



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA**



PROBLEMAS RESUELTOS **DE DEVANADOS DE** **CORRIENTE ALTERNA**

Miguel Ángel Rodríguez Pozueta

Doctor Ingeniero Industrial

Este documento está diseñado para que se obtenga un texto impreso bien organizado si decide ahorrar papel imprimiéndolo a tamaño reducido, de forma que se incluyan dos páginas por cada hoja de papel A4 apaisado.

© 2018, Miguel Angel Rodríguez Pozueta
Universidad de Cantabria (España)
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Está permitida la reproducción total o parcial de este documento bajo la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Unported que incluye, entre otras, la condición inexcusable de citar su autoría (Miguel Angel Rodríguez Pozueta - Universidad de Cantabria) y su carácter gratuito.

Puede encontrar más documentación gratuita en la página web del autor:
<http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Asignatura: DISEÑO Y CÁLCULO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS

PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE C.A.

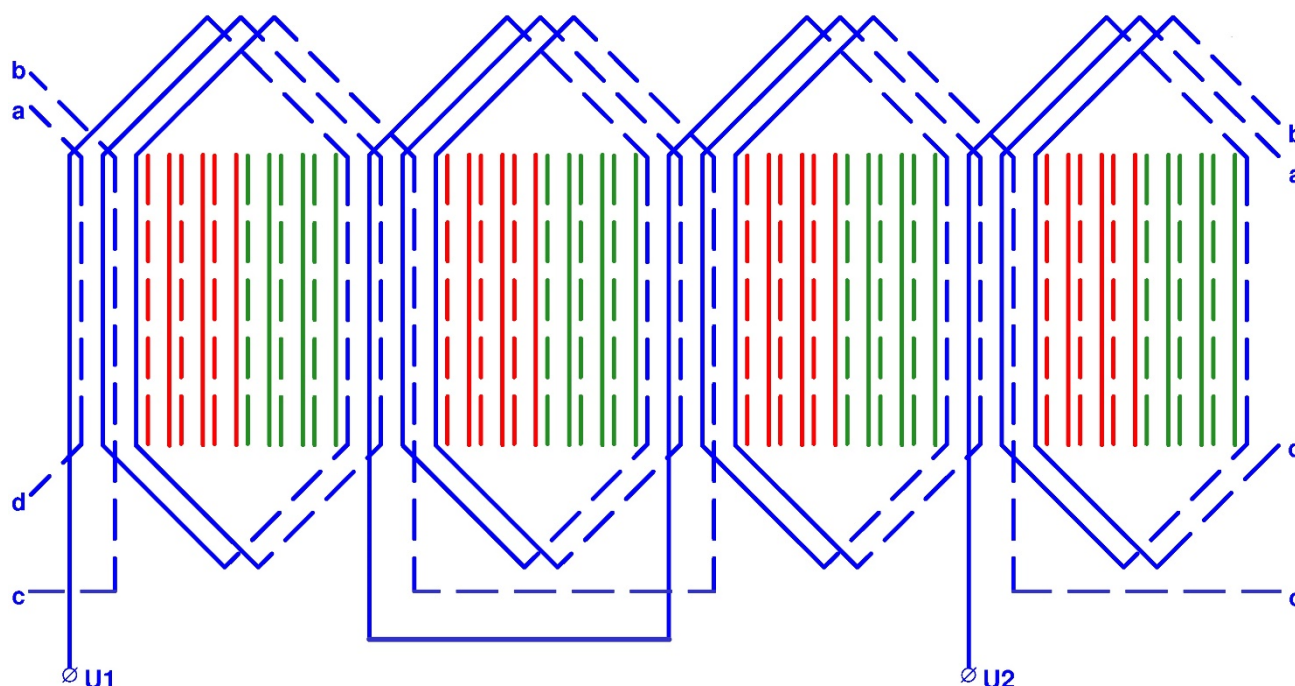
Miguel Angel Rodríguez Pozueta

ENUNCIADOS

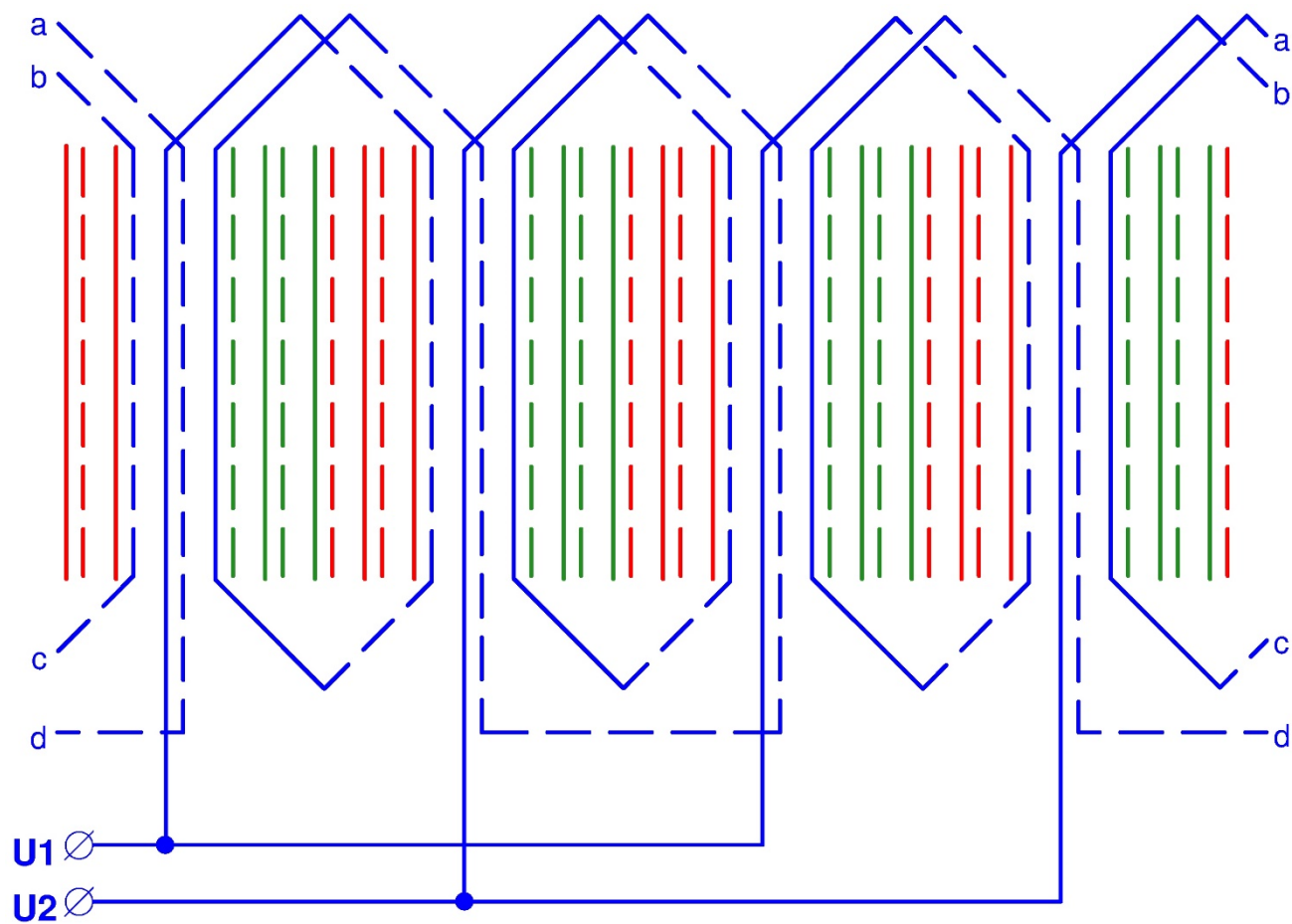
En las figuras siguientes se muestran los esquemas rectangulares de varios devanados de inducido. En el caso de bobinados trifásicos solo se dibuja el esquema de una de las fases.

En cada devanado obtenga las siguientes magnitudes:

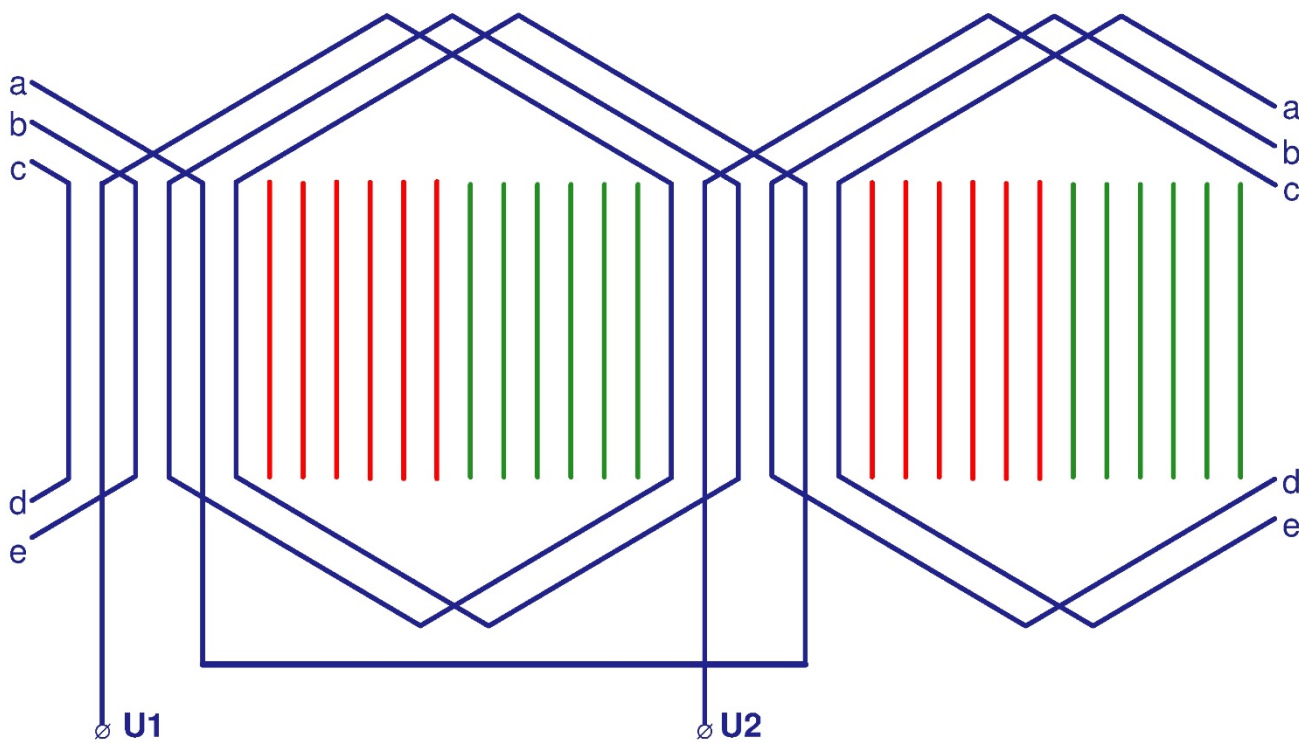
- Número de fases, m .
- Número de capas.
- Número de ranuras, K .
- Número de ramas en paralelo, a' .
- Número de polos, $2p$.
- Número de grupos polares por fase, G_f .
- Tipo de bobinado: concéntrico, imbricado u ondulado.
- Forma de conexión: por polos o por polos consecuentes.
- Número de ranuras por polo y fase, q .
- Paso polar medido en número de ranuras, y_p .
- Paso de bobina medido en número de ranuras, y_1 (en devanados concéntricos se trata del paso medio de bobina).
- Número total de grupos polares, G .
- Número total de bobinas, B .
- Número de bobinas de un grupo polar, b_g .



