

CAPÍTULO 4

DEVANADOS

4.1) CAMPOS MAGNÉTICOS PRODUCIDOS EN LAS MÁQUINAS ROTATORIAS.

4.1.1) Introducción.

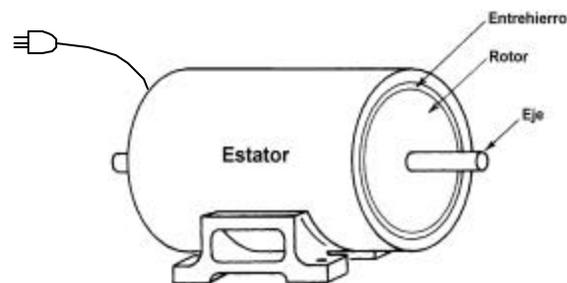


Fig.4.1.: Partes básicas de una máquina rotatoria.

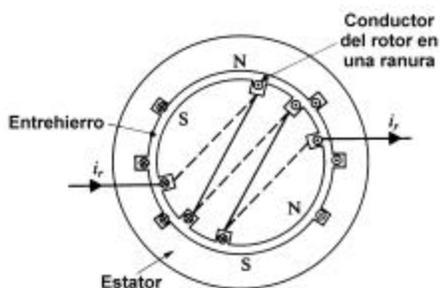


Fig.4.2.: Componentes básicas de una máquina rotatoria.

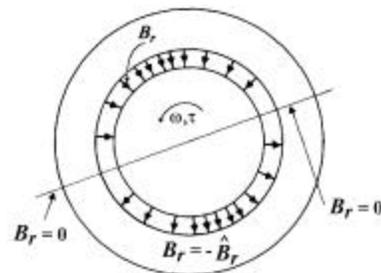


Fig.4.3.: Campo magnético en el entrehierro de una máquina.

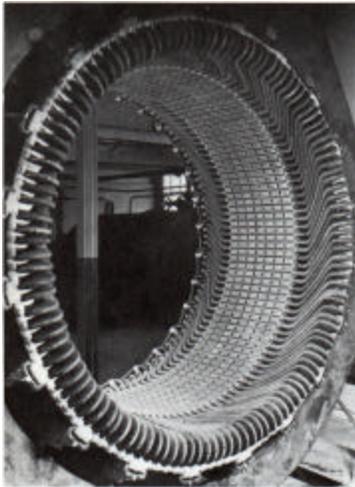


Fig.4.4.: Devanado de estator de una máquina polifásica.

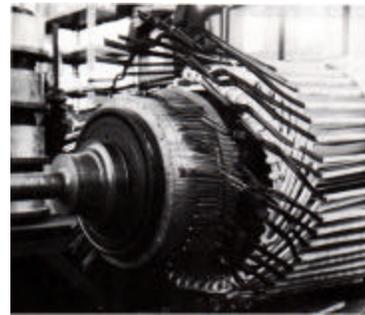
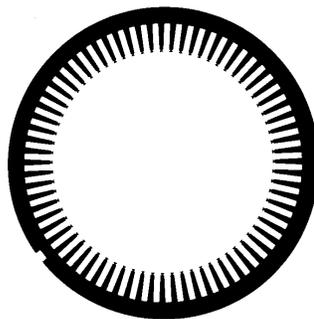
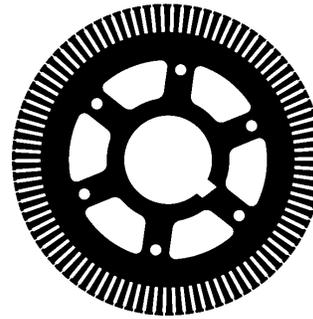


Fig.4.5.: Devanado de rotor en proceso de montaje.



a)



b)

Fig.4.6.: Chapas (láminas) de hierro de un motor de inducción.
a) estator, b) rotor.



Fig.4.7.: Montaje de láminas del estator en un generador sincrónico.

4.1.2) Devanados de estator de máquinas de corriente alterna.

Objetivo: Producir un campo sinusoidal.

$$B(\mathbf{q}) = \hat{B} \times \text{sen}(\mathbf{q}) \tag{4.1}$$

4.1.2.1) La bobina elemental.

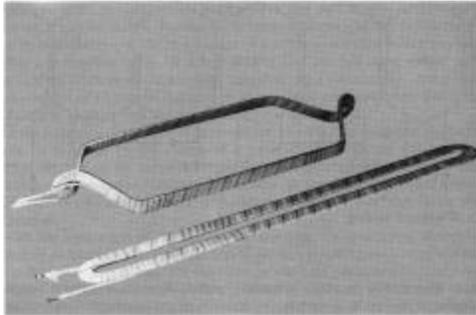


Fig.4.8.: Bobina de varias vueltas para un devanado de corriente alterna.

