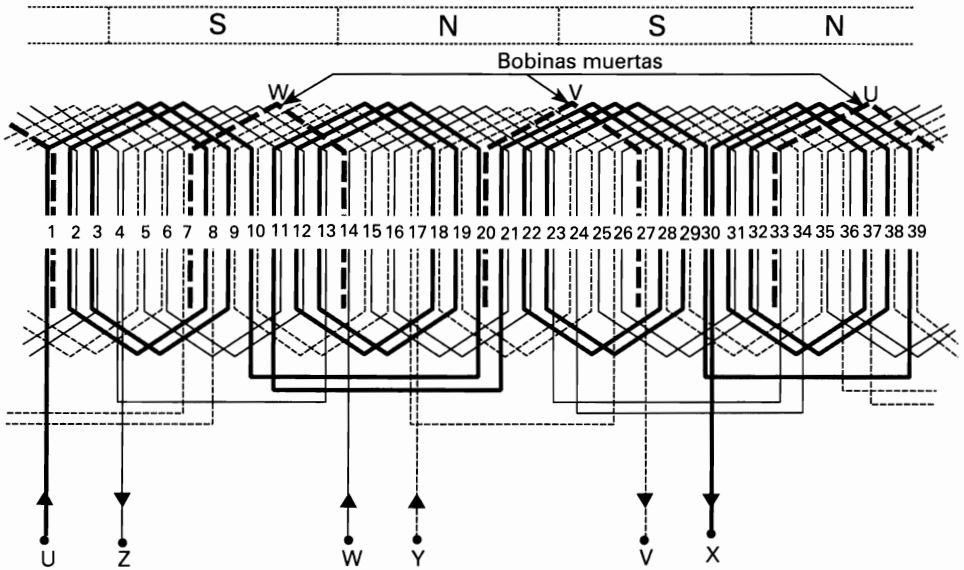


Figura 8.15. Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, tetrapolar, convertido en entero por medio de tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.12

**Ejemplo 8.13.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado, para una máquina exapolar, asíncrona trifásica de 21 ranuras, ejecutando su devanado *por polos* y a doble capa.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras:  $B = K = 21$  bobinas.

Primeramente calcularemos el paso de ranura o ancho de bobina  $Y_k$ :

– Paso de ranura o ancho de bobina:  $Y_k = \frac{K}{2p} = \frac{21}{6} = 3,5$  ranuras

Ejecutaremos el devanado, con un paso de bobina acortado de  $Y_k = 3$  ranuras.

A continuación se determina el número de bobinas por grupo  $U_g$ :

– Número de bobinas por grupo:  $U_g = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{21}{6 \times 3} = 1,166$  bobinas (valor fraccionario)

Al resultar un valor fraccionario, se aprecia que el devanado no puede ser imbricado entero, por tanto, deberemos ejecutarlo como imbricado fraccionario. No obstante, **si le quitamos tres bobinas o las dejamos muertas**, puede ser perfectamente ejecutado como *devanado imbricado entero* ya que, de este modo, conseguimos un número de bobinas por grupo de valor entero, como se ve a continuación:

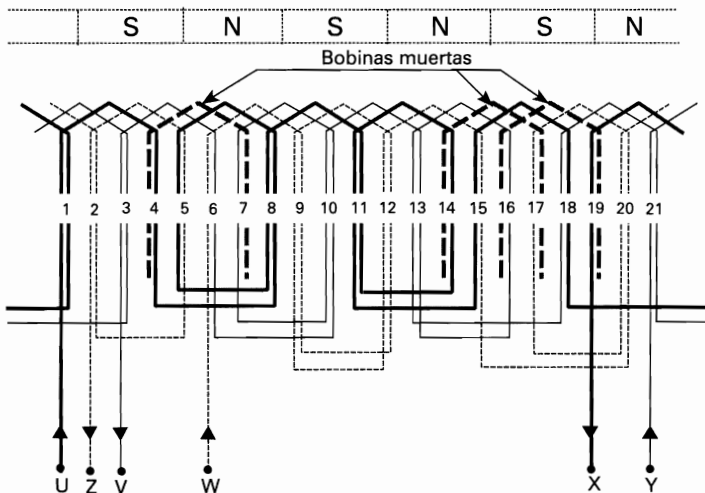
- **Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{B - 3}{2p \cdot q} = \frac{21 - 3}{18} = 1$  bobina por grupo (valor entero)

Seguidamente se calcula las distancia entre principios de fases  $Yq$  y se realiza la tabla de entradas correspondiente que, en este caso, tendremos pocas posibilidades de elegir para ello valores enteros, ya que la mayoría de los valores obtenidos son fraccionarios:

- **Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{21}{3 \times 3} = 2,333$  ranuras

Fase U	Fase V	Fase W
1	3,333	5,666
7,999	10,332	12,665
14,998	17,331	19,664

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema que es el correspondiente a la figura 8.16, para el que hemos tomado como entradas de fases las ranuras más próximas a los valores fraccionarios obtenidos en la tabla , como valor de compromiso y que son: 1, 3 y 6. Las bobinas muertas no pueden ser distribuidas a 120° geométricos, por ser el número de polos de la máquina múltiplo de tres y, por tanto, se distribuirán separadas entre sí 120° eléctricos y una por cada fase.



**Figura 8.16.** Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, exapolar, convertido en entero por medio de tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.13

### 8.3. DEVANADOS ONDULADOS, TRIFÁSICOS

Este tipo de devanados son muy parecidos a los ondulados de corriente continua y, aunque también pueden ser empleados en bobinados estáticos, se emplean preferentemente para la ejecución de rotores de motores asíncronos de corriente alterna, de mediana y gran potencia. Los devanados ondulados de corriente alterna se ejecutan normalmente *por polos* y *a dos capas* por ranura.

Son el tipo de devanado, de corriente alterna, menos empleado, a pesar de presentar ciertas ventajas con respecto a los concéntricos e imbricados, como son las enumeradas a continuación:

- Con este tipo de devanados se eliminan prácticamente todas las conexiones entre grupos de bobinas de una misma fase, quedando reducidas éstas a una única conexión por cada fase, denominada *puente de retorno*, como se aprecia en la figura 8.17.
- Este tipo de devanado permite una mejor distribución de las bobinas, permitiendo así un mejor equilibrio dinámico en los devanados rotóricos.

Los devanados ondulados de corriente alterna, se ejecutan de forma similar a los de corriente continua de su mismo nombre, es decir, al recorrer la armadura se avanza tanto por una cara como por la otra, hasta completar varias vueltas a la misma para que, de esta forma, por cada polo de la máquina, se vayan formando grupos de varias bobinas, como ocurre con cualquier otro tipo de devanado.

Según se aprecia en el dibujo de la figura 8.17, donde se ha representado una sola fase de un devanado trifásico, octapolar, con dos bobinas por grupo, cada fase está formada por dos partes perfectamente diferenciadas, unidas entre sí por el *puente de retorno*. Cada una de estas dos partes recibe el nombre de *progresiva* o *regresiva*, según cuál sea el sentido del avance de la misma por la periferia de la armadura, y tanto para el trazado del esquema como la ejecución del devanado puede empezarse por una u otra parte.

Según se aprecia en la figura 8.17, comenzando por la entrada de fase *U*, se va recorriendo el devanado, en sentido progresivo, tantas veces como bobinas por grupo tenga (dos veces en este caso por tener dos bobinas por grupo), para la formación de los grupos polares impares. Seguidamente y para que los grupos polares pares queden perfectamente formados, es necesario retroceder, por medio del puente de retorno y recorrer de nuevo el devanado otras tantas veces en sentido regresivo, hasta llegar al borne de salida *X*, ya que así la dirección de la corriente dentro de una misma ranura y grupo será la misma tanto en la parte progresiva como en la regresiva de la fase.

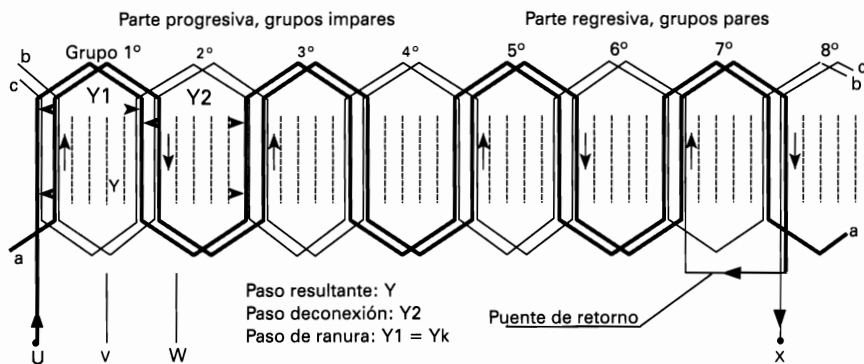


Figura 8.17. Representación simplificada de un devanado ondulado de corriente alterna.

La ejecución de los devanados ondulados solamente es posible, si el número de bobinas por grupo  $Ug$  es un número entero o entero más media unidad:

- Posibilidad de ejecución: 
$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \begin{cases} \text{número entero (ondulado entero)} \\ \text{número entero} + \frac{1}{2} \text{ (ondulado fraccionario)} \end{cases}$$

En el primer caso, cuando ( $Ug = \text{número entero}$ ), se obtiene un *devanado ondulado entero*, con igual número de bobinas por grupo, tanto en su parte progresiva como en la regresiva. Por el contrario, en el segundo caso, cuando ( $Ug = \text{número entero} + \frac{1}{2}$ ), se obtiene un *devanado ondulado fraccionario*, el cual tiene la particularidad de que los grupos de bobinas de la parte regresiva están formados por una bobina menos que los de la parte progresiva.

En la práctica se suelen utilizar solamente los *devanados ondulados enteros*, ya que permiten una mejor distribución de bobinas y, lo que es más importante, también permiten su ejecución con varios circuitos en paralelo –muy necesarios en máquinas de mediana y gran potencia–, por ser exactamente iguales sus partes progresiva y regresiva. Por el contrario, los devanados ondulados fraccionarios no permiten su ejecución con circuitos en paralelo, ya que no tienen, en sus dos partes, el mismo número de bobinas. En el caso de ser necesarios los devanados ondulados fraccionarios, con un solo circuito en serie, la distribución de sus grupos de bobinas debería hacerse por medio de la tabla 8.2, como en el caso de los devanados imbricados fraccionarios, pero solamente para el valor de  $Ug = E + \frac{1}{2}$ , como antes se mencionó.

Debido a los motivos antes expuestos, en lo que sigue describiremos solamente el cálculo y la ejecución de los devanados ondulados enteros.



## Proceso de cálculo de los devanados ondulados enteros

El orden y el proceso a seguir, para el cálculo y posterior dibujado del esquema, es similar al estudiado en el capítulo siete de esta obra, para los devanados ondulados de corriente continua, donde se partía del paso resultante  $Y$ , deducido del número de secciones inducidas o del número de delgas del colector [ $Y = Y1 + Y2 = (S \pm 1) / p = (D \pm 1) / p$ ]; mientras que aquí hemos de deducirlo a partir del número de bobinas  $B$  o del número de ranuras  $K$ , de la máquina. Por tanto, el orden a seguir es el siguiente:

1. Primeramente se comprueba la **posibilidad de ejecución**, teniendo en cuenta que para la ejecución de un devanado *ondulado entero* debe cumplirse:

$$- \text{Posibilidad de ejecución: } Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \text{Número entero}$$

Este mismo cálculo nos determina también el **número de bobinas por grupo**  $Ug$ , que ha de tener el devanado, tanto en su parte progresiva como regresiva.

2. A continuación se determinará el valor del **paso resultante**  $Y$  definido en el capítulo cinco de esta obra y de nuevo en la figura 8.17, por medio de la fórmula siguiente:

$$- \text{Paso resultante: } Y = Y1 + Y2 = \frac{B}{p} = \frac{K}{p} = \text{ranuras}$$

Recordamos que:  $B/p$  es igual a  $K/p$ , por ser el devanado ejecutado a dos capas y, por tanto, tener el mismo número de bobinas que de ranuras.

3. Seguidamente se determina el **paso de ranura o ancho de bobina**  $Yk$  que, en estos casos, es igual al ancho de sección  $Y1$ :

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = Y1 = \frac{K}{2p} = \text{ranuras}$$

4. A continuación se calcula el **paso de conexión**, que determinamos siempre *para un devanado sin cruzar*, según se describió en el capítulo cinco, cuyo valor es el siguiente:

$$- \text{Paso de conexión: } Y2 = Y - Y1 = Y - Yk = \text{ranuras}$$

Para una mejor ejecución, el llamado **paso anormal de conexión** se aumenta o disminuye en una unidad. Este paso es el que se produce entre el final de una vuelta del recorrido y el comienzo de las vueltas siguientes, cuando el devanado tiene más de una bobina por grupo (ver figura 8.17 y 8.19).

5. Seguidamente se determina la **distancia entre principios de fase** y se realiza la tabla de entradas correspondiente, por medio de la misma fórmula empleada para todos los devanados trifásicos descritos en este capítulo:

$$- \textit{Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \textit{ranuras}$$

Recordamos una vez más que se puede elegir cualquier ranura de la tabla como principio de cada fase. No obstante, si se trata de un devanado de rotor, conviene elegir como principios ranuras situadas lo más equidistantes posibles, con el fin de mejorar el equilibrio dinámico de la máquina.

6. Por último se dibuja el esquema completo, para lo cual siempre hemos de tener en cuenta que:

- Conviene numerar solamente los grupos de bobinas superiores, ya que las inferiores son en realidad las conexiones entre los diferentes grupos de bobinas, que para este tipo de devanados, ejecutados por polos, deben unirse el final de cada grupo con el principio del siguiente, al contrario que en los devanados concéntricos e imbricados.
- Los empalmes de las cabezas de las bobinas se unirán uno de la capa superior con otro de la inferior, por ser devanados a doble capa, lo mismo que luego ocurrirá con las secciones de las bobinas o con las pletinas al ser ejecutado el devanado.
- Los puentes de retorno, por el contrario, unirán siempre las bobinas o pletinas de una misma capa.
- Diferenciar las tres fases del devanado, bien sea, con colores o trazos diferentes.

A continuación veremos dos ejemplos de cálculo y dibujado del esquema de dos devanados ondulados, diferentes, según sus características eléctricas y de diseño.

**Ejemplo 8.14.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado, para el rotor de un motor asíncrono trifásico, decapolar, con armadura de 30 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa, comenzando el dibujo y la ejecución por la parte progresiva del devanado.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras:  $B = K = 30$  bobinas.

Empezaremos por verificar su posibilidad de ejecución, como *devanado ondulado entero*, que como ya se describió será el resultado de obtener como número de bobinas por grupo  $Ug$  un *número entero*. Por ser el devanado a doble capa, la fórmula requerida será:

– **Possibilidad de ejecución y número de bobinas por grupo:**

$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{30}{10 \times 3} = 1 \text{ bobina}$$

Como el resultado es un número entero, el devanado será perfectamente ejecutable, teniendo éste grupos de una sola bobina.

Seguidamente se determinará el paso de bobina resultante  $Y$ , en función del número de bobinas o de ranuras del devanado.

– **Paso resultante:**  $Y = \frac{K}{p} = \frac{30}{5} = 6 \text{ ranuras}$

Determinamos ahora el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$  que ha de ser igual al ancho de sección  $Yl$  y al paso polar de la máquina:

– **Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = Yl = \frac{K}{2p} = \frac{30}{10} = 3 \text{ ranuras}$

A continuación determinamos el paso de conexión  $Y2$ , en función de los ya calculados; paso resultante y paso de ranura:

– **Paso de conexión:**  $Y2 = Y - Yk = 6 - 3 = 3 \text{ ranuras}$

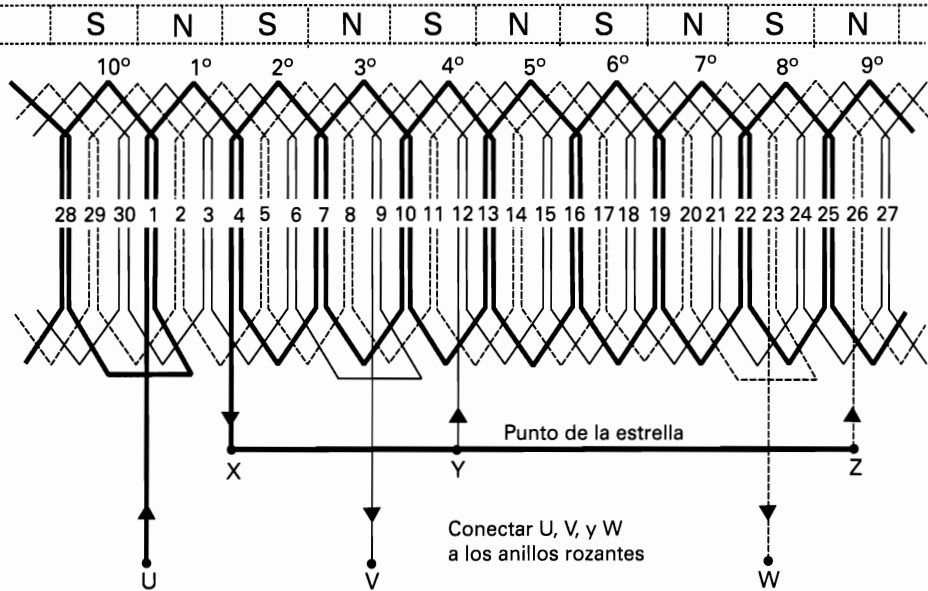
Por último, calcularemos la distancia entre principios de fase y realizaremos la tabla de entradas correspondiente:

– **Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{30}{3 \times 5} = 2 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	3	5
7	9	11
13	15	17
19	21	23

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.18, empleando los valores de pasos obtenidos, sin acortar nada, y para el que se han tomado, arbitrariamente, como principios de fase las ranuras: 1, 9 y 23.

**Ejemplo 8.15.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado ondulado, para el rotor de un motor asíncrono trifásico, tetrapolar, con armadura de 24 ranuras, ejecutando *por polos* y a doble capa, comenzando por el avance regresivo de las bobinas.



**Figura 8.18.** Esquema del devanado ondulado entero, trifásico, decapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.14.

Al ser el devanado de dos capas, el número de bobinas será el mismo que el de ranuras:  $B = K = 24$  bobinas.

Empezaremos por verificar su posibilidad de ejecución, como *devanado ondulado entero*, que como ya se describió será el resultado de obtener como número de bobinas por grupo  $U_g$  un número entero. Por ser el devanado a doble capa la fórmula requerida será:

– *Posibilidad de ejecución y número de bobinas por grupo:*

$$U_g = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ bobinas}$$

Como el resultado es un número entero, el devanado será perfectamente ejecutable, teniendo éste grupos de dos bobinas.

Seguidamente se determinará el paso de bobina resultante  $Y$ , en función del número de bobinas o de ranuras del devanado.

– *Paso resultante:*  $Y = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12$  ranuras

A continuación, se determina el paso de ranura o ancho de bobina  $Yk$ , que ha de ser igual al ancho de sección  $Yl$ :

– Paso de ranura o ancho de bobina:  $Yk = Y1 = \frac{K}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ ranuras}$

Determinamos a continuación el paso de conexión  $Y2$ , en función de los valores ya calculados del paso resultante y del paso de ranura:

– Paso de conexión:  $Y2 = Y - Yk = 12 - 6 = 6 \text{ ranuras}$

Para la perfecta formación de las polaridades correctas, el paso anormal de conexión o avance para el comienzo de la segunda vuelta, de cada fase, se realizará con una ranura más en su parte regresiva y con una ranura menos en su parte progresiva.

Por último, calcularemos la distancia entre principios de fase y realizaremos la tabla de entradas correspondiente:

– Distancia entre principios de fases:  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 2} = 4 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21

Con todos estos datos ya se puede dibujar el esquema, que es el correspondiente a la figura 8.19, y para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 9 y 17.

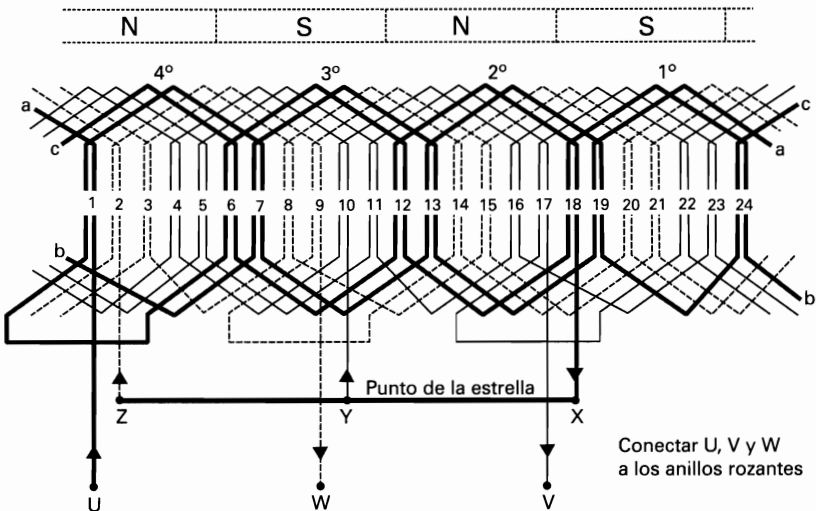


Figura 8.19. Esquema del devanado ondulado entero, trifásico, tetrapolar, ejecutado por polos y a doble capa, del ejemplo 8.15

## 8.4. DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA CON CIRCUITOS EN PARALELO

En todos los tipos de devanados de corriente alterna, descritos anteriormente, todas las bobinas y grupos de bobinas de una misma fase se conectaban en una única serie, para formar las polaridades correspondientes. No obstante, en algunos casos, ya sean máquinas grandes o pequeñas, se hace necesario conectar estos grupos de bobinas de tal forma que, dentro de una misma fase, queden formados dos o más grupos en paralelo, tal como se aprecia en los dibujos de la figura 8.20. La ejecución de los devanados con circuitos en paralelo suele hacerse por alguna de las dos razones siguientes:

- Conseguir que la máquina pueda funcionar, mediante una sencilla transformación de la conexión de sus circuitos en serie a paralelo, con dos o más tensiones de red si es un motor, o bien generando dos tensiones distintas si es un generador.
- Algunas veces también es necesario, para ajustar más fácilmente la tensión o fuerza electromotriz deseada, ya que ésta siempre ha de ser proporcional al número de espiras en serie por fase.

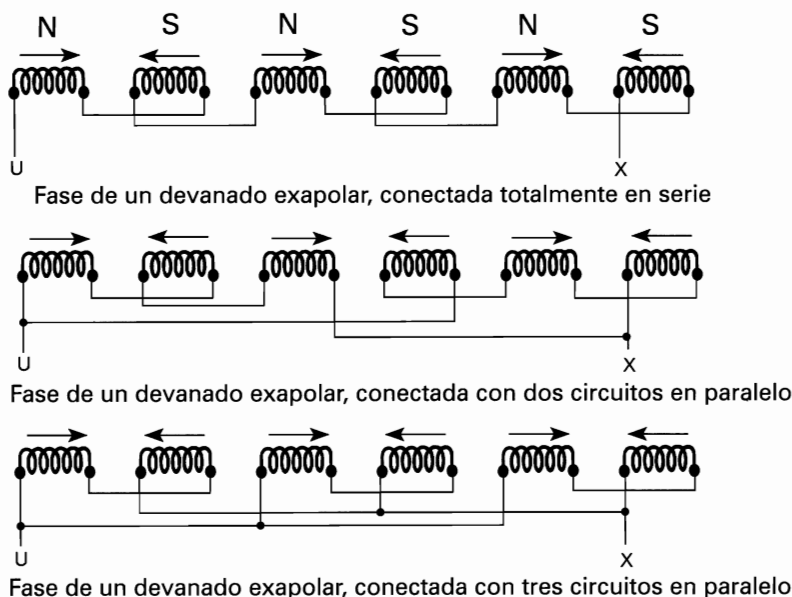


Figura 8.20. Definición de devanados con circuitos en paralelo.

Cuando se diseña o ejecuta el devanado de una máquina, provista de varios circuitos en paralelo, hay que asegurarse de que sus polaridades queden correctamente establecidas, de igual forma que si solamente tuvieran un circuito en serie por fase, ya sea éste ejecutado *por polos* o *por polos consecuentes*. También es muy importante que al deshacer el devanado de una de estas máquinas, se observe y anote con atención si éste tiene sus fases formadas por varias ramas en paralelo.

### Posibilidad de ejecución de devanados en paralelo

Para poder ejecutar correctamente un devanado con circuitos en paralelo, es muy necesario que en todos sus circuitos sean exactamente iguales: tanto su fuerza electromotriz o tensión como su impedancia; para lo cual deben cumplirse las dos condiciones siguientes:

- a. Todos sus circuitos deben tener el mismo número de bobinas y éstas el mismo número de espiras.
- b. Las corrientes que circulan por los diferentes circuitos en paralelo deben tener las direcciones apropiadas, para conseguir el número de polos deseado, ya sea el devanado ejecutado *por polos* o *por polos consecuentes*.

Para que se cumpla correctamente la primera condición es muy importante, al realizar las bobinas, que todas tengan el mismo número de espiras, sin excepción alguna, y además deben ejecutarse todas sobre un mismo molde, para que la longitud de su conductor no varíe entre ellas. De no ser así, al tener los diferentes grupos en paralelo impedancias distintas, podrían establecerse corrientes de circunvalación internas, entre las diferentes ramas en paralelo, que podrían llegar a ser muy perjudiciales para el buen funcionamiento de la máquina.

### Número de circuitos en paralelo

El número de circuitos en paralelo, que puede tener un devanado, no es arbitrario, sino que depende del tipo de ejecución (*por polos* o *por polos consecuentes*) y del número de polos de la máquina, según vemos a continuación:

- En los **devanados enteros**, ejecutados *por polos*, se podrán obtener tantos circuitos en paralelo, como divisores enteros tenga el número de polos ( $2p$ ) de la máquina. Sea por ejemplo el devanado de la figura 8.20, que tiene  $2p = 6$ ; en el que podrán realizarse devanados con: 1, 2, 3 y 6 circuitos en paralelo.

Por el contrario, si los devanados ejecutados *por polos* son **fraccionarios**, solamente podrán realizarse con tantos circuitos en paralelo, como divisores

enteros tenga su número de grupos de repetición  $GR$  (como ya vimos anteriormente:  $GR = 2p / d$ ); ya que, como es lógico, cada rama en paralelo ha de tener el mismo número de bobinas. Por ejemplo el devanado, tetrapolar, de la figura 8.12, podría ejecutarse, además de en serie, con dos circuitos en paralelo, por ser  $GR = 4 / 2 = 2$ , mientras que el octapolar de la figura 8.13, solamente puede ejecutarse en serie, por ser  $GR = 8 / 8 = 1$ .

- En todos los devanados ejecutados *por polos consecuentes*, se pueden obtener tantos grupos en paralelo, como divisores enteros tenga el número de pares de polos ( $p$ ) de la máquina. Sea, de nuevo, el ejemplo del devanado de la figura 8.20, con  $p = 3$ ; en el que solamente podrán ejecutarse devanados con: 1 y 3 circuitos en paralelo, de ser su ejecución por polos consecuentes.

### Proceso de cálculo de devanados de corriente alterna, con varios circuitos en paralelo.

El cálculo, dibujado del esquema y posterior ejecución de un devanado con circuitos en paralelo, es igual al expuesto para los diferentes tipos de devanados de corriente alterna, anteriormente descritos, en los que todos los grupos de bobinas de una misma fase se conectaban en serie. Solamente variará la forma de realizar las conexiones, entre los distintos grupos de una misma fase, para que queden correctamente formados todos los polos de la máquina, de forma idéntica a la que tendrían con todos los grupos de una misma fase conectados en serie, tal como queda perfectamente indicado en la figura 8.20.

A continuación vemos dos ejemplos de devanados con circuitos en paralelo, uno imbricado entero, ejecutado por polos consecuentes y otro imbricado fraccionario, ejecutado por polos. Los cálculos se realizarán sin apenas explicación previa, ya que son igual que para los devanados conectados en serie y éstos han sido ampliamente descritos en este mismo capítulo.

---

**Ejemplo 8.16.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado entero, para un motor asíncrono, trifásico, exapolar, con armadura de 36 ranuras, ejecutado por polos consecuentes, a una capa y *con tres circuitos en paralelo*.

$$\text{– Número de bobinas: } B = \frac{K}{2} = \frac{36}{2} = 18 \text{ bobinas ( por ser el devanado a una capa)}$$

$$\text{– Ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6 \text{ ranuras}$$



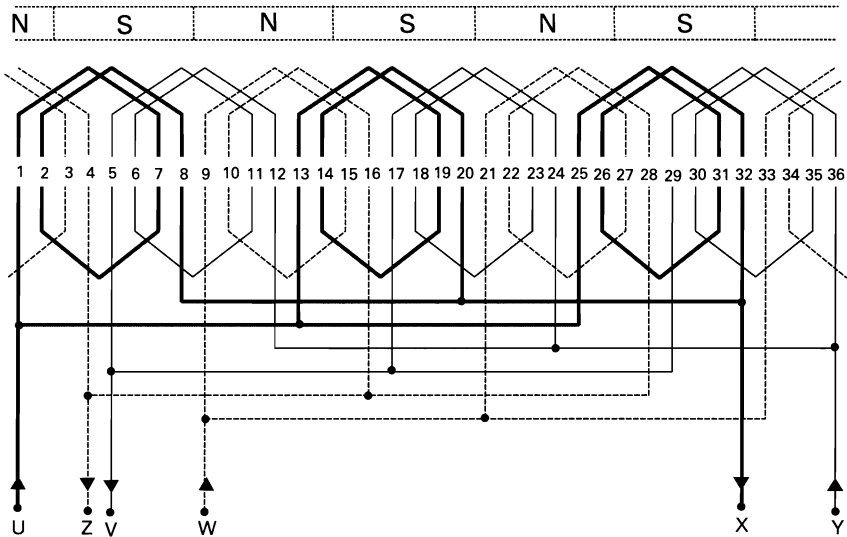
– *Número de bobinas por grupo:*

$$Ug = \frac{B}{p \cdot q} = \frac{18}{3 \times 3} = 2 \text{ bobinas (por ser de polos consecuentes)}$$

– *Distancia entre principios de fases:*  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{9} = 4 \text{ ranuras}$

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21
25	29	33

Seguidamente se dibuja el esquema, que vemos representado en la figura 8.21, para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 5 y 9.



**Figura 8.21.** Esquema del devanado imbricado entero, trifásico, exapolar, ejecutado por polos consecuentes y a una capa, con tres circuitos en paralelo, del ejemplo 8.16.

**Ejemplo 8.17.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado imbricado fraccionario, para un motor asíncrono, trifásico, octapolar, con armadura de 36 ranuras, ejecutado por polos, a dos capas y *con dos circuitos en paralelo*.

– *Número de bobinas:*  $B = K = 36 \text{ bobinas (por ser el devanado a doble capa)}$

- **Ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2p} = \frac{36}{8} = 4,5$  ranuras. Lo acortaremos a  $Yk = 4$  ranuras

- **Número de bobinas por grupo:**

$$Ug = \frac{B}{2p \cdot q} = \frac{36}{8 \times 3} = 1,5 = E + \frac{D}{d} = 1 + \frac{1}{2} = \text{bobinas}$$

Analizando este resultado tendremos: grupos de 1 y 2 bobinas ( $E$  y  $E + 1$ ), y cada grupo de repetición estará formado por un grupo grande de dos bobinas y otro pequeño de una sola bobina. El número de grupos de repetición será de:

- **Numero de grupos de repetición:**  $GR = \frac{2p}{d} = \frac{8}{2} = 4$  grupos de repetición

Con los datos obtenidos ya se pueden formar los grupos de repetición, con la ayuda de la tabla 8.2:

$E+1 - E - E+1$  ;  $E - E+1 - E = AA - B - CC - A - BB - C$  (cuatro grupos iguales)

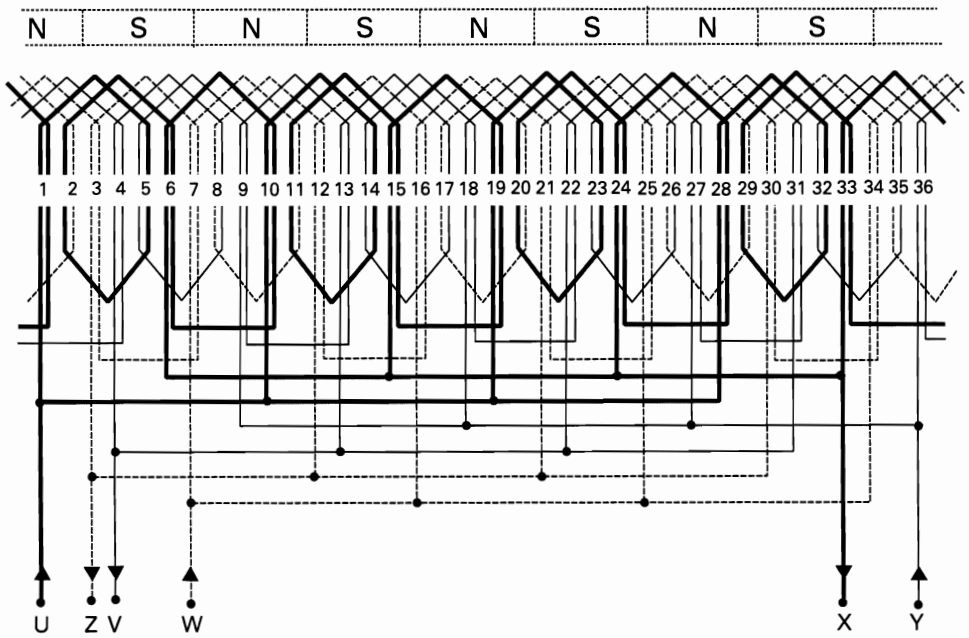
- **Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{36}{12} = 3$  ranuras

Fase U	Fase V	Fase W
1	4	7
10	13	16
19	22	25
28	31	34

Seguidamente se dibuja el esquema, que vemos representado en la figura 8.22, para el que se han tomado como principios de fase las ranuras: 1, 4 y 7.

### 8.5. CONEXIÓN DE DEVANADOS, CON CIRCUITOS EN PARALELO, PARA CAMBIO DE TENSIÓN DE UN MOTOR

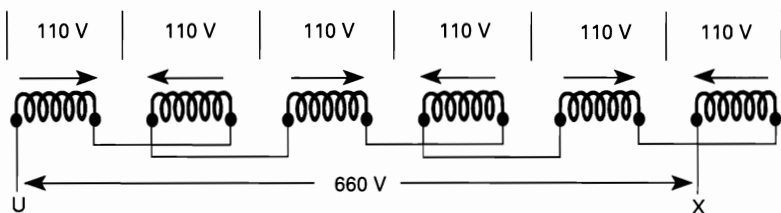
Aunque no son muy utilizados, los devanados con varios circuitos en paralelo pueden ser empleados para fabricar motores que funcionen con dos o más tensiones distintas; siempre unas múltiplo de las otras.



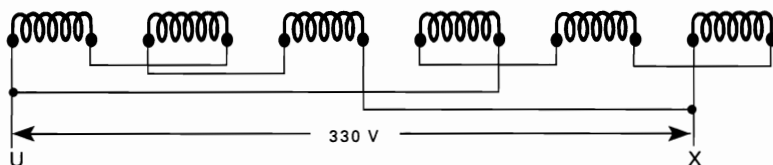
**Figura 8.22.** Esquema del devanado imbricado fraccionario, trifásico, octopolar, ejecutado por polos y a doble capa, con dos circuitos en paralelo, del ejemplo 8.17

Para ello no hay más que disponer las bobinas o grupos de bobinas de cada fase de forma tal que, bajo las distintas condiciones de alimentación, reciban siempre la misma tensión. Por supuesto, en la práctica, las agrupaciones posibles de bobinas no son más que las que se pueden realizar entre las distintas ramas en paralelo que tiene cada fase del devanado, tal como se aprecia con claridad en los esquemas de la figura 8.23.

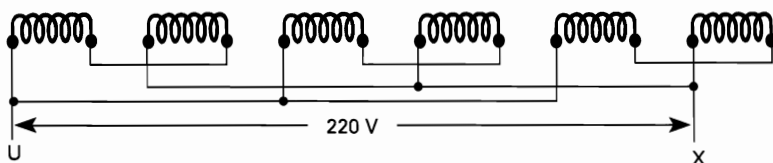
Como esta utilización de los devanados, con circuitos en paralelo, es muy poco utilizada y además la figura 8.23 es suficientemente explícita, no profundizaremos más en este tema. No obstante, si esto fuera necesario, ha de tenerse siempre la precaución de conservar los grupos polares, de cada fase, como unidades completas, sin intentar dividirlos nunca por mitades o por bobinas, para que conserven todos la misma impedancia. Y además, ha de tenerse el sumo cuidado para que, al realizar las conexiones en paralelo, se mantenga la correcta polaridad del motor, en todos los grupos de bobinas y fases.



Ejemplo de alimentación a 660 V. Conectado totalmente en serie



Ejemplo de alimentación a 330 V. Conectado con dos circuitos en paralelo



Ejemplo de alimentación a 220 V. Conectado con tres circuitos en paralelo

**Figura 8.23.** Posibilidad de los devanados, con circuitos en paralelo, para ser alimentados a varias tensiones.



# 9

---

---

## DEVANADOS PARA MOTORES DE DOS VELOCIDADES

### 9.1. MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS DE VARIAS VELOCIDADES

Los motores asíncronos trifásicos pueden construirse para más de una velocidad, bien sea realizándolos con varios devanados, de distinto número de polos, o bien con un solo devanado, pero construido de tal forma que pueda conectarse exteriormente con diferente número de polos. Por tal motivo, a algunos tipos de motores asíncronos trifásicos de varias velocidades se les denomina también *motores de polos conmutables*.

En la figura 9.1 se ven, esquemáticamente, los diferentes tipos de devanados y conexión de los mismos, que más se emplean actualmente en la construcción de motores de varias velocidades, siendo el segundo tipo el más utilizado de todos ellos.

Este tipo de motores, cuyo rotor se construye siempre de jaula de ardilla, se suele emplear por lo general para el accionamiento de máquinas herramientas y de ventiladores, y refiriéndonos a los tipos constructivos de la figura 9.1, sus características principales son las siguientes:

- **Motores con dos devanados independientes.** Estos motores tienen **dos velocidades** y se construyen de forma tal que cada devanado se ejecuta, interiormente, con un número de polos diferente y, por tanto, según se conecte a la red uno u otro devanado, el motor girará con un número de revoluciones diferente. En este tipo de motores suele conectarse ambos devanados en estrella y las combinaciones de polos más frecuentes son: 6/2, 6/4, 8/2, 8/6, 12/2 y 12/4.
- **Motores con un solo devanado, en conexión Dahlander.** Estos motores, de **dos velocidades**, se construyen con un devanado trifásico normal, pero

conectado interiormente de forma tal que según se conecten los bornes exteriores a la red, el motor tendrá un número de polos u otro distinto, pero siempre doble el uno del otro. Por tanto, tendrá dos velocidades de rotación, una doble que la otra. Según se aprecia en la figura 9.1, la conexión de sus devanados, se puede realizar en *triángulo o estrella*, para la velocidad menor y en *doble estrella* para la mayor, y las combinaciones de polos más frecuentes son: 4/2, 8/4 y 12/6.