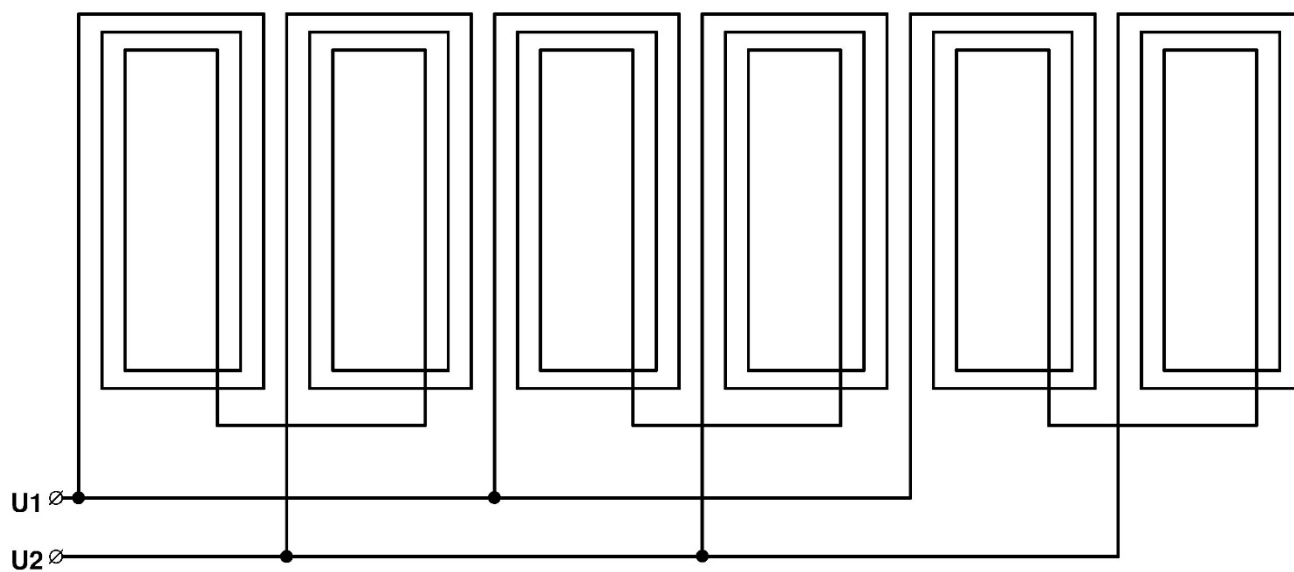
Devanado 1: Trifásico



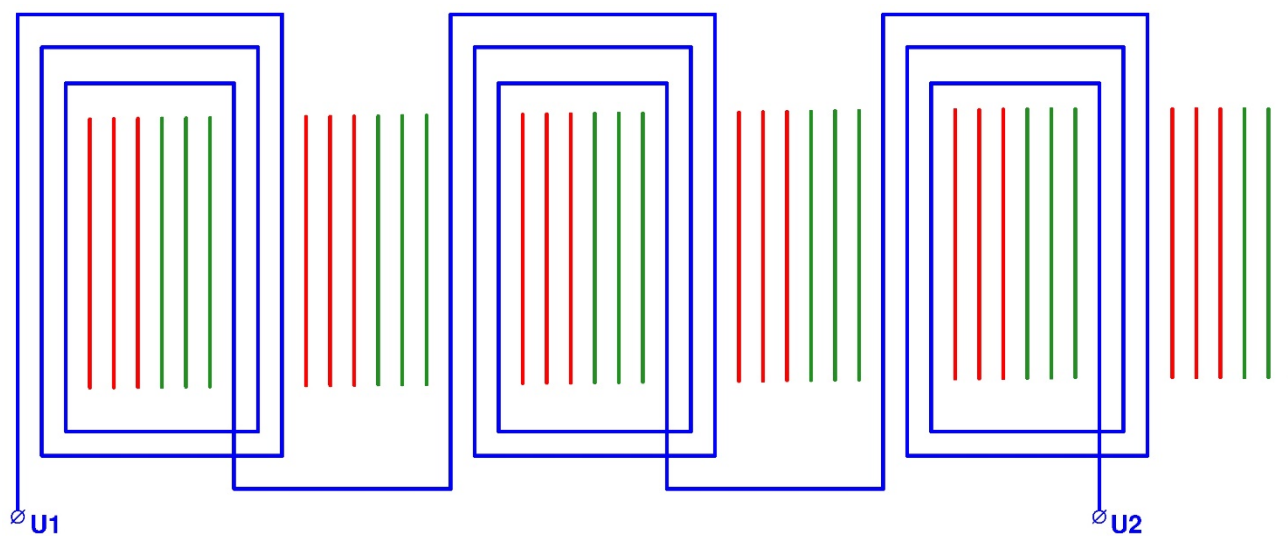
Devanado 2: Trifásico



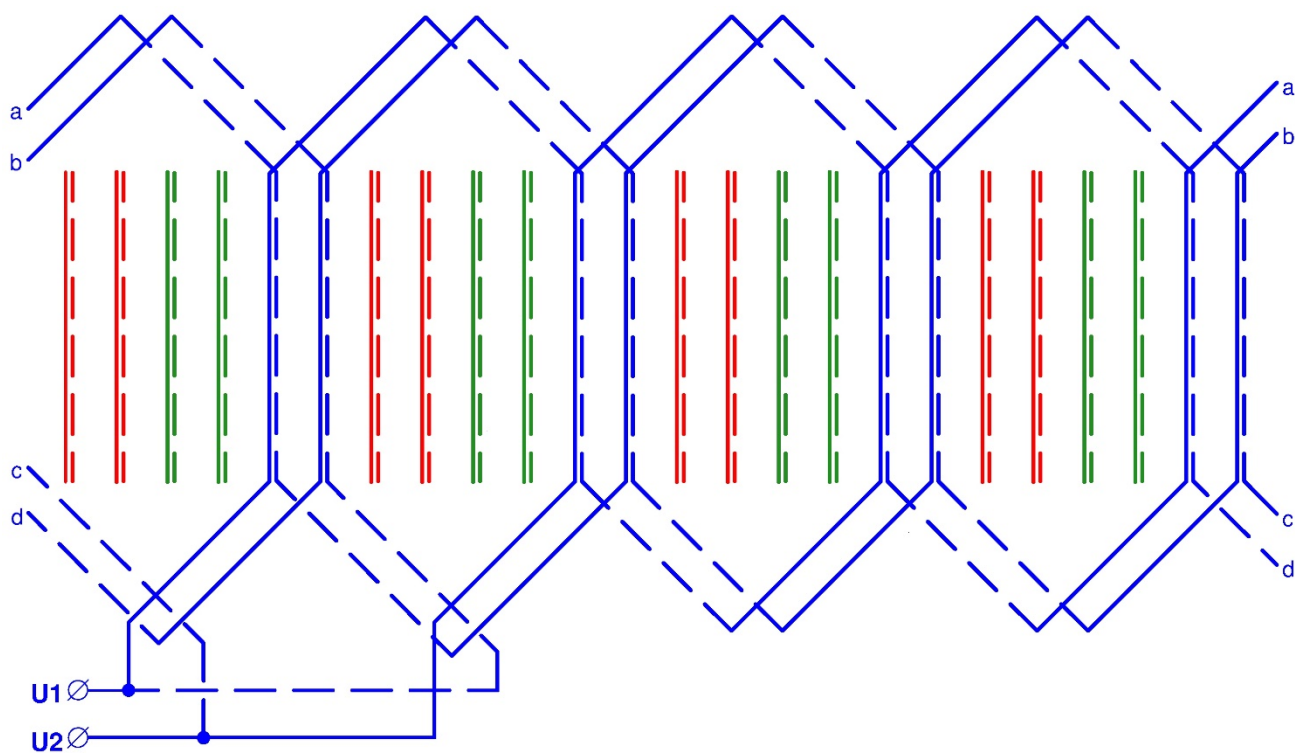
Devanado 3: Trifásico



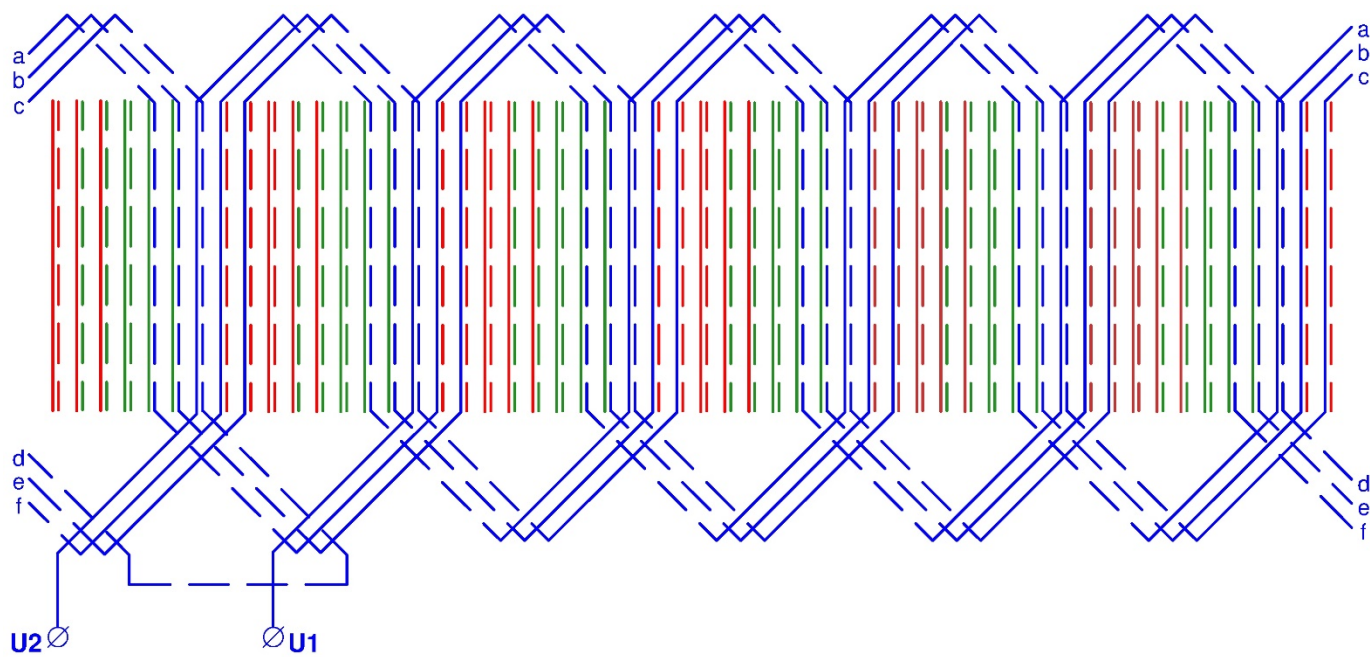
Devanado 4: Monofásico.
Las ranuras ocupan 2/3 de la circunferencia del inducido



Devanado 5: Trifásico



Devanado 6: Trifásico



Devanado 7: Trifásico

Tabla I

<u>DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA</u>	
(Esta tabla se proporciona a los alumnos en todos los exámenes)	
<p>a' Número de ramas en paralelo de una fase</p> <p>B Número total de bobinas simples</p> <p>b Número de bobinas simples de una fase por par de polos</p> <p>b_G Número de bobinas simples de un grupo polar</p> <p>G Número total de grupos polares</p> <p>G_f Número de grupos polares de una fase</p> <p>I Corriente total absorbida por una fase</p> <p>I_r Corriente que circula por cada una de las ramas en paralelo de una fase</p> <p>K Número total de ranuras</p> <p>m Número de fases</p> <p>N_r Número de espiras de una bobina simple</p> <p>N_f Número de espiras totales de una fase</p> <p>N Número de espiras efectivas en serie de una fase = Número de espiras de cada rama en paralelo de una fase</p> <p>p Número de pares de polos</p> <p>Q Número de ranuras por polo</p> <p>q Número de ranuras por polo y fase</p> <p>Z_f Número de conductores totales de una fase (Z_f = 2 N_f)</p> <p>Z Número de conductores efectivos en serie de una fase (Z = 2 N)</p>	<p> $Q = m \cdot q$ $K = 2 \cdot p \cdot Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q$ $N_f = a' \cdot N$ $I = a' \cdot I_r$ $N = \frac{p}{a'} \cdot b \cdot N_r$ $N_f = p \cdot b \cdot N_r$ $B = m \cdot p \cdot b$ $B = G \cdot b_G$ $b \cdot N_r \cdot I_r = \left(\frac{N \cdot a'}{p} \right) \cdot \left(\frac{I}{a'} \right) = \frac{N I}{p}$ $G = m \cdot G_f$ </p> <p>En devanados de una capa (como cada bobina ocupa dos ranuras):</p> $\boxed{K = 2 B} \rightarrow$ $\rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 (m \cdot p \cdot b) \rightarrow$ $\rightarrow \boxed{q = b}$ <p>En devanados de dos capas (con un lado de bobina por capa):</p> $\boxed{K = B} \rightarrow$ $\rightarrow 2 \cdot p \cdot m \cdot q = m \cdot p \cdot b \rightarrow$ $\rightarrow \boxed{2 q = b}$ <p>En devanados por polos:</p> $\boxed{G_f = 2 p}$ <p>En devanados por polos consecuentes:</p> $\boxed{G_f = p}$

REPASO DE LOS FUNDAMENTOS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- En este texto se emplea la **representación rectangular** de devanados (que también se designarán como “arrollamientos” o “bobinados”).

En esta representación se supone que la máquina ha sufrido un corte longitudinal y se la ha estirado. A continuación, se dibuja el bobinado viéndolo desde el entrehierro en esta máquina estirada.

En los esquemas de bobinado (ver las figuras de los enunciados) se muestran las **bobinas** (no las espiras). Las líneas verticales representan los **lados de bobina**, que se ubican dentro de las ranuras. En la parte superior se dibujan las **cabezas de bobina**, que unen los dos lados de la misma bobina. En la parte inferior se dibujan las conexiones entre bobinas y de estas con el exterior.

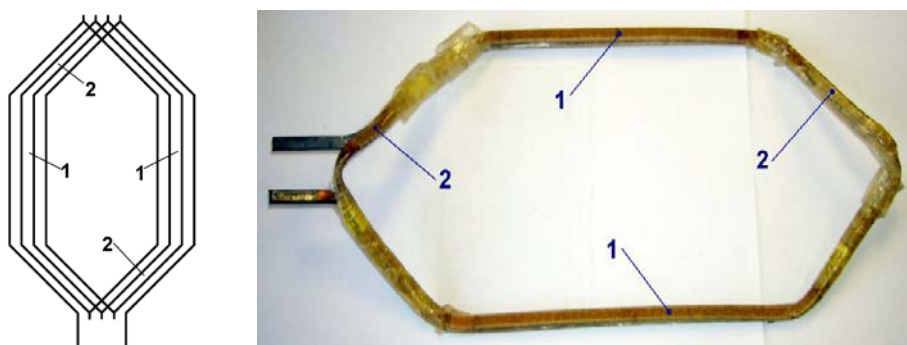


Fig. 1: Bobinas. 1: Lados o haces activos; 2: Cabezas de bobina.

Como se supone que la máquina está estirada, el esquema el devanado se dibuja sobre un plano. Pero en realidad la máquina tiene una forma cilíndrica y la ranura siguiente a la situada en el extremo derecho del esquema es la representada en el extremo izquierdo.

- Los devanados de corriente alterna pueden ser de **una capa** (en cada ranura solo hay un lado de bobina) o de **dos capas** (en cada ranura hay dos lados de bobina, uno colocado encima del otro). En este último caso en cada ranura se dibujan dos líneas verticales muy juntas (representan los dos lados de bobina ubicados en la ranura), una de trazo continuo (para el lado más cercano al entrehierro) y la otra de trazo discontinuo (para el lado más alejado del entrehierro).

En general, cuando haya un cruce en las conexiones se dibuja de trazo continuo lo más cercano al entrehierro y de trazo discontinuo lo más alejado.

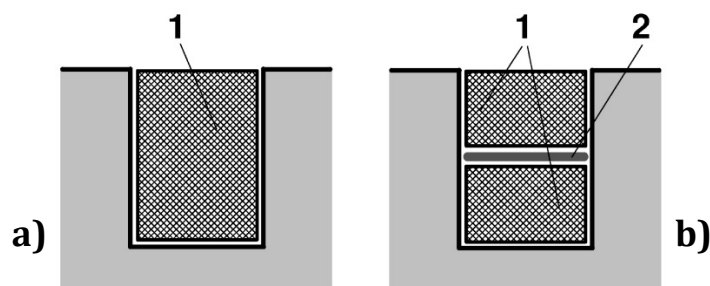


Fig. 2: Ranuras con devanados de corriente alterna: **a)** de una capa; **b)** de dos capas
(1: Lado de bobina, 2: Aislamiento entre capas):

PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- Se llama **paso polar y_p** a la distancia entre dos polos consecutivos y **paso de bobina y_1** a la distancia entre los dos lados de una bobina.

Estas distancias se miden en número de ranuras. La forma más sencilla de contar estas distancias es incluir en la cuenta las dos ranuras extremas, la primera y la última (ambas inclusive), y luego restar una. Así, en el devanado 1 el paso de bobina vale $y_1 = 8$ ranuras.

Si el paso de bobina y_1 es igual al paso polar y_p ($y_1 = y_p$) la bobina es de *paso diametral*, si es inferior ($y_1 < y_p$) es de *paso acortado* y si es superior ($y_1 > y_p$) es de *paso alargado*.