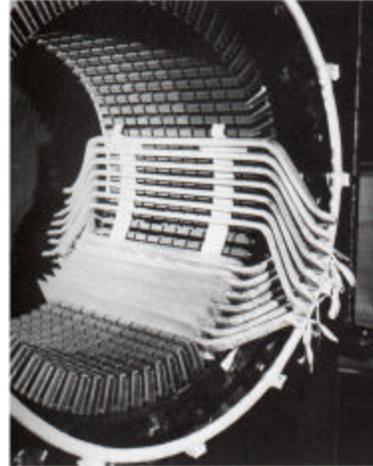


Fig.4.9.: Algunas bobinas montadas en las ranuras.

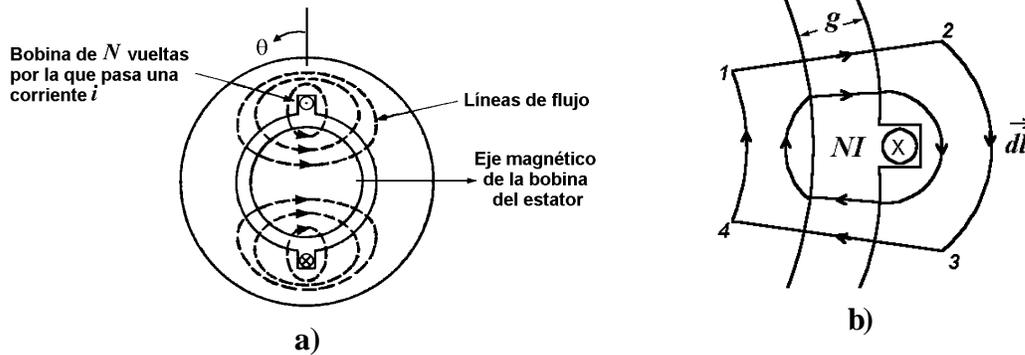


Fig.4.10.: a) Bobina concentrada elemental, b) Trayectoria de integración.

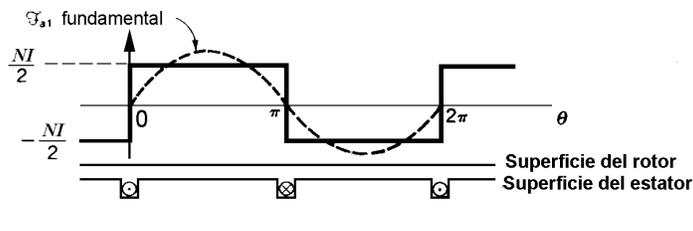


Fig.4.11.: Fuerza magnetomotriz (campo magnético) de una bobina concentrada en dos ranuras.

Campo magnético producido por la bobina elemental:

$$B(\mathbf{q}) = \frac{\mathbf{m}_b \cdot N \cdot I}{2 \cdot g} \cdot \frac{4}{p} \left[\text{sen}(\mathbf{q}) + \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3\mathbf{q}) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5\mathbf{q}) + \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7\mathbf{q}) + \dots \right] \quad (4.2)$$

Fuerza magnetomotriz de la bobina elemental:

$$F(\mathbf{q}) = \frac{N \cdot I}{2} \cdot \frac{4}{p} \left[\text{sen}(\mathbf{q}) + \frac{1}{3} \cdot \text{sen}(3\mathbf{q}) + \frac{1}{5} \cdot \text{sen}(5\mathbf{q}) + \frac{1}{7} \cdot \text{sen}(7\mathbf{q}) + \dots \right] \quad (4.3)$$

4.1.2.2) El número de pares de polos (p).

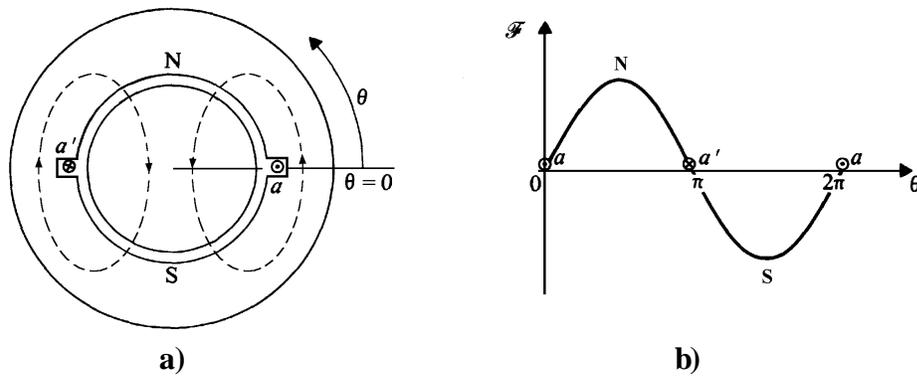


Fig.4.12.: Distribución de FMM (B) de 2 polos (p=1).