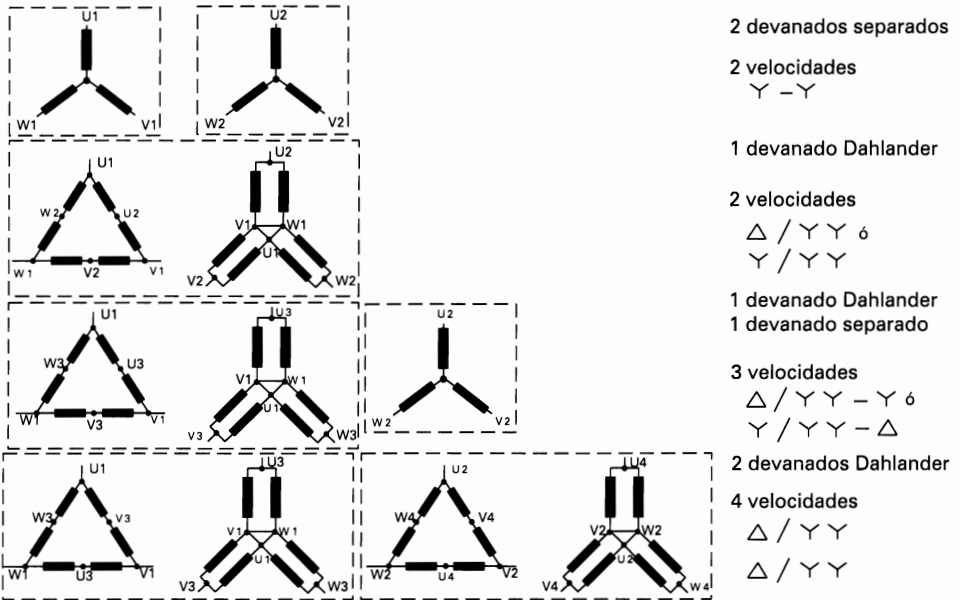


Figura 9.1. Sistemas de conexión de motores asíncronos trifásicos de varias velocidades.

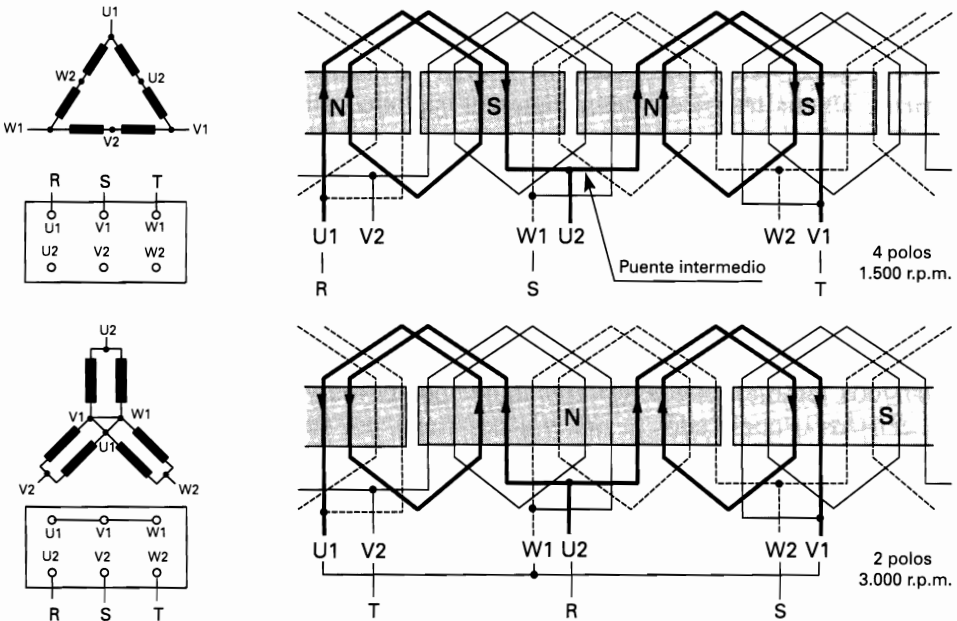
- **Motores con un devanado Dahlander y otro independiente.** Con este tipo de motores se consiguen **tres velocidades** diferentes: dos con el devanado en conexión Dahlander y la tercera con el devanado independiente, que estará construido con un número de polos distinto a las dos polaridades obtenidas con el primero. Las conexiones más utilizadas son las representadas en la figura 9.1 y las combinaciones de polos más frecuentes son: 6/4/2, 8/4/2, 8/6/4, 12/4/2, 12/6/4, 12/8/4, 16/12/8 y 16/8/4.
- **Motores con dos devanados Dahlander.** Con este tipo de motores se consiguen **cuatro velocidades**, dos con cada devanado, que han de estar diseñados para polaridades diferentes el uno del otro, siendo las combinaciones de polos más utilizadas: 12/8/6/4 y 12/6/4/2.

## 9.2 MOTORES DE DOS VELOCIDADES, EN CONEXIÓN DAHLANDER O DE POLOS CONMUTABLES

Aunque la solución más sencilla para conseguir motores de varias velocidades, podría parecer la de construir éstos con dos devanados independientes, cada uno de ellos con la polaridad correspondiente a la velocidad deseada, este sistema es muy poco empleado debido a que se necesitan ranuras de gran profundidad para que puedan acoger a los dos devanados, lo cual origina el inconveniente de tener que fabricar estos motores de gran tamaño, que junto con sus dos devanados encarece muchísimo la máquina.

Por tal motivo, el tipo de motor asíncrono trifásico de varias velocidades más utilizado, podríamos decir que casi el único que se emplea actualmente, es el de *un solo devanado en conexión Dahlander* y, por tanto, es el que describiremos con detalle a continuación; tanto en lo referente a su construcción como a sus devanados.

En la figura 9.2, está representado el devanado de un motor asíncrono trifásico en conexión Dahlander, donde se aprecia que solamente tiene un solo devanado, que puede ser concéntrico o imbricado, como el de cualquiera de los motores trifásicos descritos en el capítulo anterior. En dicha figura también se pueden apreciar tanto las conexiones internas como las conexiones de la placa de bornes a la red,



**Figura 9.2.** Conexiones internas, en triángulo y doble estrella, del devanado de un motor Dahlander, de 2 y 4 polos.



en sus dos posiciones de funcionamiento. Este motor se ha diseñado para trabajar con *cuatro polos*, cuando se conecta en triángulo y *dos polos*, cuando se conecta en doble estrella, estando ejecutado por polos consecuentes y a una capa, según se aprecia en el devanado de la fase *UI* resaltada en el dibujo.

En este tipo de devanados, conectados en *triángulo y doble estrella*, como el que se aprecia en la figura 9.2, la conexión triángulo, entre sus tres fases, se realiza en el interior del motor, con el fin de sacar solamente seis bornes a la placa de conexiones, como en cualquier devanado trifásico. Por tanto, para el arranque en la *velocidad menor* (en triángulo), no hay más que aplicar la tensión de la red a los bornes *UI*, *VI* y *WI* de la placa de conexiones, con lo cual quedan formados cuatro polos. Por el contrario, para la *velocidad mayor* (en doble estrella), se deben realizar dos operaciones: primeramente hay que cortocircuitar los bornes *UI*, *VI* y *WI*, para formar exteriormente la estrella y, a continuación, aplicar la tensión de la red a los bornes centrales *U2*, *V2* y *W2*, en su placa de conexiones, con lo cual se forman dos polos solamente.

### 9.3. PROCESO DE CÁLCULO DE UN DEVANADO DE DOS VELOCIDADES, EN CONEXIÓN DAHLANDER

El cálculo de los devanados de dos velocidades, denominados de polos conmutables o en conexión Dahlander, es similar al utilizado para los devanados de corriente alterna trifásicos, descritos en el capítulo ocho de esta obra, y como el tipo de conexión más utilizada es la de *triángulo - doble estrella*, la única diferencia al realizar éstos es que, *sus tres fases ya se conectan internamente en triángulo*, según se aprecia en la figura 9.2. Conexiones que se sacan a la placa de bornes como entradas de fase y que aquí, en vez de U, V, W, denominamos *UI*, *VI* y *WI* mientras que a los otros tres bornes de la placa se saca una conexión, obtenida del centro de cada fase y que denominamos *U2*, *V2*, *W2*, en vez de X, Y, Z.

Al igual que los otros devanados trifásicos de corriente alterna, este tipo de devanados también puede ser ejecutado: por polos y por polos consecuentes, concéntricos o imbricados, a una y a dos capas por ranura. Por tanto, en lo que sigue, se describirá de nuevo el proceso de cálculo, pero de forma resumida, para luego con unos ejemplos numéricos terminar de explicar esto.

Como este tipo de devanados ha de trabajar con dos polaridades distintas, para el cálculo hemos de utilizar también las dos, por tanto llamando: ( $2P$  y  $P$ ) al número de polos y de pares de polos, de la polaridad mayor, y ( $2p$  y  $p$ ) al número de polos y de pares de polos de la polaridad menor, para el cálculo habremos de utilizar una u otra según los criterios siguientes:

- Se deberá ejecutar con un *paso de ranura o ancho de bobina*, lo más aproximado a su paso polar, pero siempre con respecto al *número mayor de polos* que este debe tener ( $Yk = K / 2P$ ).
- Por el contrario, *el número de grupos de bobinas* se tomará con respecto al *número menor de polos*, tomando siempre: ( $Gf = 2p$ ) y ( $G = 2p \cdot q$ ). Cuando los grupos de bobinas por fase sean más de dos, se distribuirán en dos mitades iguales: una formada por los grupos polares impares y la otra por los grupos polares pares, unidos ambos por el puente intermedio de cada fase. Así quedarán mejor distribuidas sus polaridades, cuando hayan de conectarse las dos mitades en paralelo para la velocidad mayor, pudiendo ser observado este criterio en las figuras 9.2 y 9.4.
- Aunque sobre un mismo devanado se obtienen dos polaridades y éste ha de estar diseñado para ambas, la práctica aconseja tomar la *distancia entre principios de fase* con respecto a la *polaridad menor*, separadas unas de otras  $120^\circ$  eléctricos ( $Yq = K / 3p$ ). Por lo cual se realizará el cálculo y la tabla correspondiente, como en cualquier otro devanado trifásico.

Resumiendo, para el cálculo de devanados de polos conmutables o en conexión Dahlander, y de acuerdo con el tipo de devanado, se tomarán las polaridades siguientes:

- **Cálculos a realizar con la polaridad mayor ( $2P$  y  $P$ )**
  - *Para devanados concéntricos*
    - Número de ranuras por polo y fase ( $Kpq$ ).
    - Número de bobinas por grupo ( $Ug$ ).
  - *Para devanados imbricados*
    - Número de ranuras por polo y fase ( $Kpq$ ).
    - Paso de ranura o ancho de bobina ( $Yk$ ).
- **Cálculos a realizar con la polaridad menor ( $2p$  y  $p$ )**
  - *Para devanados concéntricos*
    - Número total y por fase de grupos de bobinas ( $G$  y  $Gf$ ).
    - Distancia entre principios de fase ( $Yq$ ).
  - *Para devanados imbricados*
    - Número total y parcial de grupos de bobinas ( $G$  y  $Gf$ ).
    - Número de bobinas por grupo ( $Ug$ ).
    - Distancia entre principios de fase ( $Yq$ ).

A continuación se recuerda de forma resumida, por haber sido extensamente comentados en los capítulos cinco y ocho de esta obra, el proceso de cálculo de estos devanados, tanto concéntricos como imbricados.

### Cálculos para devanados concéntricos

Tanto para devanados concéntricos por polos como por polos consecuentes, tendremos un número de ranuras por polo y fase de:

$$- \text{Número de ranuras por polo y fase: } Kpq = \frac{K}{2P \cdot q} = \text{ranuras}$$

$$- \text{Número de grupos de bobinas: } \begin{cases} Gf = 2p; G = 2p \cdot q & (\text{por polos}) \\ Gf = p; G = p \cdot q & (\text{por polos consecuentes}) \end{cases}$$

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \begin{cases} K/4P \cdot q & (\text{por polos. 1 capa}) \\ K/2P \cdot q & (\text{por polos. 2 capas}) \\ K/2P \cdot q & (\text{por polos consecuentes.} \\ & \text{1 capa}) \\ K/P \cdot q & (\text{por polos consecuentes.} \\ & \text{2 capas}) \end{cases}$$

$$- \text{Amplitud de grupo: } \begin{cases} m = (q-1) 2Ug & (\text{devanados por polos}) \\ m = (q-1) Ug & (\text{devanados por polos consecuentes}) \end{cases}$$

$$- \text{Paso de principios de fase: } Yq = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

### Cálculos para devanados imbricados

Como ya se mencionó en el capítulo ocho, los devanados imbricados se ejecutan generalmente *por polos*, bien sea a una o dos capas por ranura, con lo cual tendremos:

$$- \text{Número de ranuras por polo y fase: } Kpq = \frac{K}{2P \cdot q} = \text{ranuras}$$

$$- \text{Número de grupos de bobinas: } Gf = 2p; G = 2p \cdot q \text{ (devanados por polos)}$$

$$- \text{Número de bobinas por grupo: } Ug = \begin{cases} B/G = K/4p \cdot q & (\text{por polos. 1 capa}) \\ B/G = K/2p \cdot q & (\text{por polos. 2 capas}) \end{cases}$$

$$- \text{Paso de ranura o ancho de bobina: } Yk = \frac{K}{2P} = \text{ranuras}$$

$$- \text{Paso de principios de fase: } Yq = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

Seguidamente se verán dos ejemplos de cálculo y dibujado del esquema, para devanados de dos velocidades, en conexión Dahlander, uno concéntrico y otro imbricado, como compendio final de este capítulo.

**Ejemplo 9.1.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado concéntrico trifásico, para dos velocidades, en conexión Dahlander, de dos y cuatro polos, para un motor de 24 ranuras, ejecutado *por polos consecuentes* y a una capa.

Por ser el devanado a una capa, su número de bobinas será la mitad del número de ranuras:  $B = K / 2 = 12$  bobinas.

Primeramente calcularemos el número de ranuras por polo y fase  $Kpq$  (con la mayor de sus polaridades,  $2P = 4$ ), a la vez que comprobamos que es posible su ejecución entera ya que, al ser un devanado *por polos consecuentes*, se cumple que el resultado es un número *entero y par*.

$$\text{Número de ranuras por polo y fase: } Kpq = \frac{K}{2P \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ ranuras (número entero)}$$

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas (con la menor de sus polaridades,  $2p = 2$ ):

$$\text{Número de grupos de bobinas: } G = 2p \cdot q = 2 \times 3 = 6 \text{ grupos de bobinas}$$

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo (con la mayor de sus polaridades,  $2P = 4$ ), que al ser el devanado por polos consecuentes y a una capa lo obtendremos de la fórmula siguiente:

**Número de bobinas por grupo:**

$$Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2P \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2 \text{ bobinas por grupo}$$

Calculamos ahora la amplitud de grupo, para determinar el ancho de cada bobina, que al ser para un devanado por polos consecuentes, obtendremos de la fórmula siguiente:

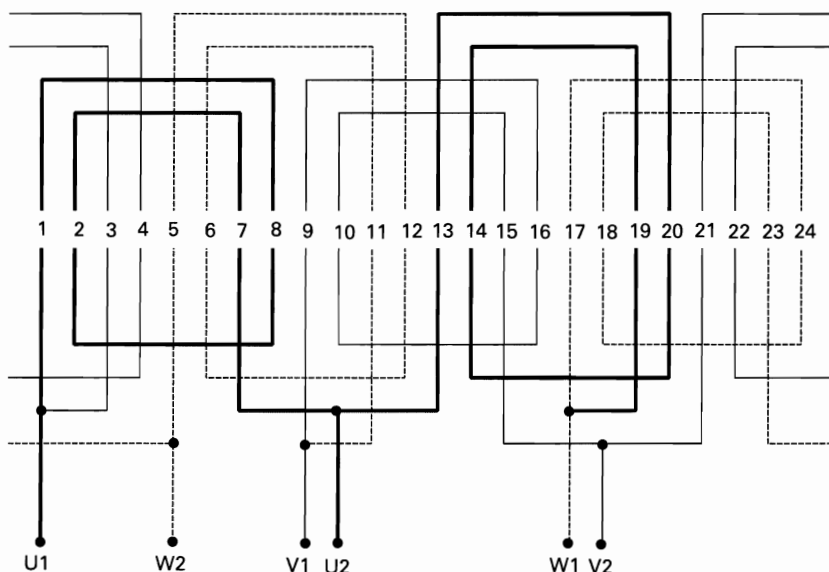
$$\text{Amplitud de grupo: } m = (q - 1) Ug = (3 - 1) 2 = 4 \text{ ranuras libres}$$

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases (con la menor de sus polaridades,  $2p = 2$ ) y elaboramos la tabla correspondiente:

$$\text{Distancia entre principios de fases: } Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 1} = 8 \text{ ranuras}$$

Fase U	Fase V	Fase W
1	9	17

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 9.3) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 9 y 17.



**Figura 9.3.** Esquema del devanado concéntrico, trifásico, de dos velocidades (2 y 4 polos), en conexión Dahlander, ejecutado por polos consecuentes y a una capa, del ejemplo 9.1.

**Ejemplo 9.2.** Calcular y dibujar el esquema correspondiente a un devanado imbricado trifásico, para dos velocidades, en conexión Dahlander, de cuatro y ocho polos, para un motor de 24 ranuras, ejecutado *por polos* y a doble capa.

Al ser un devanado a dos capas, su número de bobinas será igual al de ranuras:  $B = K = 24$  bobinas.

Primeramente calcularemos el número de ranuras por polo y fase  $K_{pq}$  (con la mayor de sus polaridades,  $2P = 8$ ):

$$\text{Número de ranuras por polo y fase: } K_{pq} = \frac{K}{2P \cdot q} = \frac{24}{8 \times 3} = 1 \text{ ranura}$$

Calculamos a continuación el número total de grupos de bobinas (con la menor de sus polaridades,  $2p = 4$ ):

**Número de grupos de bobinas:**  $G = 2p \cdot q = 4 \times 3 = 12$  grupos de bobinas

Seguidamente calculamos el número de bobinas que tiene cada grupo (con la menor de sus polaridades,  $2p = 4$ ):

**Número de bobinas por grupo:**  $Ug = \frac{K}{2p \cdot q} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$  bobinas por grupo

Calculamos ahora el paso de ranura o ancho de bobina (con la mayor de sus polaridades,  $2P = 8$ ):

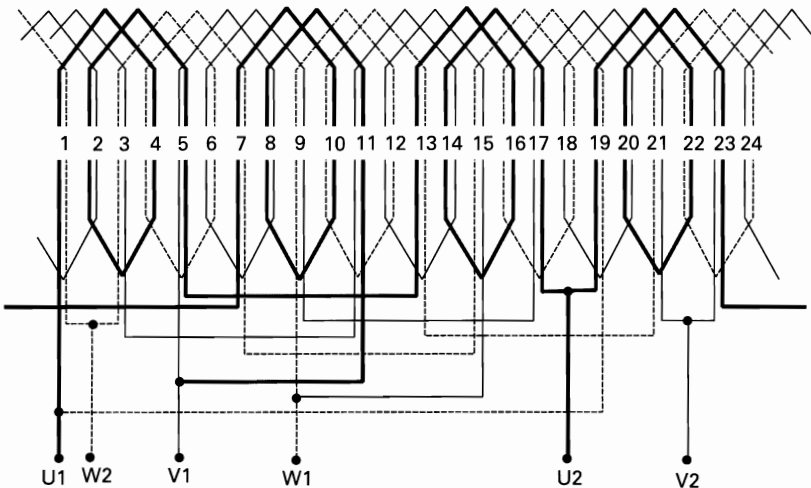
**Paso de ranura o ancho de bobina:**  $Yk = \frac{K}{2P} = \frac{24}{8} = 3$  ranuras

Por último, determinamos la distancia entre principios de fases (con la menor de sus polaridades,  $2p = 4$ ) y elaboramos la tabla correspondiente:

**Distancia entre principios de fases:**  $Yq = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 2} = 4$  ranuras

Fase U	Fase V	Fase W
1	5	9
13	17	21

Para dibujar el esquema correspondiente (figura 9.4) tomaremos como entradas de fases las ranuras: 1, 5 y 9.



**Figura 9.4.** Esquema del devanado imbricado, trifásico, de dos velocidades (4 y 8 polos), en conexión Dahlander, ejecutado por polos y a dos capas, del ejemplo 9.2.



# 10

---

---

## CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS MONOFÁSICOS DE CORRIENTE ALTERNA

### 10.1. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

Como ya se describió exhaustivamente en los apartados 3.8 a 3.12, de esta misma obra, existen muchos tipos de motores monofásicos de corriente alterna, siendo los más utilizados los denominados *motores monofásicos con devanado auxiliar de arranque*, también denominados de fase partida. A los motores con este tipo de devanados monofásicos, que pueden ser utilizados tanto con condensadores de arranque como sin condensadores de arranque, es a los que nos referiremos en este capítulo.

Los motores monofásicos con devanado auxiliar de arranque tienen dos devanados independientes, tal como se ve en los dibujos esquemáticos de la figura 10.1, a los cuales denominamos:

- Devanado principal o de trabajo.
- Devanado auxiliar o de arranque.

Los devanados principal y auxiliar, de este tipo de motores, pueden estar separados el uno del otro, ocupando ranuras distintas, o bien superpuestos, aunque siempre han de estar desfasados entre sí  $90^\circ$  eléctricos, en cuanto a su colocación en las ranuras de la armadura se refiere, tal como se aprecia en el dibujo de la figura 10.1 y en los esquemas de los ejemplos posteriores.

Según sea la colocación de ambos devanados, tendremos dos tipos de devanados monofásicos, denominados: *separados* o *superpuestos*. En los *devanados separados*, primeramente se coloca el devanado principal o de trabajo, y en ranuras distintas se coloca el devanado auxiliar o de arranque, por encima del primero, tal como se aprecia en la figura 10.1. Por el contrario, en los *devanados superpuestos*, las bobinas del devanado auxiliar de arranque se colocan en ranuras ocupadas parcialmente por otras del devanado principal de trabajo.



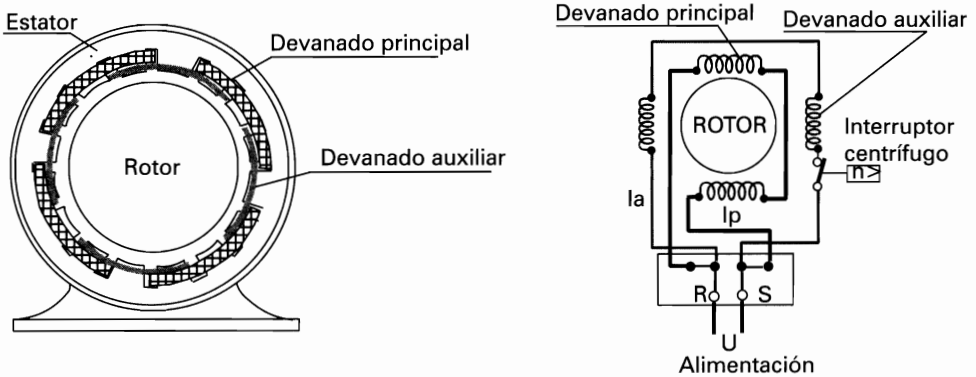


Figura 10.1. Disposición de los devanados y dibujo esquemático de un motor monofásico, con devanado auxiliar de arranque.

Estos dos posibles sistemas de colocación de los devanados traen como consecuencia pequeñas diferencias en el diseño de este tipo de devanados, que hay que tener muy en cuenta, tanto para el cálculo, como para el dibujado del esquema y posterior ejecución del devanado completo.

También hemos de decir que, aunque este tipo de devanados monofásicos podrían ser ejecutados como cualquier otro de corriente alterna –por polos y por polos consecuentes, concéntricos e imbricados–, por lo general se ejecutan: *por polos, concéntricos y a una capa*; aunque los devanados con bobinas superpuestas suelen ser ejecutados también de forma mixta a dos capas por ranura. Con esta forma de ejecución se obtienen las ventajas siguientes:

- Construcción y cálculo más sencillo.
- Permiten que los devanados principal y auxiliar tengan diferente número de espiras y diferente sección de hilo, aunque con los valores de impedancia convenientes al trabajo de cada uno.
- Se consigue un reparto de las cabezas de las bobinas más regular y uniforme, a lo largo de la armadura.

## 10.2. CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE DEVANADOS MONOFÁSICOS, DE FASE PARTIDA

Antes de detallar el proceso de cálculo de estos dos tipos de devanados monofásicos con bobinas separadas y con bobinas superpuestas, recordaremos la nomenclatura empleada para sus características principales, ya definidas en el capítulo 5 de esta obra. Al tener dos devanados cada motor, son éstas:

- Amplitud de grupo, del devanado principal o de trabajo :  $mp$
- Amplitud de grupo, del devanado auxiliar o de arranque:  $ma$
- Número de bobinas por grupo, del devanado principal o de trabajo:  $Up$
- Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar o de arranque:  $Ua$
- Paso de principios de fase:  $Yq = Y_{90}$
- Paso de ciclo:  $Y_{360}$

Recordamos también que, tanto en los devanados monofásicos con bobinas separadas como con bobinas superpuestas, los principios de fase de sus dos devanados principal y auxiliar se consideran como si de un solo devanado bifásico se tratara, debiendo estar éstos separados  $90^\circ$  eléctricos ( $4p$ ), en vez de los  $120^\circ$  eléctricos ( $3p$ ) de los devanados trifásicos, por lo cual esta distancia expresada en número de ranuras será:

- **Paso de principios de fase, en devanados monofásicos:**

$$Yq = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \text{ranuras}$$

Estos principios de fase hay que ir separándolos luego, unos de otros,  $360^\circ$  eléctricos, mediante el denominado **paso de ciclo** ( $Y_{360}$ ); que expresado en ranuras ha de tener un valor de:

- **Paso de ciclo, en devanados monofásicos:**  $Y_{360} = \frac{K}{p} = \text{ranuras}$

Con ambos pasos se realizará la tabla de entradas correspondiente, de forma similar a la representada en la tabla 10.1 y que, como ya se mencionó, es común a ambos devanados (principal y auxiliar) así como a ambas formas de ejecución (con bobinas separadas o con bobinas superpuestas).

**TABLA 10.1.** Principios de fase y de ciclo en los devanados monofásicos.

<b>Paso de ciclo <math>Y_{360}</math></b>	<b>Devanado principal</b>	<b>Devanado auxiliar</b>
	$A$	$B = A + Yq$
	$C = A + Y_{360}$	$D = B + Y_{360}$
<b>Paso de principios <math>Yq</math></b>		

### **Proceso de cálculo de devanados monofásicos, con bobinas separadas**

Éste es el tipo de devanado monofásico más empleado y, como ya se mencionó anteriormente, en este tipo de devanados monofásicos, los dos bobinados (princi-

pal y auxiliar) ocupan distintas ranuras de la armadura; ocupando siempre el principal mayor número de ranuras que el auxiliar, por ser el primero de hilo más grueso y tener que trabajar permanentemente, mientras que el auxiliar, que se construye de hilo más fino y menos espiras, por trabajar solamente unos segundos durante el arranque del motor, necesita menos ranuras. Por tanto, atendiendo a estas premisas, para ambos devanados se reserva la proporción de ranuras siguientes:

- Para el devanado principal de trabajo: *dos tercios de ranuras*.
- Para el devanado auxiliar de arranque: *un tercio de ranuras*.

Teniendo en cuenta este reparto y que, por lo general, son devanados ejecutados por polos y a una capa; se hallará primeramente el número de bobinas por grupo del devanado principal ( $U_p$ ) que, en este tipo de devanados, con bobinas separadas, coincide con su amplitud de grupo ( $mp$ ); siendo ambos valores:

- *Número de bobinas por grupo y amplitud de grupo:*

$$U_p = mp = \frac{2}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{6p}$$

A continuación se calculará el número de bobinas por grupo del devanado auxiliar ( $U_a$ ), así como su amplitud de grupo ( $ma$ ), por medio de las fórmulas siguientes:

- *Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar:*

$$U_a = \frac{1}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{12p}$$

La amplitud de grupo en este caso ha de ser doble que la correspondiente al devanado principal, ya que ha de acoger, en su interior, doble número de bobinas que el devanado principal:

- *Amplitud de grupo, del devanado auxiliar:*  $ma = 2 \frac{2}{3} \cdot \frac{K}{4p} = \frac{K}{3p}$

Seguidamente se deben calcular el *paso de principios de fase*  $Y_q$  y el *paso de ciclo*  $Y_{360}$ , y realizar la tabla correspondiente, como ya se describió, anteriormente, en este mismo capítulo.

Por último se dibuja el esquema, diferenciando el devanado principal del auxiliar y eligiendo como entradas de ambos devanados, las ranuras más convenientes de la tabla.

A continuación veremos un ejemplo concreto, de cálculo y posterior dibujado del esquema, de un devanado monofásico, ejecutado con bobinas separadas:

**Ejemplo 10.1.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado monofásico, con bobinado auxiliar de arranque, para un motor tetrapolar, con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos* y *con bobinas separadas*:

Primeramente se calculará el número de bobinas por grupo  $U_p$  y la amplitud de dicho grupo  $mp$ , del bobinado principal, expresada en ranuras, que como ya sabemos tienen ambos el mismo valor:

– *Número de bobinas por grupo y amplitud de grupo:*

$$U_p = mp = \frac{K}{6p} = \frac{24}{6 \times 2} = 2$$

A continuación se determina el número de bobinas por grupo y la amplitud del mismo, correspondiente al devanado auxiliar  $U_a$  y  $ma$ :

– *Número de bobinas por grupo, del devanado auxiliar:*

$$U_a = \frac{K}{12p} = \frac{24}{12 \times 2} = 1 \text{ bobina}$$

– *Amplitud de grupo, del devanado auxiliar:  $ma = \frac{K}{3p} = \frac{24}{3 \times 2} = 4$  ranuras*

Seguidamente, se calculan los pasos de principio  $Y_q$  y de ciclo  $Y_{360}$  y se elabora la tabla correspondiente, para elegir las ranuras que pueden ser entradas de fase:

– *Paso de principios de fase:  $Y_q = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \times 2} = 3$  ranuras*

– *Paso de ciclo:  $Y_{360} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12$  ranuras*

Devanado principal $U_p$	Devanado auxiliar $U_a$
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.2, para el que hemos tomado, de la tabla, como entradas de los devanados principal y auxiliar las ranuras 1 y 4, aunque se podían haber tomado también las ranuras: 13 - 16, 1 - 16 ó 4 - 13.

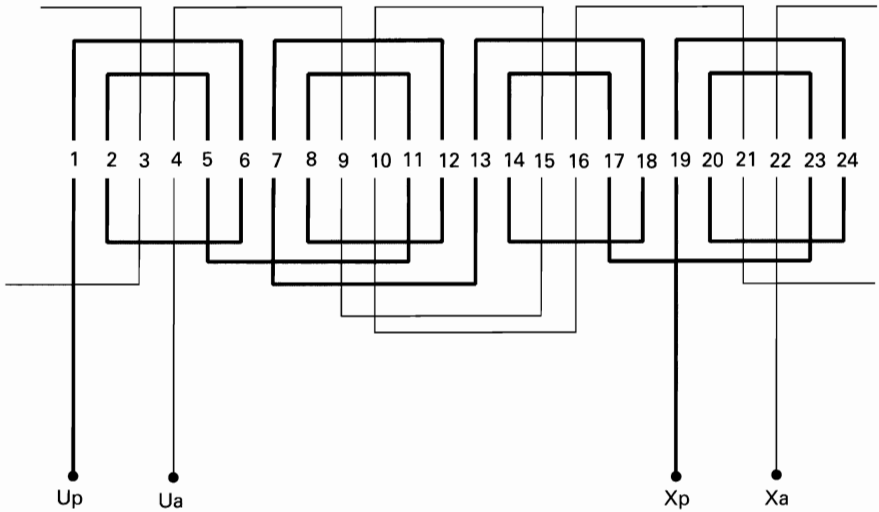


Figura 10.2. Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados separados, del ejemplo 10.1.

### Proceso de cálculo de devanados monofásicos, con bobinas superpuestas

En este tipo de devanados monofásicos, mucho menos utilizados que los de bobinas separadas, el proceso de cálculo puede parecer un poco extraño, ya que se debe partir de adoptar, de forma totalmente arbitraria, el número de bobinas por grupo, tanto de su devanado principal  $U_p$  como de su devanado auxiliar  $U_a$ , y cuyo valor puede ser tomado como *entero* o *entero mas media unidad*, dependiendo del valor obtenido para la amplitud del devanado principal  $m_p$ .

Si el valor de  $(U_a)$  es entero mas media unidad, significa que hemos de hacer la bobina exterior de cada grupo de bobinas con la mitad de espiras, y que cada dos de estas medias bobinas ocupará una misma ranura, al igual que ocurría en los *devanados mixtos*, concéntricos trifásicos, descritos en el capítulo ocho de esta obra.

Una vez adoptados estos valores, se determinará el número de ranuras que ocupará cada devanado principal y las que quedarán libres para el auxiliar, con las fórmulas siguientes:

- Número de ranuras ocupadas por el devanado principal:  $2p \cdot 2U_p$
- Número de ranuras libres:  $K - (2p \cdot 2U_p)$

A continuación se determinará la amplitud de grupo del devanado principal (*mp*), partiendo de las ranuras que ha de dejar libre este devanado, ya que son las bobinas del devanado auxiliar las que han de ocupar estas ranuras, por medio de la fórmula siguiente:

$$- \text{Amplitud de grupo del devanado principal: } mp = \frac{K - (2p \cdot 2Up)}{2p} = \text{ranuras}$$

Seguidamente se determinará la amplitud de grupo del devanado auxiliar (*ma*), de forma análoga al anterior, pero su valor, que ha de depender de los valores obtenidos para el devanado principal, ha de ser acorde con las siguientes condiciones:

Si: *mp* = número par, tendremos: *Ua* = número entero

Si: *mp* = número impar, tendremos: *Ua* = número entero + media unidad

$$- \text{Amplitud de grupo del devanado auxiliar: } ma = \frac{K - (2p \cdot 2Ua)}{2p} = \text{ranuras}$$

Por último se determinan las entradas de fase, por medio de los: pasos de principios de fase *Yq* y de ciclo *Y<sub>360</sub>*, y se elabora la tabla correspondiente, de idéntica forma a la utilizada para los devanados monofásicos con bobinas separadas.

A continuación veremos los ejemplos, de cálculo y posterior dibujado del esquema, de dos devanados monofásicos, ejecutados ambos con bobinas superpuestas, aunque con diferente número de bobinas por grupo cada uno, pero resultando ambos como devanados mixtos.

**Ejemplo 10.2.** Calcular y dibujar el esquema de un devanado monofásico, con bobinado auxiliar de arranque, para un motor tetrapolar, con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos y con bobinas superpuestas*.

Como ya sabemos, empezaremos por determinar, de forma totalmente convencional, aunque razonada, el número de bobinas por grupo de los devanados principal y auxiliar. Tomamos: *Up* = 2,5 y *Ua* = 1,5, con lo cual obtendremos un devanado doblemente mixto.

Con estos valores, determinamos a continuación la amplitud de grupo, del devanado principal (*mp*):

- *Amplitud de grupo del devanado principal:*

$$mp = \frac{K - (2p \cdot 2Up)}{2p} = \frac{24 - (4 \times 2 \times 2,5)}{4} = 1 \text{ ranura}$$

Seguidamente, determinamos la amplitud de grupo del devanado auxiliar (*ma*)

- **Amplitud de grupo del devanado auxiliar:**

$$ma = \frac{K - (2p \cdot 2Ua)}{2p} = \frac{24 - (4 \times 2 \times 1,5)}{4} = 3 \text{ ranuras}$$

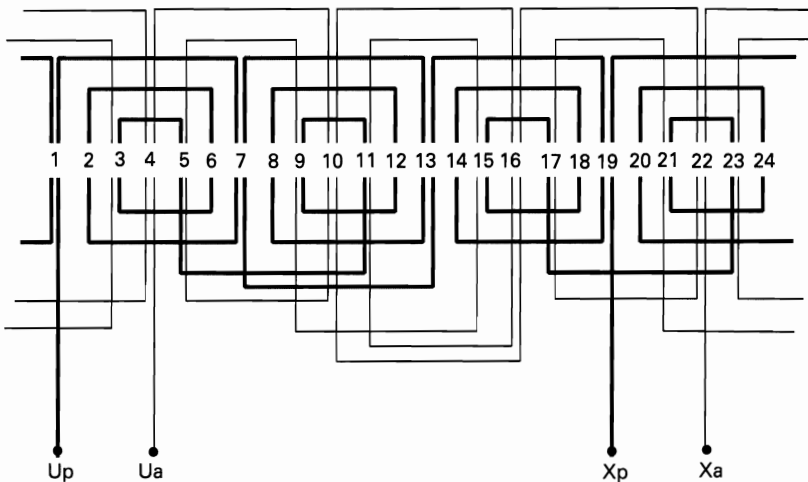
Por último, se calculan los pasos de principio  $Yq$  y de ciclo  $Y_{360}$  y se elabora la tabla correspondiente, para determinar las ranuras que pueden ser entradas de fase:

- **Paso de principios de fase:**  $Yq = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \times 2} = 3 \text{ ranuras}$

- **Paso de ciclo:**  $Y_{360} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$

Devanado principal $Up$	Devanado auxiliar $Ua$
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.3, para el que hemos tomado, de la tabla, como entradas de los devanados principal y auxiliar, las ranuras 1 y 4, al igual que en el ejemplo anterior.



**Figura 10.3.** Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados superpuestos, del ejemplo 10.2

**Ejemplo 10.3.** Calcular de nuevo el devanado del ejemplo anterior, pero con distinta solución, y dibujar el esquema correspondiente. También con 24 ranuras en su armadura, ejecutado *por polos y con bobinas superpuestas*.

Aunque se trata del mismo motor del ejemplo anterior (10.2), tomamos en este caso el mismo número de bobinas para ambos devanados:  $U_p = 2,5$  y  $U_a = 2,5$ , aunque conservando siempre el mismo número de espiras en total, en ambos devanados. También lo hemos diseñado como un devanado doblemente mixto.

Con estos nuevos valores, elegidos arbitrariamente, aunque después de estudiar el número de polos y de ranuras, para la mejor distribución de los grupos de bobinas, determinamos a continuación la amplitud de grupo, del devanado principal ( $mp$ ):

– **Amplitud de grupo del devanado principal:**

$$mp = \frac{K - (2p \cdot 2U_p)}{2p} = \frac{24 - (4 \times 2 \times 2,5)}{4} = 1 \text{ ranura}$$

Seguidamente, determinamos la amplitud de grupo, del devanado auxiliar ( $ma$ ) que, en este caso, coincide con la del devanado auxiliar, por tener ambos el mismo número de bobinas por grupo.

– **Amplitud de grupo del devanado auxiliar:**

$$ma = \frac{K - (2p \cdot 2ap)}{2p} = \frac{24 - (4 \times 2 \times 2,5)}{4} = 1 \text{ ranura}$$

Por último, se calculan los pasos de principio  $Y_q$  y de ciclo  $Y_{360}$  y se elabora la tabla correspondiente, para determinar las ranuras que pueden ser entradas de fase:

– **Paso de principios de fase:**  $Y_q = Y_{90} = \frac{K}{4p} = \frac{24}{4 \times 2} = 3 \text{ ranuras}$

– **Paso de ciclo:**  $Y_{360} = \frac{K}{p} = \frac{24}{2} = 12 \text{ ranuras}$

Devanado principal $U_p$	Devanado auxiliar $U_a$
1	4
13	16

Con estos datos ya se puede dibujar el esquema completo del devanado, que es el correspondiente a la figura 10.4, para el que hemos tomado como entradas de los devanados principal y auxiliar las ranuras 1 y 4, al igual que en los ejemplos anteriores.