- En un cuerpo que está dentro de una zona del espacio donde existe un campo magnético se llama **polo magnético** a una zona del cuerpo donde salen líneas de campo al exterior (**polo norte**) o por donde le entran líneas de campo magnético desde el exterior (**polo sur**).

Así en la Fig. 3 se muestra una bobina de tipo solenoide sometida al campo magnético que genera ella misma cuando es recorrida por una corriente i (el sentido de la inducción magnética \vec{B} se deduce de la regla del sacacorchos que avanza girando con el mismo sentido que la corriente i). Se aprecia que según se mire la bobina por su lado sur o por su lado norte, la corriente se la ve circular en sentido horario o antihorario, respectivamente (Figs. 3 y 4). Luego se puede aplicar una regla nemotécnica observando que los extremos de las letras S y N indican el sentido de la corriente i . O, viceversa, el polo magnético que se está viendo es el que corresponde a la letra S o N cuyos extremos coinciden con el sentido en el que se ve girar a la corriente i (Fig. 4).

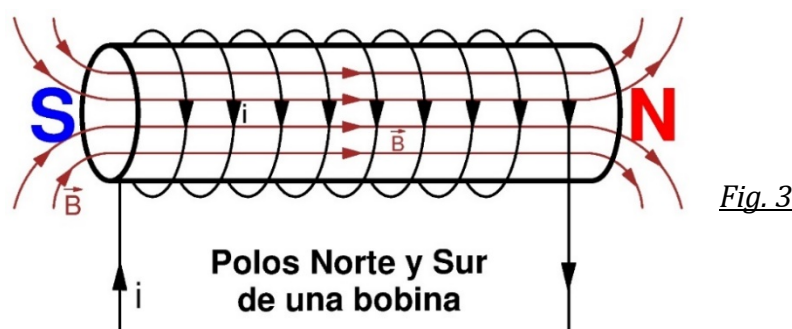


Fig. 3

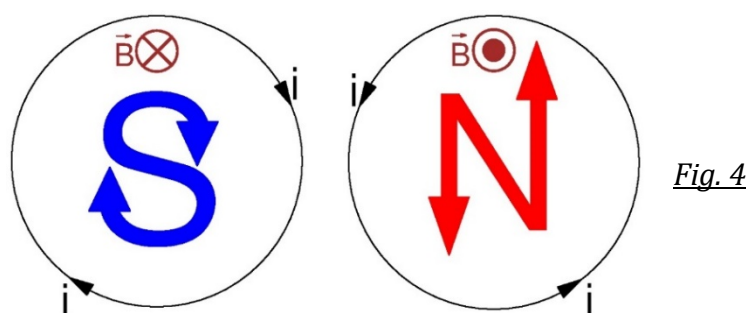


Fig. 4

- Los devanados que se van a analizar serán *monofásicos* o *trifásicos*. En este último caso el devanado consta de tres **fases** idénticas separadas entre sí una distancia equivalente a 120° eléctricos.

En el caso devanados trifásicos usualmente solo se dibujará una fase, ya que así el esquema es más sencillo y permite apreciar más claramente las características del bobinado.

PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- En un devanado de corriente alterna las bobinas de una fase se conectan formando **grupos polares**. Un grupo polar lo constituyen varias bobinas de una fase conectadas en serie y colocadas en ranuras contiguas. Cuando estas bobinas están recorridas por corriente se suman sus efectos para crear el mismo polo magnético.

Este texto solo se va referir a devanados **enteros**, que son aquellos en los que todos los grupos polares son iguales.

Una fase se forma conectando todos sus grupos polares entre sí, bien en serie o bien formando a' ramas en paralelo.

En los devanados **por polos** cada grupo polar solo origina un polo (luego, en cada fase hay tantos grupos polares como polos: $G_f = 2p$). En este caso el bobinado se forma conectando el final de un grupo polar con el final del siguiente o el principio de un grupo polar con el principio del siguiente ("*final con final y principio con principio*"), como se muestra en la Fig. 5. Entre dos polos consecutivos están los lados de bobina de dos grupos polares (Fig. 5); luego, en estos bobinados el número de lados de bobina de una fase entre dos polos consecutivos es siempre un número par.

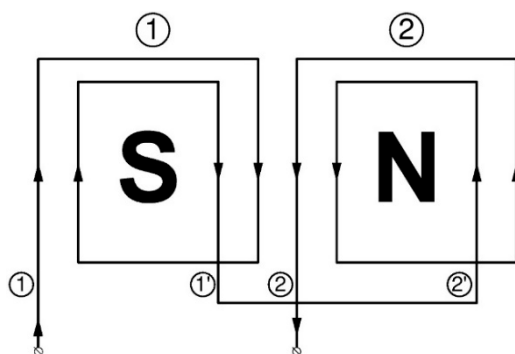


Fig. 5:
Bobinado por polos con 2 grupos polares de $b_G = 2$ bobinas cada uno y $2p = 2$ polos
(Se ha indicado dentro de circunferencias la designación de los grupos polares y de sus extremos)

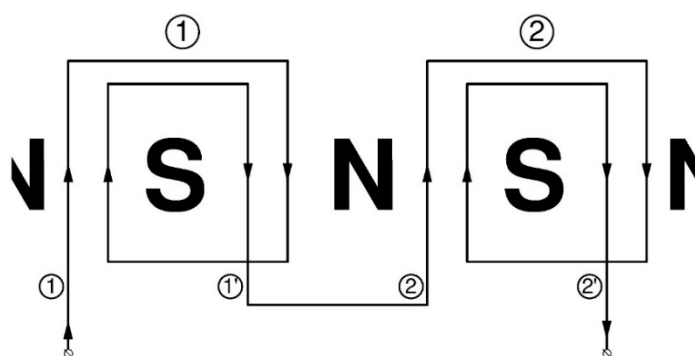


Fig. 6:
Bobinado por polos consecuentes con 2 grupos polares de $b_G = 2$ bobinas cada uno y $2p = 4$ polos
(Las dos medias "N" de los extremos representan las dos mitades del mismo polo norte)

En los devanados por **polos consecuentes** (Fig. 6) cada grupo polar origina dos polos (el polo interior al grupo y las dos mitades de los polos a cada lado del grupo polar; estos polos laterales los genera conjuntamente con los grupos polares que tiene a cada lado); luego en cada fase hay tantos grupos polares como pares de polos: $G_f = p$.

En los bobinados por polos consecuentes la conexión entre los grupos polares se efectúa uniendo "*final con principio y principio con final*". En la Fig. 6 se muestra un devanado de este tipo y en ella se han puesto dos medias "N" en los extremos para indicar que se trata del mismo polo norte (dada la forma cilíndrica del inducido).

PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- Según como son las bobinas y como se conectan entre sí para formar grupos polares se tienen tres tipos de devanados de corriente alterna: concéntricos, imbricados y ondulados.

* Los devanados **concéntricos** tienen bobinas de distinto tamaño que se van situando sucesivamente unas dentro de las otras (ver los devanados 4 y 5 y las Figs. 5 y 6).

Estos bobinados son siempre de una capa. Cuando son trifásicos y de más de 2 polos se bobinan por polos consecuentes. En los demás casos se bobinan por polos.

En el caso de que el devanado concéntrico sea por polos consecuentes, sucede que la media de los pasos de las bobinas de un grupo polar es siempre igual a un paso polar.

Si un grupo polar tiene un número de bobinas impar, la media de los pasos de todas las bobinas del grupo es igual al paso de la bobina central. Si el número de bobinas de un grupo polar es par, la media de los pasos de todas las bobinas del grupo es igual a la media de los pasos de las dos bobinas centrales.

* Los devanados **imbricados** tienen todas las bobinas de igual paso (ver los devanados 1, 2 y 3). En estos bobinados hay que retroceder para conectar el final de una bobina con el principio de la siguiente de su mismo grupo polar.

Los devanados imbricados pueden ser de una o de dos capas y siempre son por polos.

* Los devanados **ondulados** tienen todas sus bobinas de igual paso (ver los devanados 6 y 7). En este caso el final de una bobina se conecta, avanzando, al principio de la bobina correspondiente del próximo par de polos. Así, si se empieza por la primera bobina del grupo polar **1**, esta se conecta con la primera bobina del grupo polar **3** y así se van conectando las primeras bobinas de los grupos polares impares. Al acabar de dar la primera vuelta al inducido y haber conectado todas las primeras bobinas, se empieza una segunda vuelta conectando las segundas bobinas de los grupos polares impares. En la siguiente vuelta se conectan las terceras bobinas y así sucesivamente, hasta completar todos los grupos polares impares. De forma análoga empezando, por ejemplo, con la primera bobina del grupo polar **2**, se devanan los grupos polares pares.

Al final, pues, se tienen dos semifases: una la de los grupos polares impares y la otra la de los grupos polares pares.

La fase se forma conectando las dos semifases en paralelo (entonces $a' = 2$ ramas en paralelo) o en serie (entonces $a' = 1$ rama en paralelo). En este último caso el conductor que une en serie las dos semifases se denomina *punto de retorno*. Por lo tanto, en estos bobinados solo hay dos posibles valores de a' , 1 o 2 ramas en paralelo; independientemente del número de grupos polares que tenga el bobinado.

Estos devanados siempre son de dos capas y se bobinan por polos.

PROBLEMAS RESUELTOS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

- En la práctica *solo se conectan por polos consecuentes los devanados concéntricos trifásicos y de más de dos polos*. Todos los demás tipos de bobinado se conectan por polos.
- Como ya se ha indicado anteriormente, los devanados por polos deben tener un número par de lados de bobina por fase entre dos polos magnéticos consecutivos (Fig. 5). Si el bobinado, además, es de una capa (y, por lo tanto, en cada ranura solo se ubica un lado de bobina), el número de ranuras de una fase situadas entre dos polos debe ser un número par. Es decir, *en bobinados por polos de una capa el número de ranuras por polo y fase, q , es siempre un número par*.

Como consecuencia de los anterior y teniendo en cuenta que la relación (2) (que se deduce más adelante) muestra que el paso polar se obtiene multiplicando q por el número de fases, m ; se obtiene que *en bobinados por polos de una capa el paso polar, y_p , también es siempre un número par*.

- Los devanados imbricados de una capa se ejecutan colocando en las ranuras alternativamente un lado izquierdo de una bobina y un lado derecho de otra bobina. Es decir, todas las ranuras impares alojan lados izquierdos de bobina y todas las ranuras pares alojan lados derechos de bobina, o a la inversa (ver el devanado 3).

Como una bobina consta de un lado izquierdo y de un lado derecho, sucede que uno de los dos lados de una bobina está en una ranura impar y el otro en una ranura par. De esto se deduce que *los devanados imbricados de una capa tienen siempre un paso de bobina, y_1 , impar*.

Los bobinados imbricados siempre son por polos. En consecuencia, los devanados imbricados de una capa, según se ha indicado en el párrafo anterior, tienen un paso polar y_p par. Por lo tanto, se deduce que en estos devanados los pasos polar, y_p (que es par) y de bobina, y_1 (que es impar), nunca podrán ser iguales (sus bobinas no pueden ser diametrales) y lo habitual es que el paso de bobina sea acortado. *Los bobinados imbricados de una capa tienen siempre un acortamiento ($y_p - y_1$) no nulo y este acortamiento es impar*.

- Ya se ha indicado antes en este texto que *los bobinados concéntricos por polos consecuentes tienen siempre un paso medio de bobina (valor medio de los pasos de bobina de todas las bobinas de un grupo polar), y_1 , exactamente igual al paso polar, y_p* .

PROCEDIMIENTO DE RESOLUCIÓN DE LOS PROBLEMAS DE DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

1. Se empieza identificando el *número de fases, m*, del devanado. Normalmente este será un dato del enunciado; pero, si no es así, es fácil obtener esta información.

En los devanados trifásicos (por ejemplo, el devanado 1) los esquemas de bobinado que se van a utilizar solo van a mostrar una de las tres fases. Por lo tanto, en el esquema se verá dibujado un bobinado que únicamente utiliza un tercio de todas las ranuras. De las otras fases solamente se mostrarán sus ranuras sin el resto del bobinado. Además, es habitual distinguir las fases de estos arrollamientos usando diferentes colores (o diferentes tipos de trazo), lo cual ayuda a deducir que se trata de un bobinado trifásico.

En los devanados monofásicos (por ejemplo, el devanado 4) es fácil ver que solamente hay una fase, pues el bobinado ocupa todas las ranuras (salvo las ranuras que están vacías, si es que las hay) y solo tiene dos extremos: el principio y el final de la fase. En estos bobinados es frecuente el no ranurar toda la circunferencia del inducido, sino que el centro de los polos se deja sin ranuras (o, lo que es equivalente, se dejan ranuras vacías). Esto se hace así porque las bobinas que se colocaran en el centro de un polo apenas producirían efecto alguno. Por esto, es habitual que para estos bobinados el enunciado diga que únicamente se ranura una fracción del inducido.

2. Lo siguiente es ver el *número de capas* que tiene el bobinado.

Se observan las ranuras y si en cada una de ellas hay dibujada una única línea vertical de trazo continuo, es que se trata de un devanado de una capa (por ejemplo, el devanado 5). Si en cada ranura hay dibujadas dos líneas verticales próximas entre sí, una de trazo continuo y otra de trazo discontinuo, se trata de un devanado de dos capas (ver el devanado 1).