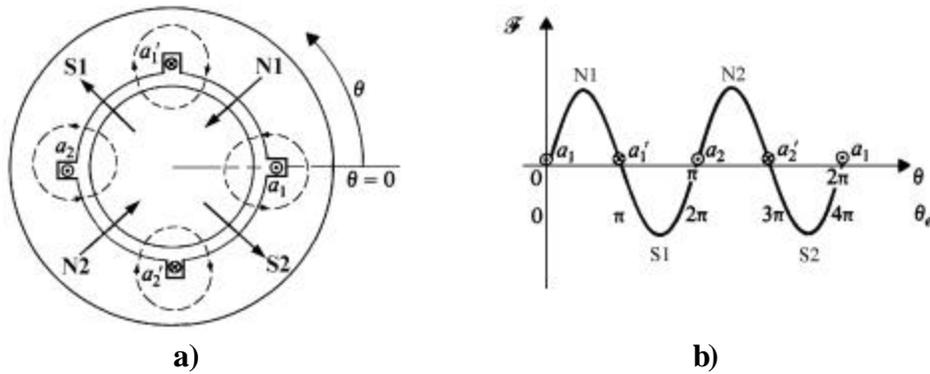


Fig.4.13.: Distribución de FMM (B) de 4 polos (p=2).

- θ : Grados mecánicos.
- θ_e : Grados eléctricos, definidos por la periodicidad del campo.

$$\mathbf{q}_e = p \cdot \mathbf{q} \quad (4.4)$$

4.1.2.3) Devanados distribuidos.

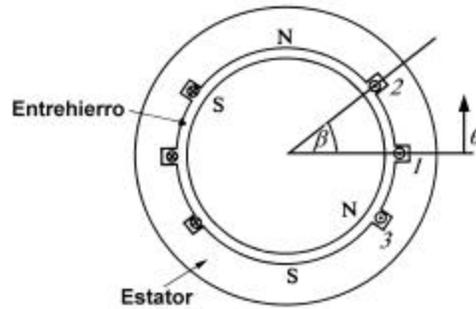


Fig.4.14.: Devanado de 3 bobinas.

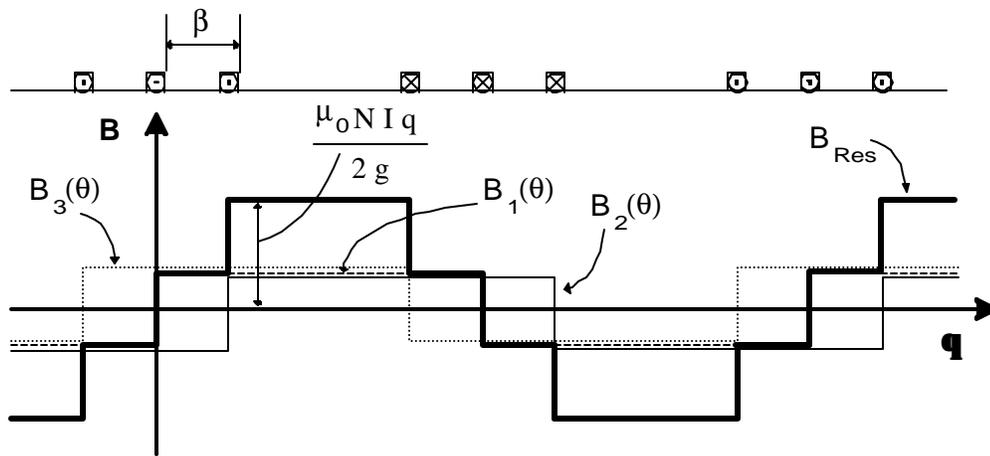


Fig.4.15.: Campo resultante en un devanado de 3 bobinas.