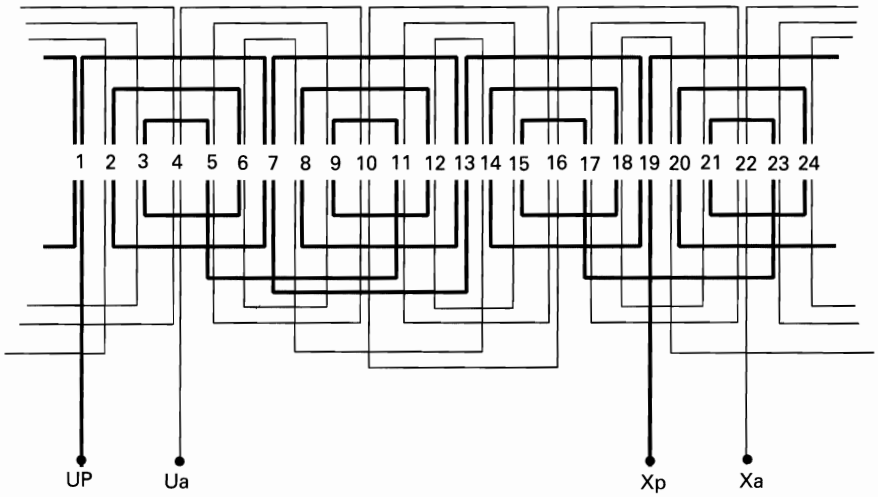


Figura 10.4. Esquema del devanado monofásico, de fase partida, tetrapolar, ejecutado por polos y con bobinados superpuestos, del ejemplo 10.3

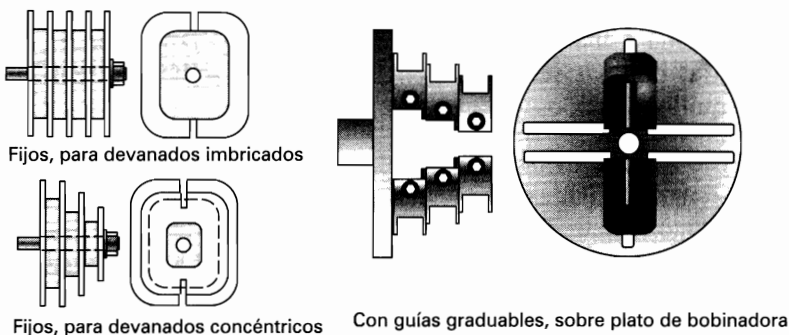
# 11

## EJECUCIÓN PRÁCTICA Y BARNIZADO DE MOTORES ELÉCTRICOS

### 11.1. CONSTRUCCIÓN DE BOBINAS

Las bobinas para la ejecución de los devanados eléctricos pueden construirse de muchas formas y tamaños, dependiendo siempre del tipo de máquina y de la potencia de la misma. Asimismo pueden ser: con el conductor de hilo o de pletina, construidas con los conductores ya aislados o con conductores desnudos y aislados posteriormente, con un solo conductor o con varios en paralelo, construidas manualmente o por medio de máquinas bobinadoras, etc.

Cuando las bobinas son de hilo, para el devanado correcto de las mismas se preparan moldes acanalados, apropiados a su longitud y anchura, de acuerdo con las medidas de la armadura que las ha de contener. Los moldes suelen fabricarse de: madera, metálicos o de materiales plásticos, a su vez pueden ser fijos o extensibles, para una sola bobina o múltiples, tal como se aprecia en los dibujos de la figura 11.1.



**Figura 11.1.** Moldes para la construcción de bobinas

Los moldes múltiples, suelen fabricarse con tantos módulos o partes como bobinas por grupo ha de tener el devanado, pudiendo ser estos módulos: todos iguales, si el devanado ha de ser imbricado, o bien de diferentes tamaños, cuando se trata de devanados concéntricos.

Cuando las bobinas son de pletina, por lo general de una sola espira, y para devanados ondulados, no pueden ser ejecutadas como las anteriores, debido a su mala flexibilidad, por lo cual suelen fabricarse o componerse moldes o plantillas apropiados a su perfil y se les va dando forma a las pletinas, bien sea de forma manual o con máquinas plegadoras, unas veces en forma de bobinas completas y otras de medias bobinas, como se aprecia en la figura 11.2.

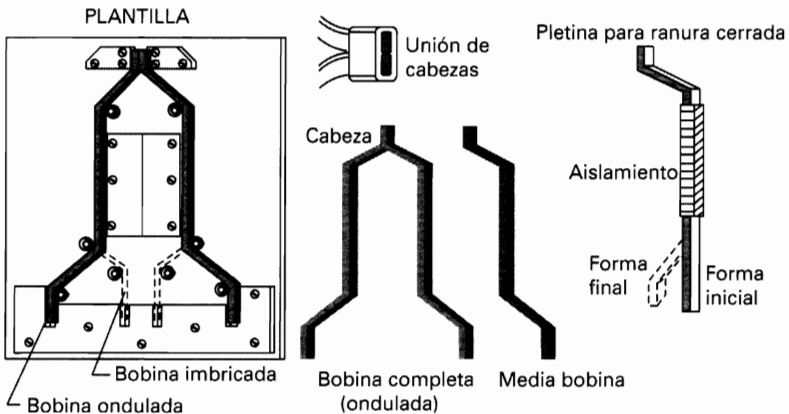


Figura 11.2. Moldes o plantillas para la construcción de bobinas de pletina.

Cuando las bobinas de pletina se emplean en armaduras con ranuras abiertas, pueden moldearse completamente las bobinas o medias bobinas. Por el contrario, cuando las ranuras son cerradas o semicerradas solamente se puede preparar una cabeza de la bobina y una vez aislada e introducida en la ranura, se les da la forma definitiva. Si las bobinas se construyen por mitades, se han de unir ambas, por medio de casquillos soldados, para completar la bobina.

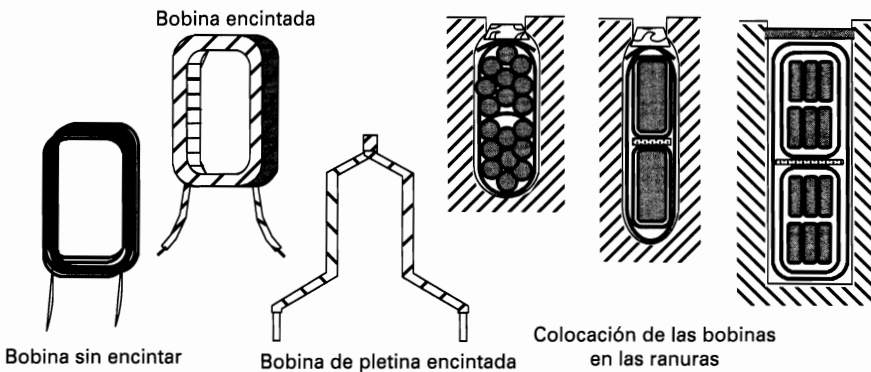
En la mayoría de los casos, cuando los devanados son de pletina, y se trata de rebobinar un devanado que se ha quemado, no es necesario moldear nuevas pletinas, ya que lo que se estropea generalmente es el aislamiento que las recubre, así como el aislamiento de las ranuras. En estos casos no hay más que extraerlas, limpiar y aislar de nuevo, pletinas y ranuras, y volverlas a introducir y conectar debidamente. Si las ranuras son cerradas o semicerradas, se complica el trabajo, ya que hay que enderezar una cabeza de cada bobina, para poder sacarlas, y una vez intro-

ducidas de nuevo, darles la forma que tenían en las cabezas. En estos casos, y para facilitar el trabajo de moldeado de las pletinas, es conveniente recocer el cobre, para aumentar su flexibilidad.

## 11.2. COLOCACIÓN Y AISLAMIENTO DE LAS BOBINAS

Una vez confeccionadas las bobinas, y sobretodo cuando se construyen de pletina desnuda o con conductores aislados con tejido de algodón, seda o fibra de vidrio, puede ser conveniente terminar su aislamiento. Esta tarea se suele realizar, a mano o a máquina, por medio de cintas de material aislante arrolladas sobre las bobinas, acordes con la clasificación térmica requerida por la máquina, según se aprecia en la figura 11.3. Si fuera necesario, se estrangularán las bobinas, antes del encintado, tal como se describe en el apartado 11.3.

Antes de introducir las bobinas en las ranuras del palastro, hay que limpiar dichas ranuras cuidadosamente sobretodo si es una máquina que hay que rebobinar, aislar las ranuras, con una o varias capas de material aislante, apropiado a la tensión y las características térmicas de funcionamiento de la máquina (ver capítulo 6).



**Figura 11.3.** Aislamiento de bobinas y su colocación en las ranuras de la armadura.

Seguidamente ya se pueden introducir las bobinas en las ranuras, cuidando de no dañar los aislamientos de conductores y ranuras, distribuyendo sus cabezas de la forma más apropiada posible, acordes con la distribución que ya tenían en el devanado viejo. Si el devanado fuera a doble capa por ranura, se colocará, en cada ranura, una o varias tiras de material aislante entre ambas bobinas. Por último, una vez introducidas todas las bobinas correctamente, se cierra el aislante de las ranuras sobre las bobinas y se colocan las cuñas de cierre de ranura, según se aprecia en las figuras 11.3 y 6.2 de esta obra.

Una vez introducidas todas las bobinas, ya se pueden conectar las bobinas y los grupos de bobinas entre sí, de forma igual a la dibujada en el esquema del devanado, con el fin de obtener las polaridades correctas requeridas por la máquina. Si el devanado es de pletina y está formado por medias bobinas, previamente hay que completarlas, uniendo sus cabezas posteriores, por medio de casquillos, soldados generalmente, tal como se aprecia en la figura 11.2.

Por último, y una vez verificadas y comprobadas las correctas conexiones del devanado, se aislarán convenientemente las cabezas de las bobinas y puentes de conexión, por medio de cintas y tubos aislantes, tejidos y láminas de papel o cartón, acordes con la clasificación térmica del resto de los aislamientos, y se atará éste convenientemente, antes de proceder al barnizado final del devanado.

### 11.3. ESTRANGULAMIENTO DE BOBINAS

En los devanados con bobinas rígidas e iguales –para armaduras de ranuras abiertas generalmente– como es el caso de los imbricados u ondulados, contruidos con pletinas o hilos muy gruesos, la construcción de las bobinas se realiza en dos fases: primeramente se devanan las bobinas sobre moldes o plantillas apropiadas, de tal forma que sus dos lados activos queden en el mismo plano, en vez de quedar paralelos como los de las bobinas fácilmente moldeables. A continuación, se procede a darles forma, abriendo éstas a la distancia requerida por su paso de ranura, quedando ambos lados paralelos entre sí, para su fácil introducción en las ranuras, tal como se aprecia en los dibujos de la figura 11.4.

A esta deformación final de las bobinas es a lo que se denomina *estrangulamiento* y a este tipo de bobinas estranguladas. El estrangulamiento o la deformación de las bobinas puede realizarse sobre el propio bastidor de la máquina de bobinar o bien por medio de un artilugio casero. En ambos casos y por medio de un husillo, se desplazan los dos lados activos de las bobinas, hasta la distancia e inclinación deseada. El aislamiento o encintado final de las bobinas suele realizarse una vez estranguladas, para evitar roturas y desgarrones durante el proceso de estrangulamiento.

Como los devanados pueden ser a una o dos capas por ranura, durante el estrangulamiento deberá tenerse esto presente, para que cuando se introduzcan las bobinas en las ranuras, ambos lados activos queden completamente paralelos (devanados a una capa), o bien paralelos pero desplazados media ranura, cuando el devanado es a doble capa y un lado activo ha de colocarse en el fondo de la ranura y el otro en el exterior, tal como se aprecia en los devanados de rotor y estator de la figura 11.4.

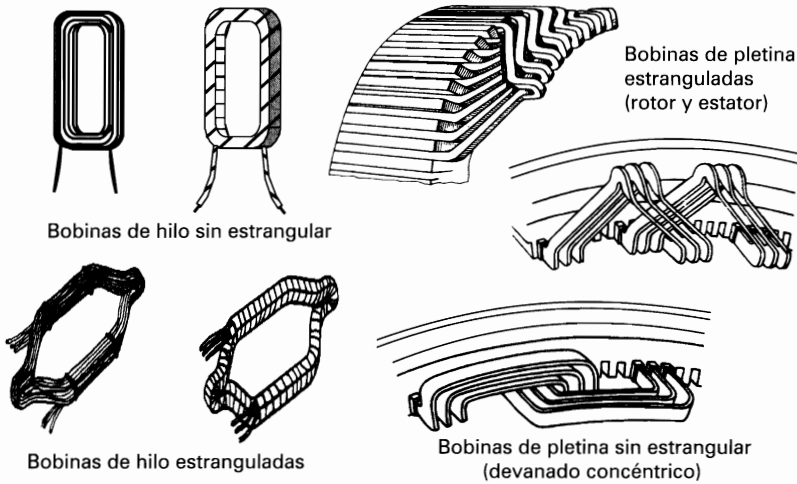


Figura 11.4. Ejecución y colocación de bobinas estranguladas.

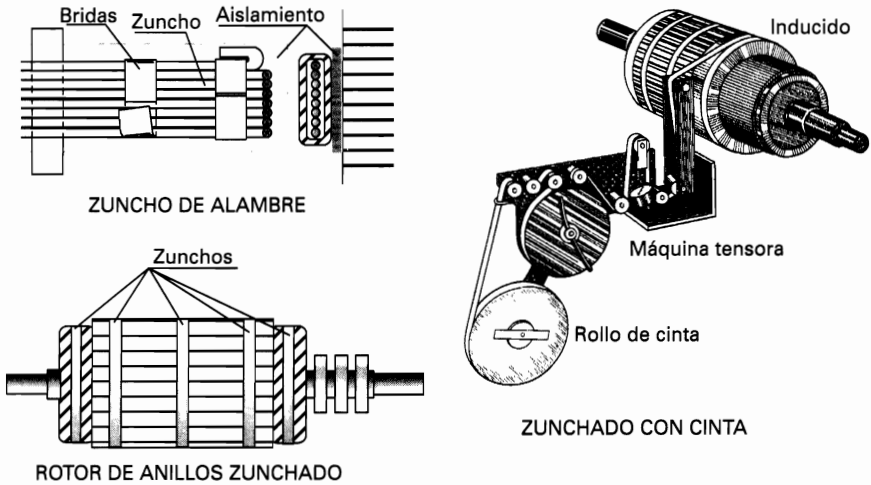
## 11.4. ZUNCHADO DE ROTORES E INDUCIDOS

En los devanados rotóricos y de inducidos, que están expuestos a una gran fuerza centrífuga durante su funcionamiento, podrían llegar a salirse las bobinas de las ranuras o bien abrirse las cabezas de las mismas, si no se toman medidas correctoras que lo eviten. Para ello deben atarse, fuertemente, mediante zunchos, tanto los lados activos como las cabezas de las bobinas, tal como se aprecia en la figura 11.5.

Antiguamente los zunchos se realizaban exclusivamente, con alambres metálicos de gran resistencia (acero, latón, etc.), de 0,5 a 1,5 mm de diámetro generalmente, colocando estos: sobre muescas efectuadas sobre el propio hierro del rotor, para la sujeción de los lados activos de las bobinas y sobre ambos lados de las cabezas de las bobinas, previo aislamiento, por medio de tiras de material aislante, acorde con las características térmicas del motor. Una vez realizados y tensados los zunchos, se sujetaban con pequeñas bridas o tiras de cobre o latón, soldadas al propio zuncho.

Actualmente el atado se realiza, casi exclusivamente, con cintas de fibra de vidrio, impregnadas generalmente de resinas de poliéster, que pueden llegar hasta la clase térmica de aislamiento tipo **F** (155°). Los hilos de fibra de vidrio que constituyen la cinta son paralelos entre sí y sin trama alguna, lo que junto con la resina de poliéster que los impregna, una vez ejecutado el zuncho, se polimerizan, por

medio de calor, apretando éste y dando lugar a una sujeción sólida y compacta de gran resistencia mecánica.



**Figura 11.5.** Zunchado de rotores e inducidos.

Los zunchos textiles, a base de fibras de vidrio y resinas sintéticas, presentan frente a los zunchos metálicos las siguientes ventajas:

- Poseen una gran resistencia a la tracción y unas excelentes cualidades aislantes, por lo que no es necesario colocar otros aislantes en la base del zunchado, con el consiguiente ahorro de espacio y tiempo.
- No son magnéticos, por lo que se eliminan totalmente los calentamientos que, por el efecto de las corrientes inducidas, pudieran aparecer en los zunchos metálicos.
- Al polimerizar la resina, una vez calentados los devanados, entre  $115^{\circ}$  y  $150^{\circ}$  generalmente, se produce una contracción que mejora el apretado del zunchado.
- No se corroen, por lo cual son apropiados para máquinas que trabajen en atmósferas cargadas de humedad.
- Debido a que no necesitan bridas de cierre o sujeción soldadas, como ocurre con los zunchos de alambre, resultan: más baratos, son más fáciles de colocar y se ahorra mucho tiempo.

## 11.5. BARNIZADO DE DEVANADOS ELÉCTRICOS

Los devanados de las máquinas eléctricas, una vez ejecutados, se recubren con barnices o resinas aislantes, que mejoran sus condiciones dieléctricas y mecánicas. Como ya se describió en el capítulo seis de esta obra, existen muchos tipos de barnices y resinas aislantes para poder ser utilizados en todo tipo de máquinas eléctricas, en función de las condiciones térmicas que estas hayan de soportar. Actualmente casi todos los tipos de resinas y barnices son de tipo sintético y de secado al horno, fabricándose barnices desde la clase térmica *B* (130°) a la clase térmica *F* (155°) y resinas hasta la clase térmica *C* (>180°).

Según sea el tamaño y el tipo de trabajo de la máquina, así como los medios disponibles en el taller, las tareas de: impregnación, relleno y acabado de los devanados eléctricos por medio de barnices o resinas, pueden ser realizadas con los medios y las formas siguientes, representadas en la figura 11.6:

- **Barnizado con pincel o vertido.** Este sistema de barnizado solamente se aplica en las reparaciones “in situ” o para máquinas de muy poca potencia devanadas artesanalmente, siendo su eficacia muy pequeña, debido a la poca penetración del barniz. En estos casos, el barniz se aplica por medio de una brocha o pincel, también se puede verter sobre el devanado o aplicar a pistola una vez diluido. Debe aplicarse el barniz con exceso, para conseguir una mayor penetración en las bobinas y materiales aislantes, empleándose muchas veces barnices de secado al aire, debido a su más fácil utilización. Si el barniz no es de secado al aire, el secado posterior ha de hacerse siguiendo las recomendaciones del fabricante del barniz.
- **Barnizado por inmersión.** En este procedimiento de barnizado los bobinados, previamente secados (a temperaturas entre 110° y 120°) y aun calientes (entre 35° y 80° generalmente), de acuerdo con las instrucciones del fabricante del barniz o resina, se sumergen enteramente en el barniz, en cubas apropiadas, girándolos y moviéndolos en todos los sentidos para que escapen todas las burbujas de aire ocluidas. Cuando las máquinas son muy grandes, se realiza el barnizado por inmersiones parciales, dando siempre tiempo a que el aire ocluido salga completamente.

Cuando se ha conseguido la impregnación total del devanado, se retira éste y se deja escurrir, antes de ser introducido en la estufa u horno de secado; donde debe ser secado y curado según los tiempos y las temperaturas recomendadas por el fabricante del barniz, que pueden oscilar de 110° a 160° y entre 30 minutos y 48 horas.

- **Barnizado al vacío y a presión.** Este procedimiento de barnizado se utiliza cada vez más, tanto en las fabricas de máquinas eléctricas como en los talle-



res de bobinados de gran solvencia y calidad de servicio, ya que con él se obtienen las ventajas siguientes:

- La impregnación a fondo del barniz aislante y una gran compacidad y resistencia mecánica del devanado.
- La eliminación total de toda la humedad del devanado, aun en las capas más profundas del mismo, así como la eliminación total del aire ocluido.
- Una mejor calidad del aislamiento obtenido, que permanece en el tiempo sin alteración alguna.
- Una mayor resistencia a: los choques, las vibraciones y los efectos electrodinámicos, así como una mayor protección a los agentes medioambientales.

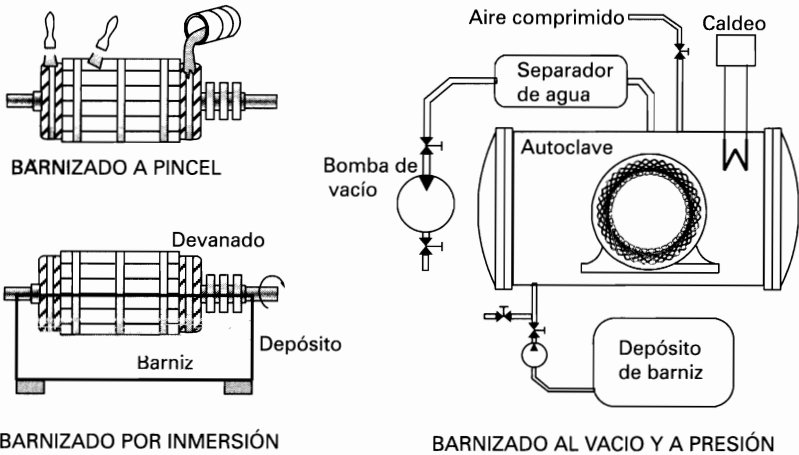


Figura 11.6. Barnizado de devanados eléctricos.

El proceso de barnizado, por este sistema de vacío y a presión, es algo distinto a los anteriormente enumerados. Se suele hacer en cuatro fases, generalmente, como las descritas a continuación:

- **Secado previo del devanado.** Éste se puede realizar en horno aparte o en el propio autoclave o cuba de impregnación y secado. En el primer caso se calienta entre  $110^{\circ}$  y  $120^{\circ}$ , durante unas horas, dependiendo del tamaño del devanado, hasta que quede totalmente exento de humedad. Si el secado se realiza en el propio autoclave, se calienta a unos  $110^{\circ}$  y, por medio de la bomba, se realiza el vacío (a 1 bar ó 750 mm de columna de mercurio), manteniendo la temperatura y el vacío durante unas horas, dependiendo del tamaño de la máquina. A continuación, y en ambos casos, se desconecta la

bomba de vacío y se deja enfriar hasta que el devanado alcance los 35° o 50° aproximadamente, antes de proceder al barnizado.

- **Impregnación al vacío y a presión.** Después de secado el devanado y con éste aun caliente, se produce de nuevo el vacío en la cuba y, cuando se haya completado, se desconecta la bomba de vacío y se inyecta el barniz, procurando que cubra completamente todos los arrollamientos. Durante este proceso es conveniente que el vacío sea al menos de unos 0,5 bar ó 350 mm de mercurio, para que el barniz pueda penetrar hasta los últimos rincones del devanado.

Por lo general, se reconoce que el barniz ha penetrado suficientemente, cuando dejan de aparecer burbujas en su superficie, en un proceso que suele durar entre 30 minutos y 1,5 horas, dependiendo del tamaño del devanado.

- **Escurrido.** Una vez seguros de que el devanado ha sido impregnado convenientemente, se inyecta aire a presión en la cuba o autoclave, para facilitar el primer escurrido del barniz. El barniz de este primer escurrido, que puede durar una hora, se recoge de nuevo en el depósito para su posterior reutilización.

Para mejorar el escurrido del barniz sobrante, es conveniente elevar de nuevo la temperatura a unos 70° u 80° y hacer de nuevo el vacío, el barniz sobrante de este segundo escurrido, al vacío y en caliente, no es conveniente reutilizarlo de nuevo, por haber sido alterado en su composición, debido a la temperatura.

- **Secado final.** Una vez que el devanado esté completamente escurrido, se eleva de nuevo la temperatura del autoclave o cuba, entre 120° y 200°, de acuerdo con el tipo de barniz y recomendaciones del fabricante, produciendo de nuevo un vacío, de entre 0,5 bar ó 400 mm de mercurio. Manteniendo la temperatura durante una hora o algo más, el vacío habrá alcanzado la cota de 1 bar ó 750 mm de columna de mercurio, aproximadamente.

Seguidamente se termina de secar el barniz, a la temperatura y el tiempo recomendado por el fabricante, hasta su total curación o polimerización. Este proceso final de secado y curación puede realizarse en horno aparte, en vez de en el propio autoclave o cuba de impregnación, con el fin de aumentar el rendimiento y la vida de éste.



# 12

---

---

## MODIFICACIÓN DE DEVANADOS ELÉCTRICOS DE CORRIENTE ALTERNA

### 12.1. CAMBIO DE TENSIÓN

Dado que la tensión en bornes de una máquina de corriente alterna es proporcional al número de espiras en serie por fase y a la frecuencia de la corriente de alimentación, para el cambio de tensión debe modificarse alguna de estas dos variables. La relación entre unas variables y otras nos viene dada por la misma relación de transformación, empleada para los transformadores eléctricos, que se obtiene a partir de las fuerzas electromotrices inducidas en bobinas, de un determinado número de espiras  $N$ :

$$\begin{aligned} \text{f.e.m. inducida en el primario: } \frac{V_p}{V_s} &= \frac{4.44 N_p \cdot f \cdot \Phi}{4.44 N_s \cdot f \cdot \Phi} = \frac{N_p}{N_s} \\ \text{f.e.m. inducida en el secundario: } \end{aligned}$$

La intensidad de corriente, por el contrario, ha de ser inversamente proporcional a la tensión de funcionamiento del motor, con lo cual las relaciones completas entre los devanados primario y secundario de un transformador son:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = m$$

Por tanto, si consideramos que el número de espiras eficaces en un determinado devanado es el número de espiras conectadas en serie, por fase, y llamando:  $N$  al número de espiras actual y  $N'$  al número de espiras futuro, si además consideramos como:  $V$  a la tensión actual y  $V'$  la tensión prevista, e  $I$  a la intensidad actual e  $I'$  a la futura, podemos aplicar las mismas relaciones para el cambio de la tensión de trabajo de un motor o generador:

$$\frac{V}{V'} = \frac{N}{N'} = \frac{I'}{I}; \text{ Espiras para la nueva tensión: } N' = N \frac{V'}{V}$$

Por la misma relación podemos determinar la nueva intensidad  $I'$  que circulará por el nuevo devanado. Pero como en la práctica los hilos empleados en los devanados se suelen medir por su diámetro o sección (ver capítulo 6, tabla 6.2, de esta obra), en vez de trabajar con las intensidades, podemos trabajar directamente con la sección de los conductores necesaria. Así llamando  $S$  a la sección actual y  $S'$  a la sección futura tendremos:

$$\text{Intensidad para la nueva tensión: } I' = I \frac{V}{V'}; \text{ Nueva sección: } S' = S \frac{V}{V'}$$

Si partimos del diámetro de los conductores, siempre que sean éstos circulares, podemos obtener la sección de los mismos por medio de la fórmula siguiente:

$$\text{Sección de un conductor en función del diámetro: } S = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0,785 d^2$$

Para todos estos cálculos, dado que la mayoría de los motores de corriente alterna pueden trabajar con dos tensiones distintas, una en estrella y la otra en triángulo, hemos de partir de tensiones de fase o bien referidas al mismo tipo de conexión.

Por otra parte, también sabemos que la densidad de corriente que puede circular por un conductor disminuye al aumentar su sección, el espesor de su aislamiento, así como de la velocidad del motor y de la ventilación del mismo, pudiendo llegar en los motores normales desde 2 a 6 A/mm<sup>2</sup> aproximadamente. Por tanto, una vez obtenidas las nuevas intensidades y secciones del conductor, para la nueva tensión

TABLA 12.1. Intensidades máximas, de los hilos de cobre para devanados de B.T.

Diámetro en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Intensidad, en A	Diámetro en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Intensidad, en A	Diámetro en mm	Sección en mm <sup>2</sup>	Intensidad, en A
0,25	0,049	0,30	1,80	2,545	12	2,60	5,309	26
0,40	0,125	0,70	1,90	2,835	14	2,80	6,157	28
0,60	0,283	1,60	2,00	3,142	16	3,00	7,069	31
0,80	0,503	2,60	2,10	3,463	18	3,20	8,042	33
1,00	0,785	4,00	2,20	3,801	19	3,40	9,079	36
1,20	1,131	5,5	2,30	4,155	20	3,60	10,178	40
1,40	1,539	7	2,40	4,539	22	3,80	11,341	46
1,60	2,011	10	2,50	4,909	24	4,00	12,566	51

de funcionamiento, podemos ajustarlas, por medio de tablas, iguales o similares a la 12.1, referida ésta a motores bien ventilados y de baja tensión. Estos ajustes pueden ser necesarios para que el total de espiras por bobina entre perfectamente en el hueco de las ranuras, sin detrimento de la sección óptima necesaria, para el buen funcionamiento y calentamiento de la máquina.

Cuando los cálculos obtenidos implican un gran inconveniente para poder alojar las nuevas espiras en las ranuras, se puede recurrir también al empleo de varios hilos en paralelo, si con ello es más fácil la colocación de las bobinas en las ranuras, siempre que se respeten las secciones mínimas del nuevo conductor. Esto se puede conseguir fácilmente ayudándose de la tabla 6.3, de esta misma obra.

Veámoslo todo con un ejemplo numérico:

**Ejemplo 12.1.** Calcular el número de espiras y las medidas del conductor, para un motor, asíncrono trifásico, tetrapolar, de 10 KW de potencia, que trabaja actualmente a 500 V conectado en estrella, que se desea rebobinar para trabajar con las tensiones normalizadas de 220/380 V. Actualmente tiene: cuatro grupos de dos bobinas cada uno por fase, cada bobina tiene 21 espiras de hilo de 1,80 mm de diámetro, equivalente a 2,544 mm<sup>2</sup> de sección.

Como la tensión actual de 500 V actúa en conexión estrella, hemos de tomar como referencia de cálculo la tensión de 380 V, correspondiente a la conexión estrella deseada, o bien pasar las dos a tensiones de fase.

- *Número de espiras en serie por fase, a 500 V:*  $N = 4 \text{ grupos} \times 2 \text{ bobinas} \times 21 \text{ espiras} = 168 \text{ espiras}$
- *Nuevo número de espiras en serie por fase:*

$$N' = N \frac{V'}{V} = 168 \frac{380 \text{ V}}{500 \text{ V}} = 127,68 = 128 \text{ espiras}$$

- *Número de espiras por bobina:*  $= \frac{128 \text{ espiras}}{4 \text{ grupos} \times 2 \text{ bobinas}} = 16 \text{ espiras por bobina}$

Si el devanado es entero, también se puede partir directamente del número de espiras por bobina, sin temor alguno, pero como norma general, es mejor partir del total de espiras en serie por fase y luego distribuirlas por bobinas, en función del tipo de devanado.

Seguidamente se calculará la nueva sección del hilo de las bobinas, directamente en este caso, ya que tenemos la sección actual:

– **Nueva sección del hilo:**  $S' = S \frac{V}{V'} = 2,545 \text{ mm}^2 \frac{500 \text{ V}}{380 \text{ V}} = 3,348 \text{ mm}^2$

Esta nueva sección se corresponde con un diámetro de hilo de:

– **Diámetro del nuevo hilo:**  $d' = \sqrt{4S'/\pi} = \sqrt{(4 \times 3,348 \text{ mm}^2)/3,14} = 2,06 \text{ mm}$

Se realizarán las nuevas bobinas con hilo de cobre normalizado de 2,10 mm de diámetro.

## 12.2. CAMBIO DE FRECUENCIA

Si quisiéramos cambiar la frecuencia de trabajo de un motor o generador, manteniendo la tensión constante –aunque esto no es habitual dada la normalización de la frecuencia industrial– puede resultar tan fácil como lo anteriormente expuesto para el cambio de tensión a frecuencia constante, ya que según se aprecia en las fórmulas que nos dan la f.e.m. inducida, tanto la frecuencia ( $f$ ) como el número de espiras ( $N$ ) son dos variables, que actúan de igual forma:

$$\begin{aligned} \text{f.e.m. inducida en el primario: } \quad & \frac{V_p}{V_s} = \frac{4.44 N_p \cdot f \cdot \Phi}{4.44 N_s \cdot f \cdot \Phi} \\ \text{f.e.m. inducida en el secundario: } \quad & \end{aligned}$$

De otro modo, en corriente alterna, la impedancia de las bobinas también varía con la frecuencia, siendo directamente proporcional a la misma y, por tanto, se reduce la intensidad al aumentar la frecuencia. Así, llamando ( $f$ ) a la frecuencia actual y ( $f'$ ) a la frecuencia futura, tendremos las relaciones siguientes:

$$\frac{N}{N'} = \frac{V}{V'} = \frac{f'}{f}; \quad \frac{S}{S'} = \frac{I}{I'} = \frac{f}{f'}$$

Como se aprecia en las relaciones anteriores: el número de espiras en serie por fase es inversamente proporcional al valor de la frecuencia, mientras que la intensidad y, por tanto, la sección del conductor, son directamente proporcionales al valor de la frecuencia. Por este motivo, al igual que hacíamos con el cambio de tensión de un motor, los nuevos valores de: número de espiras  $N'$  y de sección del conductor  $S'$ , los obtendremos de las fórmulas siguientes:

Espiras para la nueva frecuencia:  $N' = N \frac{f}{f'}$

Intensidad para la nueva frecuencia:  $I' = I \frac{f'}{f}$ ; Nueva sección:  $S' = S \frac{f}{f'}$

**Muy importante.** Todo cambio de frecuencia en un motor, aunque se mantenga su tensión, afecta directamente a su potencia y a la velocidad de giro del mismo, ya que como sabemos: la potencia de un motor asíncrono de corriente alterna depende de la intensidad absorbida y su velocidad depende de la frecuencia de la red, según las fórmulas siguientes:

$$\text{Potencia activa: } P = V \cdot I \cdot \cos.\varphi; \text{ ó } P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos.\varphi; \text{ Velocidad: } n = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Por lo cual al ser afectados ambos valores, durante el cambio de la frecuencia de un motor, la potencia ( $P$ ), que es directamente proporcional a la intensidad ( $I$ ) y la velocidad ( $n$ ), que es directamente proporcional a la frecuencia ( $f$ ), adquirirán los nuevos valores siguientes:

$$\frac{P}{P'} = \frac{f}{f'}; \text{ Nueva potencia: } P' = P \frac{f'}{f}$$

$$\frac{n}{n'} = \frac{f}{f'}; \text{ Nueva velocidad: } n' = n \frac{f'}{f}$$

Veámoslo todo, de nuevo, con un ejemplo numérico:

**Ejemplo 12.2.** Sea el mismo motor del ejemplo 12.1, asíncrono trifásico, tetrapolar, de 10 KW de potencia, alimentado a 500 V, el cual en vez de cambiarle su tensión de alimentación, es necesario modificarlo para pasar de una frecuencia de 60 Hz a otra frecuencia de 50 Hz. Determinar: su nuevo número de espiras en serie por fase, la nueva sección de los conductores necesaria, la nueva potencia que suministrará el motor y su nueva velocidad.

Recordamos aquí que en su actual constitución tiene: 168 espiras, en serie por fase, correspondientes a 21 espiras por bobina, estando éstas formadas por un hilo cilíndrico de 2,544 mm<sup>2</sup> de sección o 1,80 mm de diámetro.

Al ser tetrapolar, su velocidad actual será:  $n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{60 \text{ Hz} \cdot 60}{2} = 1800$  r.p.m., teóricas

Primeramente calcularemos el nuevo número de espiras, en serie por fase, y la nueva sección del conductor, que ha de tener el devanado, por ser los dos datos necesarios para su rebobinado:

$$\text{- Espiras para la nueva frecuencia: } N' = N \frac{f}{f'} = 168 \frac{60 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} = 201,6$$

Tomaremos 200 espiras en serie por fase o: 200 esp. / (4 grupos x 2 bobinas) = 25 espiras por bobina



$$- \text{Nueva sección: } S' = S \frac{f'}{f} = 2,544 \text{ mm}^2 \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 2,12 \text{ mm}^2 \text{ (Hilo de 1,60 mm de diámetro)}$$

Seguidamente se determinarán los nuevos valores de potencia y velocidad, que originará el cambio de frecuencia:

$$- \text{Nueva potencia: } P' = P \frac{f'}{f} = 10 \text{ KW} \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 8,33 \text{ KW}$$

$$- \text{Nueva velocidad: } n' = n \frac{f'}{f} = 1800 \text{ r.p.m.} \frac{50 \text{ Hz}}{60 \text{ Hz}} = 1500 \text{ r.p.m.}$$


---

### 12.3. CAMBIO DE VELOCIDAD

Como todos sabemos, el cambio de velocidad de un motor asíncrono, ya sea éste monofásico o trifásico, implica el cambio del número de polos del mismo y, por tanto, su rebobinado; ya que éste requerirá diferente número de grupos y de bobinas, por ser su velocidad inversamente proporcional a su número de pares de polos, a través de la fórmula ya conocida de:

$$\text{Velocidad: } n = \frac{f \cdot 60}{p} = \text{r.p.m.}; \text{ Cumpléndose que: } p \cdot n = p' \cdot n'$$

A primera vista parece fácil el cambio del número de polos, pero en la práctica no siempre resulta bien, ya que al variar el número de polos se altera: el ancho de las bobinas y también la longitud del arco polar y, consecuentemente, también pueden ser alteradas la distribución de la inducción y del flujo magnético por polo, ya que existen menos pérdidas cuanto más concentrado está el devanado y los fabricantes ajustan las medidas del núcleo magnético a las características de la máquina. Esto puede traer como consecuencia un comportamiento anómalo y una disminución o un mal aprovechamiento de la potencia del motor. Por tanto, solamente se podrá cambiar, con éxito, la polaridad de un motor, cuando las características físicas de la distribución de los grupos de bobinas, antes y después del cambio, no sean muy diferentes.

En las fórmulas de la f.e.m. inducida en un generador o de la tensión aplicada a un motor, vistas anteriormente, se aprecia que cuando se mantiene constante la tensión de alimentación y la frecuencia, quedan como variables el número de espiras  $N$  y el flujo  $\Phi$ . A su vez se ha introducido un nuevo valor que denominamos factor de devanado  $k$ , este factor engloba a otros dos denominados generalmente factor de distribución  $k_d$  y factor de ancho de bobina  $k_p$ , ambos inferiores a la unidad; el primero disminuye al aumentar la extensión de la zona en la que se distribuyen las

espiras de un devanado; así por ejemplo tendremos:  $k_d = 0,955$  como máximo para devanados trifásicos y  $k_d = 0,90$  para devanados bifásicos o monofásicos, mientras que el segundo  $k_p$  disminuye al acortar el paso de ranura o ancho de bobina, con respecto al paso polar, valiendo uno cuando el paso de bobina es igual al paso polar y disminuyendo al acortarlo. Así realmente tendríamos:

$$f.e.m. \text{ inducida: } E (V) = 4.44 N \cdot f \cdot \Phi \cdot k$$

Ante esto, pueden no dar buen resultado los cambios de polaridad que impliquen: un cambio del número de fases o una ejecución que implique una extensión muy desigual de los grupos de bobinas, así como un acortamiento excesivo del paso de bobina, ya que al aumentar la amplitud o el arco polar ocupado por los grupos de bobinas, disminuye el factor de devanado  $k$ . Si son posibles y darán buen resultado, por ejemplo, los cambios de un motor trifásico de cuatro a seis polos, de seis a ocho, o viceversa; pero no de ocho a dos polos.