3. Lo que sigue es contar el *número total de ranuras, K*, del bobinado.

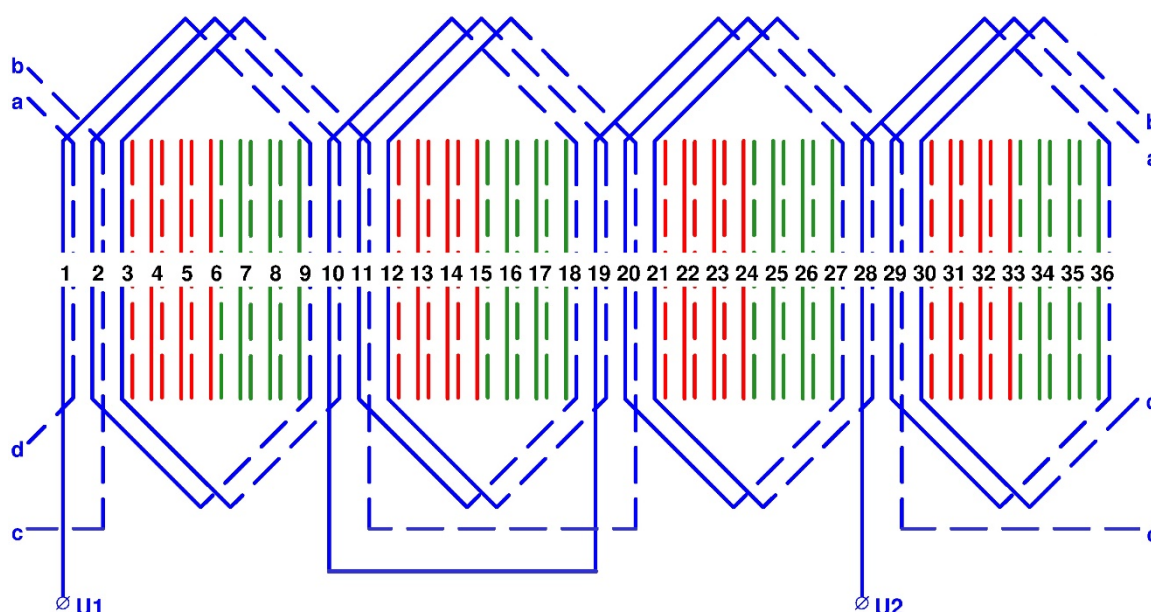


Fig. 5: Devanado 1 incluyendo la numeración de las ranuras

Para ello, si el esquema no lo tiene ya indicado, se numeran una tras otra las ranuras del bobinado. Así, por ejemplo, para el devanado 1 se colocaría la numeración mostrada en la Fig. 5, lo cual permitiría saber que en este bobinado el número total de ranuras vale $K = 36$ ranuras.

4. Aunque no es imprescindible, lo que conviene hacer a continuación, es suponer que la corriente entra a la fase por uno de sus extremos y sale por el otro y dibujar en las ranuras una flecha mostrando el sentido que tendría la corriente en este caso.

Observando como queda el recorrido de esta corriente se aprecia el *número de ramas en paralelo* a' que tiene el bobinado. Así, el devanado 1 tiene una rama en paralelo ($a' = 1$ rama) y el devanado 2 tiene dos ramas en paralelo ($a' = 2$ ramas).

Además, aplicando la regla nemotécnica mostrada en la Fig. 4, también conviene indicar sobre el esquema los polos magnéticos que se originan.

Así, por ejemplo, en la Fig. 6 se comprueba que el devanado 1 tiene todas sus bobinas en serie (luego, $a' = 1$ rama en paralelo) y, también, que su número de polos es $2p = 4$ polos.

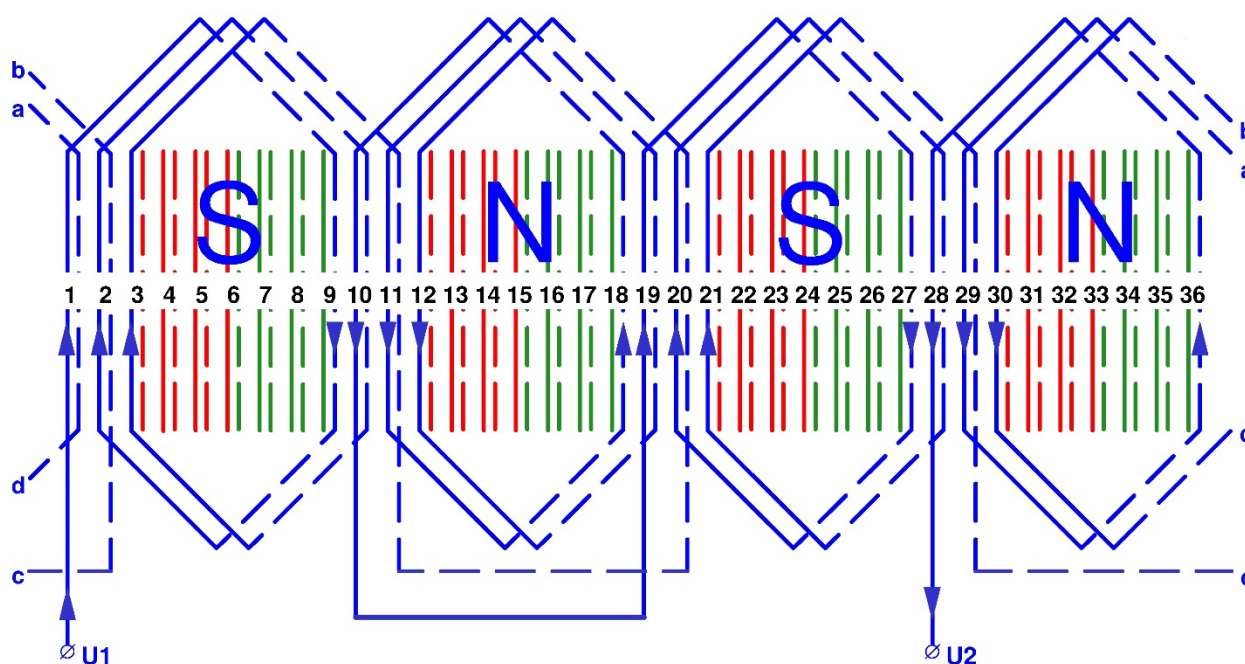


Fig. 6: Devanado 1. Se ha añadido a la Fig. 5 el sentido de las corrientes y los polos magnéticos que originan

5. Observando el esquema del devanado con los sentidos de la corriente en las ranuras ya dibujados (Fig. 6), es fácil apreciar el *número de grupos polares por fase*, G_f , que tiene la fase analizada y el *número de bobinas por grupo polar*, b_g , que hay en cada uno de ellos. Más adelante se volverá a obtener el valor de b_g por cálculo. Evidentemente, el valor calculado de b_g debe coincidir con el obtenido por observación del esquema. Esto sirve de comprobación de que no se han cometido errores.

Aunque no es imprescindible, es conveniente identificar los grupos polares. En este texto esto se hará mediante un número dentro de una circunferencia colocado en la parte superior de cada grupo polar. En la Fig. 7 se muestran los grupos polares de una fase del devanado 1.

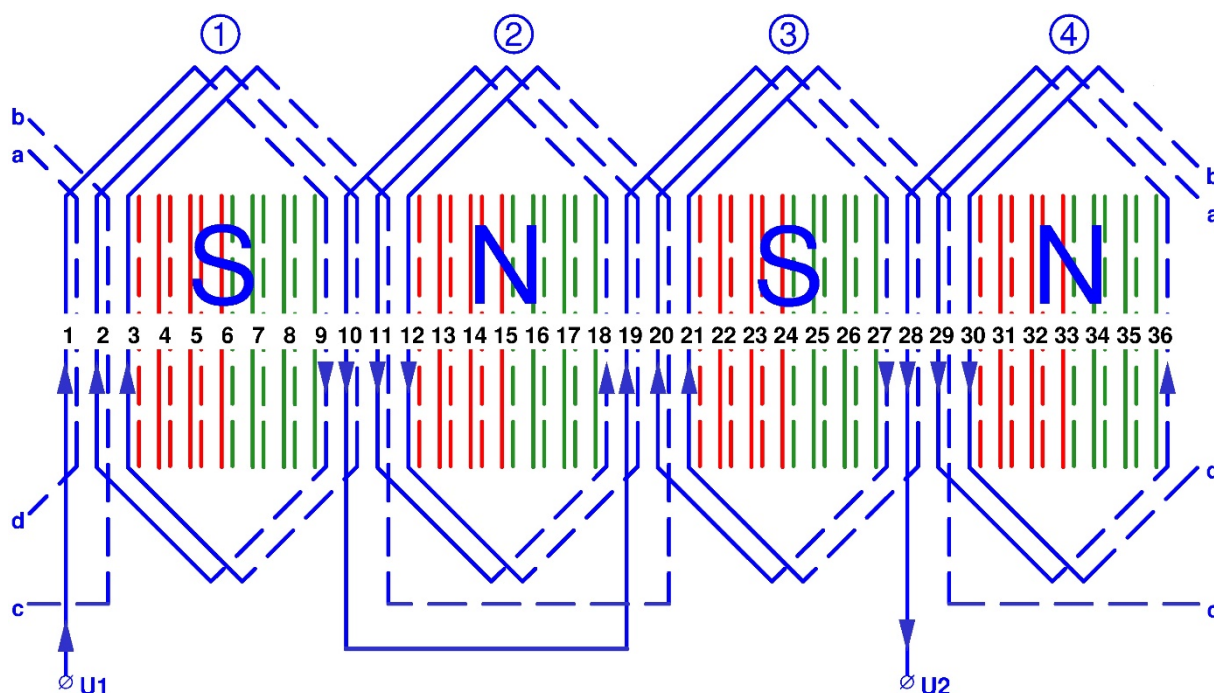


Fig. 7: Devanado 1. Se ha añadido a la Fig. 6 la identificación de los 4 grupos polares de la fase representada

6. Ahora se va a determinar el *tipo de devanado* que se trata observando como son y como se conectan las bobinas de un grupo polar.

Recuerde que en la parte superior del diagrama están las cabezas de bobina, es decir, los dos lados unidos por la misma cabeza dibujada en la parte superior pertenecen a la misma bobina. En la parte inferior están las uniones entre las bobinas de un mismo grupo polar, las conexiones entre grupos polares y las conexiones con el exterior.

Si las bobinas son de diferente ancho y se van colocando una dentro de las otras, se trata de un bobinado concéntrico. Este bobinado siempre es de 1 capa (ver los devanados 4 y 5).

Si las bobinas son todas de igual paso, puede tratarse de un devanado imbricado o de un devanado ondulado. Si es de una capa será imbricado y si es de dos capas puede ser de cualquiera de estos dos tipos.

La mejor forma para discernir si un bobinado de bobinas de igual paso es imbricado u ondulado es observar que si para conectar la primera bobina de la fase con la siguiente es preciso retroceder, entonces es imbricado, o es preciso avanzar hasta el siguiente par de polos, entonces el devanado es ondulado. El devanado ondulado siempre es de dos capas.

7. Para comprobar si el bobinado es *por polos* o *por polos consecuentes* se pueden seguir varios métodos.

Si el número de grupos polares por fase, G_f , es igual al número de polos, $2p$, el devanado es por polos y si G_f es igual al número de pares polos, p , el devanado es por polos consecuentes.

Recuerde que los bobinados imbricados y ondulados son siempre por polos. Los concéntricos, trifásicos y de más de dos polos son por polos consecuentes; el resto de los devanados concéntricos (no trifásicos y/o de dos polos) son por polos.

Otra forma es observar como se conecta un grupo polar con el siguiente. Si se conectan “*principio con principio y final con final*” es por polos (Fig. 5), mientras que si la conexión es “*principio con final y final con principio*” es por polos consecuentes (Fig. 6). En los bobinados concéntricos e imbricados esto se aprecia mejor si se marcan los principios y finales de los grupos polares (basta con marcar los extremos de los dos primeros grupos polares). Para ello en este texto se colocará un número dentro de una circunferencia en cada extremo de un grupo polar. En el extremo del principio el número es el mismo que el que identifica al grupo polar y en el extremo del final se coloca este mismo número añadiéndole un apóstrofo ‘ (así, en la Fig. 8 se aprecia que el devanado 1 es por polos).

Evidentemente, todos estos métodos deben dar el mismo resultado, lo que sirve de comprobación de que no se están cometiendo errores.

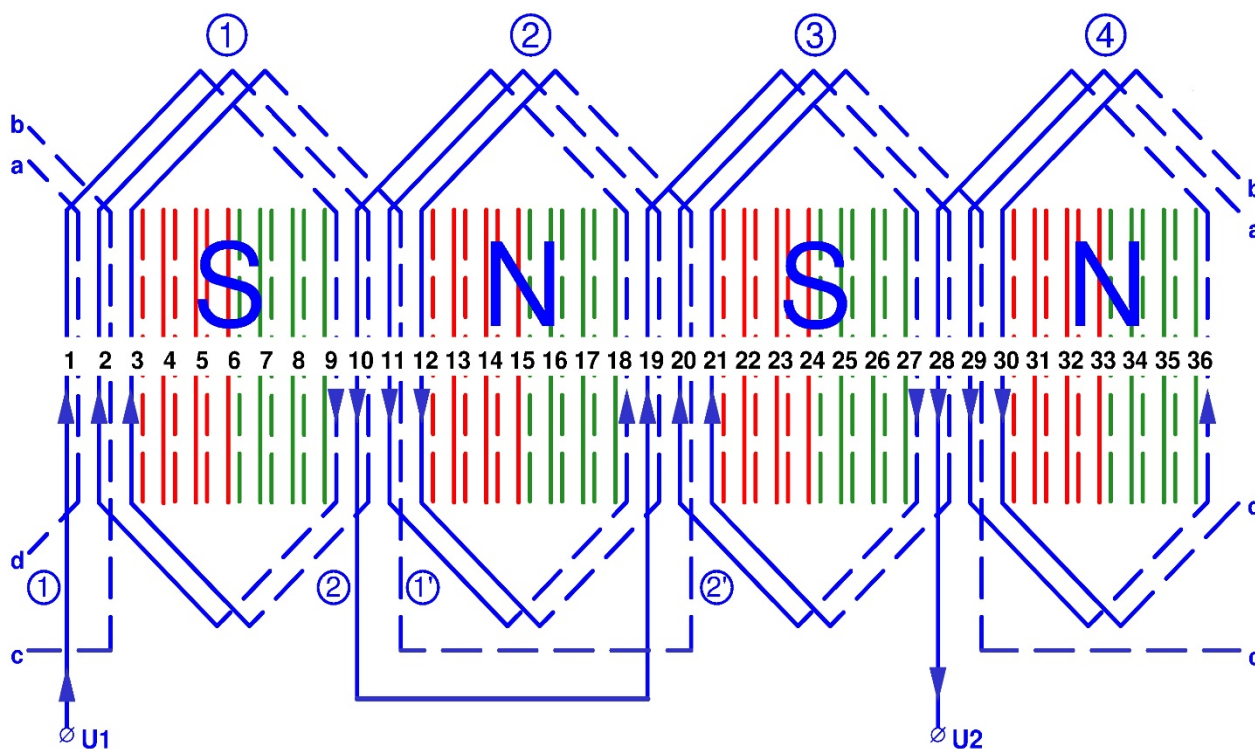


Fig. 8: Devanado 1. Se ha añadido a la Fig. 7 la identificación de los extremos de los dos primeros grupos polares de la fase representada

8. El *número de ranuras por polo y fase*, q , se calcula mediante esta relación que se deduce de las que aparecen en la tabla I:

$$q = \frac{K}{m(2p)} \quad (1)$$

El *paso polar medido en número de ranuras*, y_p , se calcula así:

$$y_p = \frac{K}{2p} = m \cdot q \quad (2)$$

9. El *paso de bobina medido en número de ranuras*, y_1 , es el número de ranuras que hay entre los dos lados de la misma bobina.