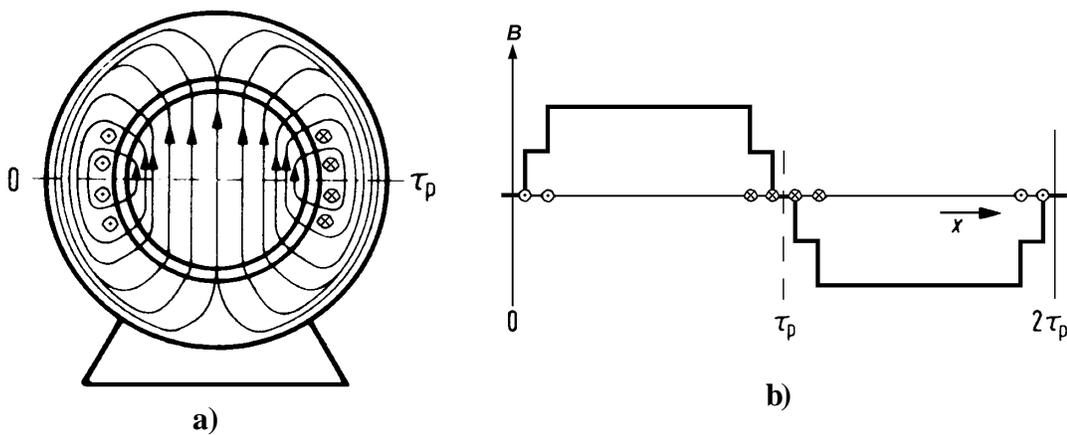


Fig.4.16.: a) Devanado con 4 bobinas $p=1, q=4$; b) Campo resultante.

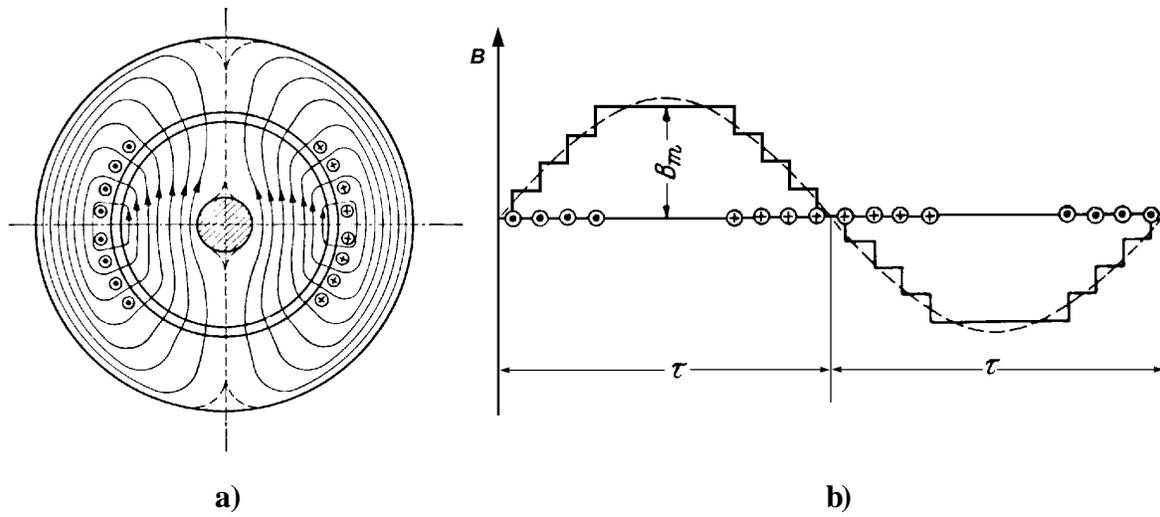


Fig.4.17: a) Devanado monofásico distribuido, $p=1$, $q=8$; b) Campo magnético resultante.