Por tanto, para el buen funcionamiento de la máquina, el producto del número de espiras en serie por fase  $N$  y el valor del flujo máximo por polo  $\Phi$  debe de ser igual, antes y después de la reforma, tanto con una como con otra polaridad y además el factor de devanado  $k$  no puede variar grandemente. Esto implica que para el cambio de la polaridad de un motor y, prescindiendo del factor de devanado, es necesario cambiar también el número de espiras en serie por fase, ya que éstas son inversamente proporcionales al valor de los flujos y éstos al número de polos de la máquina, según se aprecia en las relaciones siguientes:

$$\text{Relaciones entre flujos: } \Phi \cdot N = \Phi' \cdot N'; \quad \Phi \cdot 2p = \Phi' \cdot 2p'$$

Siendo:  $N$  y  $N'$ : número de espiras actual y futuro;  $\Phi$  y  $\Phi'$ : flujo actual y futuro;  $2p$  y  $2p'$ : número de polos actual y futuro.

Así el valor del número de espiras, en serie por fase, con la nueva polaridad será:

$$\text{Nuevo número de espiras: } N' = N \frac{2p'}{2p}$$

Como en los casos anteriores, de cambio de velocidad y frecuencia, la modificación del número de espiras lleva implícita la modificación de la sección del conductor, en relación inversa al número de éstas, la sección del conductor de las nuevas bobinas, que se deriva también del cambio del número de polos será:

$$\text{Nueva sección del conductor: } S' = S \frac{2p}{2p'}$$

Al igual que ocurría durante el cambio de la frecuencia de un motor, la potencia suministrada por el motor ( $P$ ), que es directamente proporcional a la intensidad ( $I$ ), también se verá modificada, adquiriendo el siguiente valor:

$$\frac{P}{P'} = \frac{2p'}{2p} ; \text{ Nueva potencia: } P' = P \frac{2p}{2p'}$$

Veámoslo todo con un ejemplo concreto:

**Ejemplo 12.3.** Sea un motor asíncrono trifásico, tetrapolar (1500 r.p.m.), de 12 Kw, 220/380 V, de 36 ranuras, con un devanado, ejecutado a doble capa, de 144 espiras en serie por fase, de hilo de 3,2 mm de diámetro (8 mm<sup>2</sup>), distribuidas en cuatro grupos de tres bobinas cada uno; que se desea transformar en otro exapolar (1000 r.p.m.). Calcular: el nuevo número de espiras en serie por fase y la sección del conductor que han de tener éstas, así como la nueva potencia que proporcionará el motor y dibujar ambos esquemas, siendo ambos ejecutados por polos, y el de seis polos a una capa por ranura.

Primeramente calcularemos el nuevo número de espiras, en serie por fase, y la nueva sección del conductor, que ha de tener el devanado, por ser los dos datos necesarios para su rebobinado:

**Nuevo número de espiras:**

$$N' = N \frac{2p'}{2p} = 144 \frac{6}{4} = 216 \text{ espiras (6 bobinas de 36 espiras, por fase)}$$

**Nueva sección del conductor:**

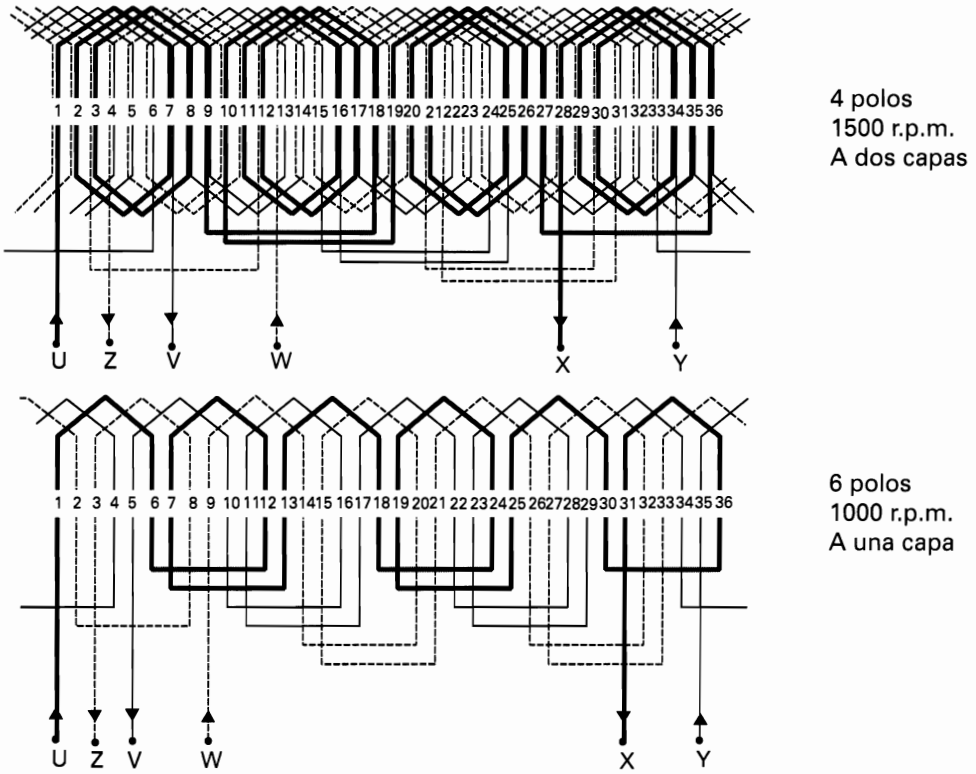
$$S' = S \frac{2p}{2p'} = 8 \text{ mm}^2 \frac{4}{6} = 5,33 \text{ mm}^2 \text{ (2,6 mm de diámetro)}$$

Como parte negativa, de esta transformación de 1500 r.p.m. a 1000 r.p.m., tendremos una disminución de la potencia del motor, de 12 a 8 KW, según los cálculos siguientes:

$$\text{Nueva potencia: } P' = P \frac{2p}{2p'} = 12 \text{ KW} \frac{4}{6} = 8 \text{ KW}$$

o algo inferior, debido a que la disminución de la velocidad disminuye la refrigeración de la máquina.

Seguidamente, en la figura 12.1, se ven los esquemas correspondientes a los dos devanados, el primero de 4 polos, 1500 r.p.m. y ejecutado a doble capa, y el segundo de 6 polos y 1000 r.p.m., ejecutado a una capa por ranura.



**Figura 12.1.** Esquemas de los devanados imbricados enteros, trifásicos, tetrapolar y exapolar, ejecutados por polos, del ejemplo 12.3.



# 13

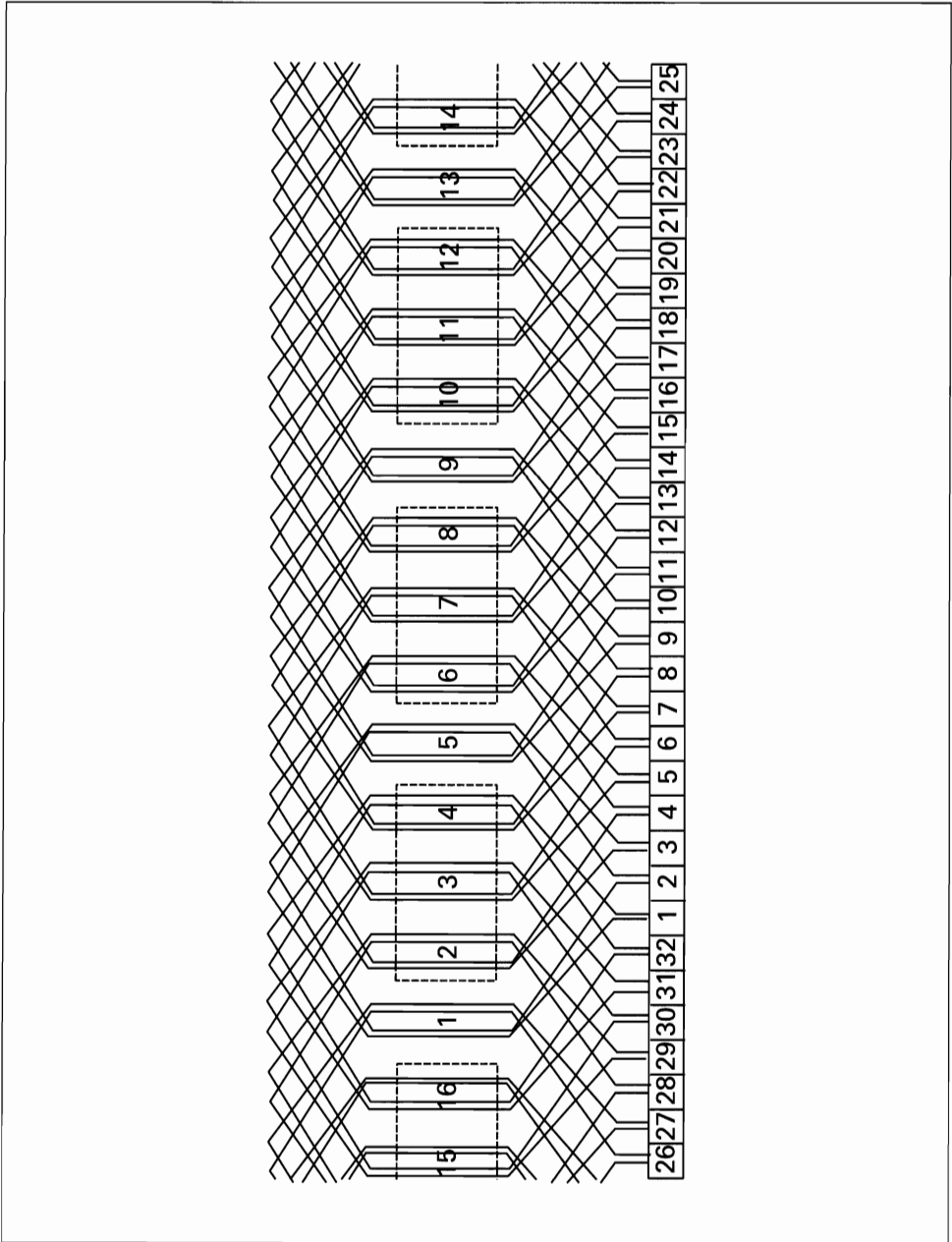
---

## APÉNDICE ESQUEMAS DE DEVANADOS

A continuación y para completar esta obra, se han dibujado 49 esquemas de devanados eléctricos, de todo tipo y condición, unos pertenecientes a máquinas de corriente continua y otros a máquinas de corriente alterna, referidos todos ellos a máquinas con características muy comunes a los más utilizados industrialmente. Primeramente se incluyen los de corriente continua y, a continuación, los de corriente alterna.

Los devanados se han dibujado de forma apaisada para poder apreciar mejor todos sus detalles y se han consignado, al final de cada página, las características eléctricas y de tipo de devanado más significativas de todos ellos.

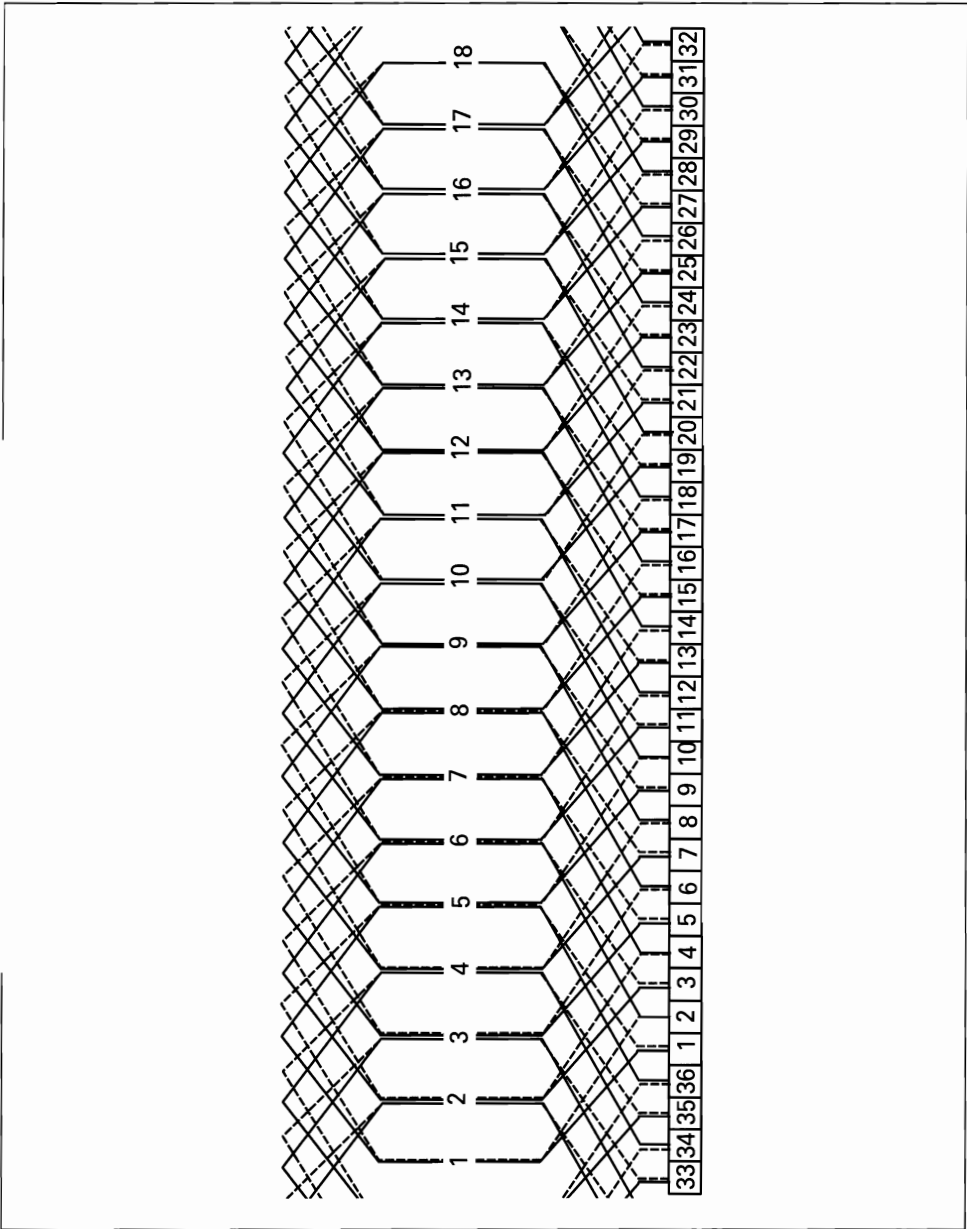
Con esto se pretende facilitar a los lectores el aprendizaje y diseño de los devanados eléctricos, así como los trabajos de bobinado y rebobinado que diariamente ejecutan los profesionales.



**Esquema c.c. 13.1.** Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar

$$K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2$$

$$Y_k = K / 2p = 4 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 1 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 8 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 7$$

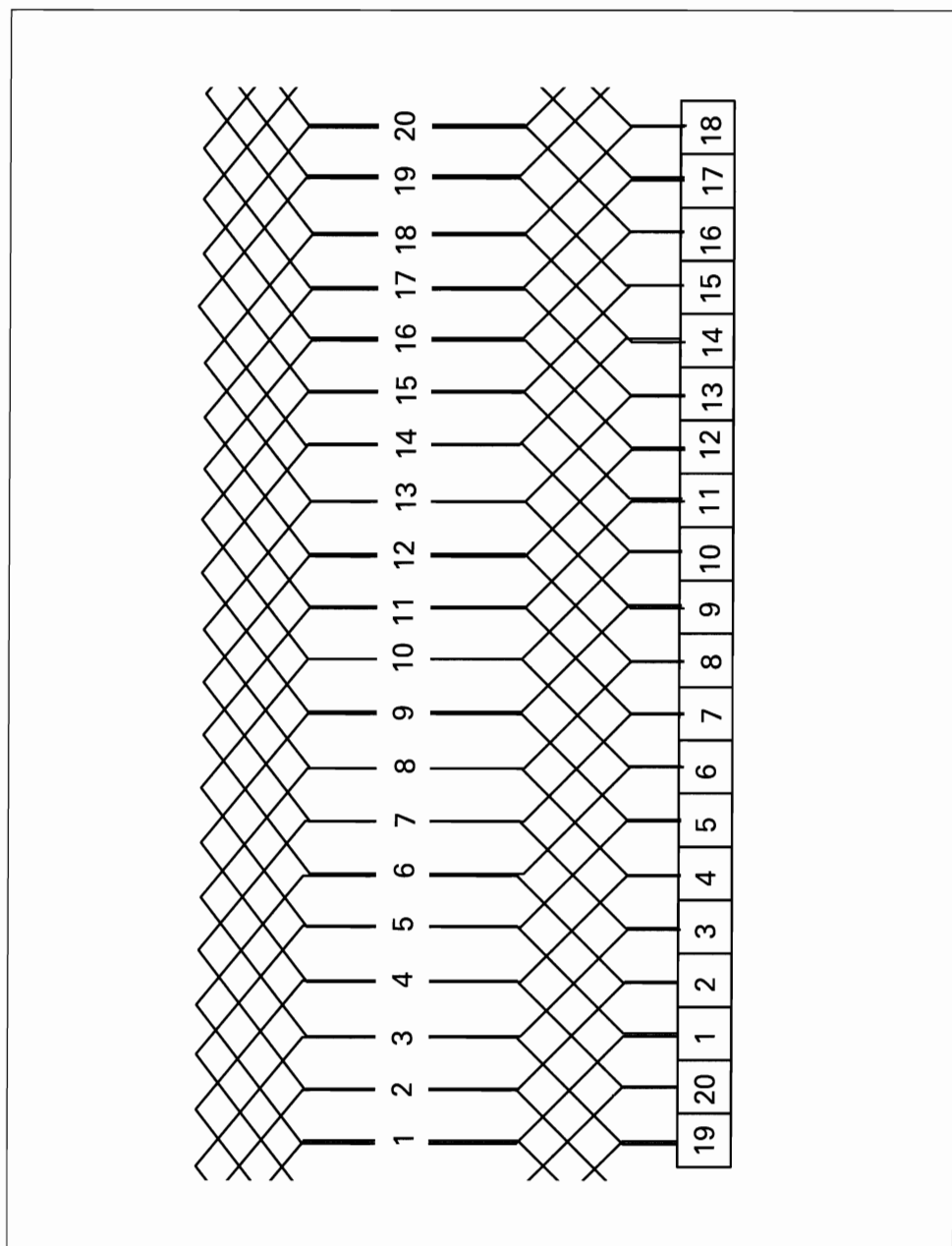


**Esquema c.c. 13.2.** Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado cruzado y con paso acortado

$$K = 18 ; D = 36 ; 2p = 4 ; U = 2$$

$$Y_k = K / 2p = 4 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = -1 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 8 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 9$$

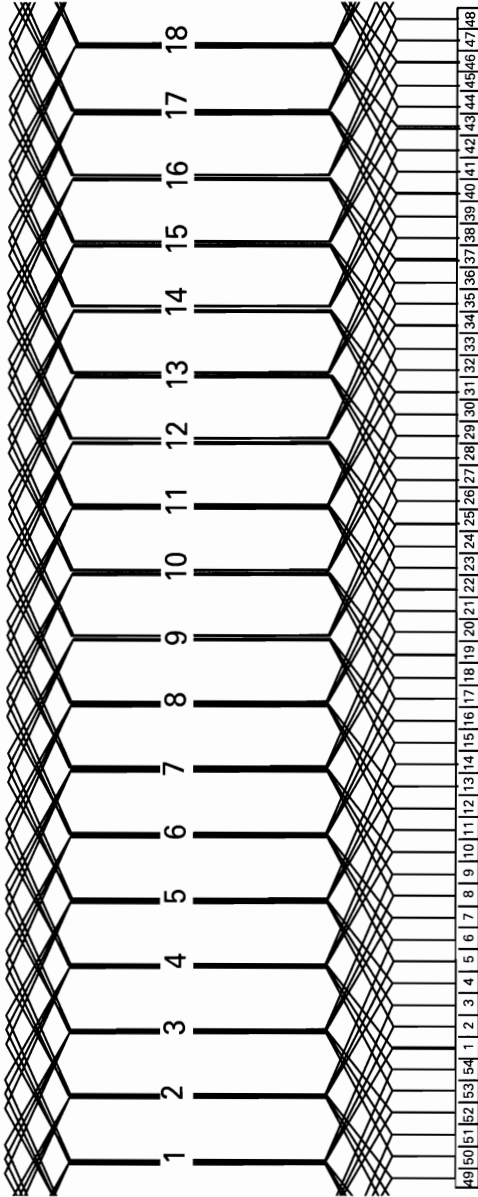




**Esquema c.c. 13.3.** Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar

$$K = 20 ; D = 20 ; 2p = 4 ; U = 1$$

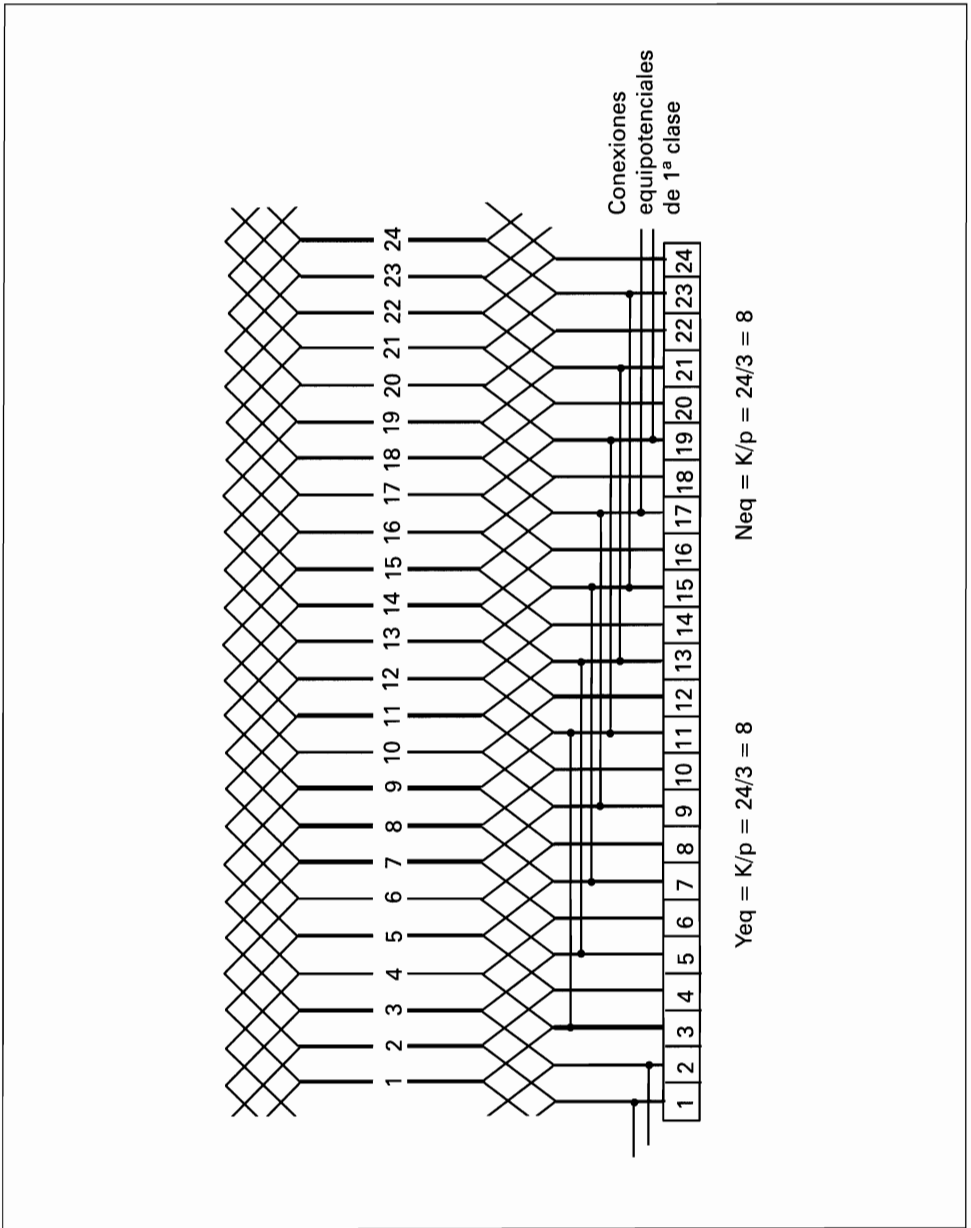
$$Y_k = K / 2p = 5 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 1 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 5 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 4$$



**Esquema c.c. 13.4.** Devanado imbricado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$$K = 18 ; D = 54 ; 2p = 4 ; U = 3$$

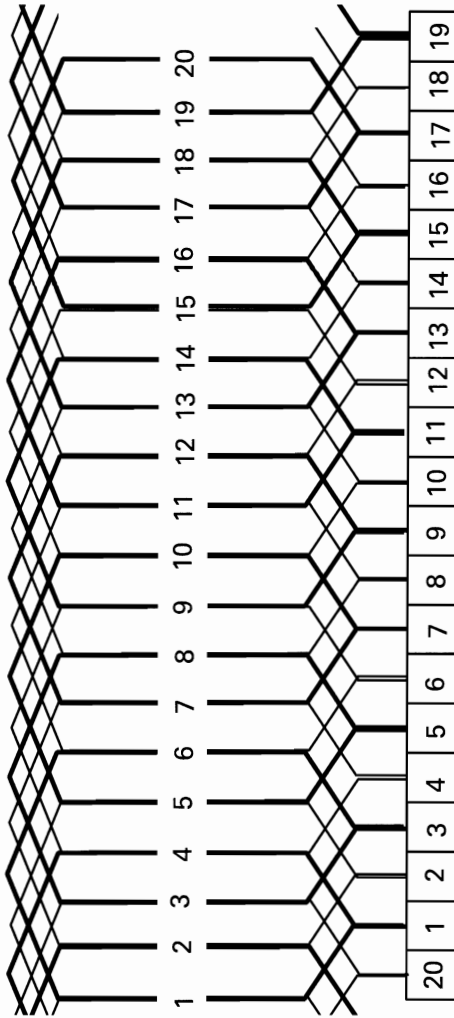
$$Y_k = K / 2p = 4,5 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 1 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 12 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 11$$



**Esquema c.c. 13.5.** Devanado imbricado simple, ejecutado sin cruzar y con conexiones equipotenciales de primera clase

$$K = 24 ; D = 24 ; 2p = 6 ; U = 1$$

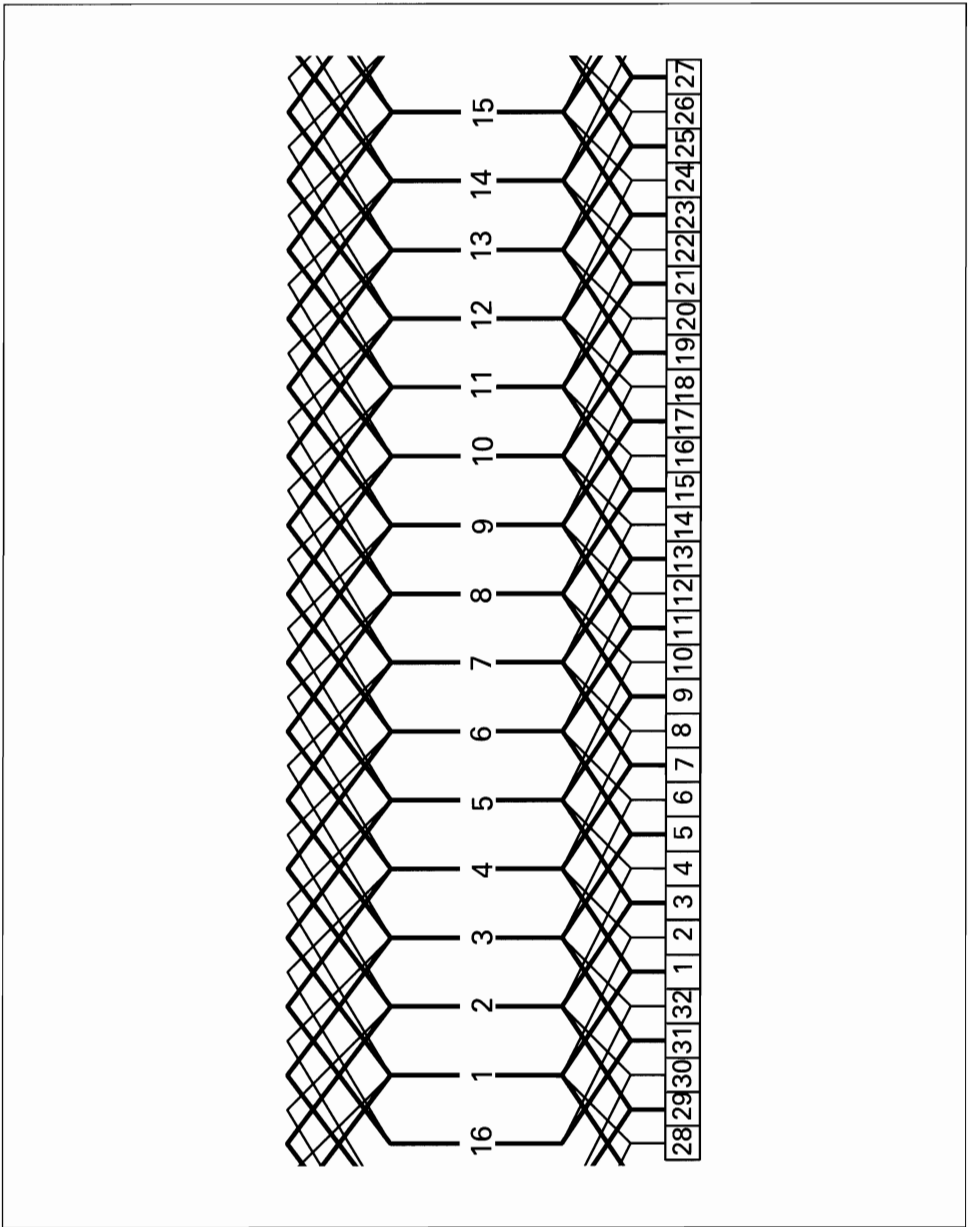
$$Y_k = K / 2p = 4 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 1 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 4 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 3$$



**Esquema c.c. 13.6.** Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar

$K = 20$  ;  $D = 20$  ;  $2p = 4$  ;  $U = 1$

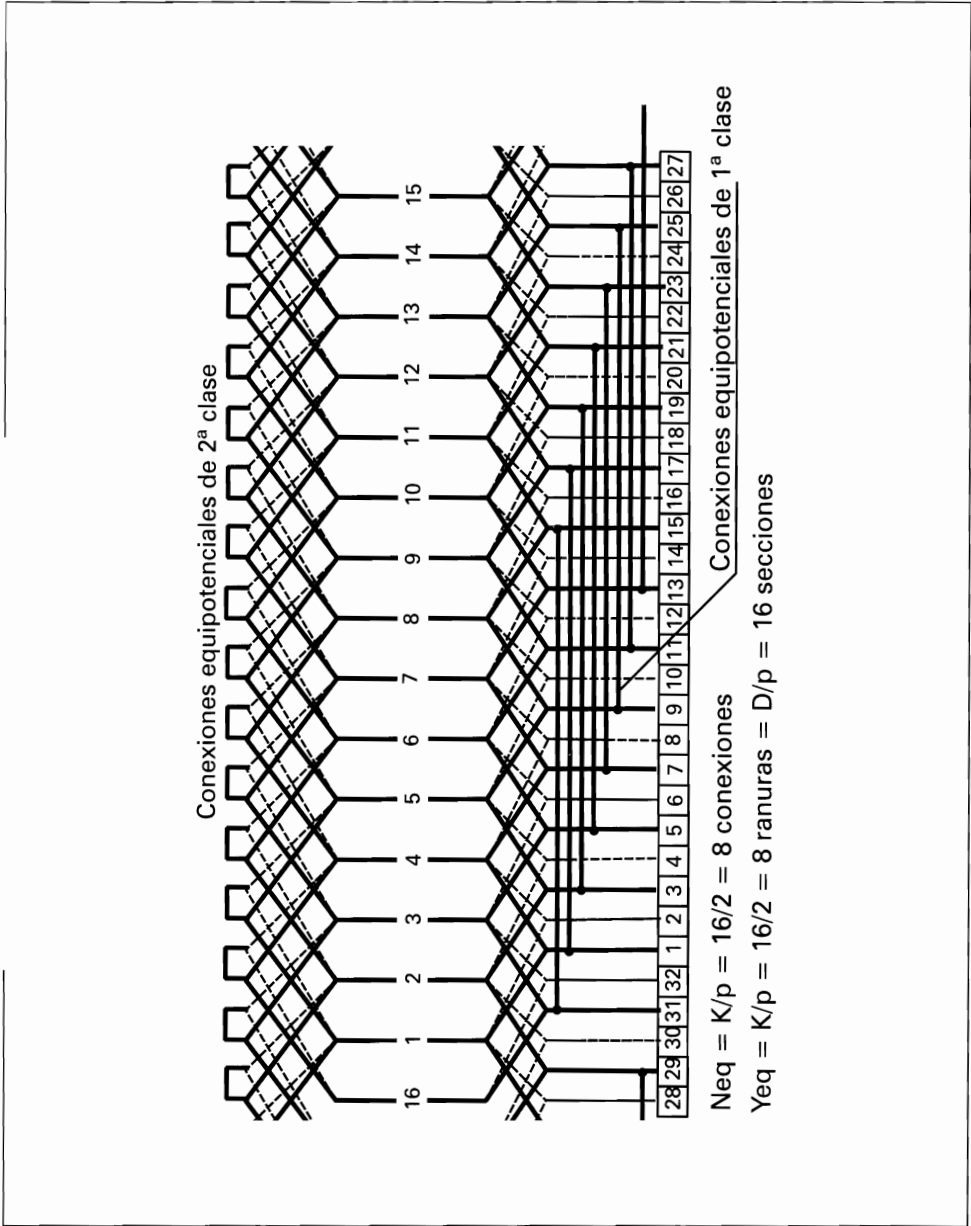
$Y_k = K / 2p = 5$  ;  $Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 2$  ;  $Y_1 = Y_k \cdot U = 5$  ;  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 3$



**Esquema c.c. 13.7.** Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar

$$K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2$$

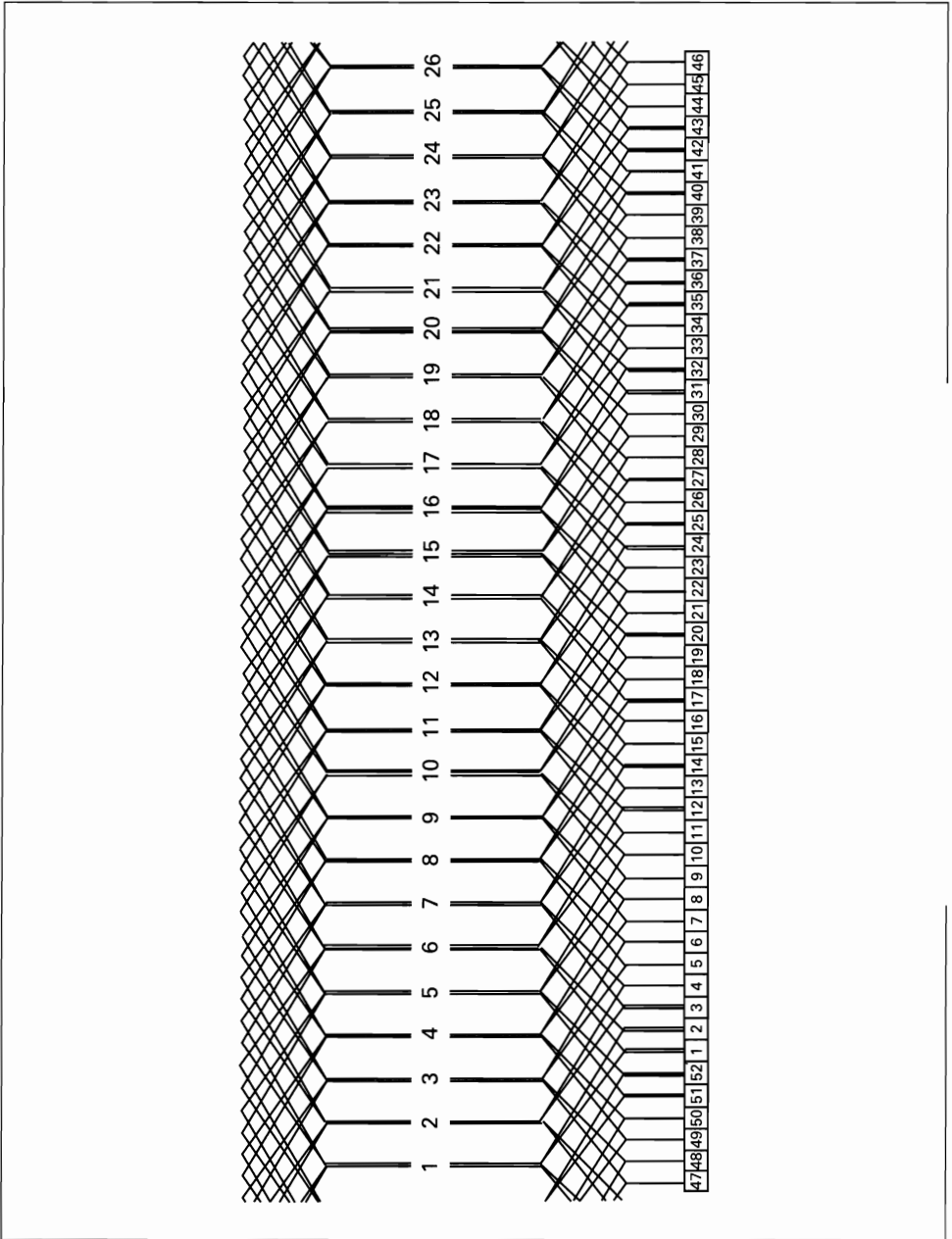
$$Y_k = K / 2p = 4 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 2 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 8 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 6$$



**Esquema c.c. 13.8.** Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar y con conexiones equipotenciales de primera y segunda clase