Una forma de obtener y_1 es contar las ranuras que hay entre los dos lados de una misma bobina, incluyendo en esta cuenta las ranuras ocupadas por ambos lados, y luego a dicha cuenta se resta una.

Si -como se indicó en el apartado 3 y en la Fig. 5- se han numerado las ranuras del devanado, hay una forma sencilla para calcular y_1 . *El paso de bobina y_1 es la diferencia de los números de las ranuras donde se alojan los dos lados de una misma bobina.* Así, para el devanado 1 en la Fig. 5 se observa que la primera bobina ocupa las ranuras 1 y 9; luego, el paso de bobina vale: $y_1 = 9 - 1 = 8$ ranuras.

Para identificar los dos lados de una bobina en el esquema basta con apreciar que ambos lados deben estar unidos por la misma cabeza de bobina, la cual se dibuja en la parte superior del esquema del bobinado.

En los devanados concéntricos y_1 designa al *paso medio de bobina* (el valor medio de los pasos de las bobinas de un grupo polar). Si el número de bobinas de un grupo polar, b_G , es impar, el paso medio es igual al paso de la bobina central, y si es par, el paso medio es igual a la media de los pasos de las dos bobinas centrales de un grupo polar.

10. Como ya se ha indicado en el apartado 7, sucede que:

- Si el devanado es *por polos*: $G_f = 2p$
- Si el devanado es *por polos consecuentes*: $G_f = p$

11. Evidentemente, el *número total de grupos polares*, G , se obtiene multiplicando el número de fases, m , por el número de grupos polares de una fase, G_f (ver la tabla I):

$$G = m \cdot G_f \quad (3)$$

- 12.** Según se deduce de la tabla I, el *número total de bobinas B* (de todas las fases juntas) se obtiene a partir del número de ranuras K así:

- Si el devanado es de *una capa*: $B = \frac{K}{2}$

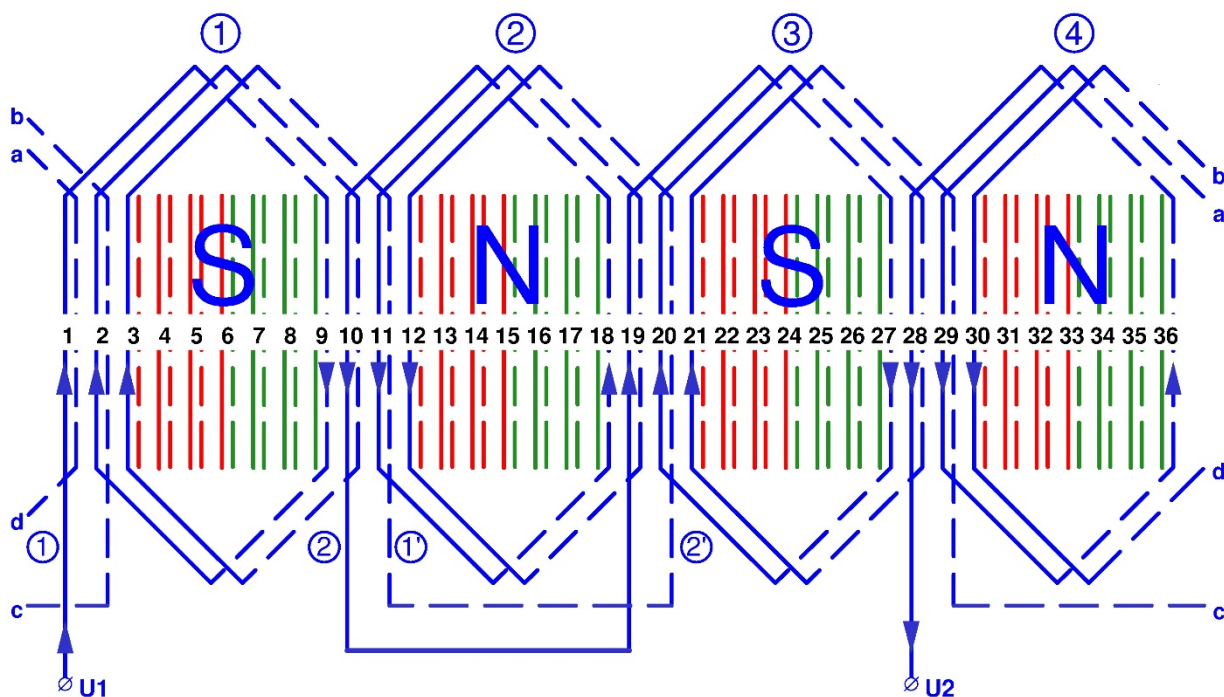
- Si el devanado es de *dos capas*: $B = K$

- 13.** El *número de bobinas de un grupo polar, b_G* , se puede obtener mediante esta relación que se deduce de la tabla I:

$$b_G = \frac{B}{G} \quad (4)$$

Este resultado debe coincidir con el que se obtuvo por observación del esquema del bobinado en el apartado 5, lo cual sirve para comprobar que no se han cometido errores.

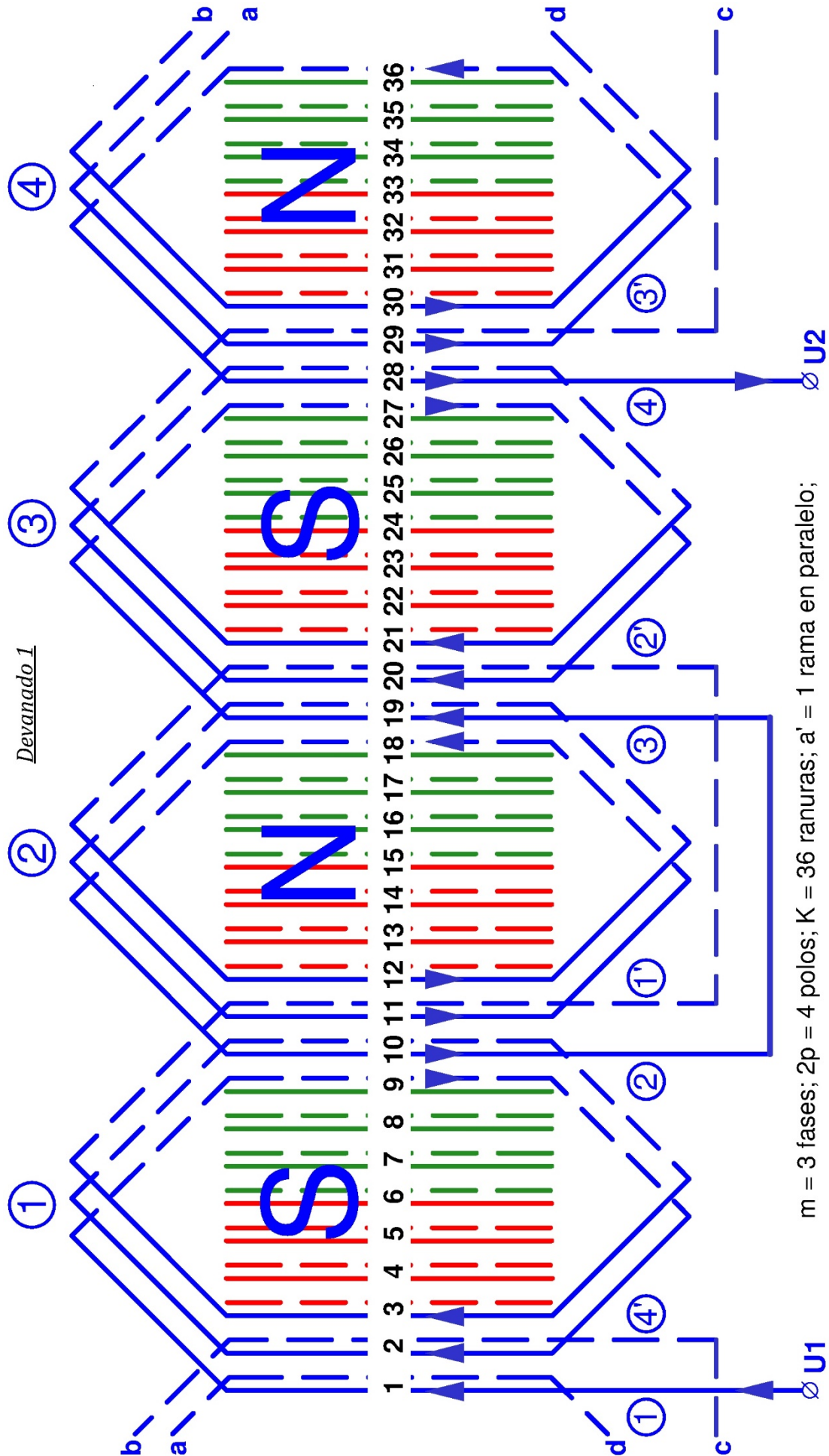
RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 1

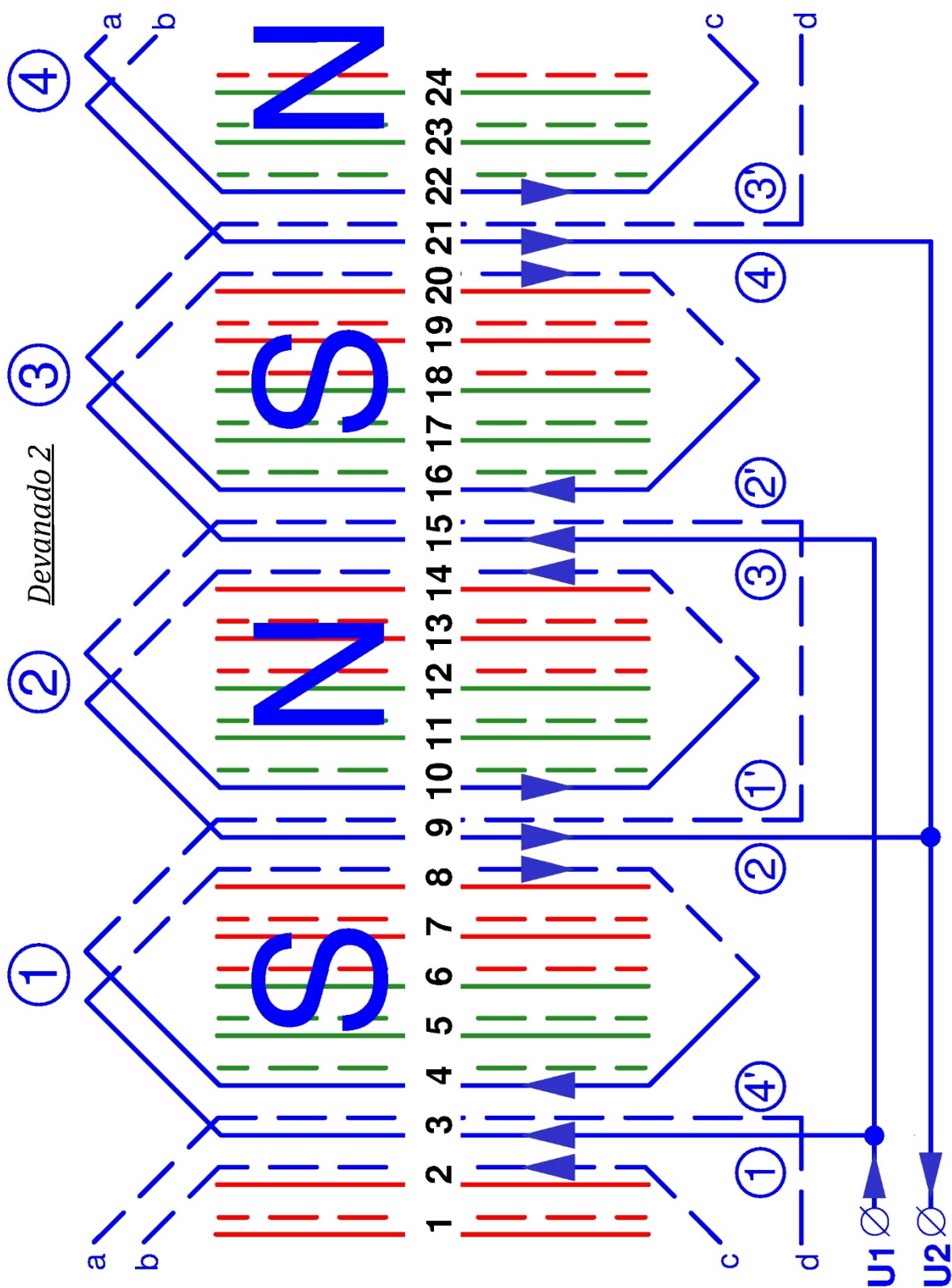


Devanado 1

En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 1 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente, la numeración de los grupos polares y el marcado de los extremos de los dos primeros grupos polares. Operando como se acaba de explicar en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

- Número de fases: $m = 3$ fases.
- Número de capas: 2 capas.
- Número de ranuras: $K = 36$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 1$ rama en paralelo.
- Número de polos: $2p = 4$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 4$ grupos polares/fase ($b_G = 3$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: imbricado.
- Forma de conexión: por polos.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{36}{3 \cdot 4} = 3$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{36}{4} = 9$ ranuras.
- Paso de bobina medido en número de ranuras:
 $y_1 = 8$ ranuras (paso acortado en: $y_p - y_1 = 1$ ranura)
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 3 \cdot 4 = 12$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K = 36$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{36}{12} = 3$ bob/grupo polar.