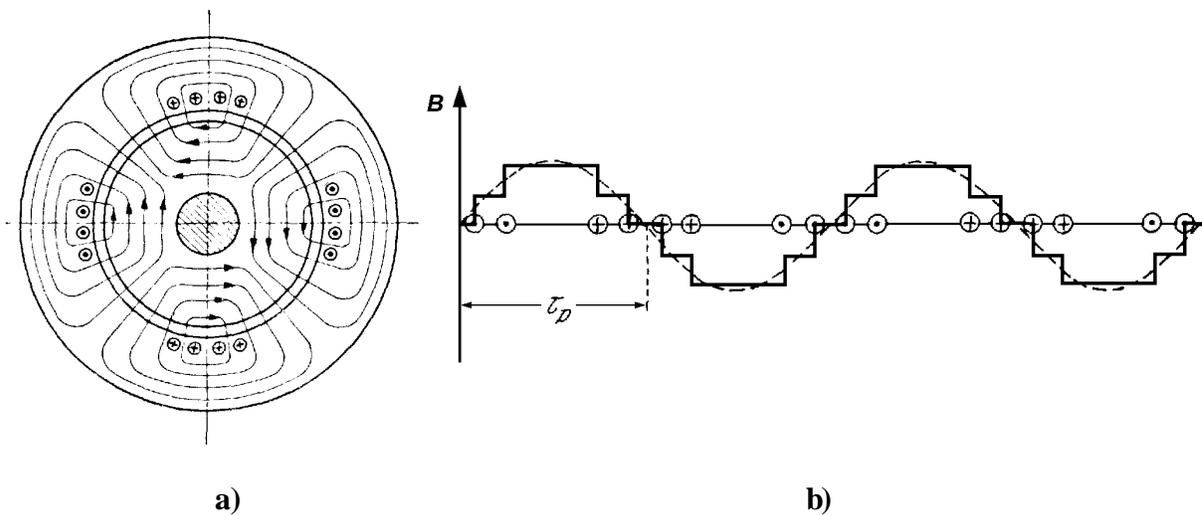


Fig.4.18: a) Devanado monofásico de 4 polos, $p=2$, $q=4$; b) Campo magnético resultante.

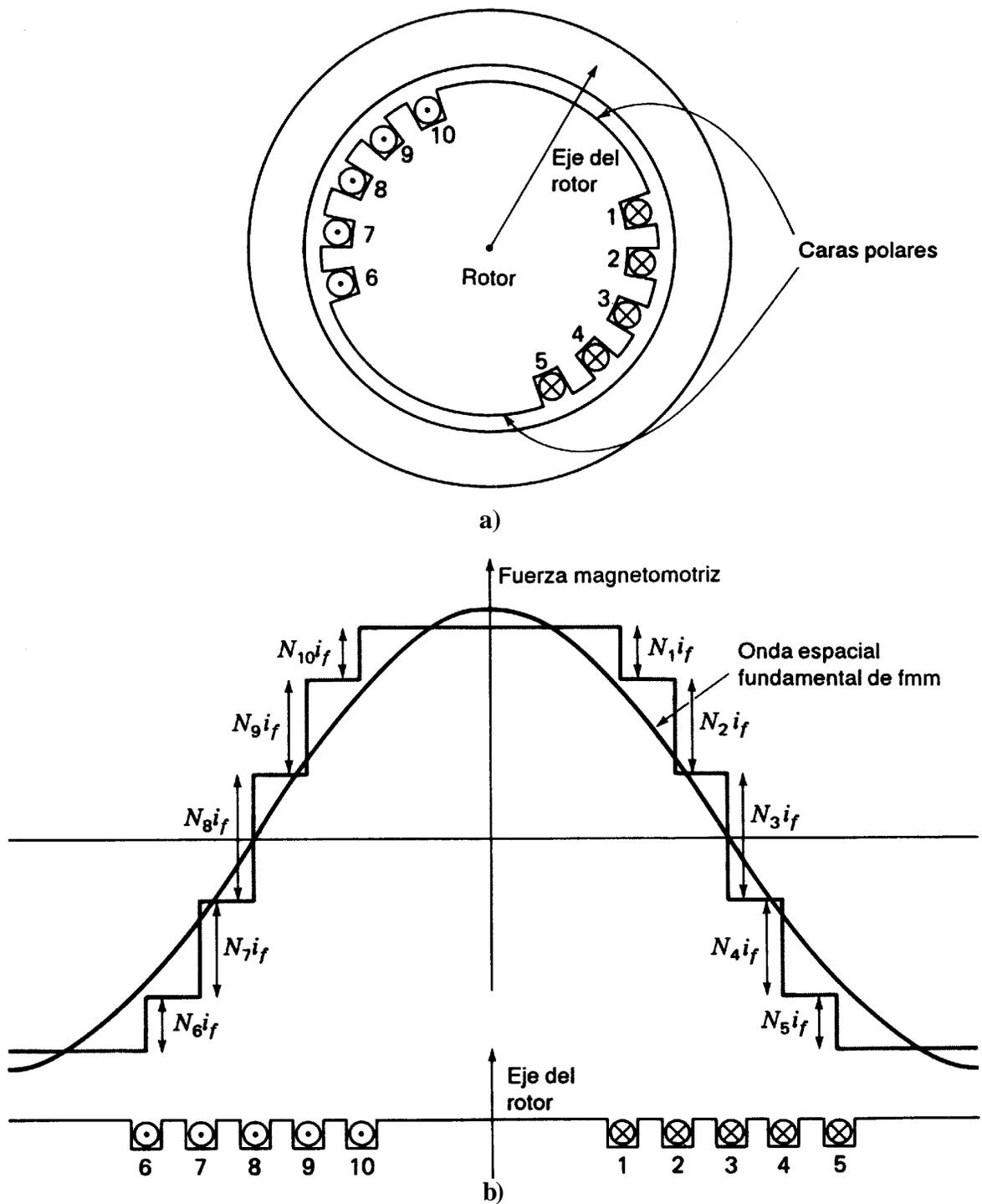


Fig.4.19.: a) Devanado distribuido en un rotor cilíndrico; b) Distribución de la fuerza magnetomotriz.