$K = 16 ; D = 32 ; 2p = 4 ; U = 2$

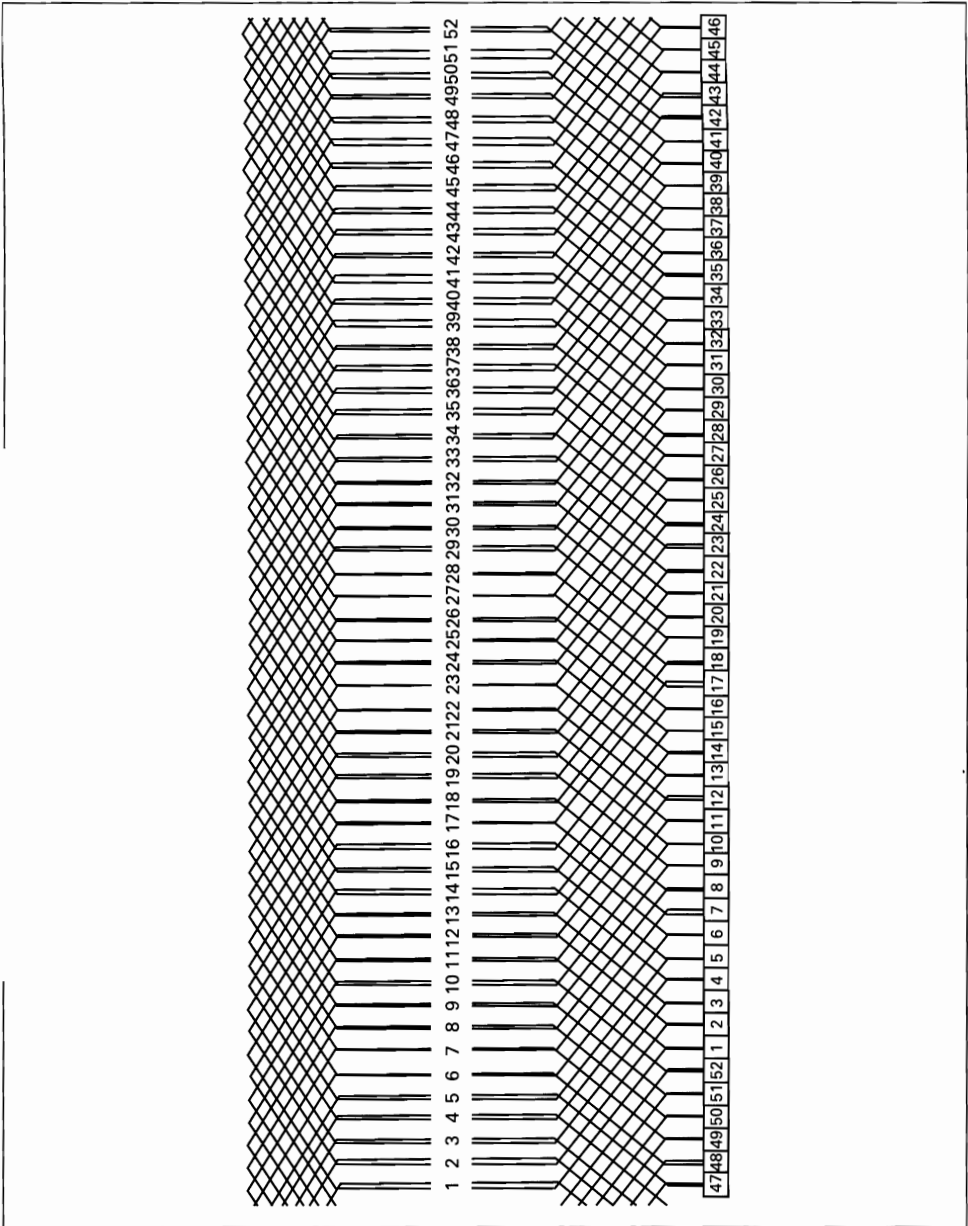
$Y_k = K / 2p = 4 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 2 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 8 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 6$



**Esquema c.c. 13.9.** Devanado imbricado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$K = 26$  ;  $D = 52$  ;  $2p = 4$  ;  $U = 2$

$Y_k = K / 2p = 6,5$  ;  $Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 2$  ;  $Y_1 = Y_k \cdot U = 12$  ;  $Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 10$

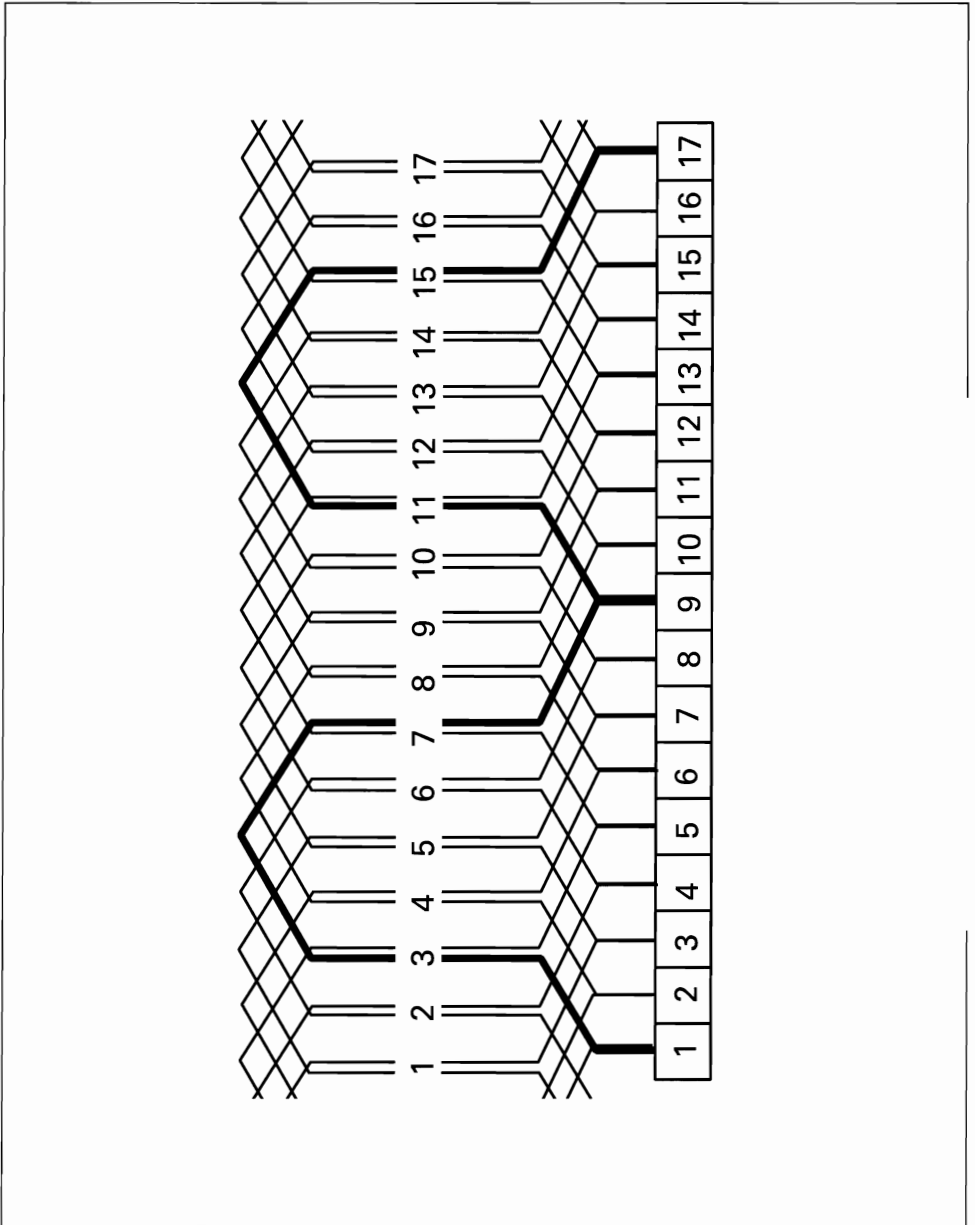


**Esquema c.c. 13.10.** Devanado imbricado doble, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$$K = 52 ; D = 52 ; 2p = 4 ; U = 2$$

$$Y_k = K / 2p = 13 ; Y_{col} = Y_1 - Y_2 = 2 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 26 ; Y_2 = Y_1 - Y_{col} = 24$$

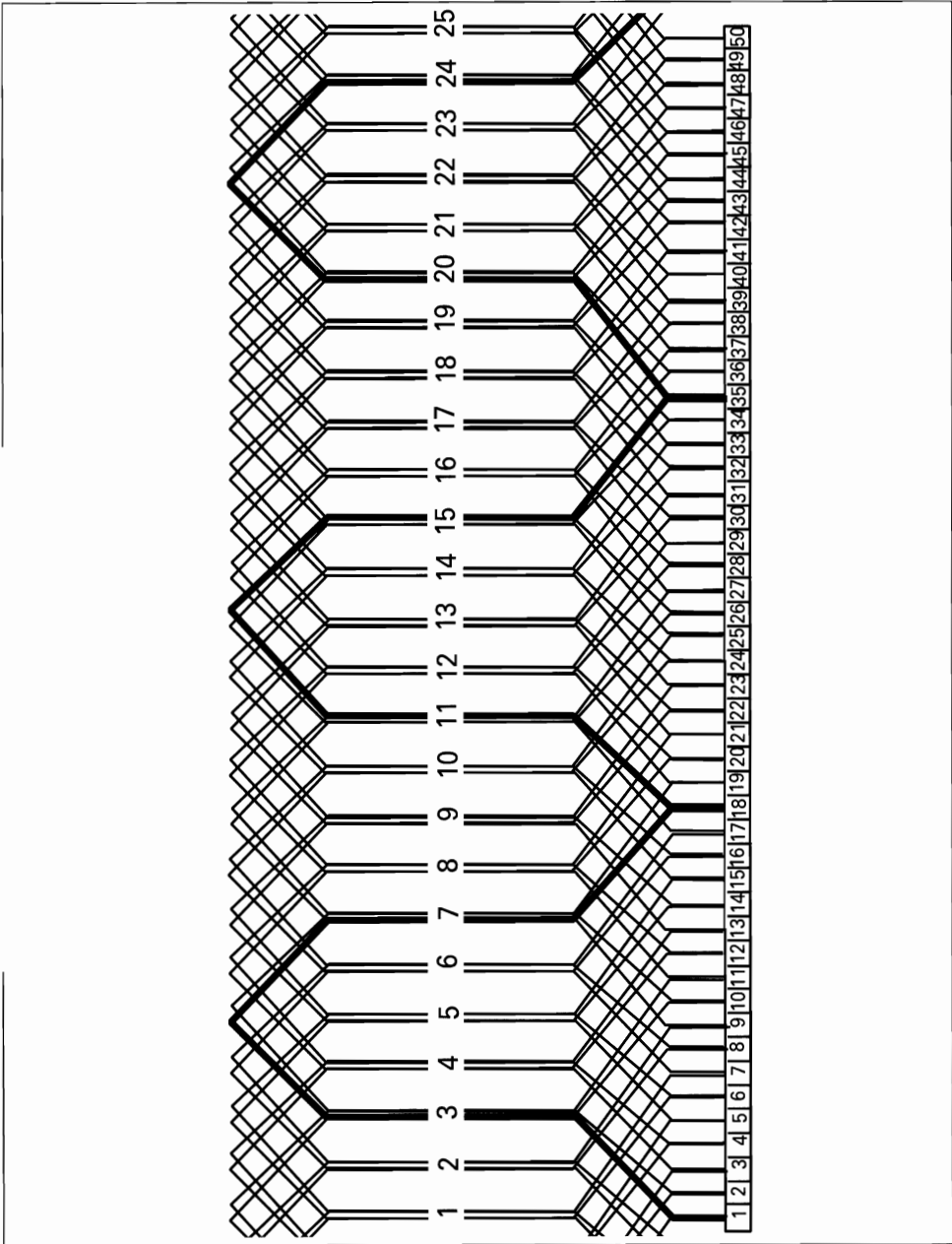




**Esquema c.c. 13.11.** Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$$K = 17 ; D = 17 ; 2p = 4 ; U = 1$$

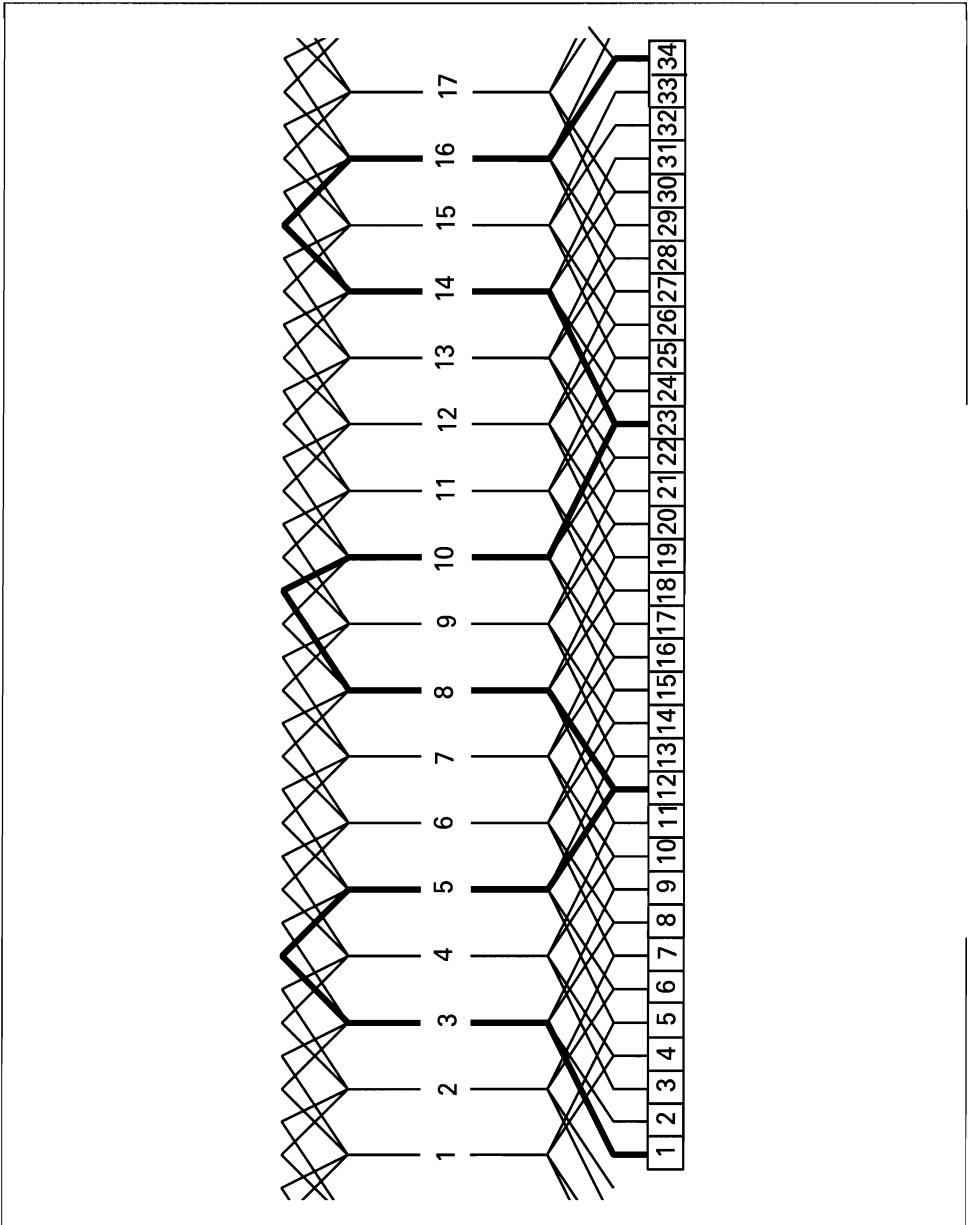
$$Y_k = K / 2p = 4,25 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 8 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 4 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 4$$



Esquema c.c. 13.12. Devanado ondulado simple, ejecutado cruzado y con paso acortado

$$K = 25 ; D = 50 ; 2p = 6 ; U = 2$$

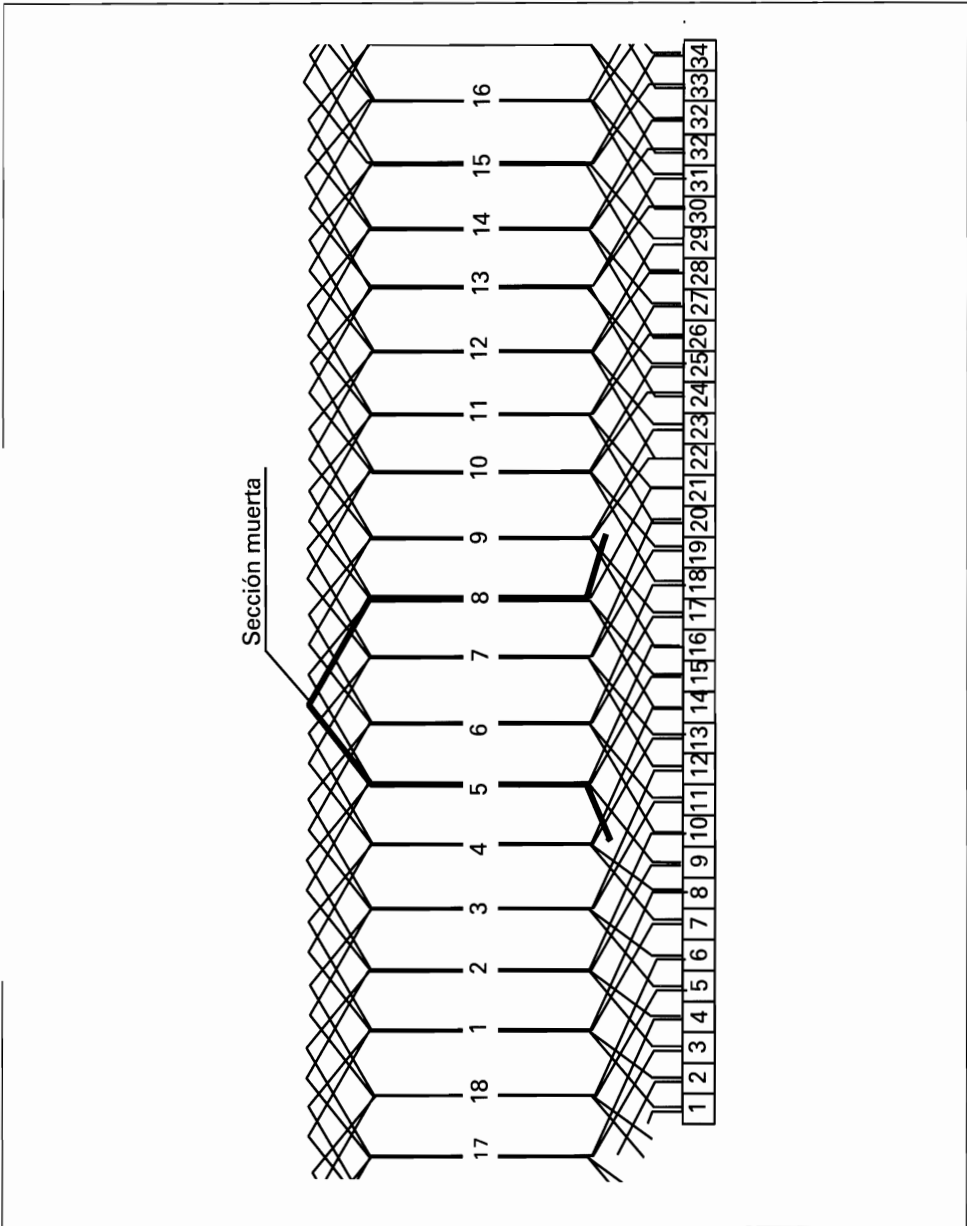
$$Y_k = K / 2p = 4,166 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 17 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 8 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 9$$



**Esquema c.c. 13.13.** Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$$K = 17 ; D = 34 ; 2p = 6 ; U = 2$$

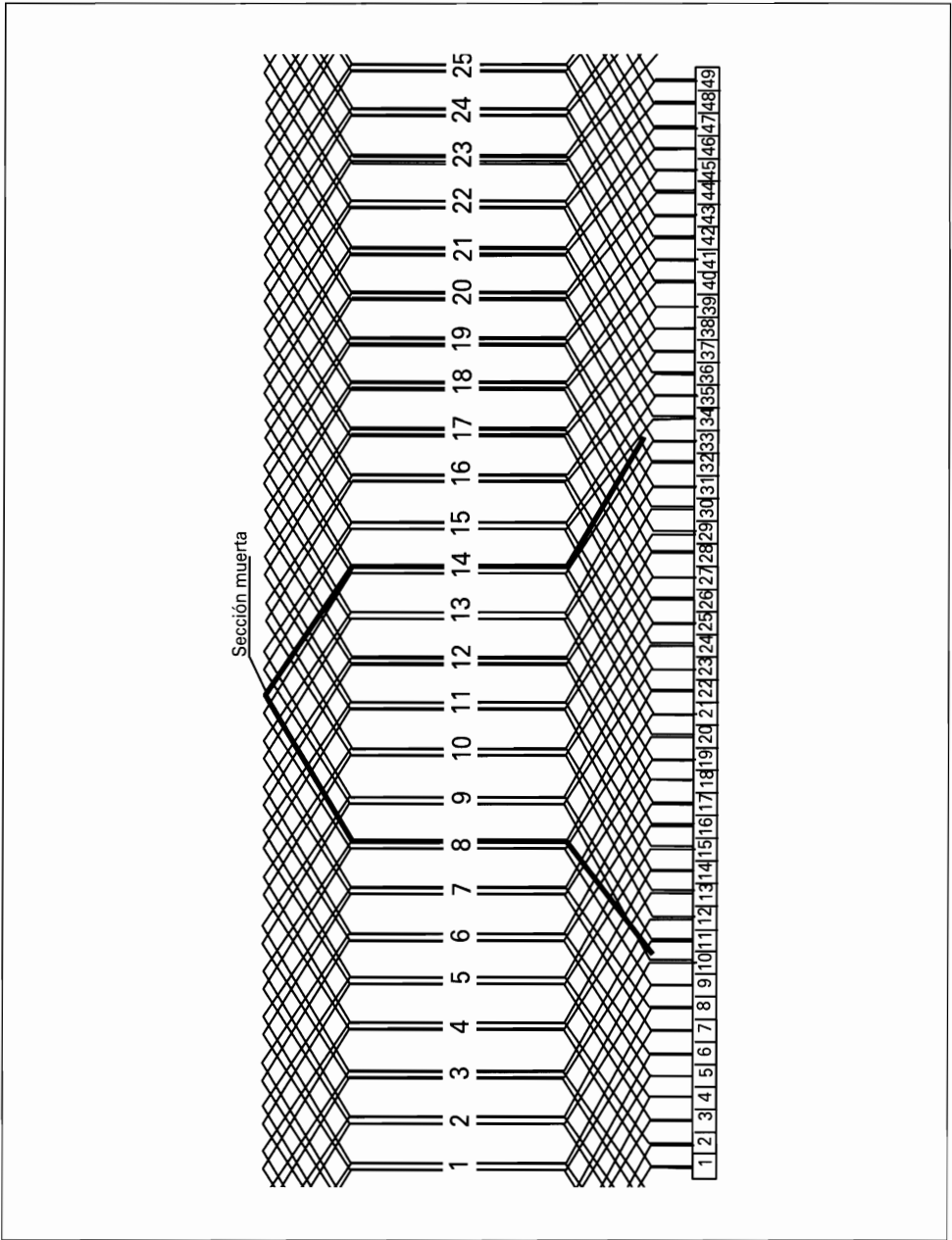
$$Y_k = K / 2p = 2,8 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 11 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 4 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 7$$



**Esquema c.c. 13.14.** Devanado ondulado simple, para inducido, ejecutado cruzado y con una sección muerta

$$K = 18 ; D = 35 ; 2p = 6 ; U = 2$$

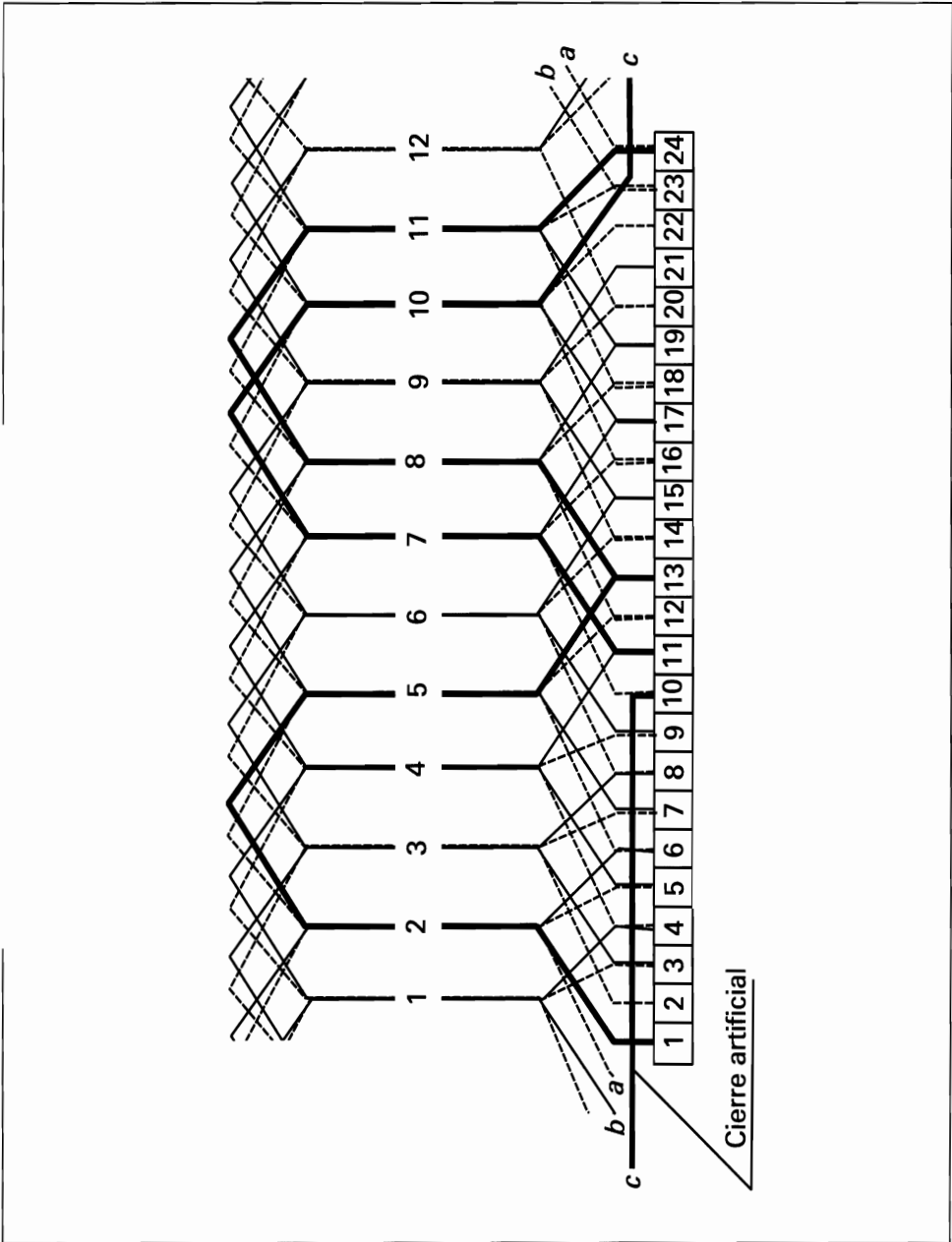
$$Y_k = K / 2p = 3 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 12 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 6 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 6$$



Esquema c.c. 13.15. Devanado ondulado simple, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

$$K = 25 ; D = 49 ; 2p = 4 ; U = 2$$

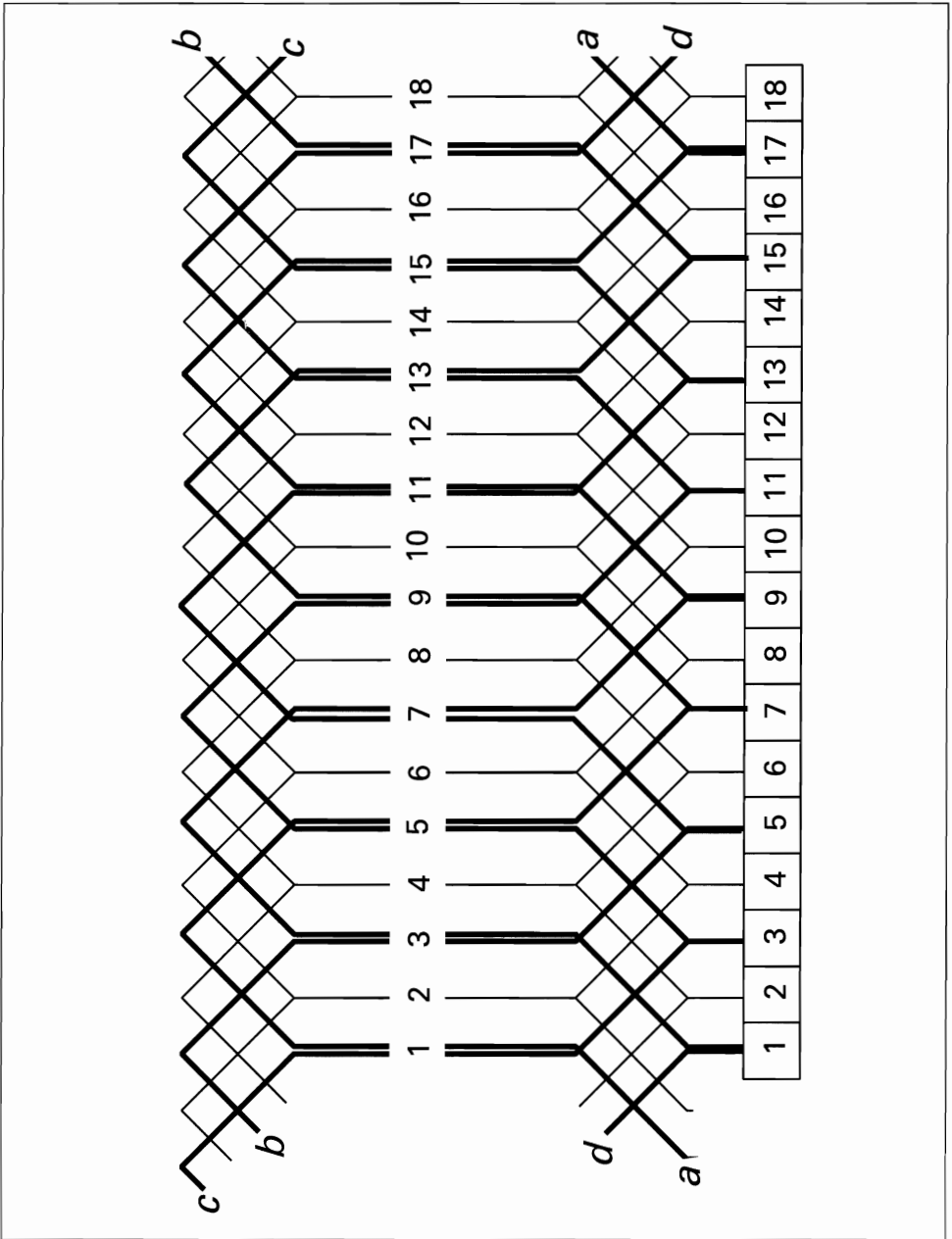
$$Y_k = K / 2p = 6,25 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 24 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 12 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 12$$



**Esquema c.c. 13.16.** Devanado ondulado simple, ejecutado con cierre artificial

$$K = 12 ; D = 24 ; 2p = 4 ; U = 2$$

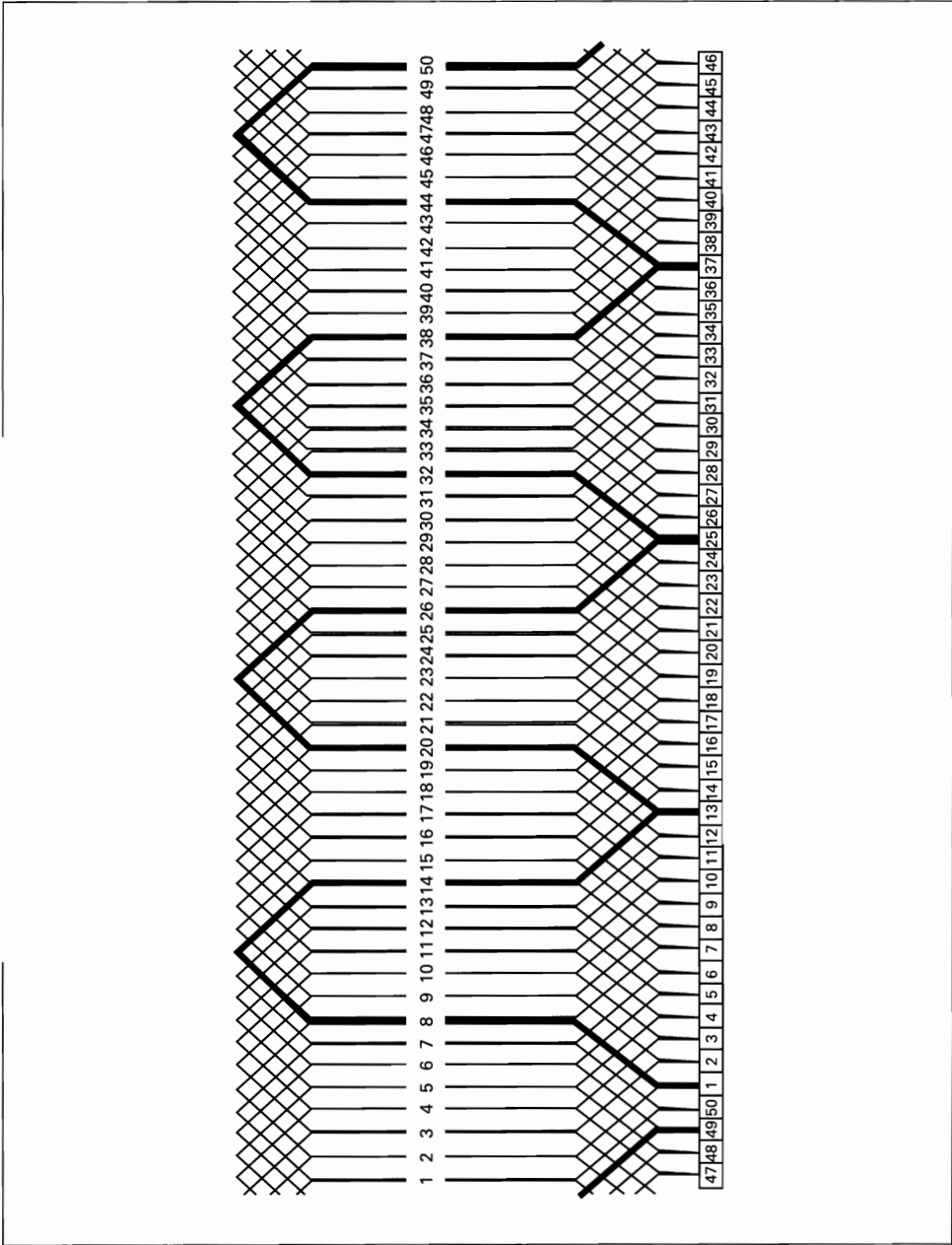
$$Y_k = K / 2p = 3 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 11 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 6 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 5$$



Esquema c.c. 13.17. Devanado ondulado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado

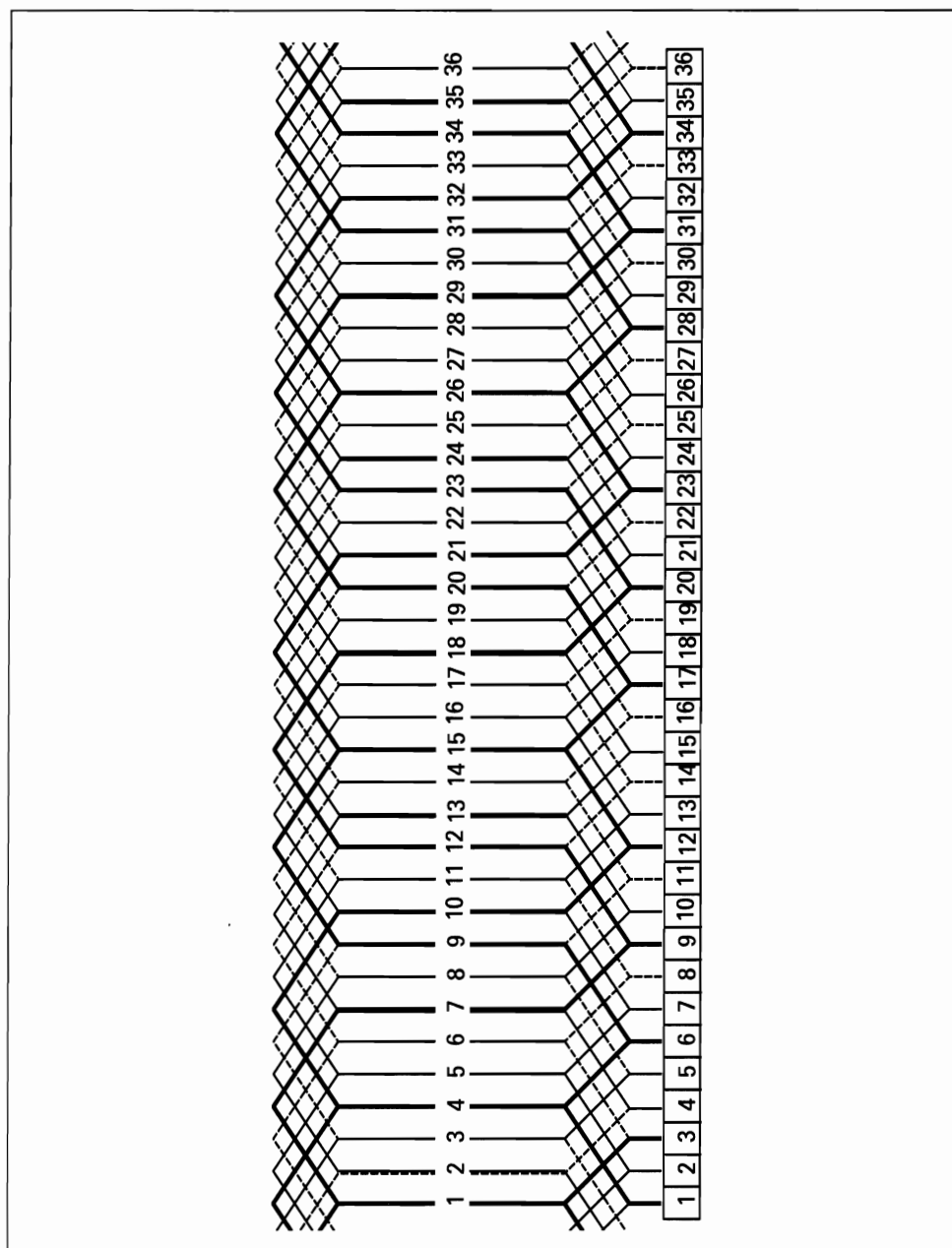
$$K = 18 ; D = 18 ; 2p = 4 ; U = 1$$

$$Y_k = K / 2p = 4,5 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 8 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 4 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 4$$



**Esquema c.c. 13.18.** Devanado ondulado doble, ejecutado sin cruzar y con paso acortado  
 $K = 50 ; D = 50 ; 2p = 8 ; U = 1$   
 $Y_k = K / 2p = 12 ; Y_{col} = Y1 + Y2 = 12 ; Y1 = Yk \cdot U = 6 ; Y2 = Y_{col} - Y1 = 6$