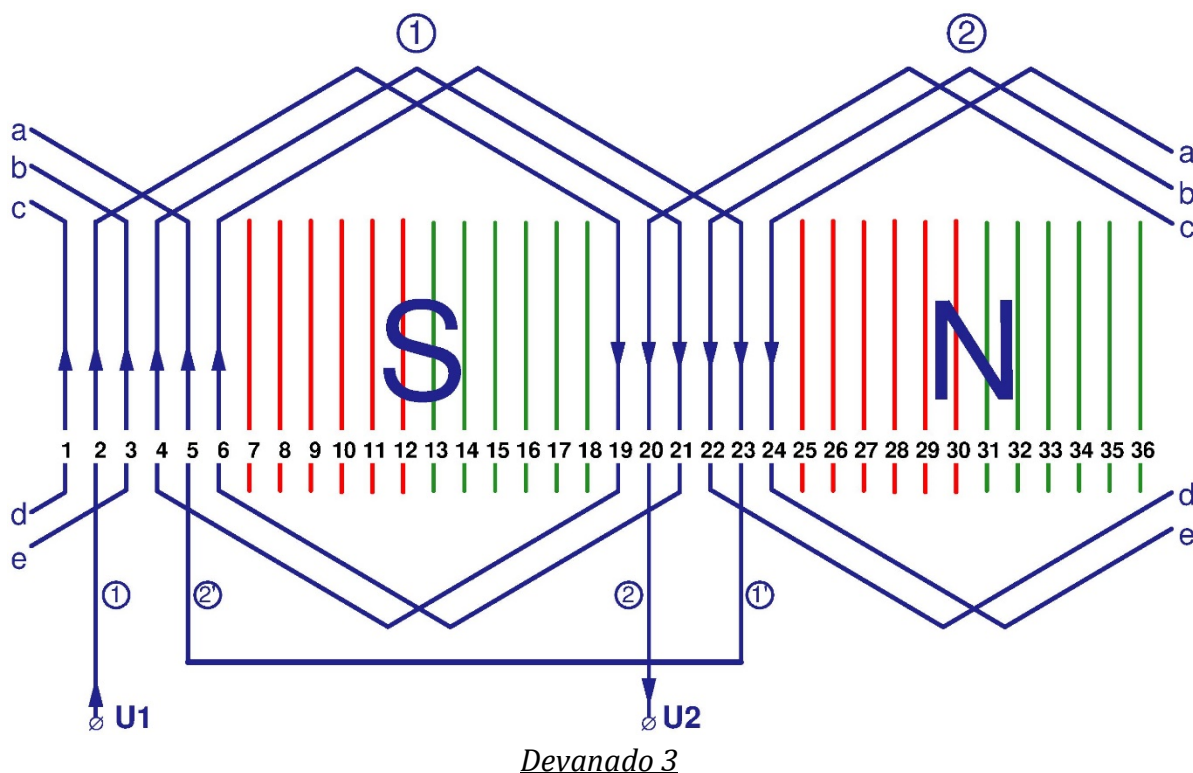




$m = 3$ fases; $2p = 4$ polos; $K = 24$ ranuras; $a' = 2$ ramas en paralelo;

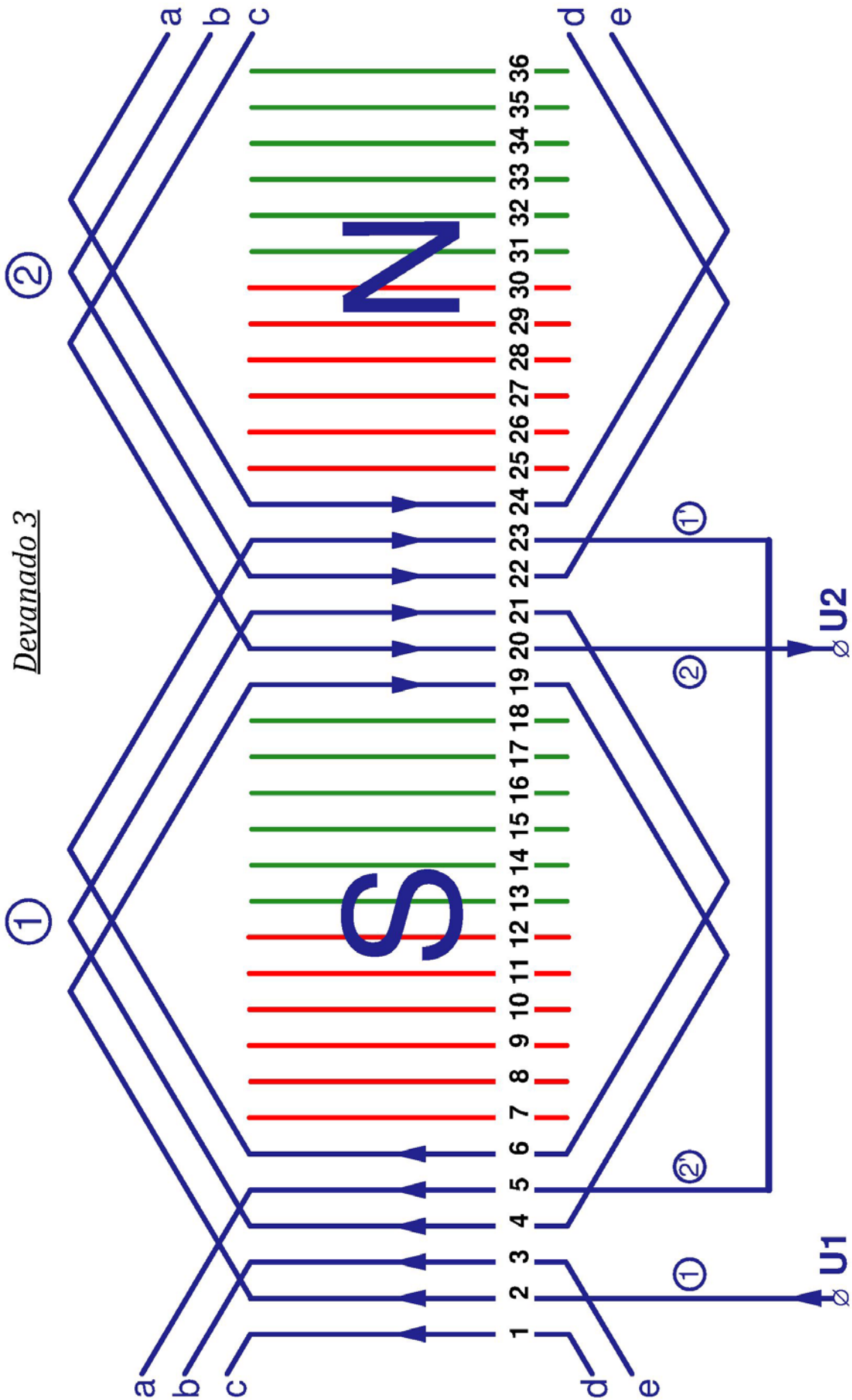
2 capas; imbricado; por polos; paso acortado en 1 ranura

RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 3



En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 3 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente, la numeración de los grupos polares y el marcado de los extremos de los dos grupos polares. Operando como se ha explicado en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

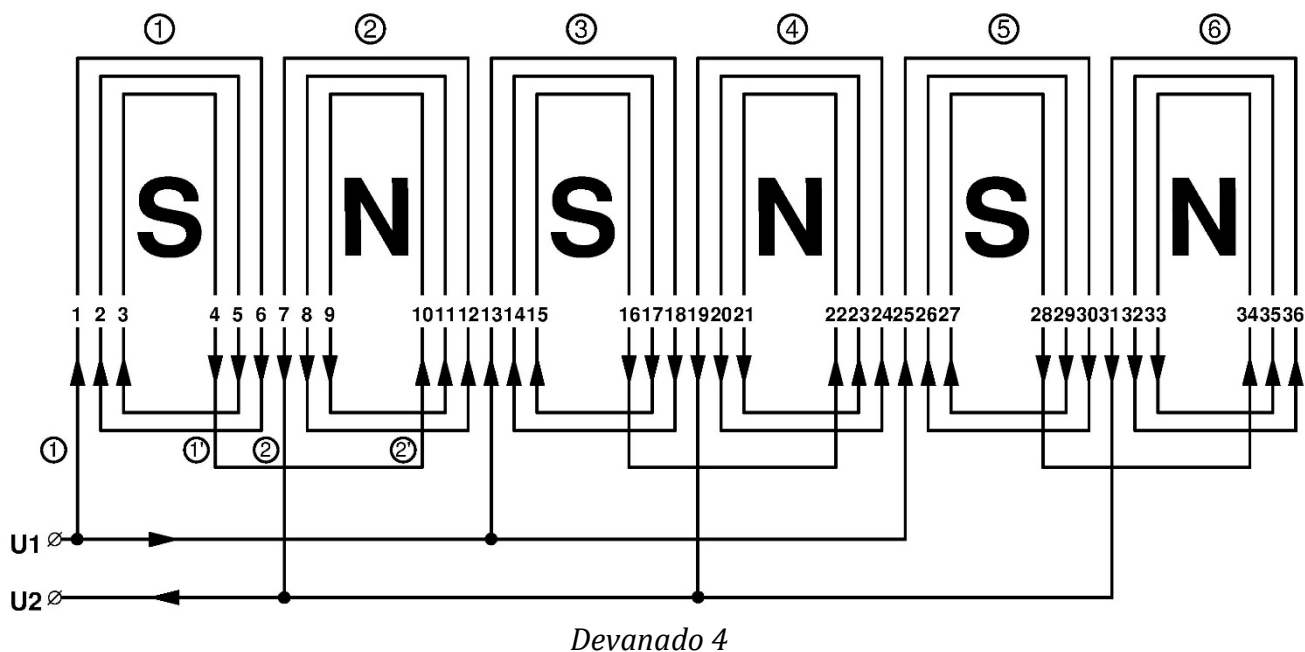
- Número de fases: $m = 3$ fases.
- Número de capas: 1 capa.
- Número de ranuras: $K = 36$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 1$ rama en paralelo.
- Número de polos: $2p = 2$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 2$ grupos polares/fase ($b_G = 3$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: imbricado.
- Forma de conexión: por polos.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{36}{3 \cdot 2} = 6$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{36}{2} = 18$ ranuras.
- Paso de bobina medido en número de ranuras:
 $y_1 = 17$ ranuras (paso acortado en: $y_p - y_1 = 1$ ranura)
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 3 \cdot 2 = 6$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K/2 = 18$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{18}{6} = 3$ bob/grupo polar.



$m = 3$ fases; $2p = 2$ polos; $K = 36$ ranuras; $a' = 1$ rama en paralelo;

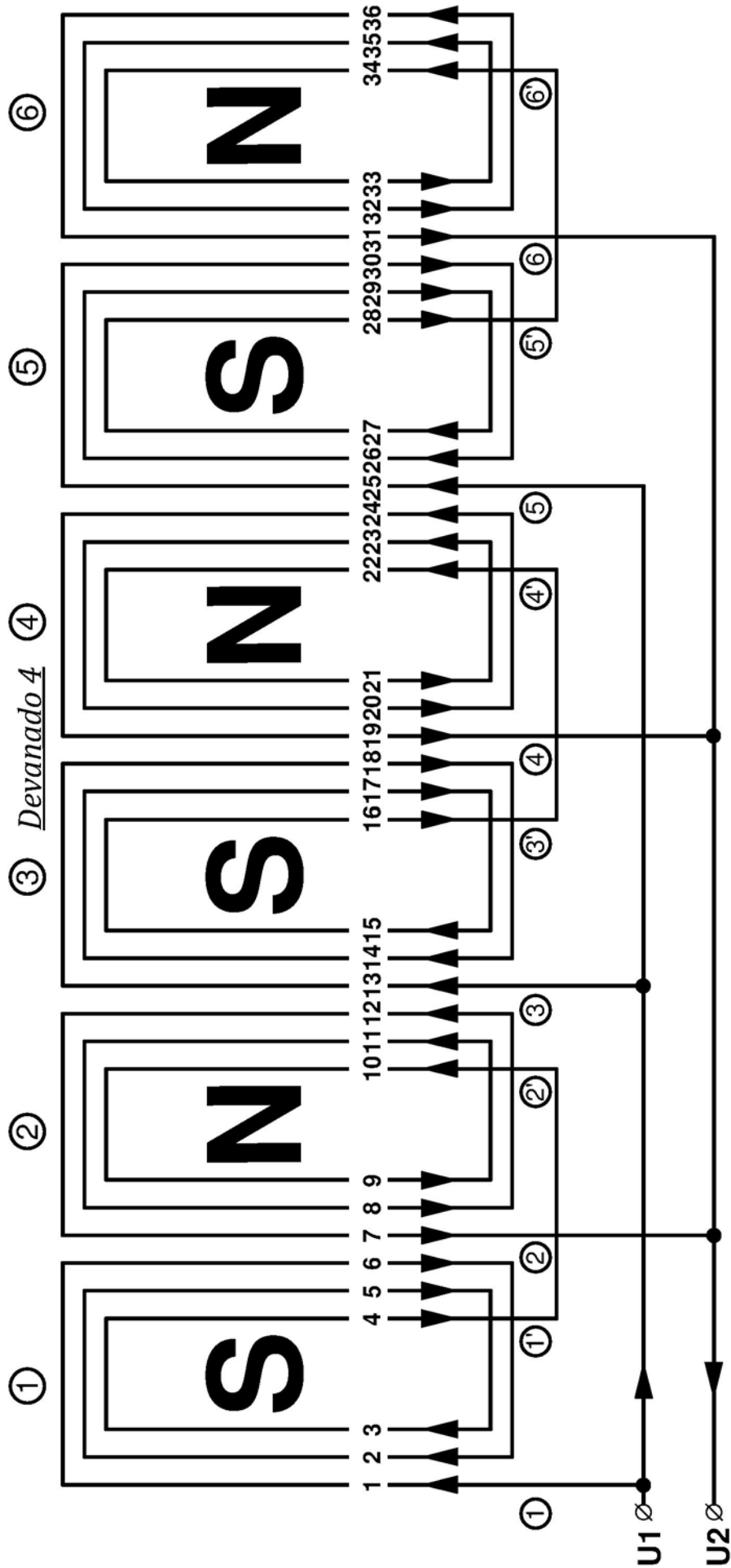
1 capa; imbricado; por polos; paso acortado en 1 ranura

RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 4



En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 4 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente, la numeración de los grupos polares y el marcado de los extremos de los dos primeros grupos polares. Operando como se ha explicado en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

- Número de fases: $m = 1$ fase.
- Número de capas: 1 capa.
- Número de ranuras: $K = 36$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 3$ ramas en paralelo.
- Número de polos: $2p = 6$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 6$ grupos polares/fase ($b_G = 3$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: concéntrico.
- Forma de conexión: por polos.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{36}{1 \cdot 6} = 6$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{36}{6} = 6$ ranuras.
- Paso medio de bobina medido en número de ranuras (igual al paso de la 2ª bobina (la bobina central) de un grupo polar por ser b_G impar e igual a 3 bobinas/grupo polar):
 $y_1 = 3$ ranuras (paso acortado en: $y_p - y_1 = 3$ ranuras).
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 1 \cdot 6 = 6$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K/2 = 18$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{18}{6} = 3$ bob/grupo polar.