4.1.2.4) Devanados de doble capa.

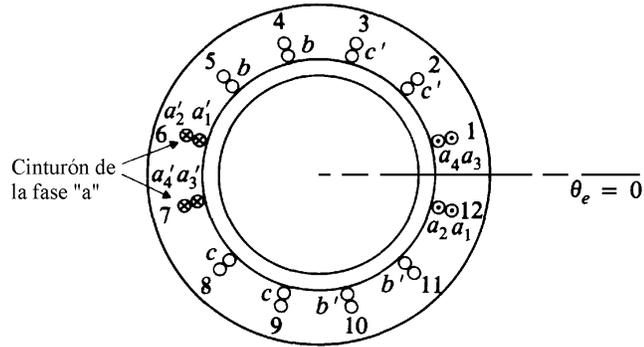


Fig.4.20.: Devanado trifásico de doble capa.

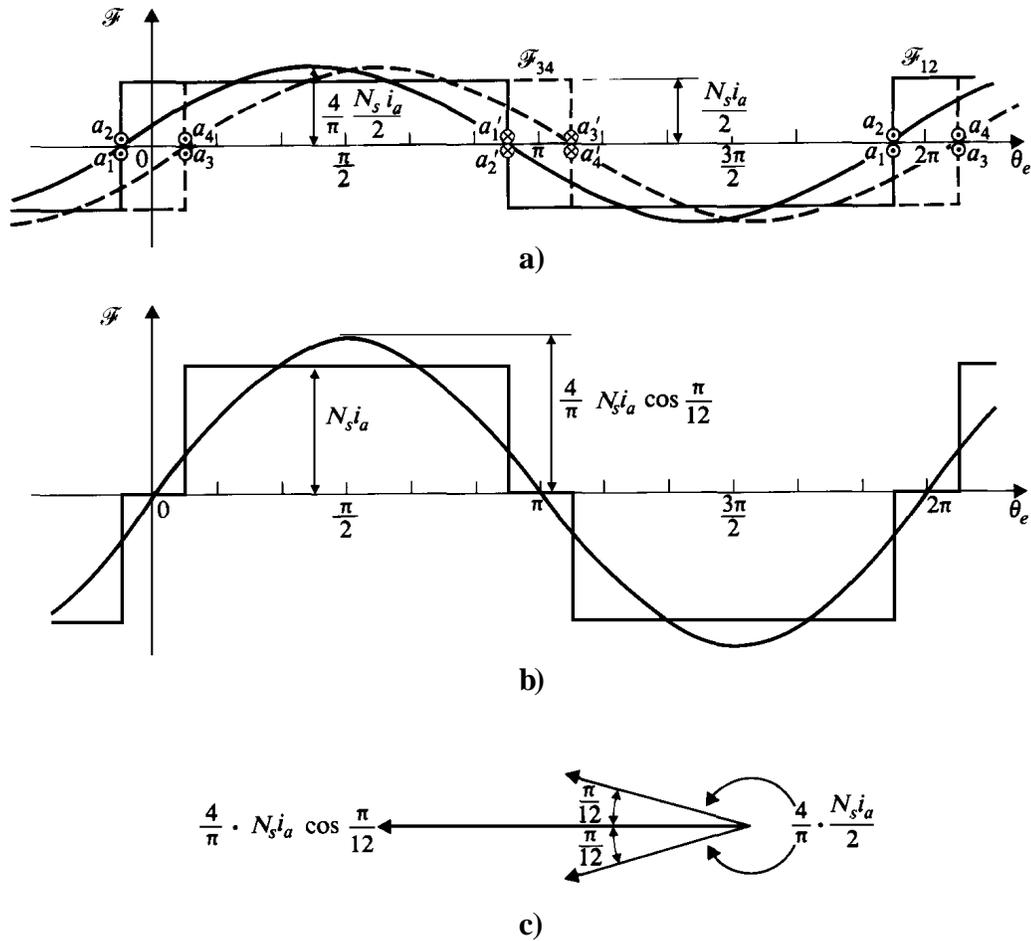


Fig.4.21.: Fuerza magnetomotriz de la fase a del devanado de doble capa de la figura 4.20.