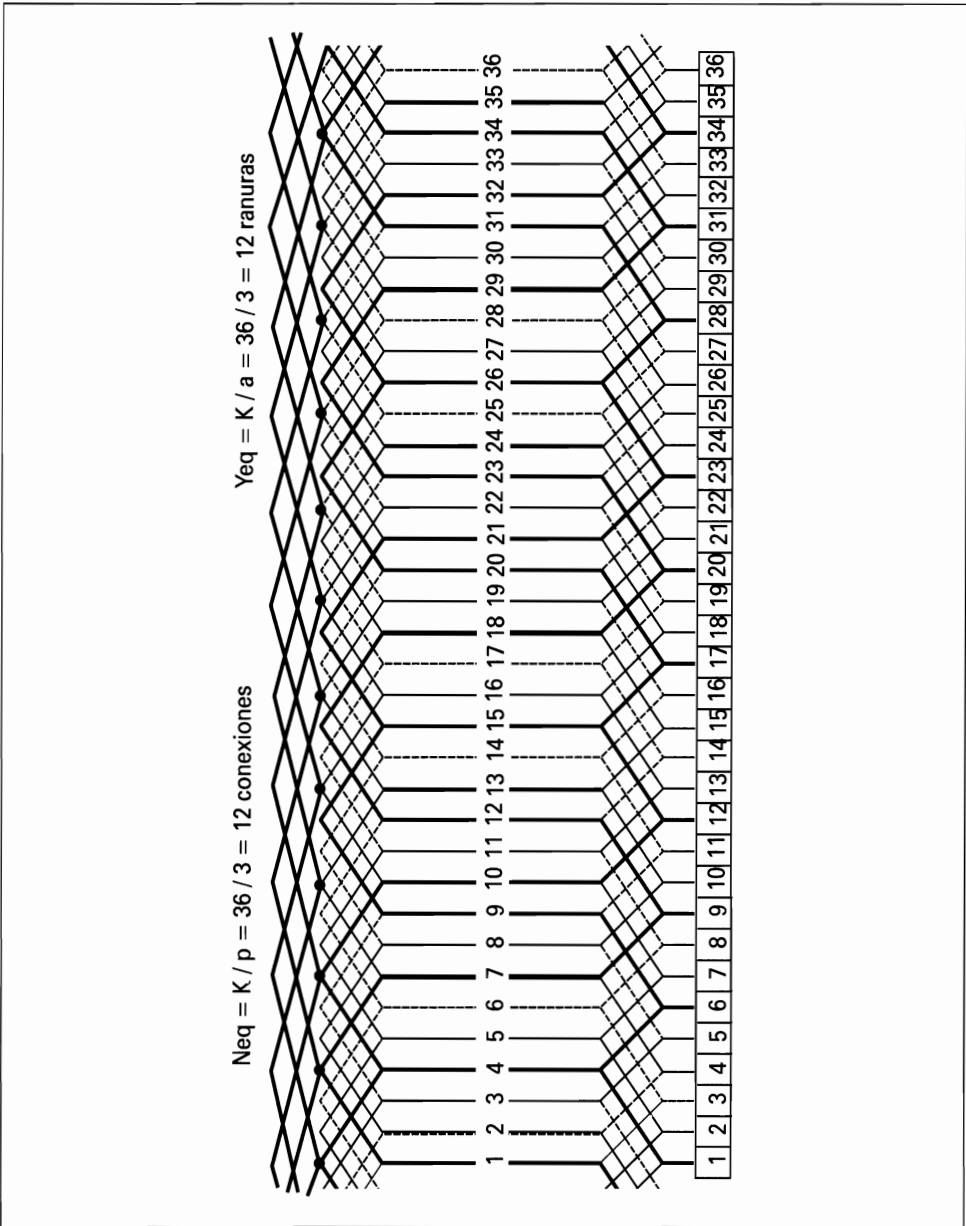




**Esquema c.c. 13.19.** Devanado ondulado triple, para inducido, ejecutado sin cruzar

$$K = 36 ; D = 36 ; 2p = 6 ; U = 1$$

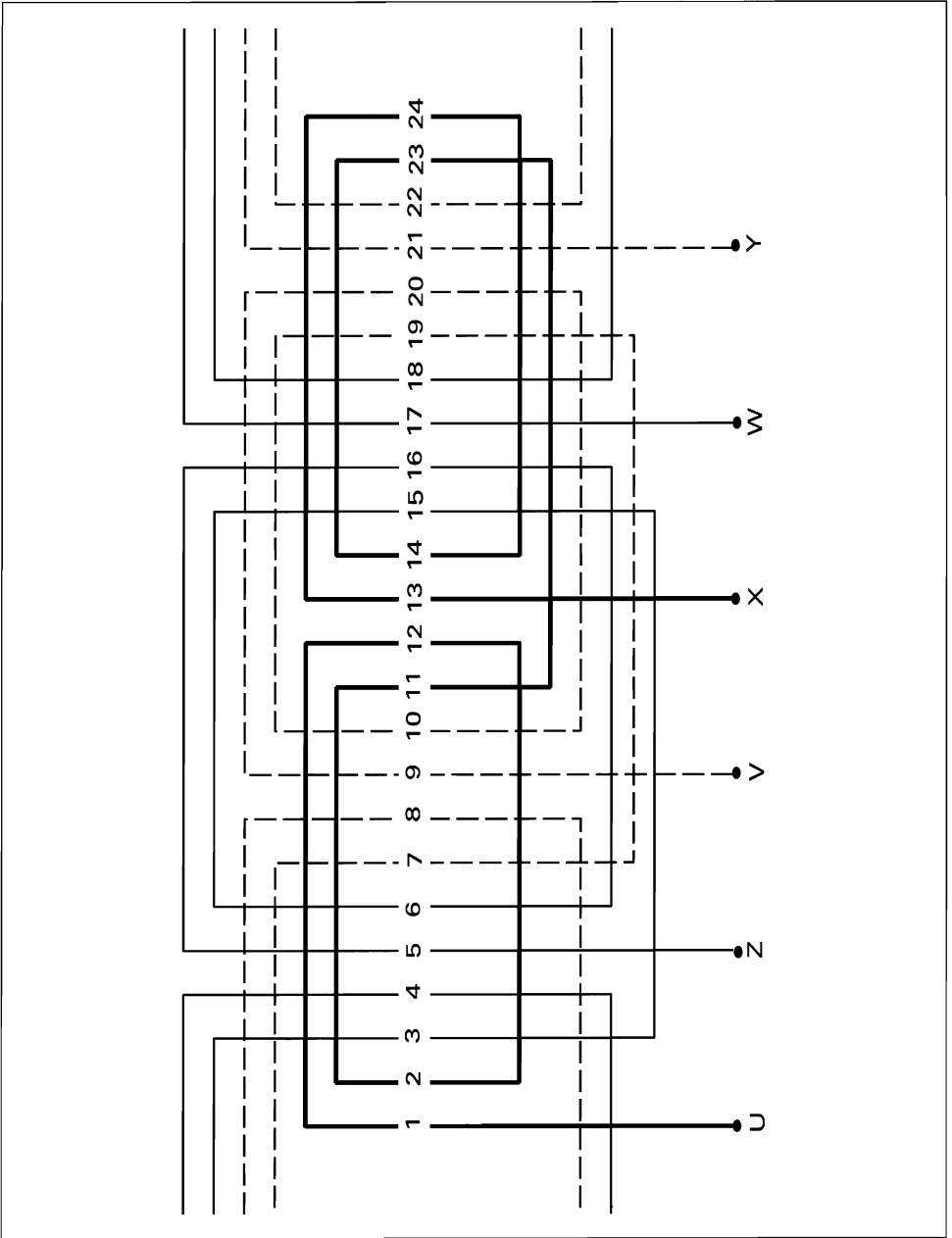
$$Y_k = K / 2p = 6 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 11 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 6 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 5$$



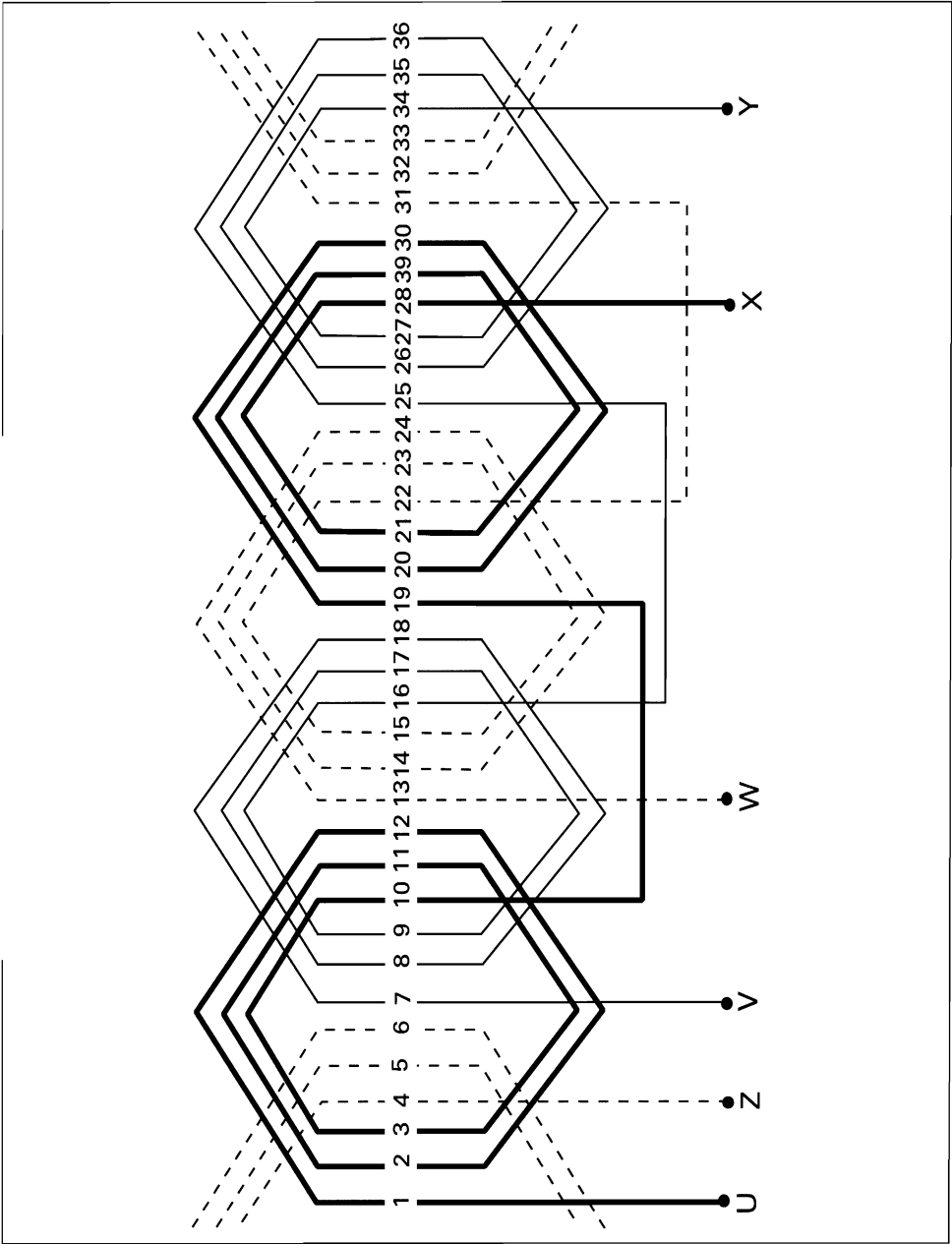
**Esquema c.c. 13.20.** Devanado ondulado triple, ejecutado sin cruzar y con bobinas equipotenciales de primera clase

$$K = 36 ; D = 36 ; 2p = 6 ; U = 1$$

$$Y_k = K / 2p = 6 ; Y_{col} = Y_1 + Y_2 = 11 ; Y_1 = Y_k \cdot U = 6 ; Y_2 = Y_{col} - Y_1 = 5$$



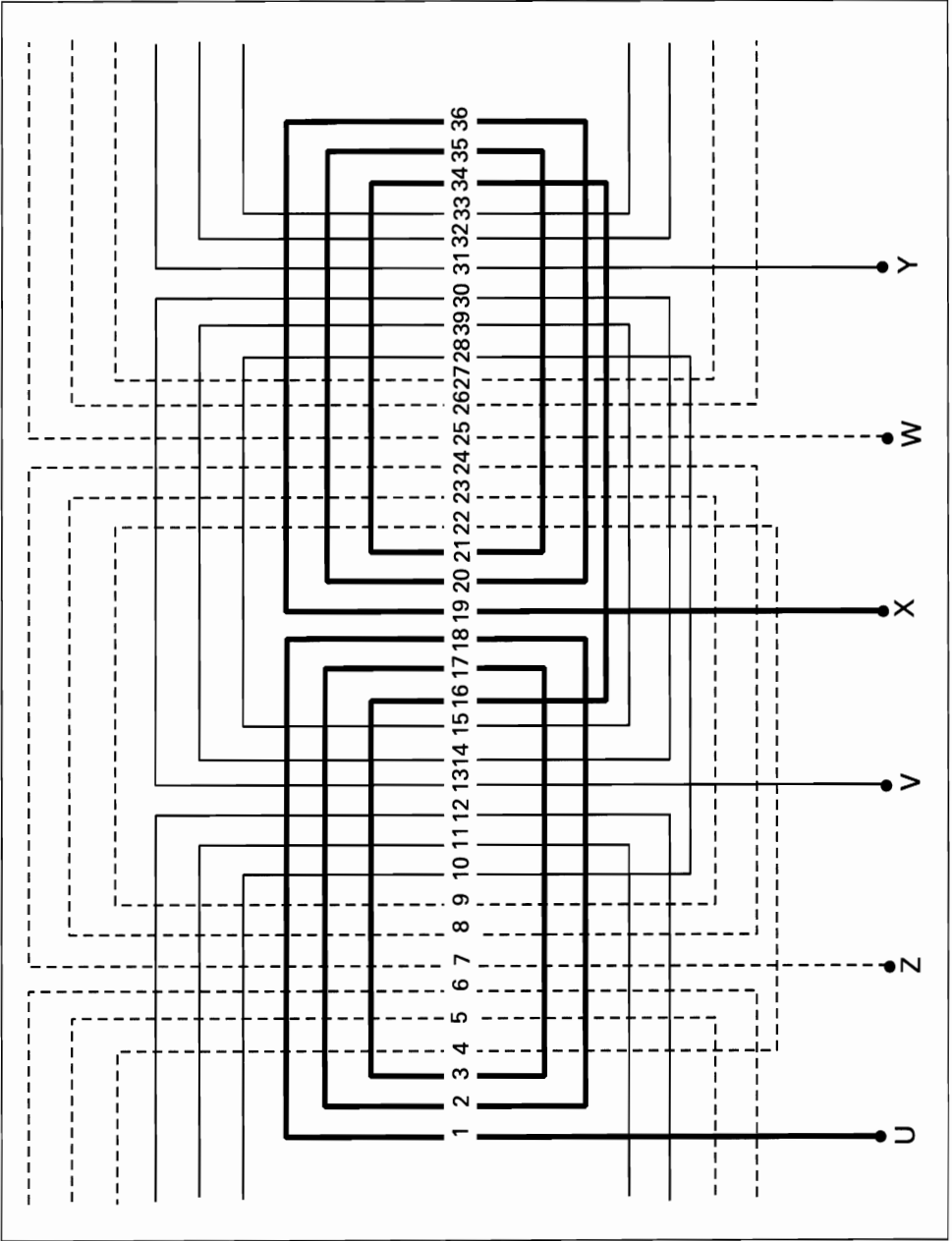
**Esquema c.a. 13.21.** Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa  
 $K = 24$  ;  $2p = 2$  ;  $B = K / 2$  ;  $q = 3$   
 $G = 2p \cdot q = 6$  ;  $U_g = K / (4p \cdot q) = 2$  ;  $m = (q - 1) 2U_g = 8$  ;  $Y_q = K / 3p = 8$



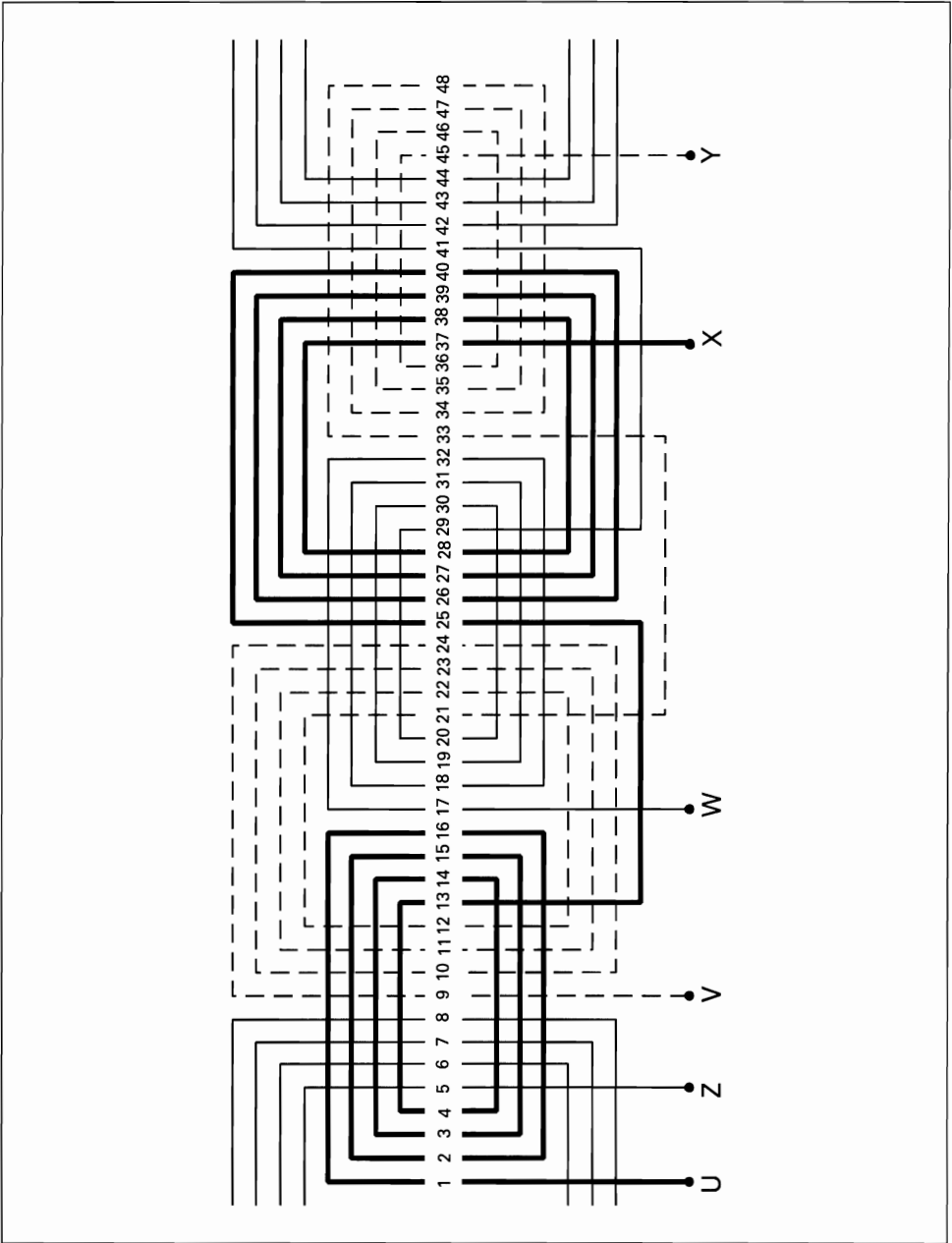
**Esquema c.a. 13.22.** Devanado concéntrico, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 36 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

$$G = p \cdot q = 6 ; U_g = K / (2p \cdot q) = 3 ; m = (q - 1) U_g = 6 ; Y_q = K / 3p = 6$$



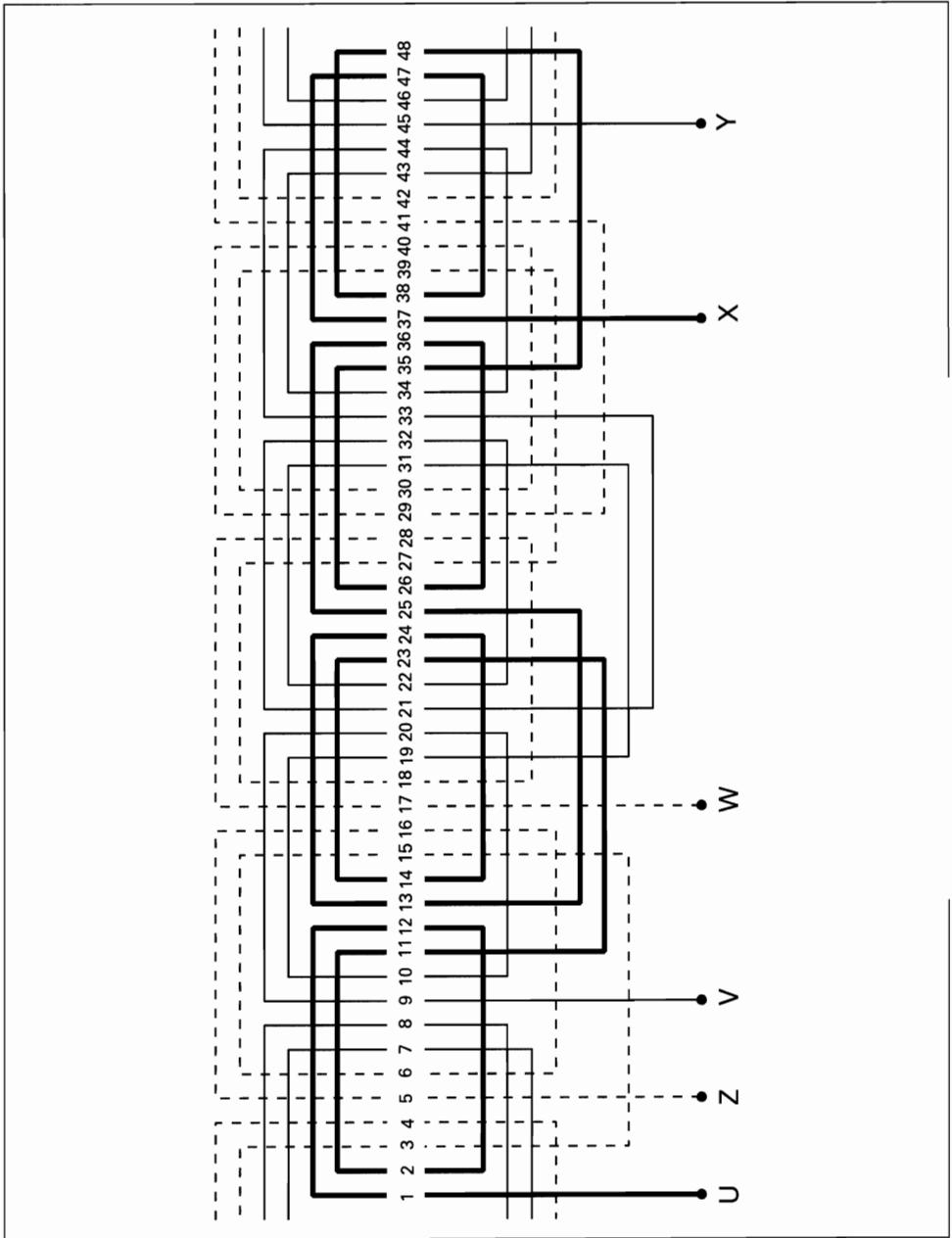
**Esquema c.a. 13.23.** Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa  
 $K = 36$  ;  $2p = 2$  ;  $B = K / 2$  ;  $q = 3$   
 $G = 2p \cdot q = 6$  ;  $U_g = K / (4p \cdot q) = 3$  ;  $m = (q - 1) 2U_g = 12$  ;  $Y_q = K / 3p = 12$



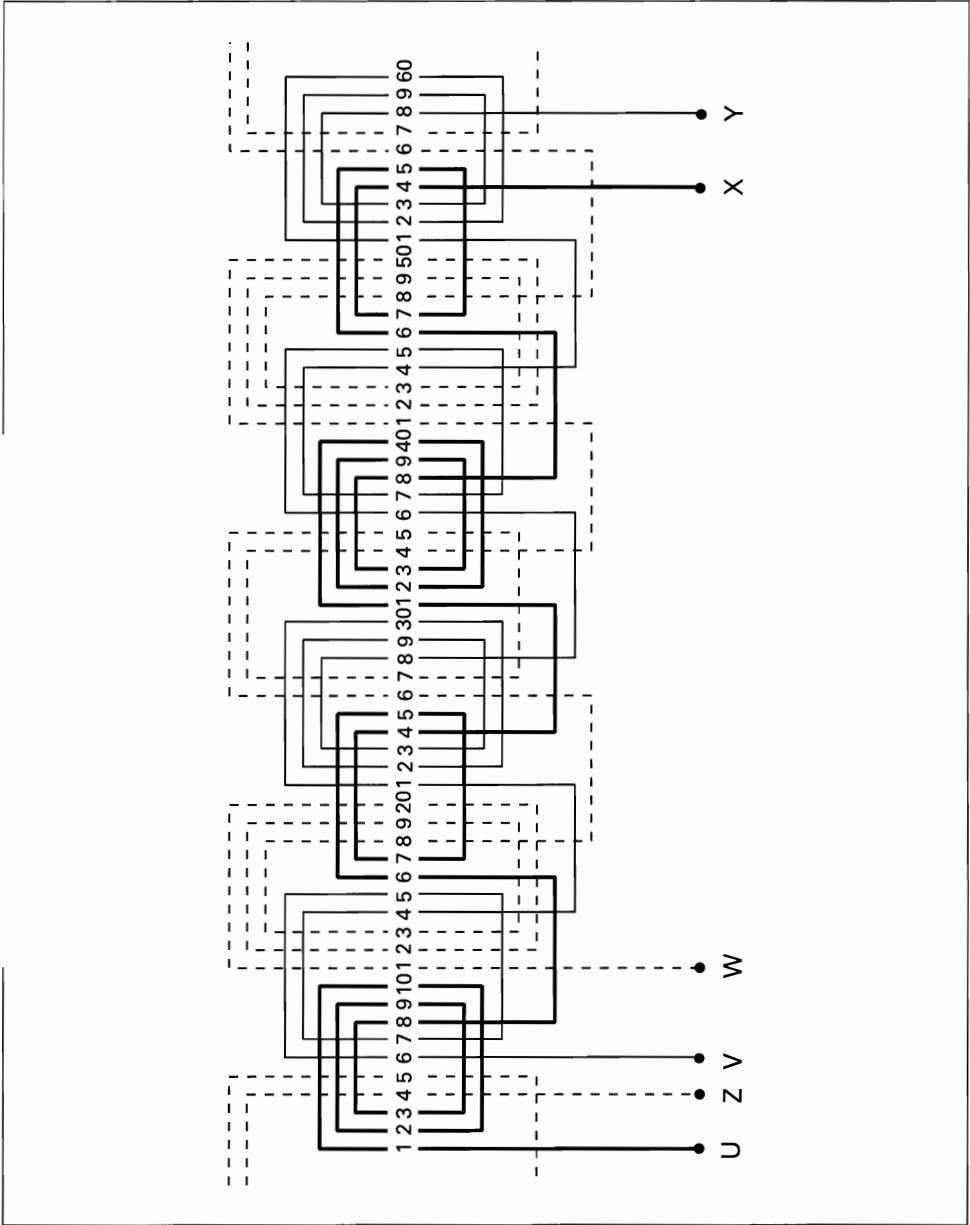
**Esquema c.a. 13.24.** Devanado concéntrico, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 48 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

$$G = p \cdot q = 6 ; U_g = K / (2p \cdot q) = 4 ; m = (q - 1) U_g = 8 ; Y_q = K / 3p = 8$$



**Esquema c.a. 13.25.** Devanado concéntrico, ejecutado por polos y a una capa  
 $K = 48$  ;  $2p = 4$  ;  $B = K / 2$  ;  $q = 3$   
 $G = 2p \cdot q = 12$  ;  $U_g = K / (4p \cdot q) = 2$  ;  $m = (q - 1) 2U_g = 8$  ;  $Y_q = K / 3p = 8$

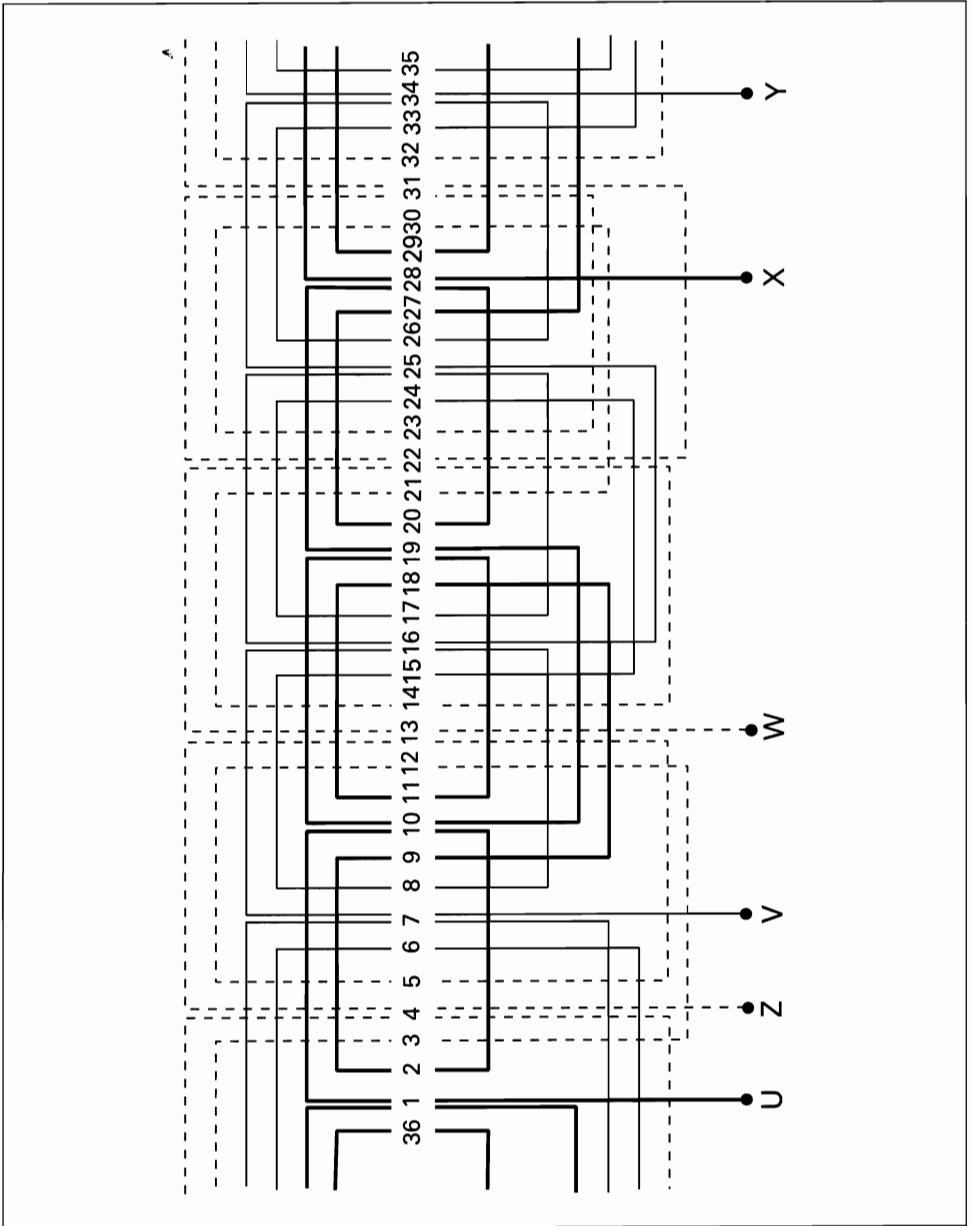


**Esquema c.a. 13.26.** Devanado concéntrico mixto (grupos de dos y tres bobinas), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 60 ; 2p = 8 ; B = K / 2 ; q = 3$$

$$G = p \cdot q = 12 ; U_g = K / (2p \cdot q) = 2,5 ; m = (q - 1) U_g = 4 \text{ y } 6 ; Y_q = K / 3p = 5$$

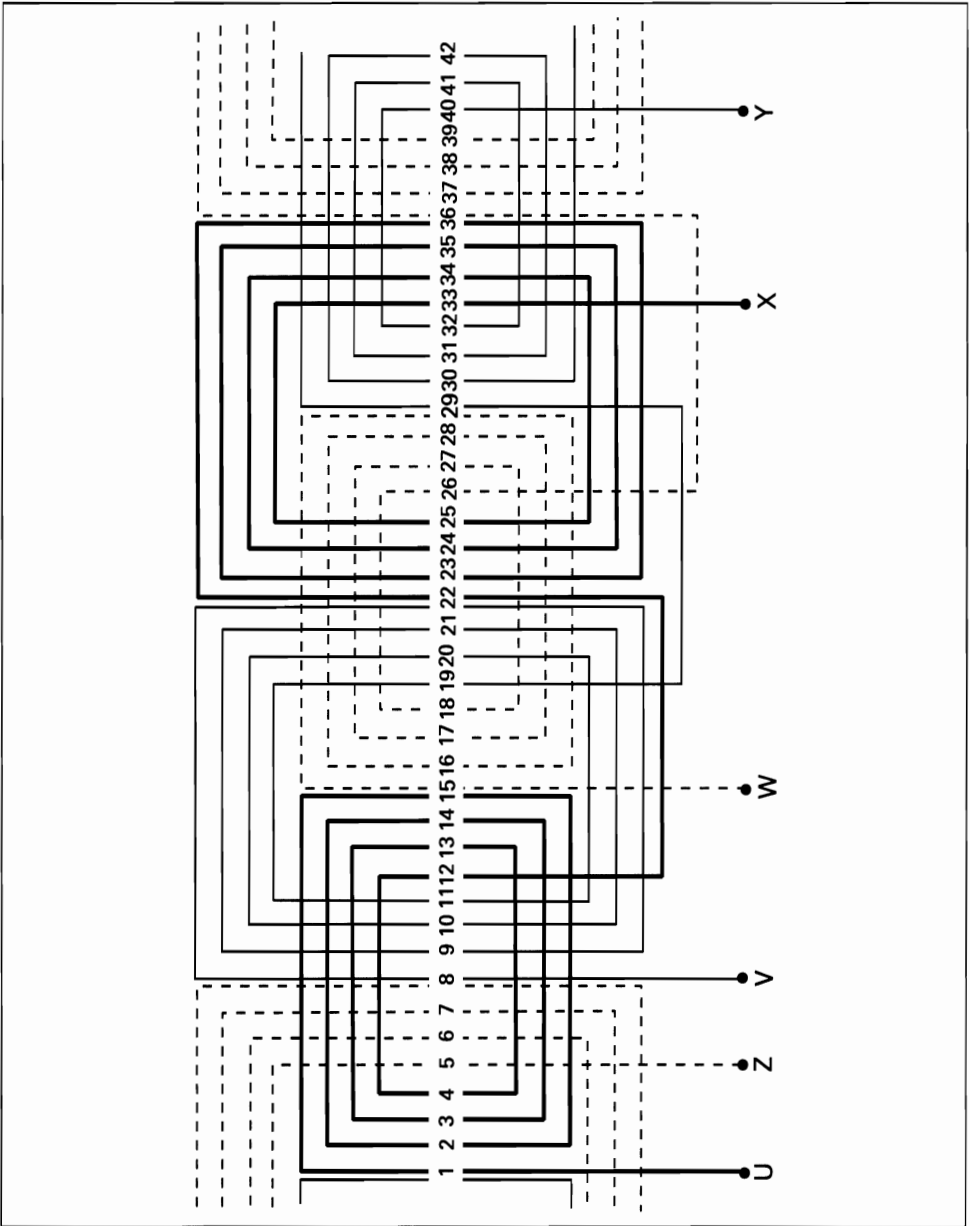




**Esquema c.a. 13.27.** Devanado concéntrico mixto (grupos con medias bobinas), ejecutado por polos y a una capa

$$K = 36; 2p = 4; B = K / 2; q = 3$$

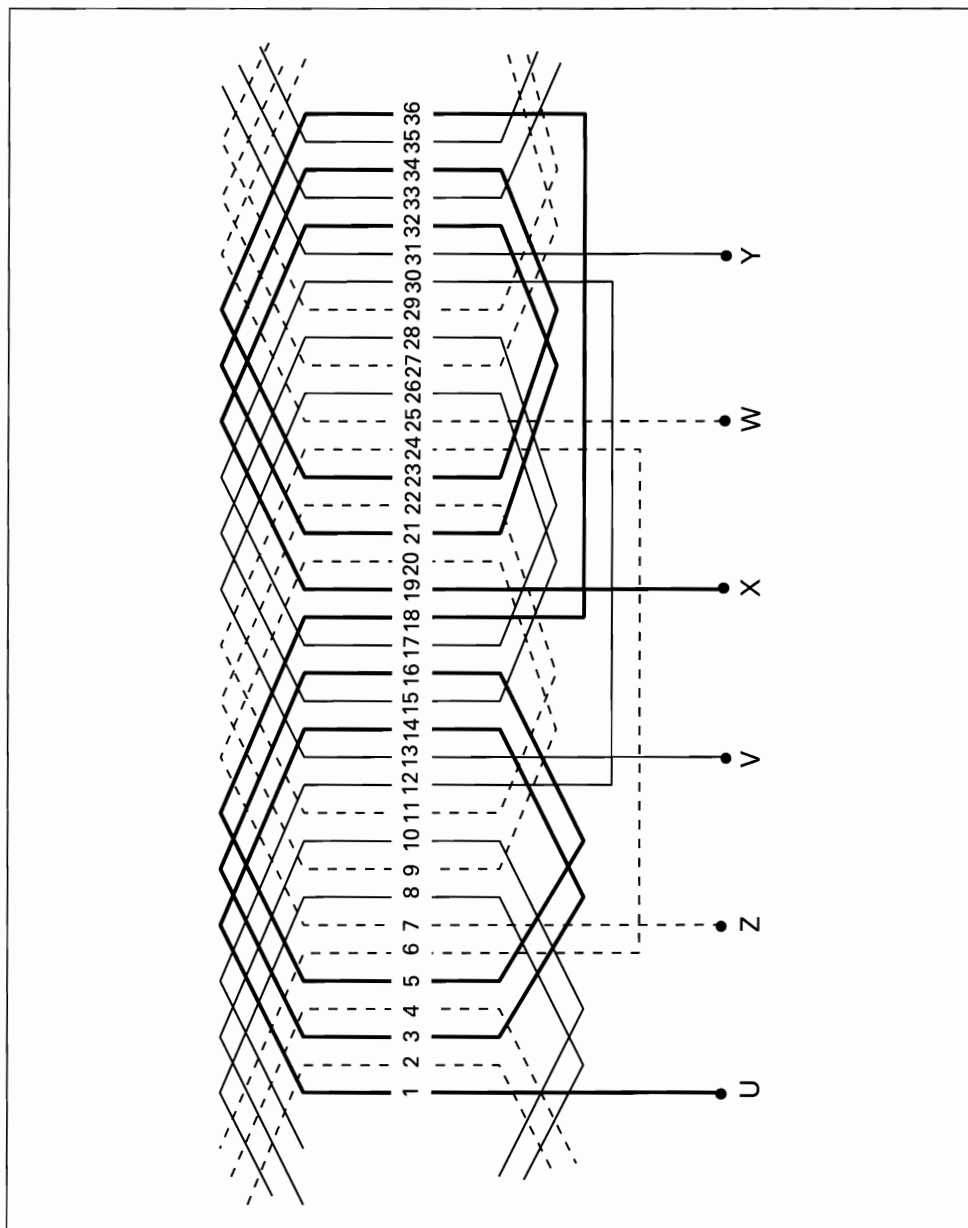
$$G = 2p \cdot q = 12; U_g = K / (4p \cdot q) = 1,5; m = (q - 1) 2U_g = 6; Y_q = K / 3p = 6$$



**Esquema c.a. 13.28.** Devanado concéntrico mixto (grupos con medias bobinas), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 42 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