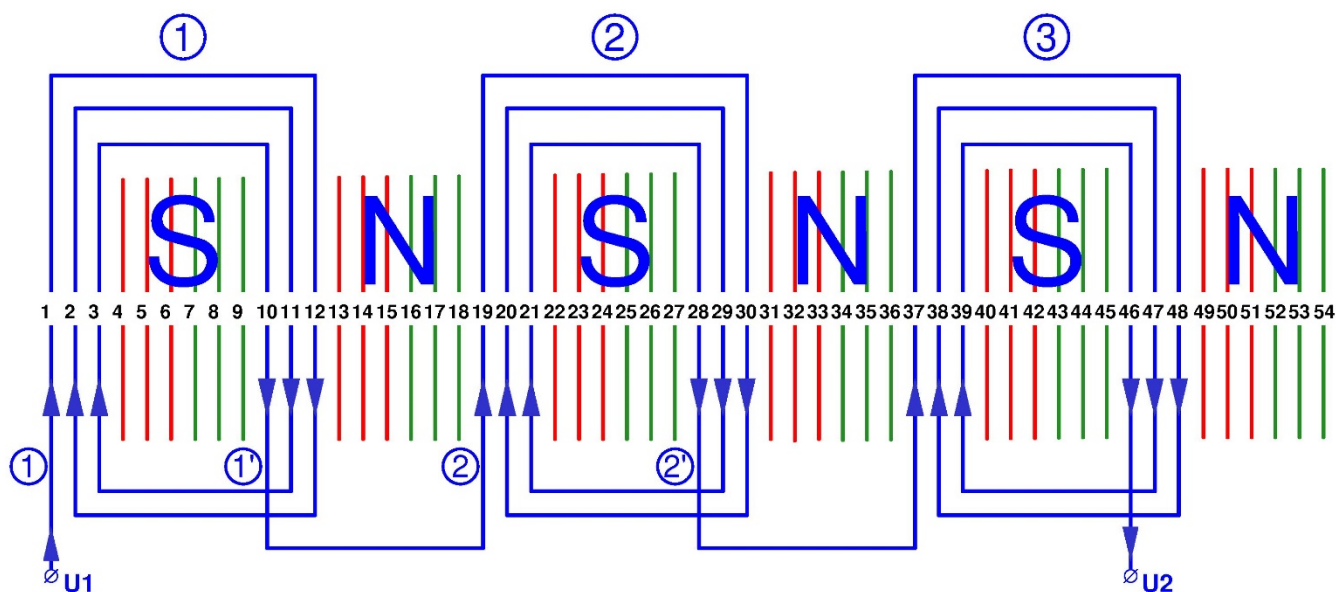


$m = 1$ fase; las ranuras ocupan los $2/3$ del inducido;

$2p = 6$ polos; $K = 36$ ranuras; $a' = 3$ ramas en paralelo; 1 capa;

concéntrico con paso medio de las bobinas diferente del paso polar; por polos

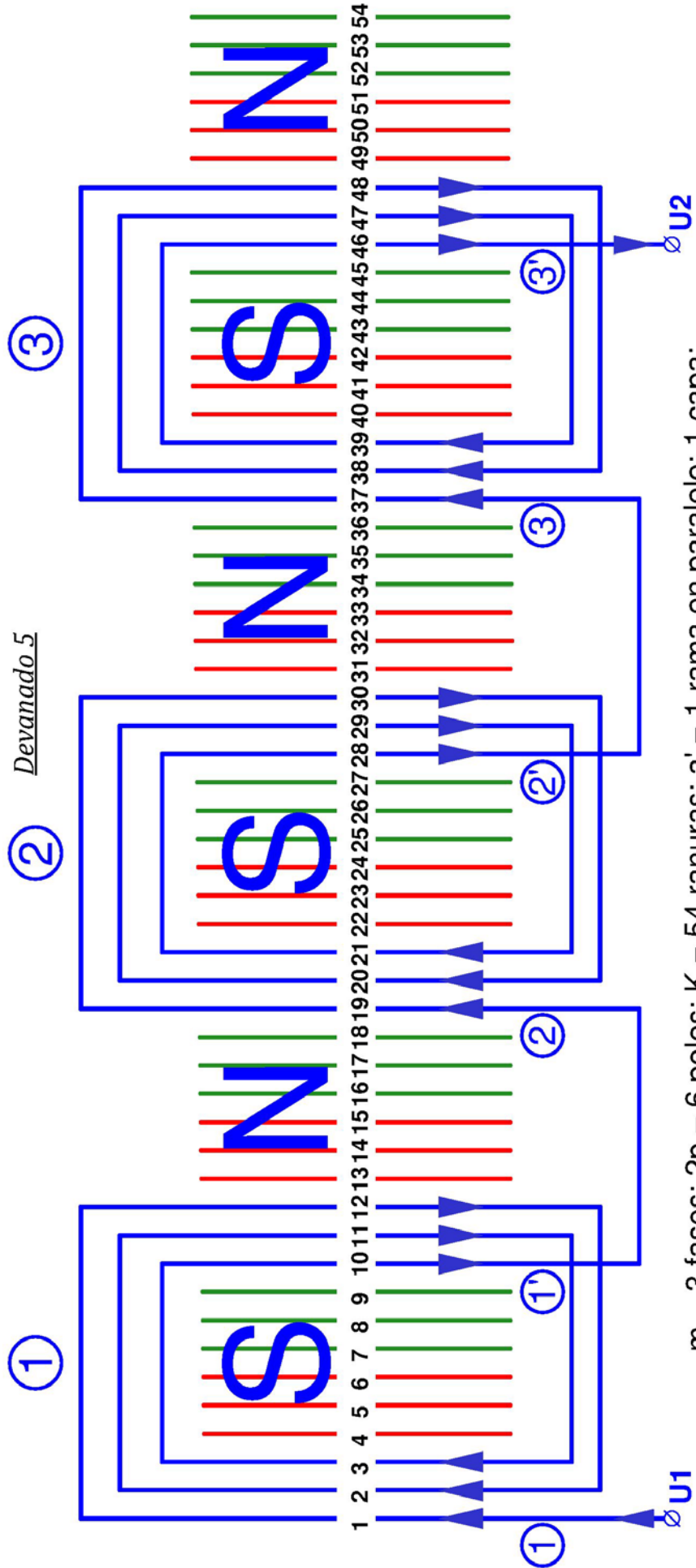
RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 5



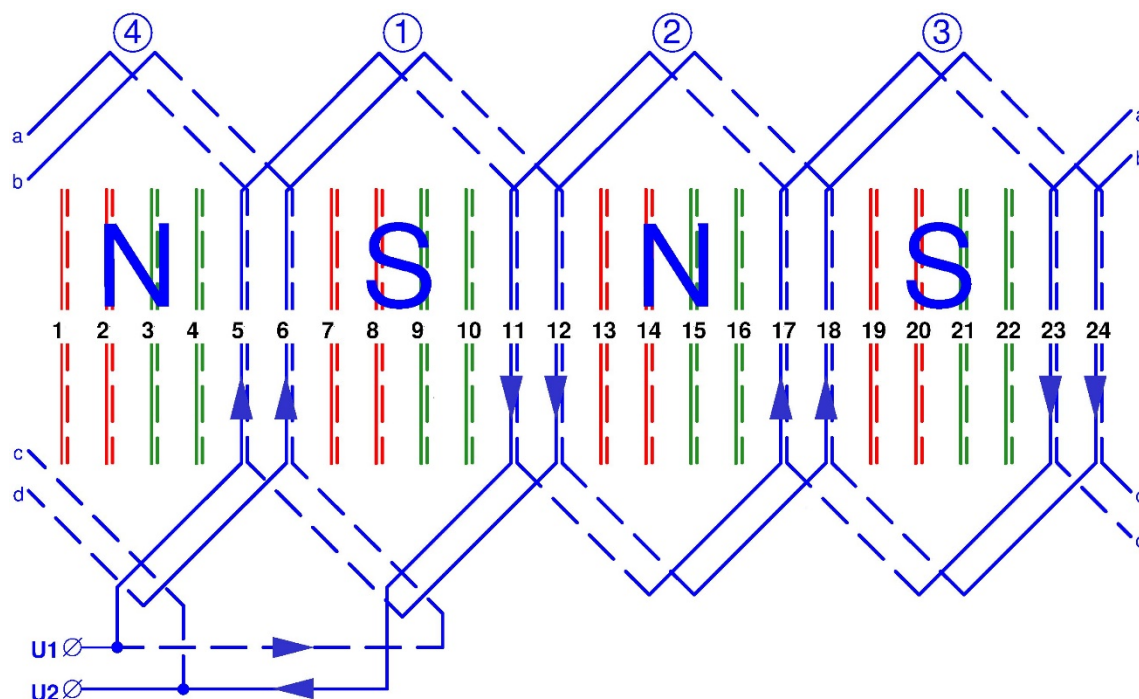
Devanado 5

En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 5 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente, la numeración de los grupos polares y el marcado de los extremos de los dos primeros grupos polares. Operando como se ha explicado en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

- Número de fases: $m = 3$ fases.
- Número de capas: 1 capa.
- Número de ranuras: $K = 54$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 1$ rama en paralelo.
- Número de polos: $2p = 6$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 3$ grupos polares/fase ($b_G = 3$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: concéntrico.
- Forma de conexión: por polos consecuentes.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{54}{3 \cdot 6} = 3$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{54}{6} = 9$ ranuras.
- Paso medio de bobina medido en número de ranuras (igual al paso de la 2ª bobina (la bobina central) de un grupo polar por ser b_G impar e igual a 3 bobinas/grupo polar): $y_1 = 9$ ranuras (el paso medio de bobina es igual al paso polar).
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 3 \cdot 3 = 9$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K/2 = 27$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{27}{9} = 3$ bob/grupo polar.



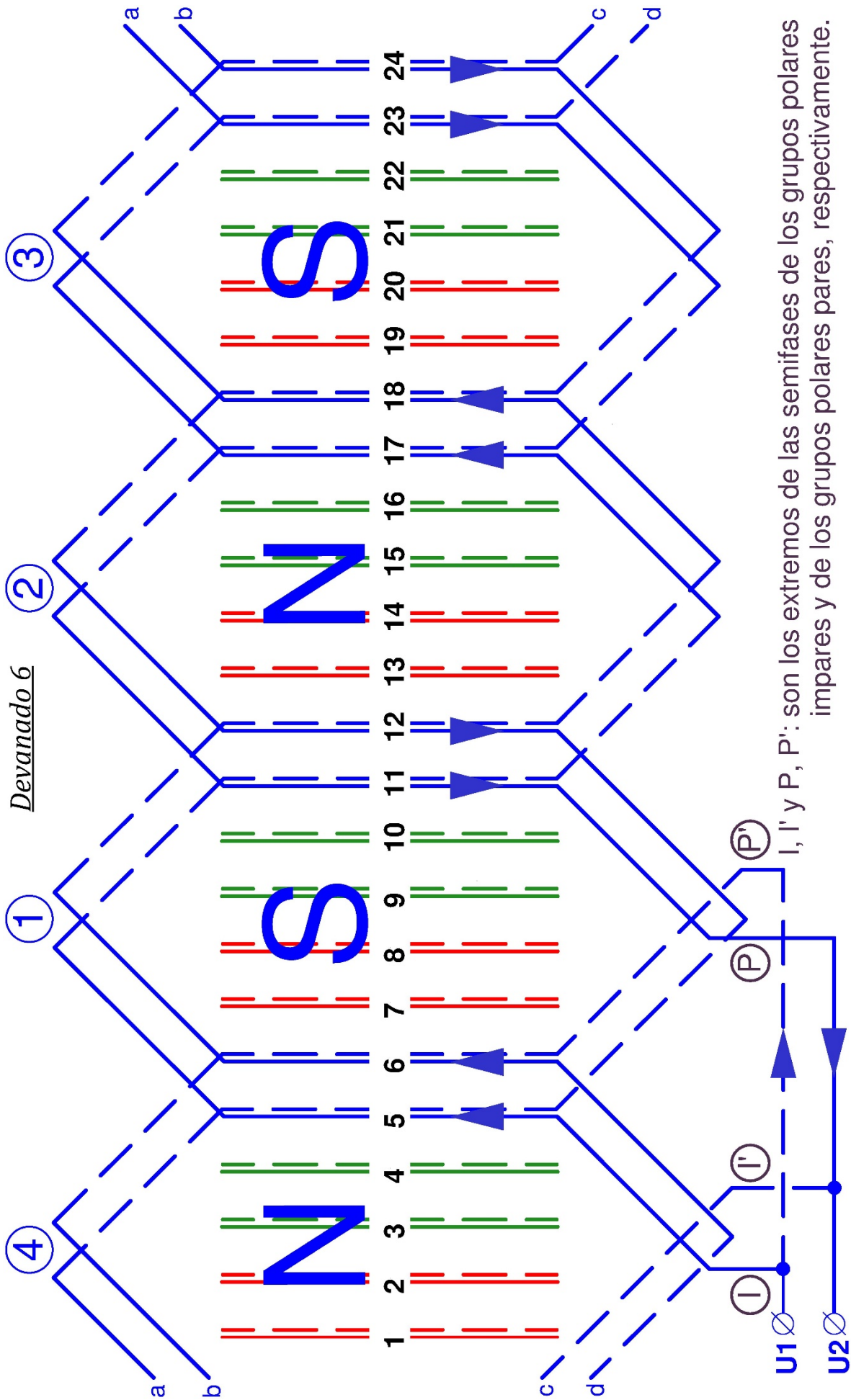
RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 6



Devanado 6

En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 6 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente y la numeración de los grupos polares (en la figura de la página siguiente se han marcado también los extremos de las dos semifases). Operando como se ha explicado en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

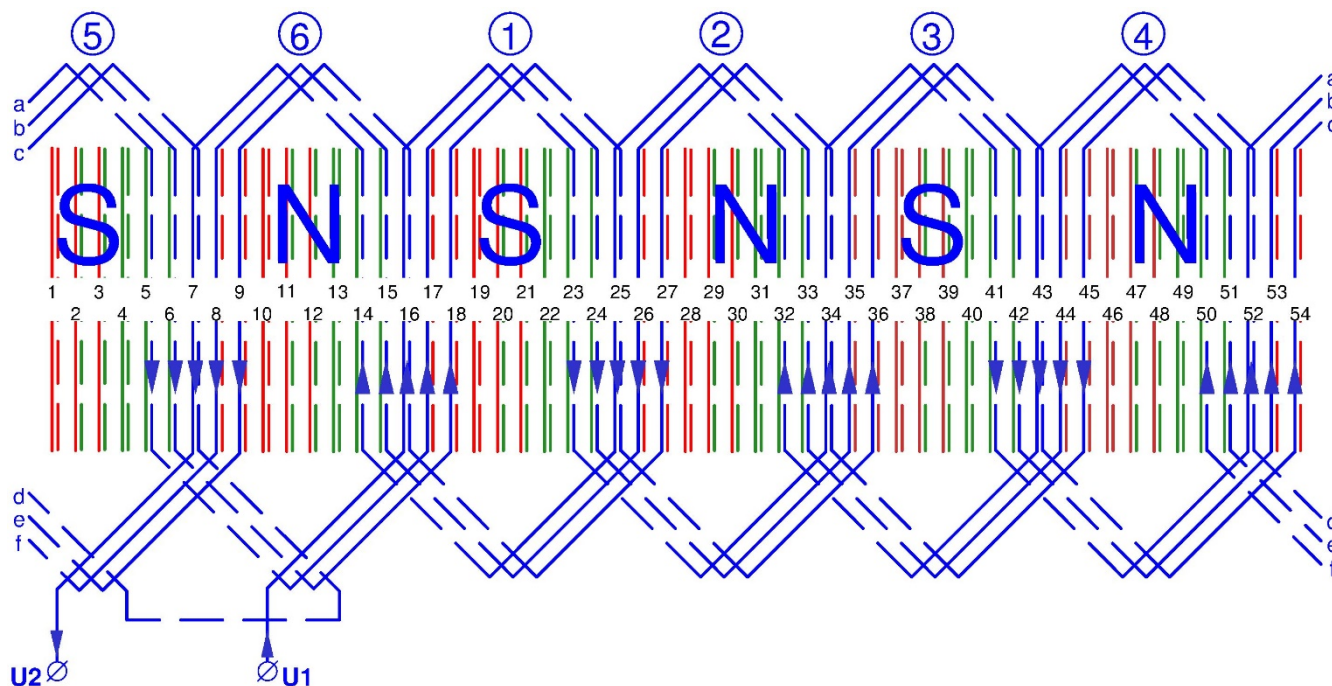
- Número de fases: $m = 3$ fases.
- Número de capas: 2 capas.
- Número de ranuras: $K = 24$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 2$ ramas en paralelo.
- Número de polos: $2p = 4$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 4$ grupos polares/fase ($b_G = 2$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: ondulado.
- Forma de conexión: por polos.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{24}{3 \cdot 4} = 2$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{24}{4} = 6$ ranuras.
- Paso de bobina medido en número de ranuras:
 $y_1 = 6$ ranuras (bobinas de paso diametral, pues: $y_1 = y_p$)
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 3 \cdot 4 = 12$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K = 24$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{24}{12} = 2$ bob/grupo polar.