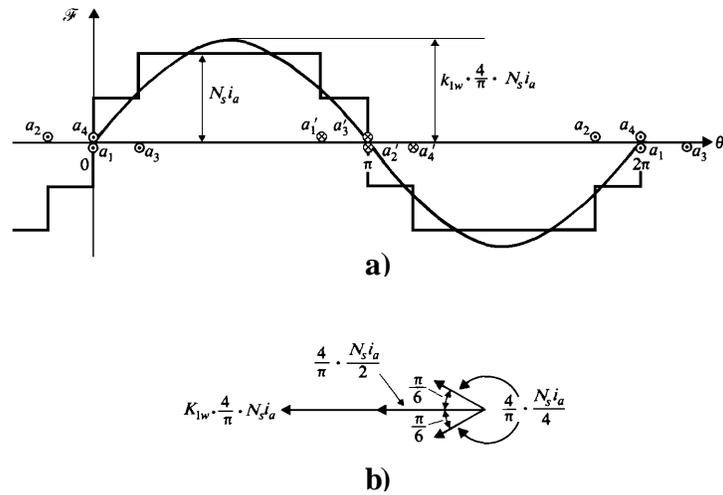


Fig.4.22.: Campo resultante del devanado de doble capa (fase "a") de la figura 4.20. con las capas corridas en una ranura.

4.1.2.5) El campo giratorio.

Campo giratorio de 2 polos:

$$FMM(\mathbf{q}, t) = FMM_{m\acute{a}x} \mathbf{x} \cos(\mathbf{q} - \mathbf{w}t) \tag{4.5}$$

$$B(\mathbf{q}, t) = B_{m\acute{a}x} \mathbf{x} \cos(\mathbf{q} - \mathbf{w}t) \tag{4.6}$$

Velocidad del campo:

$$v(t) = \frac{dq}{dt} = w \tag{4.7}$$

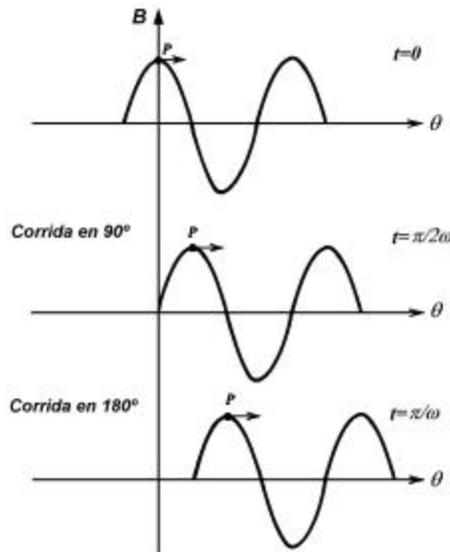


Fig.4.23.: Desplazamiento de un campo giratorio.

➔ *Campo giratorio de p pares de polos:*

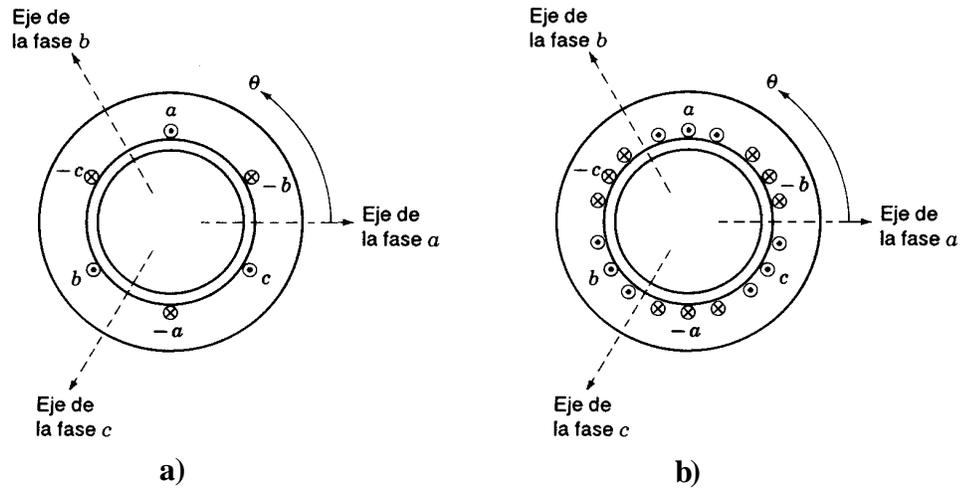


Fig.4.26.: Devanado de estator trifásico de dos polos con: **a)** 1 bobina por fase, **b)** 3 bobinas por fase.