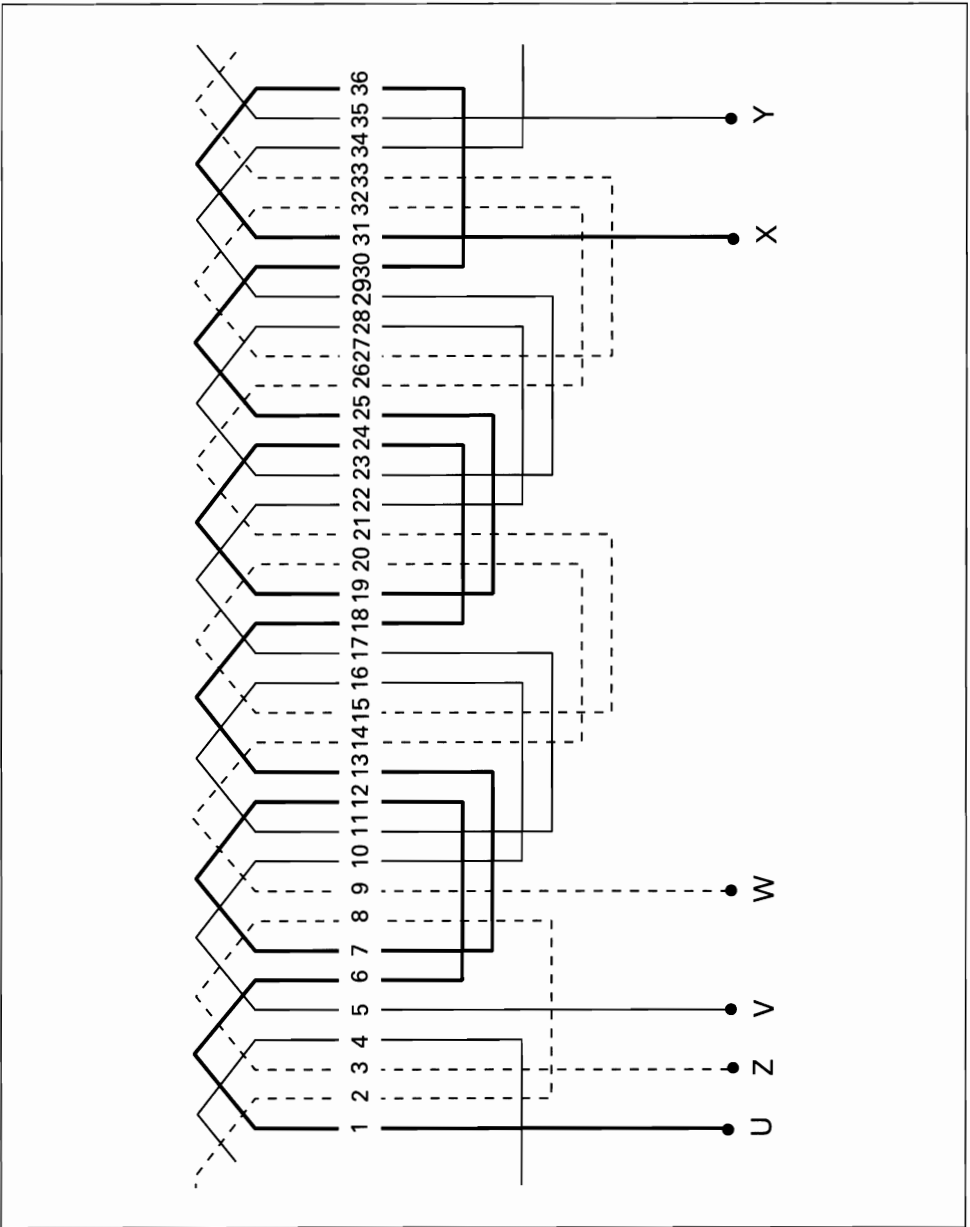
$$G = p \cdot q = 6 ; U_g = K / (2p \cdot q) = 3,5 ; m = (q - 1) U_g = 7 ; Y_q = K / 3p = 7$$



**Esquema c.a. 13.29.** Devanado imbricado entero, ejecutado con paso muy acortado, por polos y a una capa

$$K = 36 ; 2p = 2 ; B = K / 2 ; q = 3$$

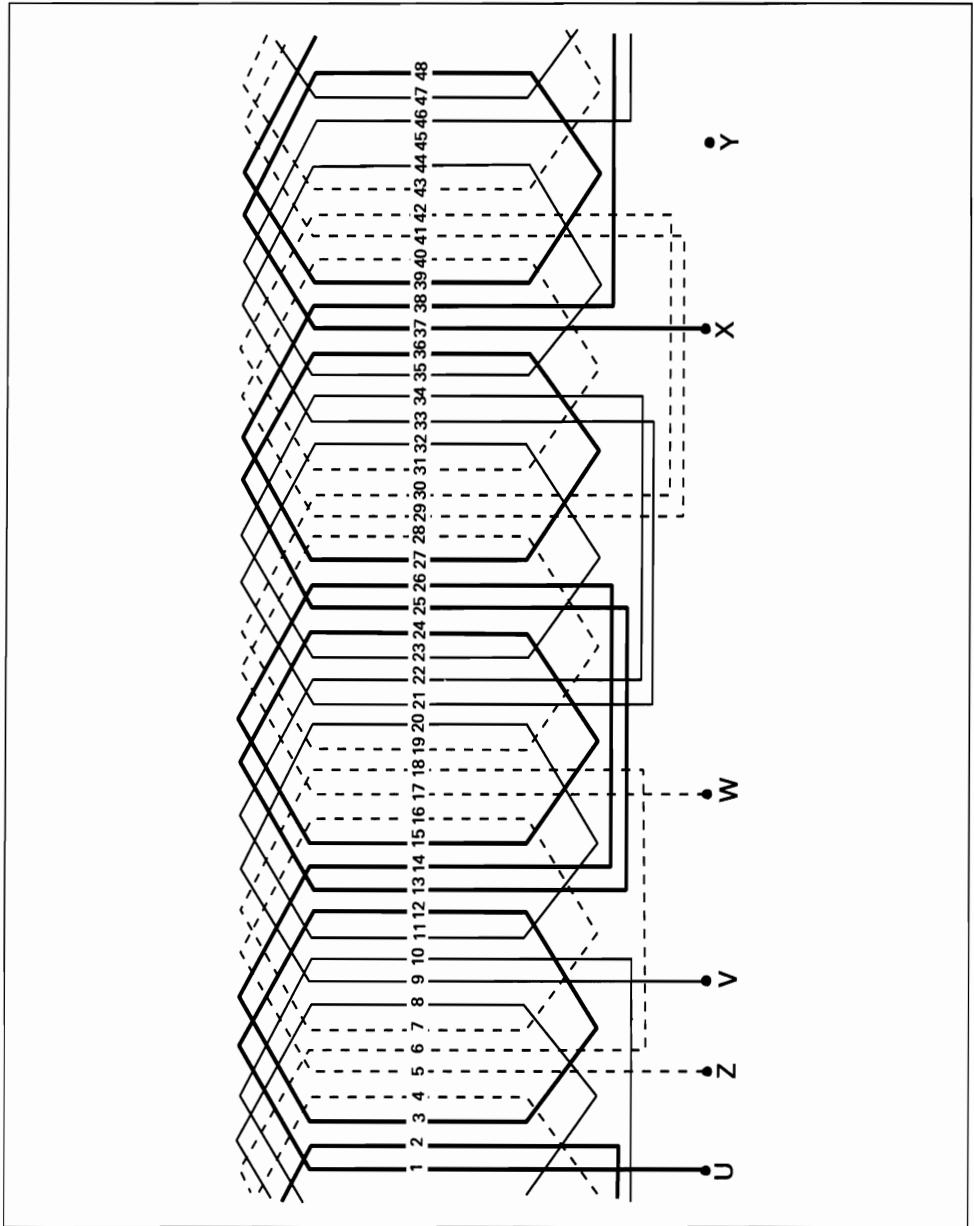
$$G = 2p \cdot q = 6 ; U_g = K / (4p \cdot q) = 3 ; Y_k = K / 2p = 18 ; Y_q = K / 3p = 12$$



**Esquema c.a. 13.30.** Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

$$K = 36 ; 2p = 6 ; B = K / 2 ; q = 3$$

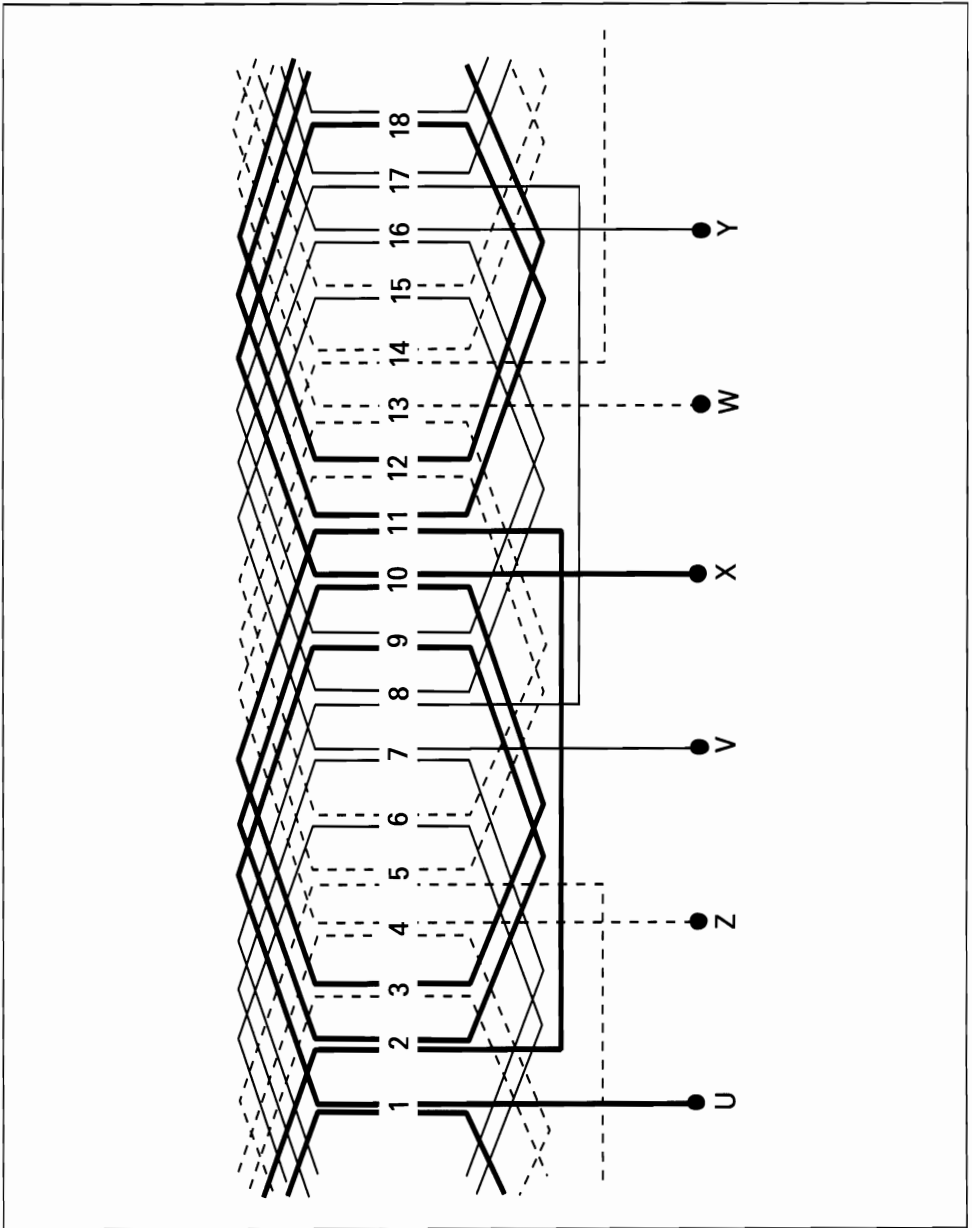
$$G = 2p \cdot q = 18 ; U_g = K / (4p \cdot q) = 1 ; Y_k = K / 2p = 6 ; Y_q = K / 3p = 4$$



**Esquema c.a. 13.31.** Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

$$K = 48 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

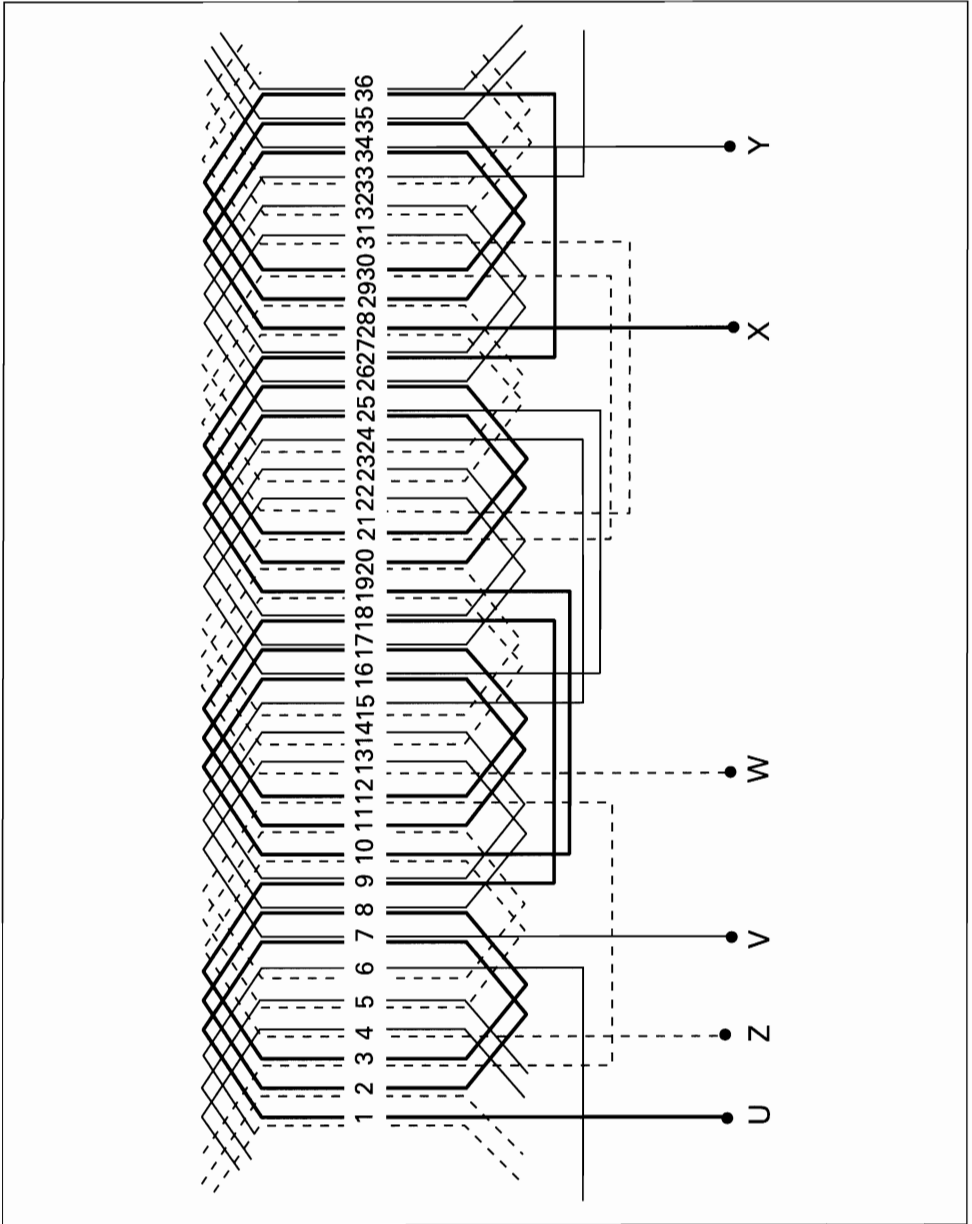
$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = K / (4p \cdot q) = 2 ; Y_k = K / 2p = 12 ; Y_q = K / 3p = 8$$



**Esquema c.a. 13.32.** Devanado imbricado entero, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

$$K = 18 ; 2p = 2 ; B = K ; q = 3$$

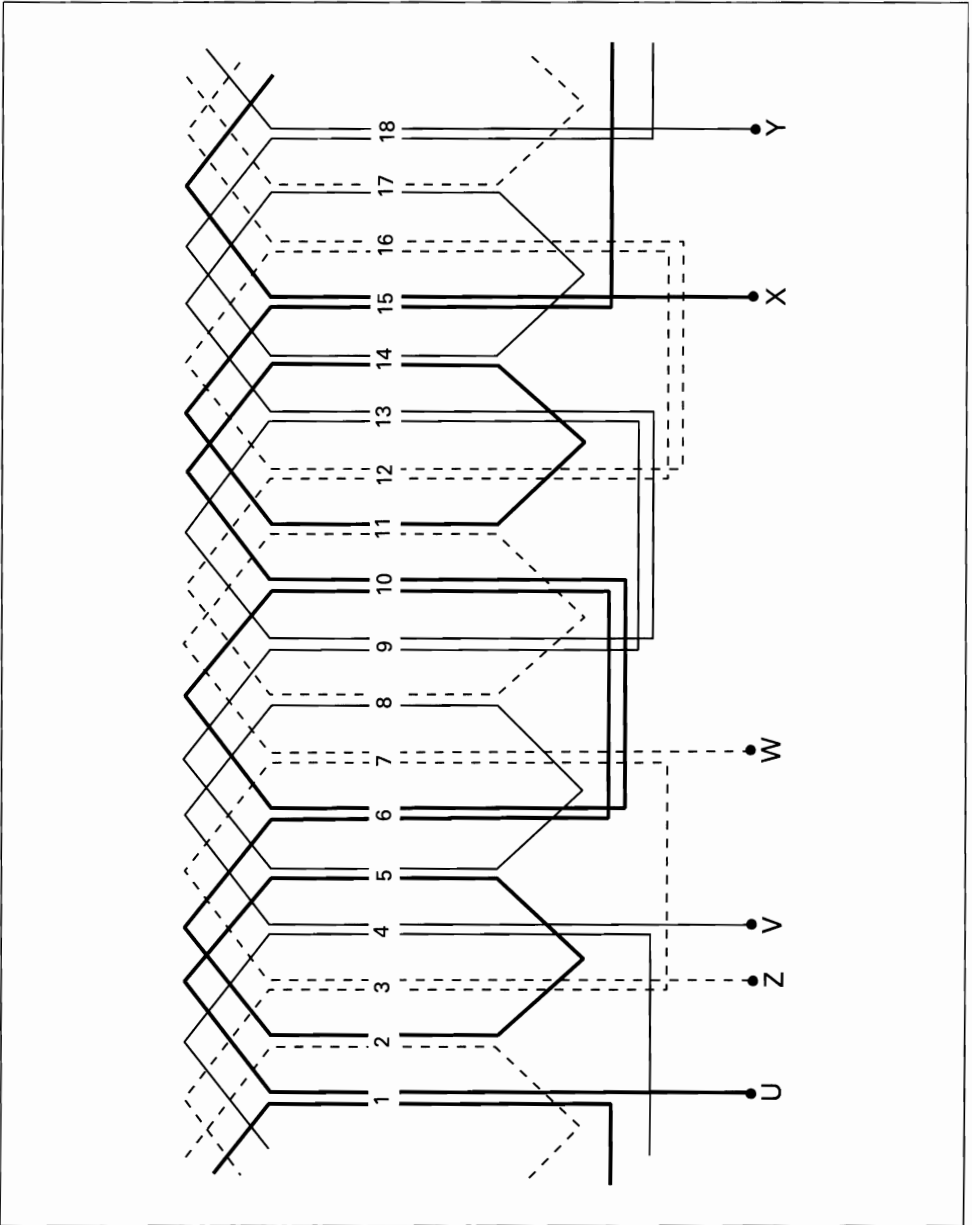
$$G = 2p \cdot q = 6 ; U_g = K / (2p \cdot q) = 3 ; Y_k = K / 2p = 9 ; Y_q = K / 3p = 6$$



**Esquema c.a. 13.33.** Devanado imbricado entero, ejecutado con paso muy acortado, por polos y a doble capa

$$K = 36 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3$$

$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = K / 2p \cdot q = 3 ; Y_k = K / 2p = 9 ; Y_q = K / 3p = 6$$

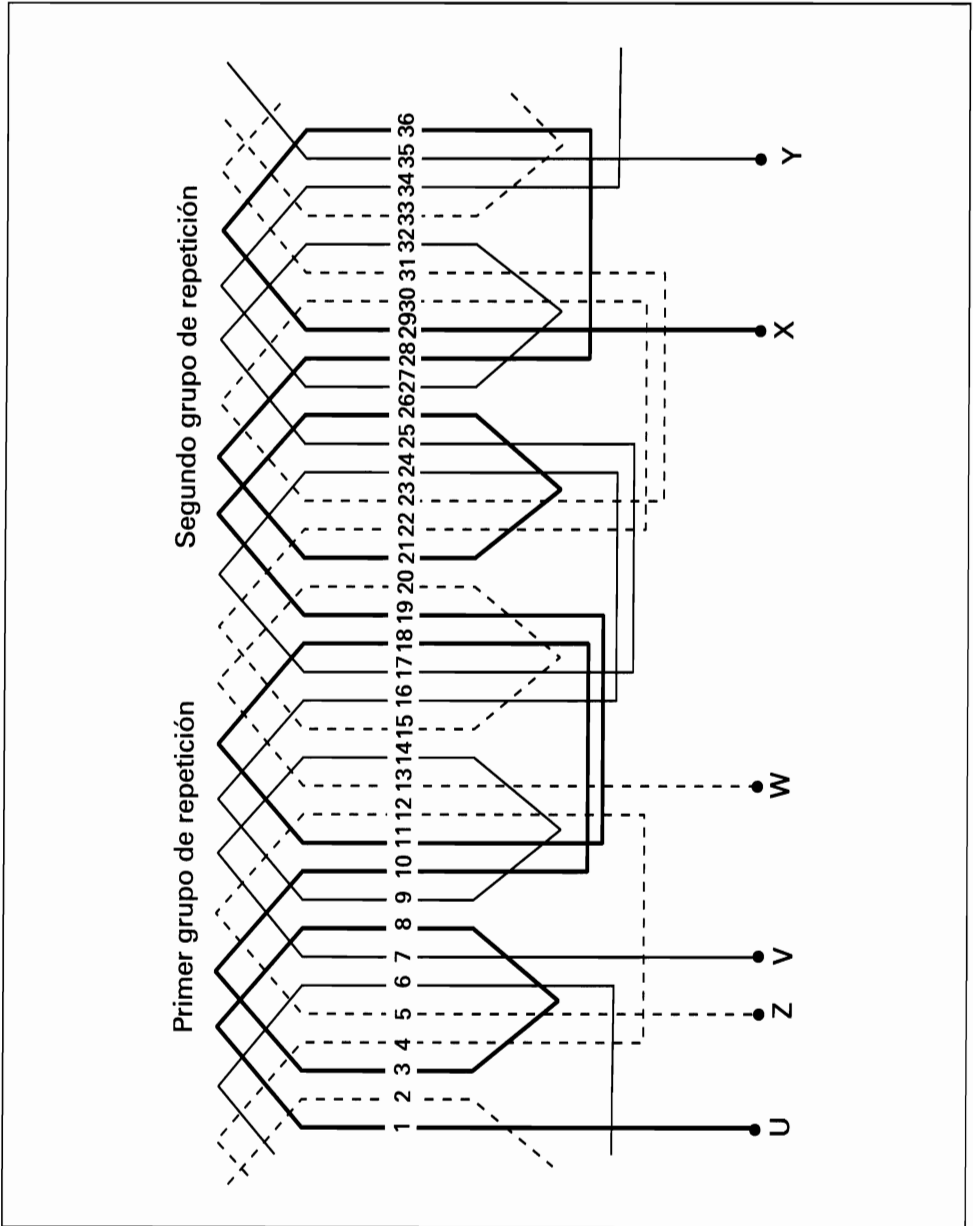


**Esquema c.a. 13.34.** Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

$$K = 18 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3$$

$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = B / 2p \cdot q = 1\frac{1}{2} ; Y_k = K / 2p = 4,5 ; Y_q = K / 3p = 3$$

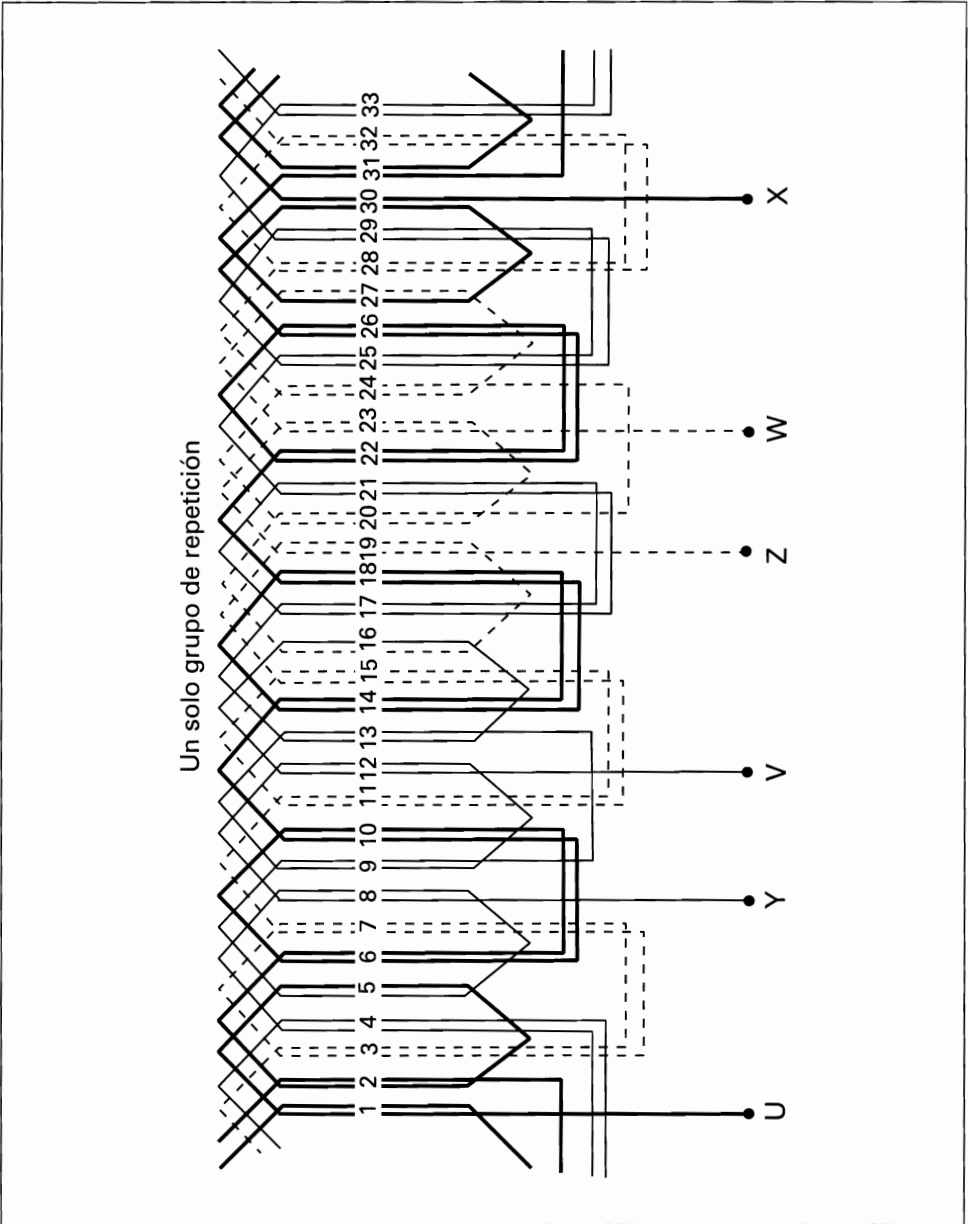




**Esquema c.a. 13.35.** Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a una capa

$$K = 36 ; 2p = 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

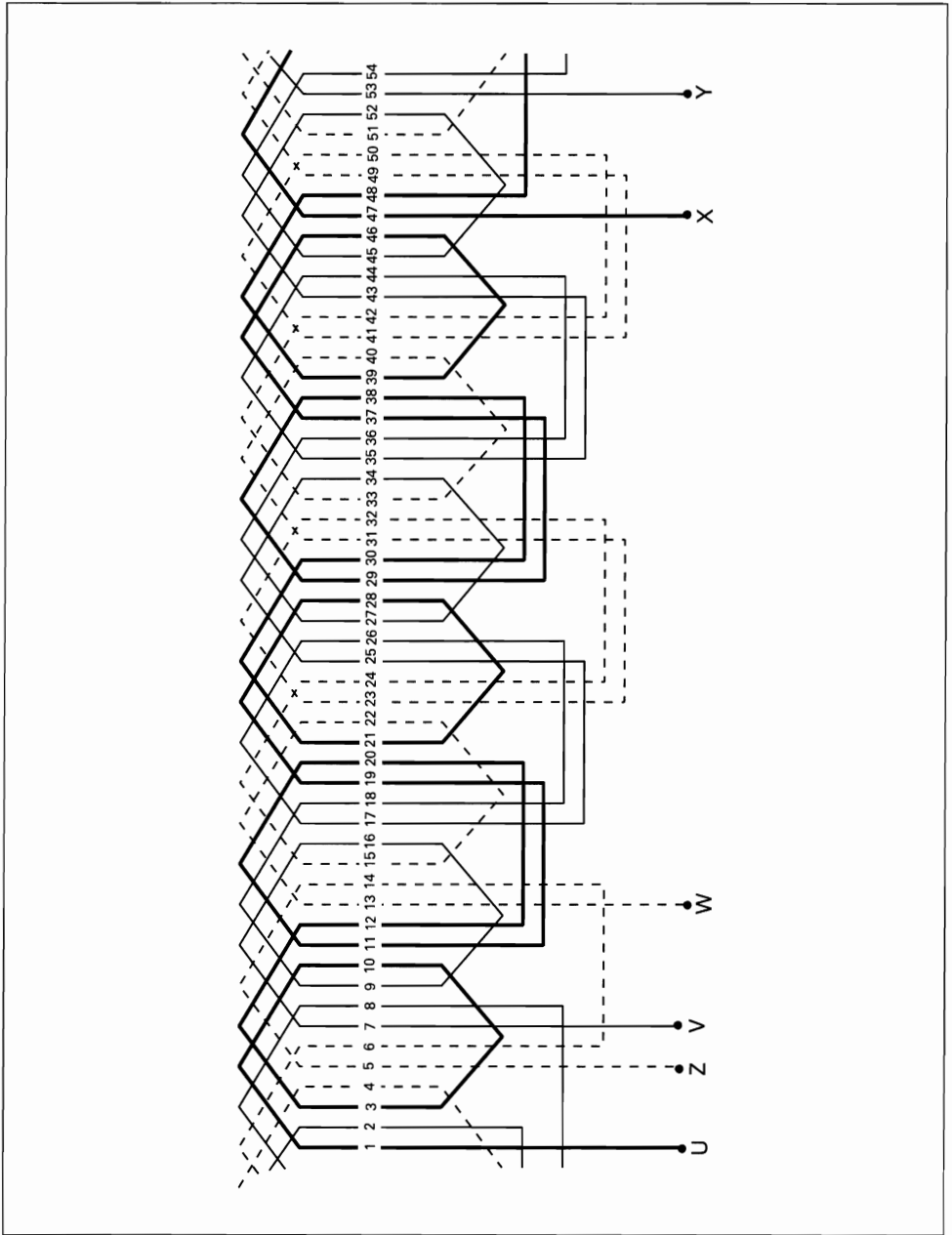
$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = B / 2p \cdot q = 1\frac{1}{2} ; Y_k = K / 2p = 9 ; Y_q = K / 3p = 6$$



**Esquema c.a. 13.36.** Devanado imbricado fraccionario, ejecutado con paso acortado, por polos y a doble capa

$$K = 33 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3$$

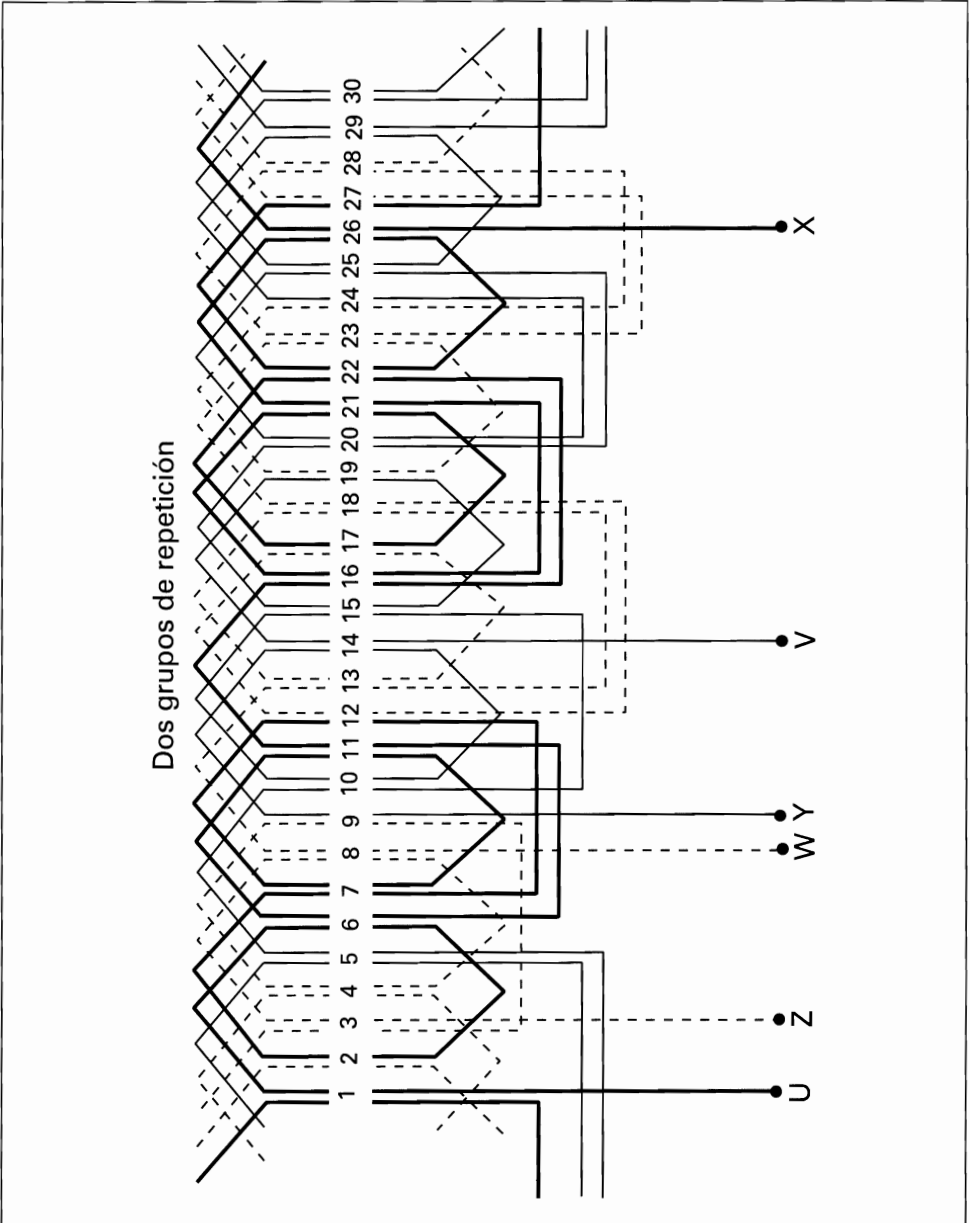
$$G = 2p \cdot q = 24 ; U_g = B / 2p \cdot q = 1\frac{3}{8} ; Y_k = K / 2p = 4,125 ; Y_q = K / 3p = 2,75$$



**Esquema c.c. 13.37.** Devanado imbricado fraccionario, ejecutado por polos y a una capa

$$K = 54 ; 2p = 6 ; B = K / 2 ; q = 3$$

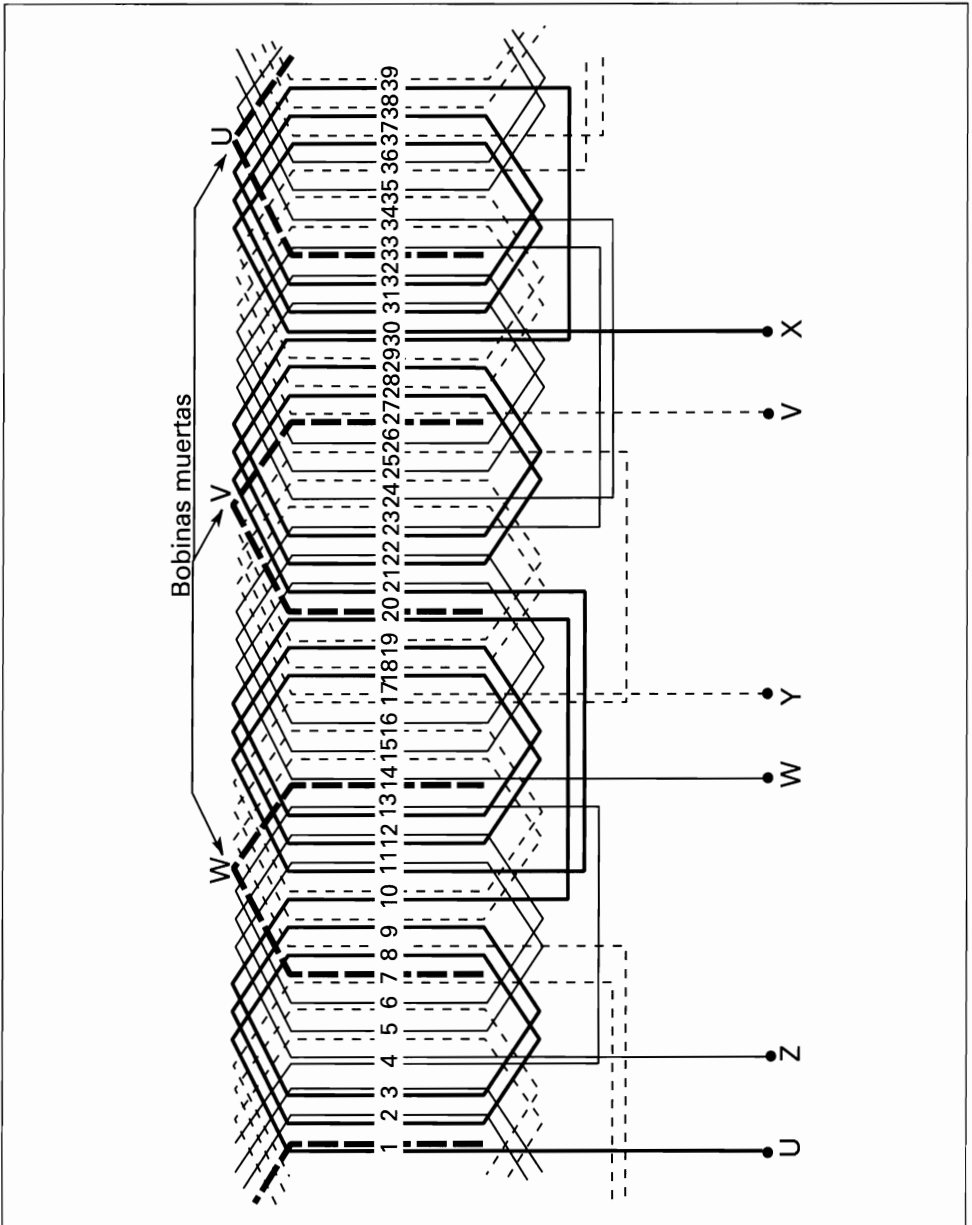
$$G = 2p \cdot q ; U_g = B / (2p \cdot q) = 1 \frac{1}{2} ; Y_k = K / 2p = 9 ; Y_q = K / 3p = 6$$



**Esquema c.a. 13.38.** Devanado imbricado fraccionario, irregular, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 30 ; 2p = 6 ; B = K ; q = 3$$