Devanado trifásico ondulado por polos, 4 polos, doble capa, $K = 24$ ranuras,

$q = 2$ ranuras por polo y fase, paso de bobina diametral, $a' = 2$ ramas en paralelo.

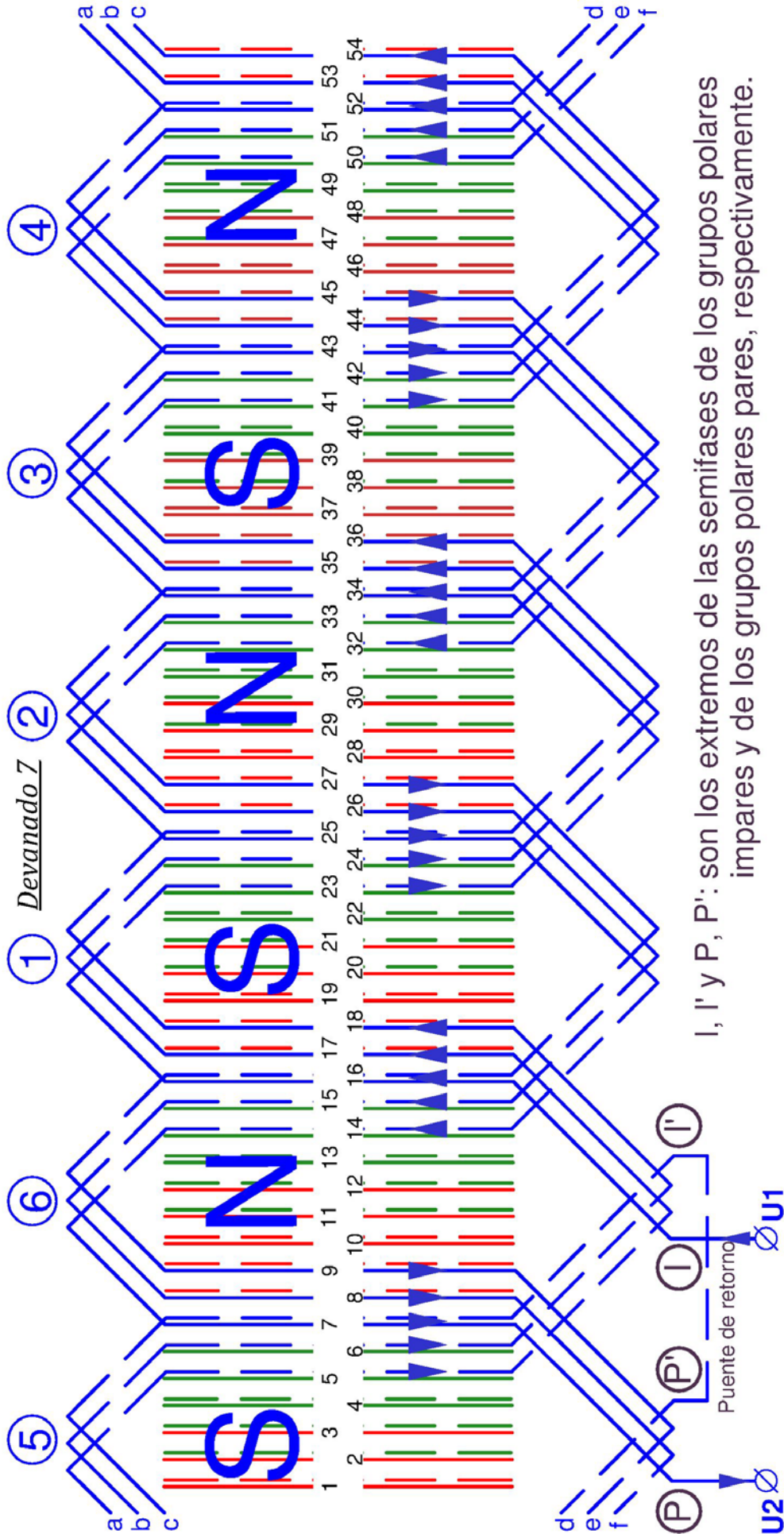
RESOLUCIÓN DEL DEVANADO 7



Devanado 7

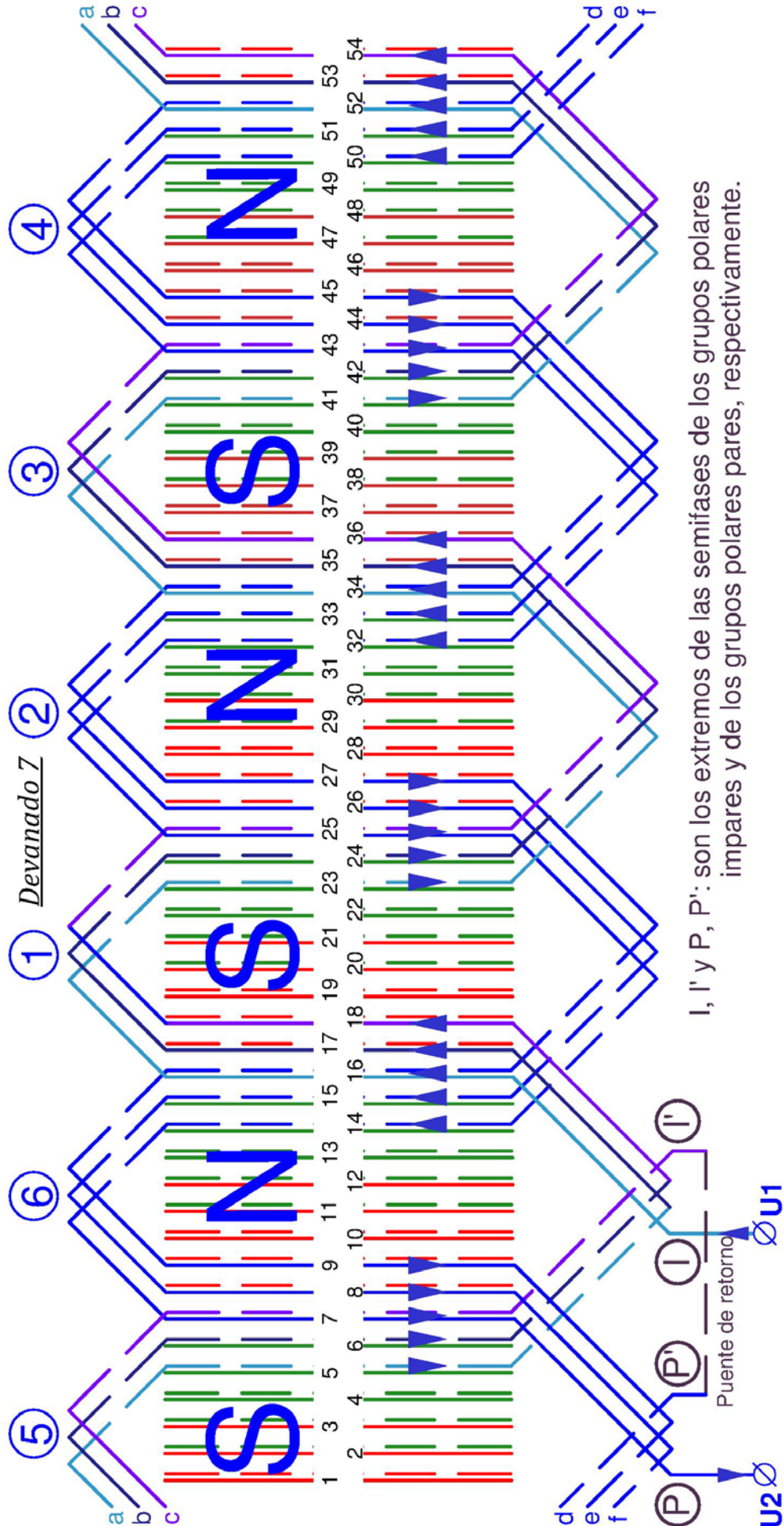
En la figura anterior se ha reproducido el esquema del devanado 7 que proporciona el enunciado y se le han añadido: la numeración de las ranuras, el sentido de la corriente por las ranuras y los polos que crea dicha corriente y la numeración de los grupos polares (en las figuras de las páginas siguientes se han marcado también los extremos de las dos semifases y el puente de retorno). Operando como se ha explicado en las páginas anteriores, se obtienen estos resultados:

- Número de fases: $m = 3$ fases.
- Número de capas: 2 capas.
- Número de ranuras: $K = 54$ ranuras.
- Número de ramas en paralelo: $a' = 1$ rama en paralelo.
- Número de polos: $2p = 6$ polos.
- Número de grupos polares por fase: $G_f = 2p = 6$ grupos polares/fase ($b_G = 3$ bob/g.p.).
- Tipo de bobinado: ondulado.
- Forma de conexión: por polos.
- Número de ranuras por polo y fase: por (1): $q = \frac{K}{m(2p)} = \frac{54}{3 \cdot 6} = 3$ ran/polo y fase.
- Paso polar medido en número de ranuras (por (2)): $y_p = \frac{K}{2p} = \frac{54}{6} = 9$ ranuras.
- Paso de bobina medido en número de ranuras:
- $y_1 = 7$ ranuras (paso acortado en: $y_p - y_1 = 2$ ranuras)
- Número total de grupos polares (por (3)): $G = m \cdot G_f = 3 \cdot 6 = 18$ grupos polares.
- Número total de bobinas: $B = K = 54$ bobinas.
- Número de bobinas de un grupo polar: (por (4)): $b_G = \frac{B}{G} = \frac{54}{18} = 3$ bob/grupo polar.



Devanado trifásico ondulado por polos, 6 polos, doble capa, $K = 54$ ranuras,

$q = 3$ ranuras por polo y fase, paso de bobina acortado 2 ranuras, $a' = 1$ rama en paralelo



Se han usado diferentes colores para la semifase de los grupos polares (g.p.) pares y para la de los g.p. impares. Para esta última semifase también se ha usado un color distinto para cada una de las vueltas al inducido: la primera vuelta conecta las primeras bobinas de los g.p. impares, la segunda conecta las segundas bobinas de los g.p. impares, y así sucesivamente. La semifase de los g.p. impares empieza en el g.p. 1 y la de los pares en el g.p. 6.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOLDEA, I. y NASAR, S. A. 2010. *The Induction Machine Design Handbook*. New York: CRC Press.
- [2] CHAPMAN. 2005. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [3] CORRALES MARTÍN, J. 1982. *Cálculo industrial de máquinas eléctricas (2 tomos)*. Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.
- [4] CORTES CHERTA. 1994. *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas. 5 tomos*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- [5] FITZGERALD, KINGSLEY Y UMANS. 2004. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [6] FOGIEL, M. 1987. *The electrical machines problem solver*. New York. Research and Education Association.
- [7] FRAILE MORA, J. 2008. *Máquinas eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- [8] FRAILE MORA, J. y FRAILE ARDANUY, J. 2015. *Problemas de máquinas eléctricas*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L.
- [9] IVANOV-SMOLENSKI. 1984. *Máquinas eléctricas. Tomo 2*. Moscú: Editorial Mir.
- [10] KOSTENKO y PIOTROVSKI. 1979. *Máquinas eléctricas. Tomo II*. Moscú: Editorial Mir.
- [11] LANGSDORF. 1977. *Teoría de las máquinas de corriente alterna*. Méjico: McGraw-Hill.
- [12] MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ, F. 2001. *Reparación y bobinado de motores eléctricos*. Madrid: Paraninfo.
- [13] PYRHÖNEN, JUHA y otros. 2010. *Design of rotating electrical machines*. West Sussex (Inglaterra): John Wiley & Sons Ltd.
- [14] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1991. *101 esquemas de bobinados de corriente alterna*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [15] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1998. *Enciclopedia CEAC de electricidad: Máquinas de c.a.* Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [16] RAMIREZ VAZQUEZ, J. 1998. *Enciclopedia CEAC de electricidad: Talleres electromecánicos. Bobinados*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- [17] RAPP, J. 1997. *Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos*. Bilbao: Editado por el autor.
- [18] RODRÍGUEZ POZUETA, M. A. 2010. *Constitución de las máquinas eléctricas. Bobinados (nivel avanzado)*. Universidad de Cantabria. Santander (España). Se puede descargar en este sitio web:
http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm#Aspectos_Generales
- [19] SUÁREZ CREO, J.M. y MIRANDA BLANCO, B.N. 2006. *Máquinas eléctricas. Funcionamiento en régimen permanente*. Santiago de Compostela: Tórculo Edicións, S.L.