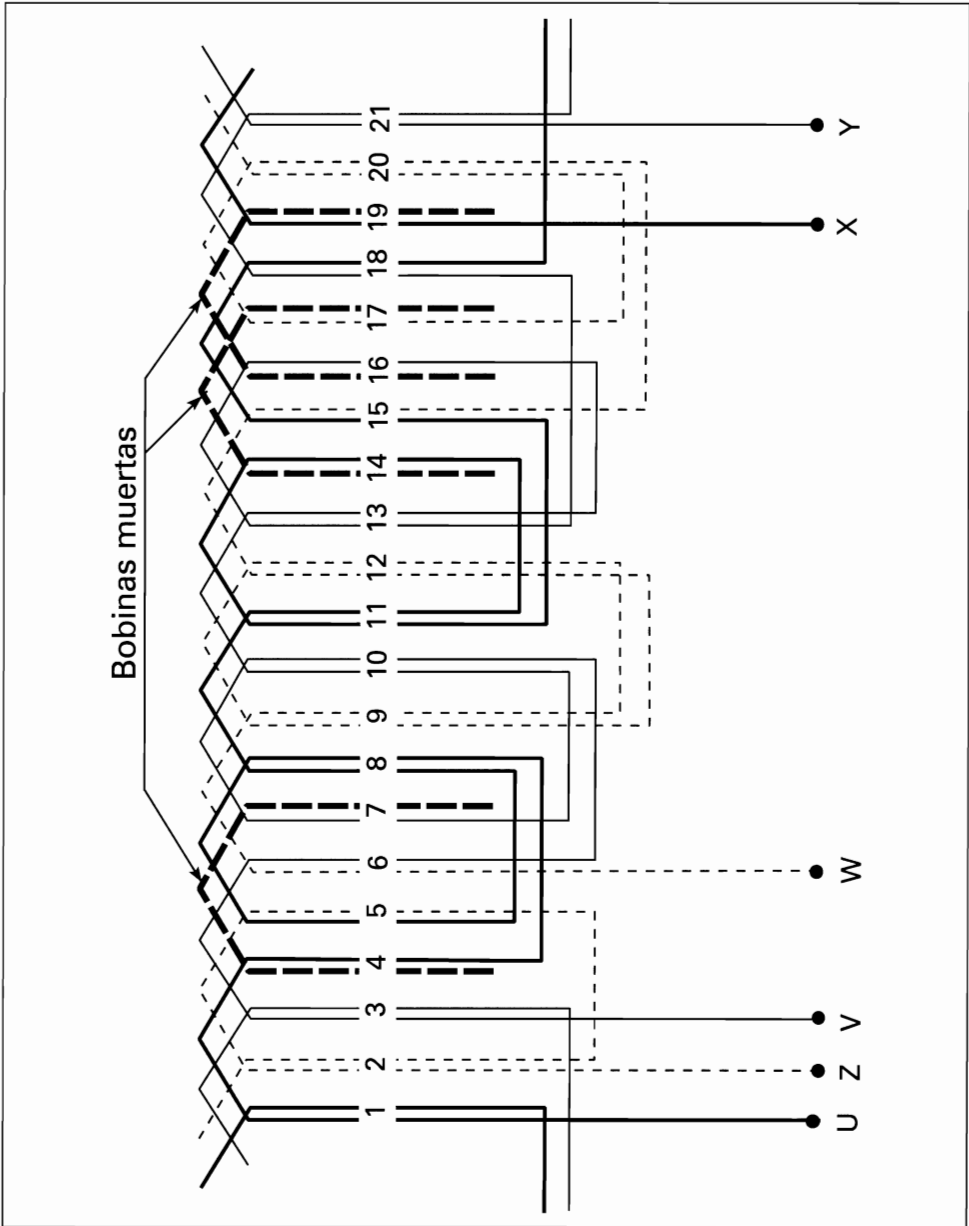
$$G = 2p \cdot q = 18 ; U_g = B / (2p \cdot q) = 1\frac{2}{3} ; Y_k = K / 2p = 5 ; Y_q = K / 3p = 3,333$$



**Esquema c.a. 13.39.** Devanado imbricado fraccionario, con tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 39 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3$$

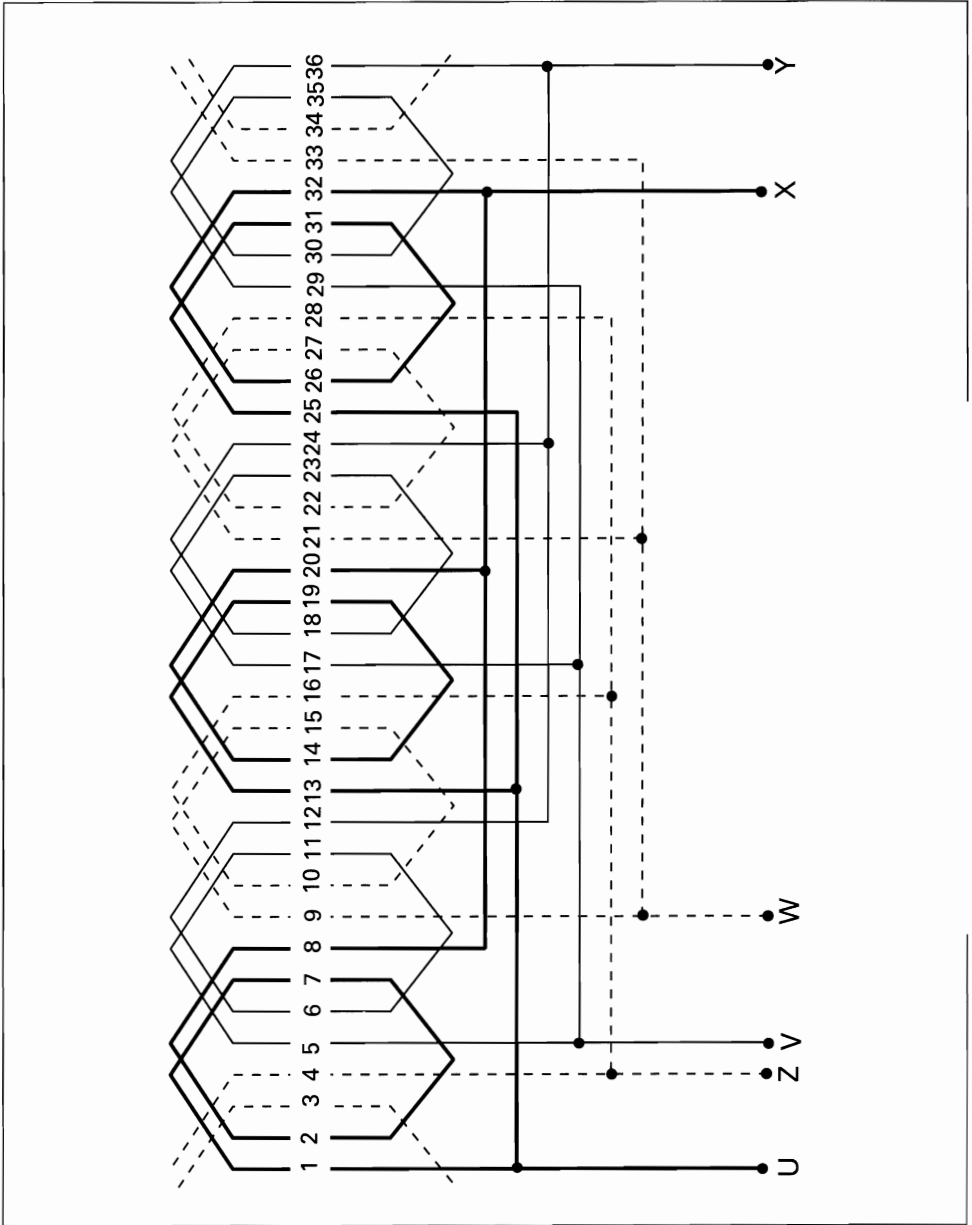
$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = B / (2p \cdot q) = 3/4 ; Y_k = K / 2p = 9,75 ; Y_q = K / 3p = 6,5$$



**Esquema c.a. 13.40.** Devanado imbricado fraccionario, con tres bobinas muertas, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 21 ; 2p = 6 ; B = K ; q = 3$$

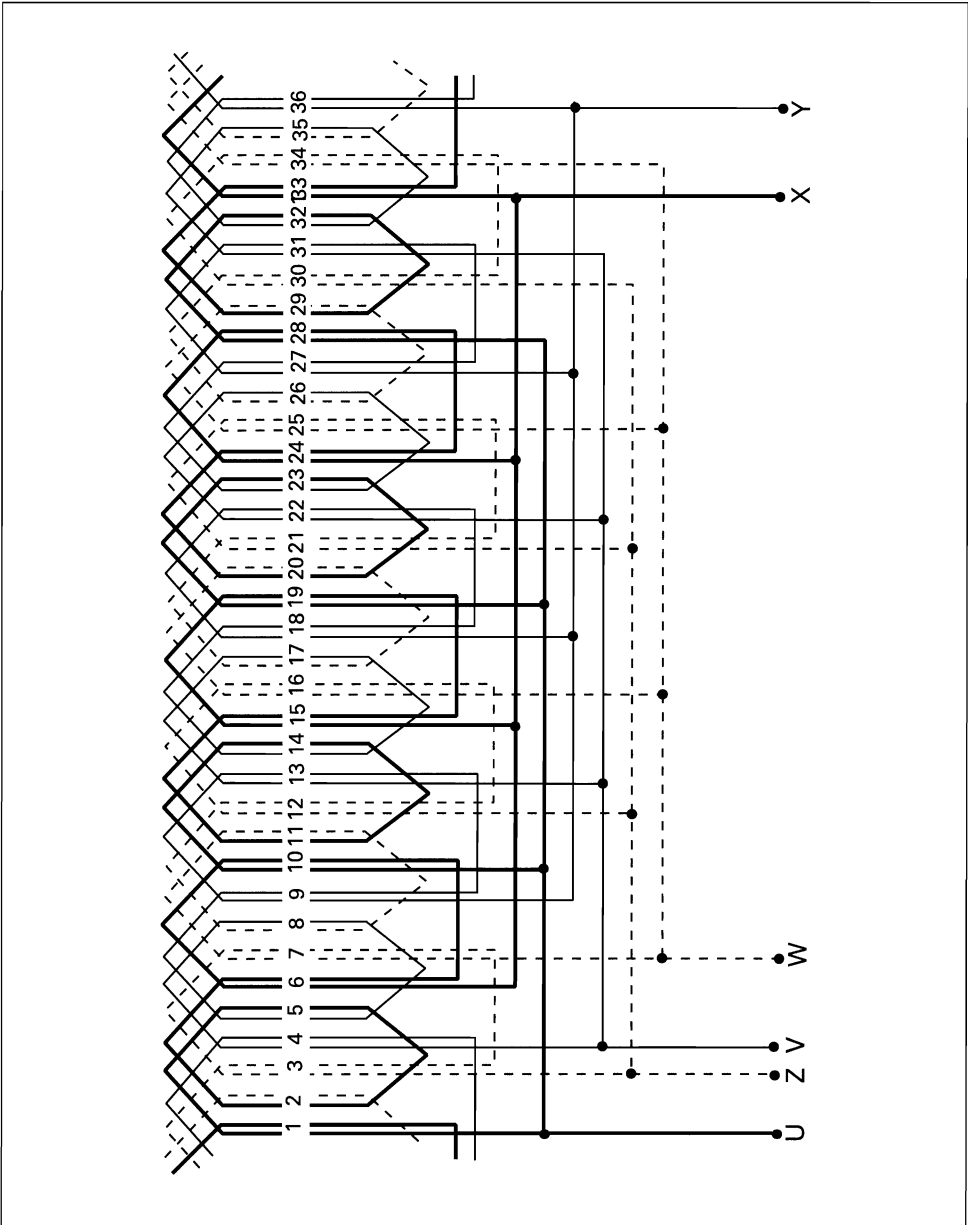
$$G = 2p \cdot q = 18 ; U_g = B / (2p \cdot q) = 1,166 ; Y_k = K / 2p = 3,5 ; Y_q = K / 3p = 2,333$$



Esquema c.a. 13.41. Devanado imbricado entero, con tres circuitos en paralelo, ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 36 ; 2p = 6 ; B = K / 2 ; q = 3$$

$$G = p \cdot q = 9 ; U_g = B / (p \cdot q) = 2 ; Y_k = K / 2p = 6 ; Y_q = K / 3p = 4$$

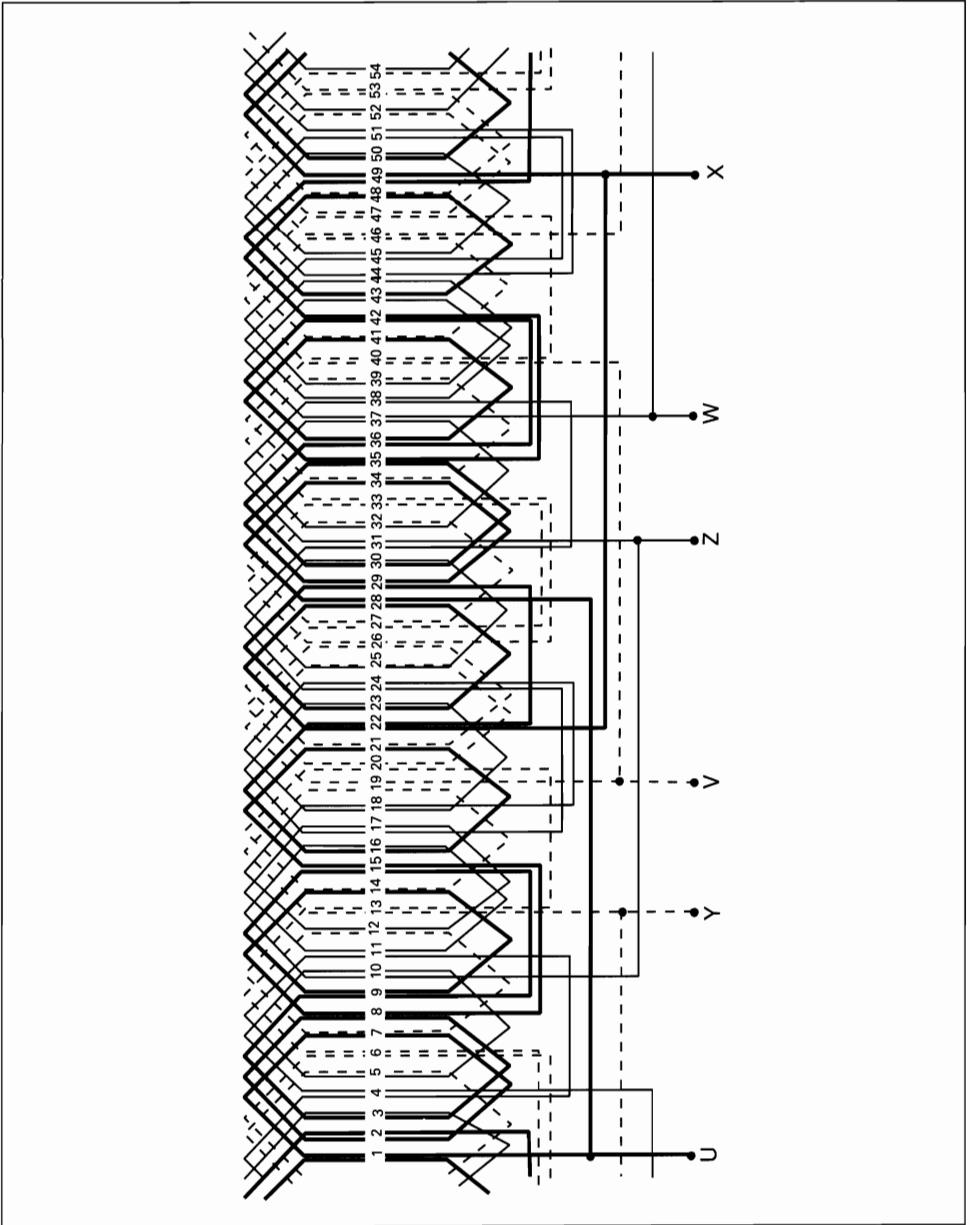


**Esquema c.a. 13.42.** Devanado imbricado fraccionario, con cuatro circuitos en paralelo, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 36 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3$$

$$G = 2p \cdot q = 24 ; U_g = B / (2p \cdot q) = 1\frac{1}{2} ; Y_k = K / 2p = 4,5 ; Y_q = K / 3p = 3$$

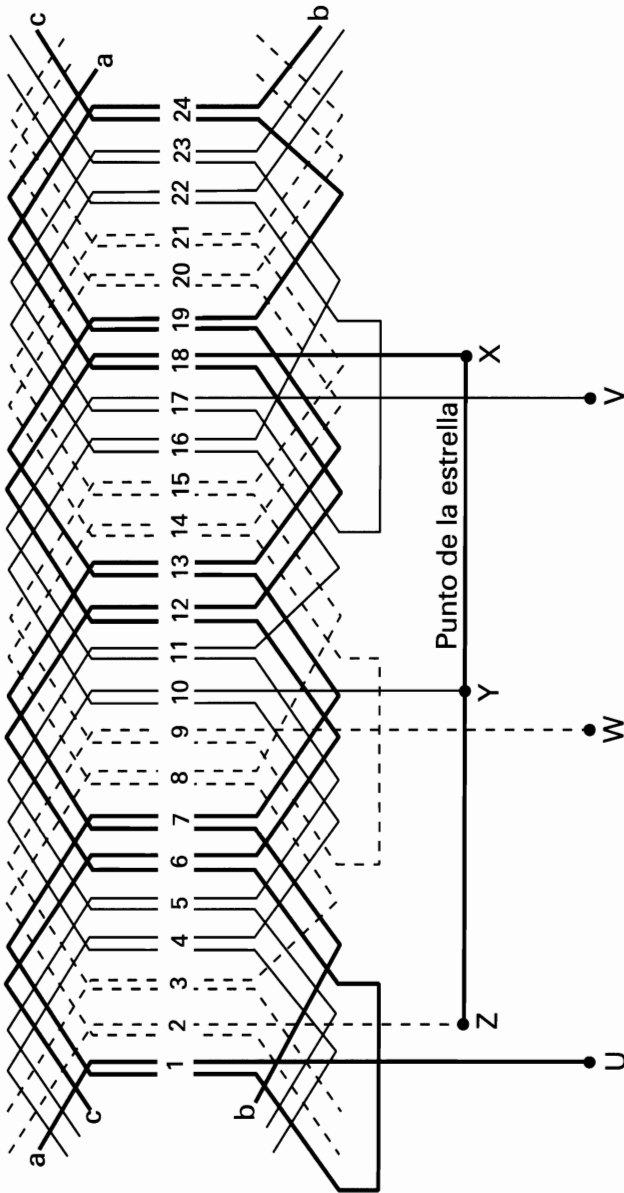




**Esquema c.a. 13.43.** Devanado imbricado fraccionario, con dos circuitos en paralelo, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 54 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3$$

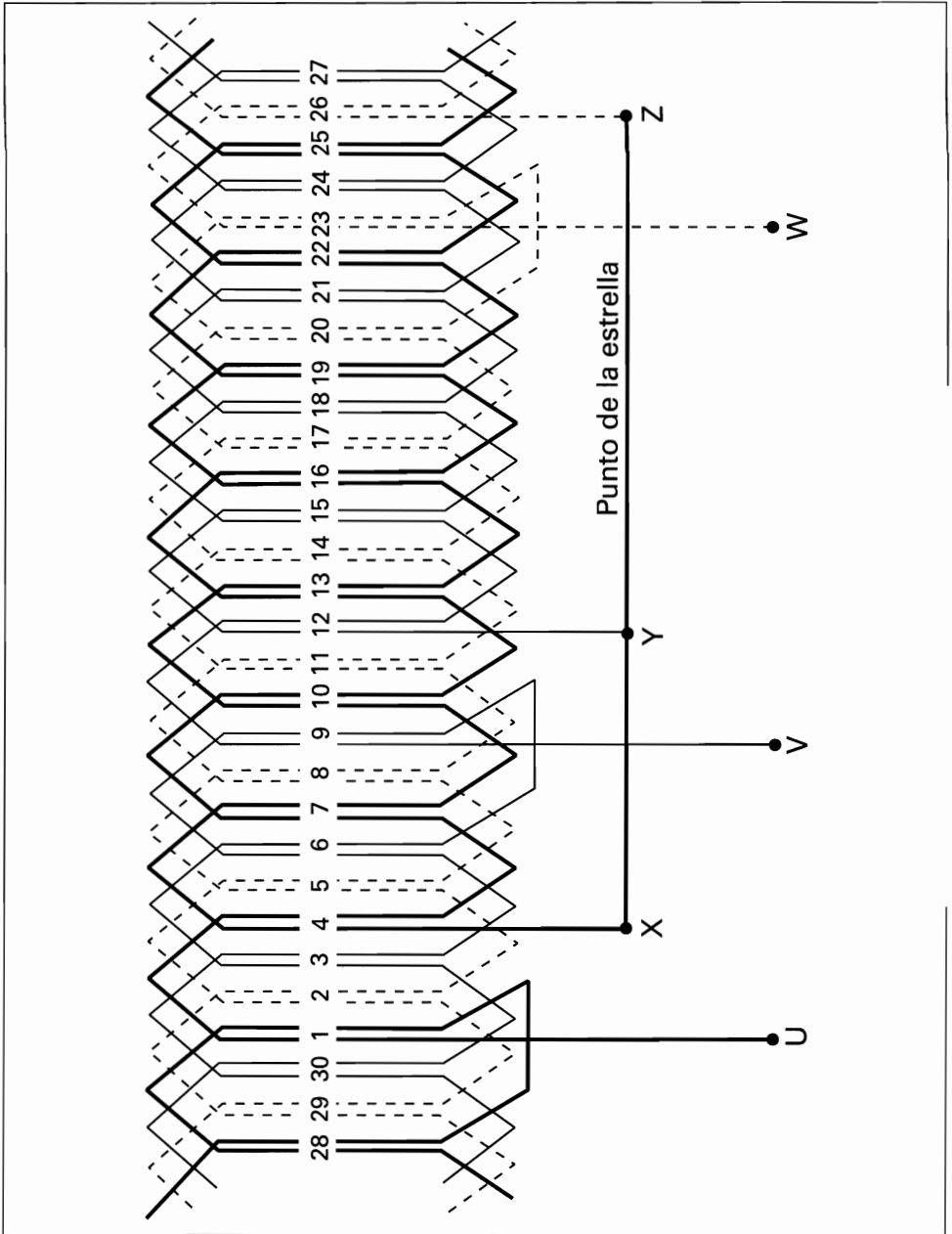
$$G = 2p \cdot q = 24 ; U_g = B / (2p \cdot q) = 2\frac{1}{4} ; Y_k = K / 2p = 6,75 ; Y_q = K / 3p = 4,5$$



**Esquema c.a. 13.44.** Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 24 ; 2p = 4 ; B = K ; q = 3$$

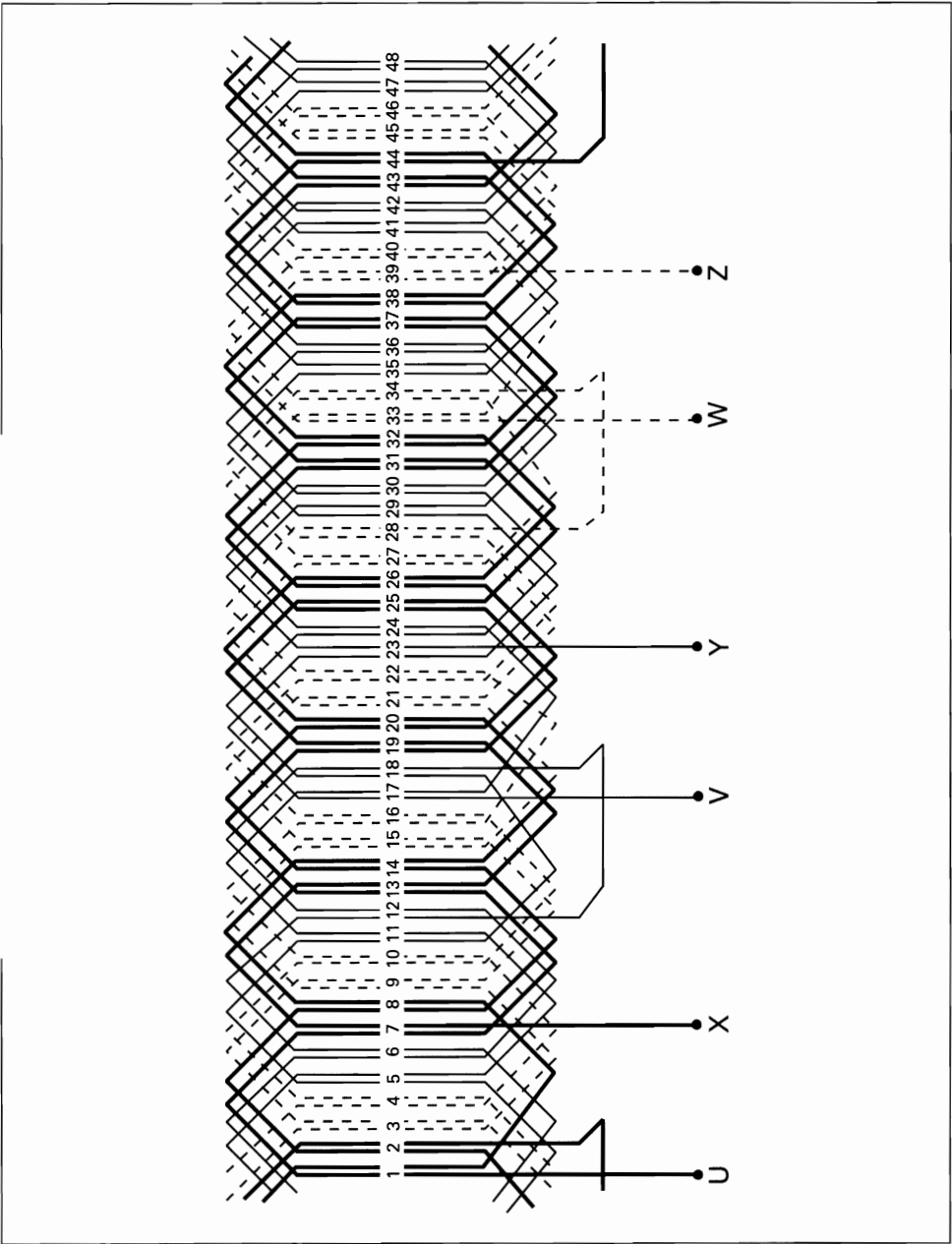
$$U_g = B / (2p \cdot q) = 2 ; Y = K / p = 12 ; Y_k = Y_1 = K / 2p = 6 ; Y_2 = Y - Y_k = 6 ; Y_q = K / 3p = 4$$



Esquema c.a. 13.45. Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 30 ; 2p = 10 ; B = K ; q = 3$$

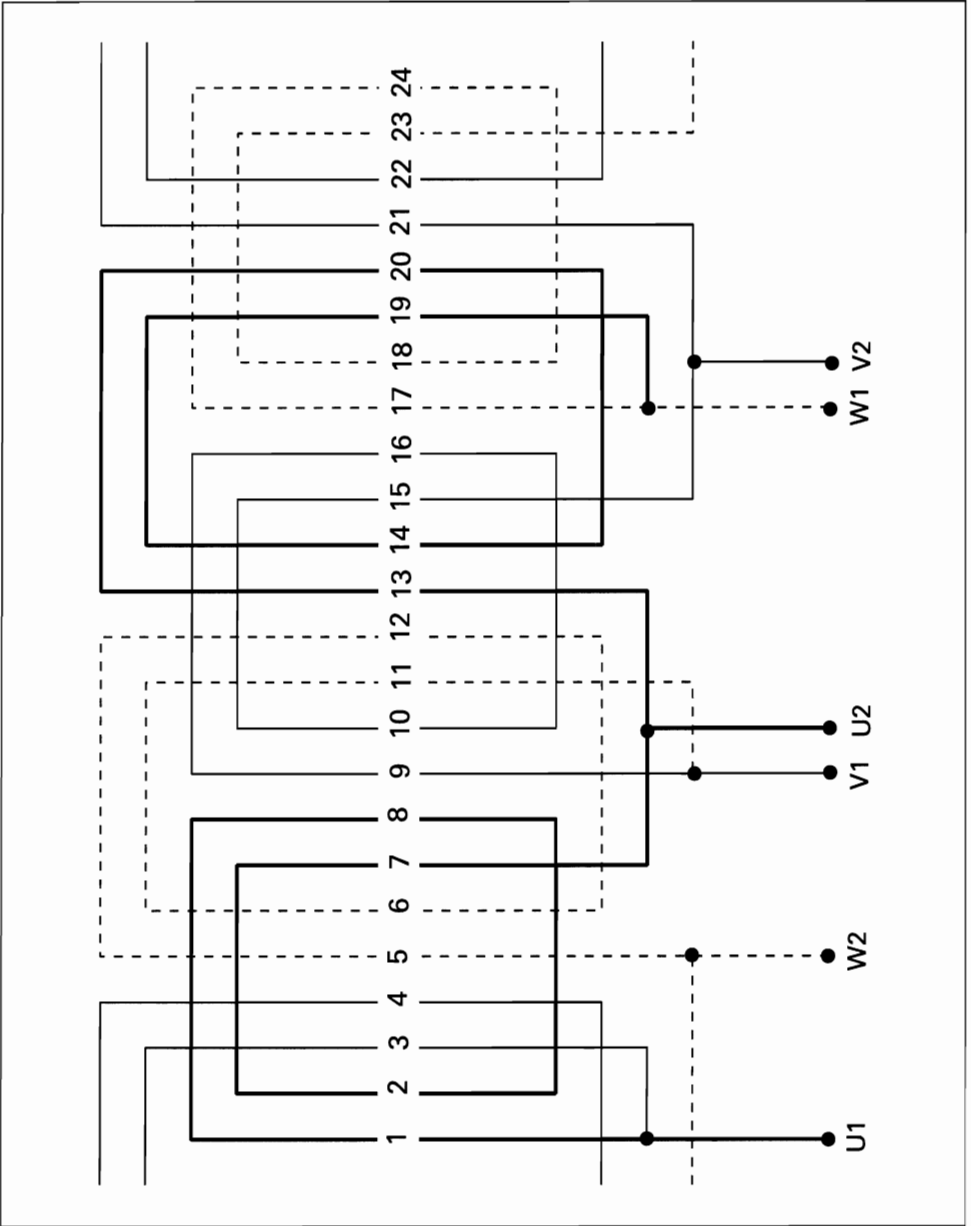
$$U_g = B / (2p \cdot q) = 1 ; Y = K / p = 6 ; Y_k = Y_1 = K / 2p = 3 ; Y_2 = Y - Y_k = 3 ; Y_q = K / 3p = 2$$



Esquema c.a. 13.46. Devanado ondulado entero, ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 48 ; 2p = 8 ; B = K ; q = 3$$

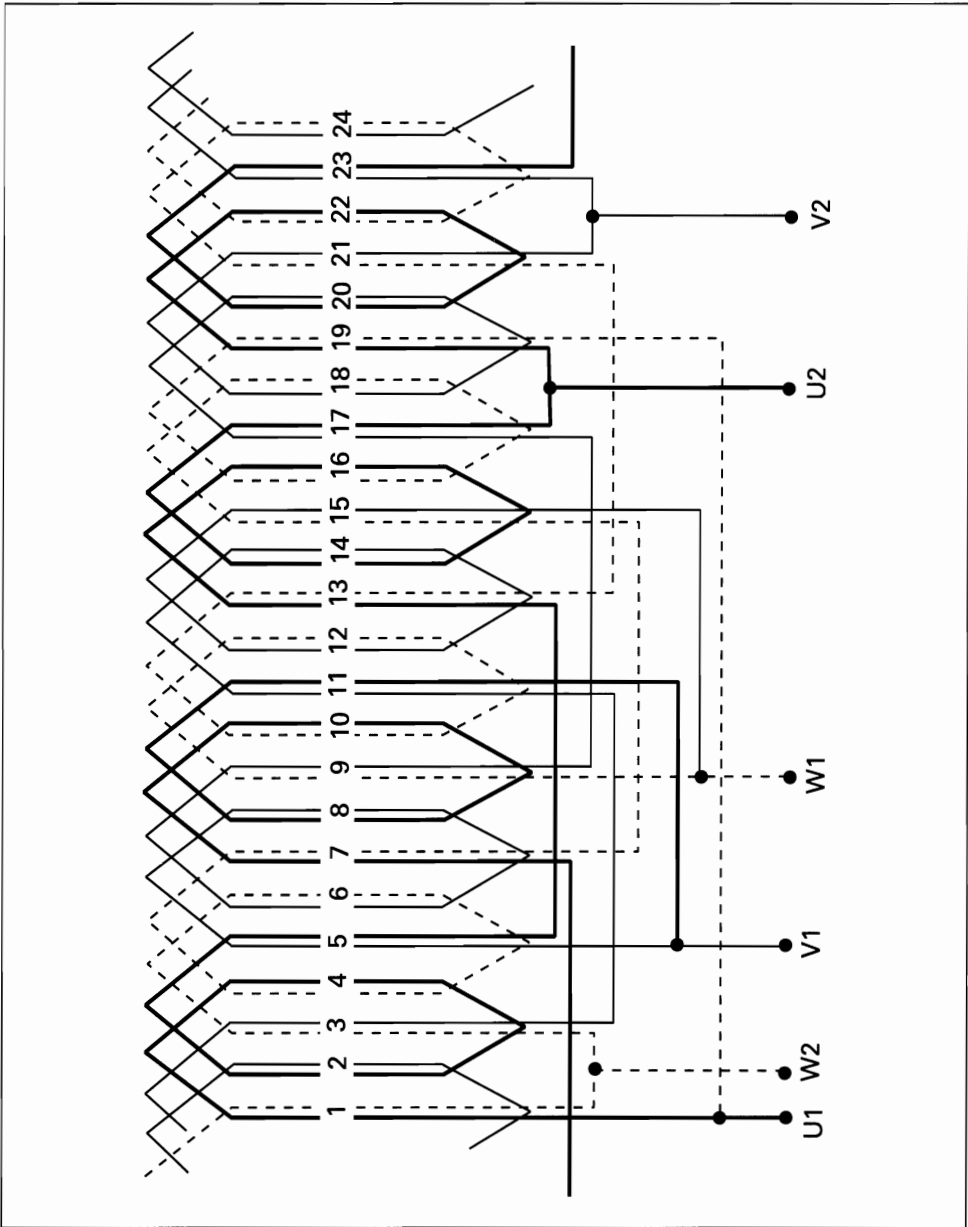
$$U_g = B / (2p \cdot q) = 2 ; Y = K / p = 12 ; Y_k = Y_1 = K / 2p = 6 ; Y_2 = Y - Y_k = 6 ; Y_q = K / 3p = 4$$



**Esquema c.a. 13.47.** Devanado concéntrico en conexión Dahlander (dos velocidades) ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 24 ; 2p = 2 / 4 ; B = K / 2 ; q = 3$$

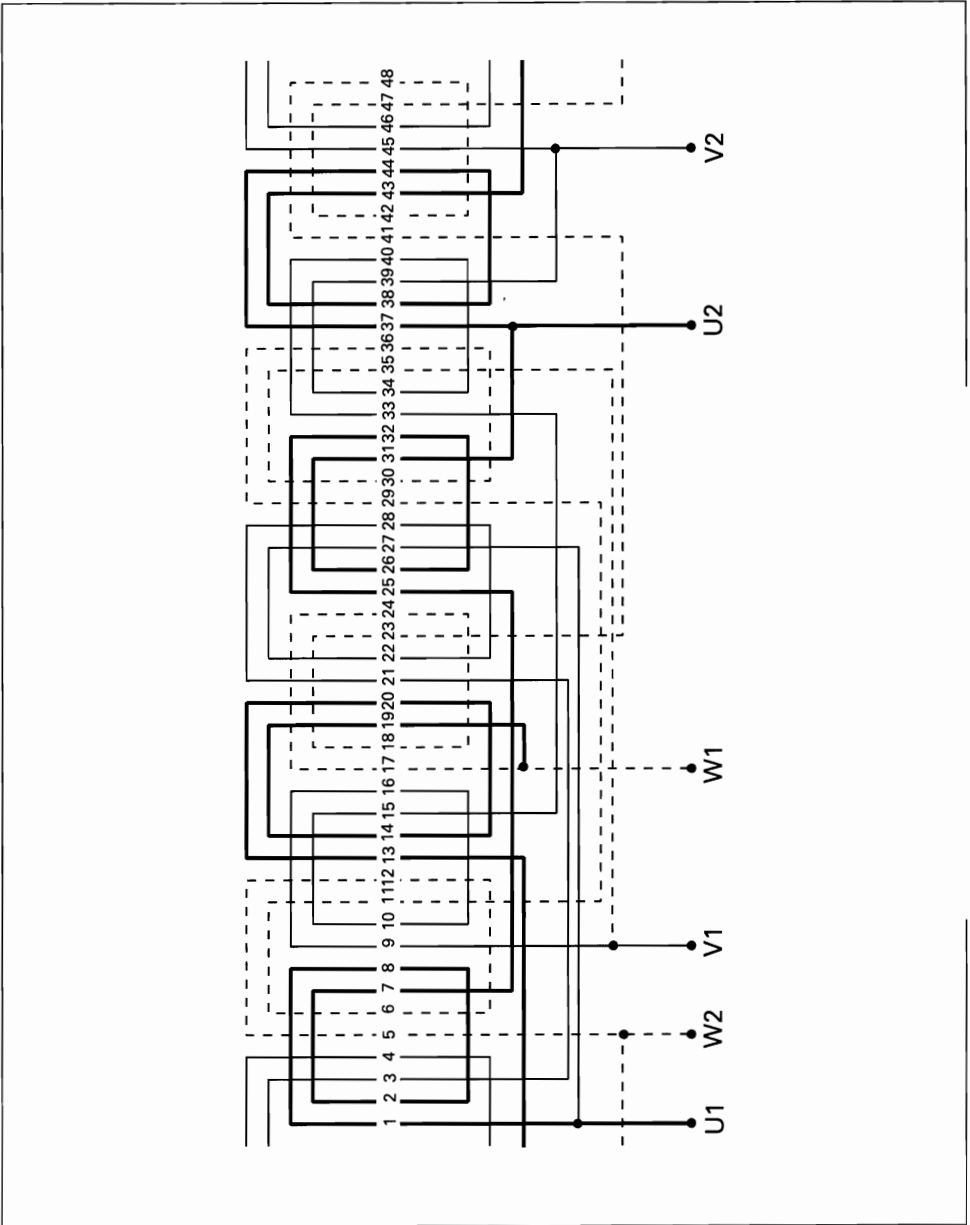
$$G = 2p \cdot q = 6 ; U_g = K / 2P \cdot q = 2 ; m = (q - 1) U_g = 4 ; Y_q = K / 3p = 8$$



**Esquema c.a. 13.48.** Devanado imbricado en conexión Dahlander (dos velocidades) ejecutado por polos y a doble capa

$$K = 24 ; 2p = 4 / 8 ; B = K ; q = 3$$

$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = K / 2p \cdot q = 2 ; Y_k = K / 2P = 3 ; Y_q = K / 3p = 4$$



Esquema c.a. 13.49. Devanado imbricado en conexión Dahlander (dos velocidades), ejecutado por polos consecuentes y a una capa

$$K = 48 ; 2p = 4 / 8 ; B = K / 2 ; q = 3$$

$$G = 2p \cdot q = 12 ; U_g = K / (2P \cdot q) = 2 ; m = (q - 1) U_g = 4 ; Y_q = K / 3p = 8$$