Características del devanado trifásico:

- Las tres fases tienen igual número de vueltas.
- Ejes magnéticos desplazados 120° eléctricos.
- Corrientes desfasadas en 120°.

$$FMM_a(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t) \cos q \tag{4.14}$$

$$FMM_b = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t - 120) \cdot \cos(q - 120) \tag{4.15}$$

$$FMM_c = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \cos(\omega \cdot t - 240) \cdot \cos(q - 240) \tag{4.16}$$

$$FMM_{Re s} = FMM_a + FMM_b + FMM_c \tag{4.17}$$

$$FMM_{Re s} = \frac{3}{2} \cdot FMM_{M\acute{a}x} \cdot \cos(q - \omega \cdot t) \tag{4.18}$$

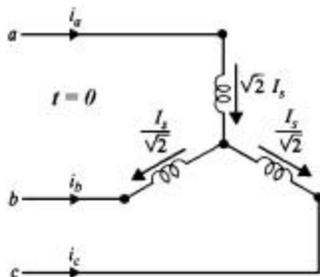


Fig.4.27.: Devanado trifásico en conexión estrella.

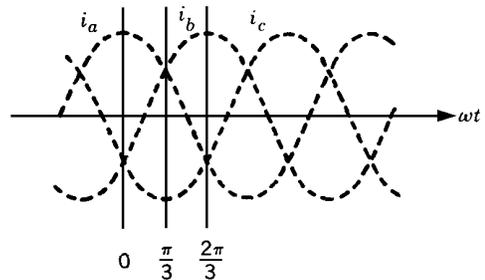


Fig.4.28.: Corrientes trifásicas.

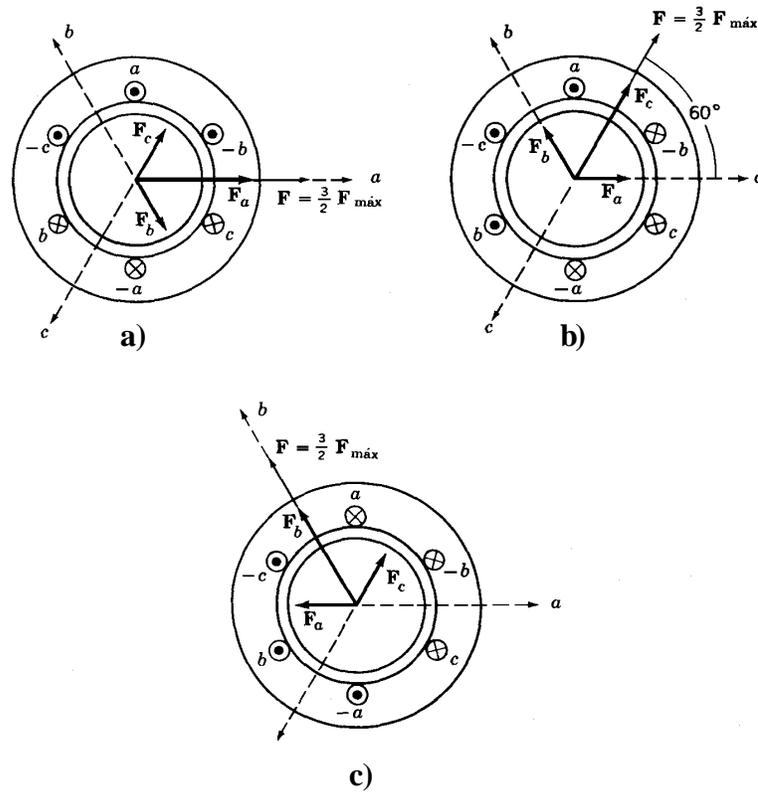


Fig.4.29.: Campo giratorio producido por el devanado trifásico.
 a) $\omega t=0$; b) $\omega t=\pi/3$ y c) $\omega t=2\pi/3$.

4.1.2.8) Construcción de un devanado trifásico.

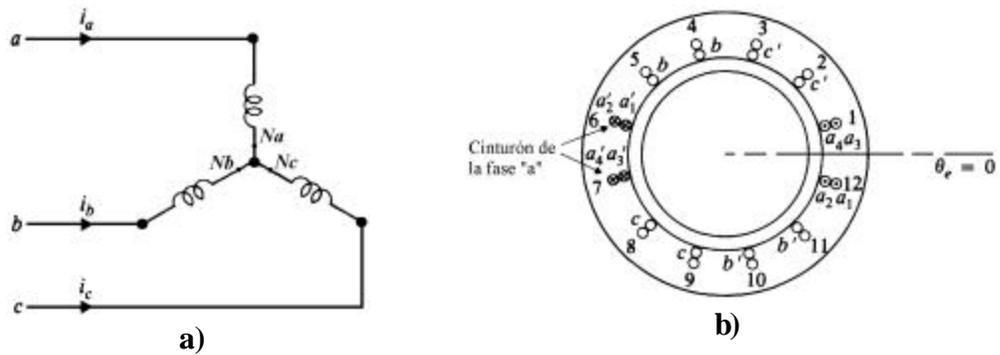


Fig.4.30.: Devanado trifásico de dos polos, doble capa, a) Conexión externa; b) Ranuras de estator.

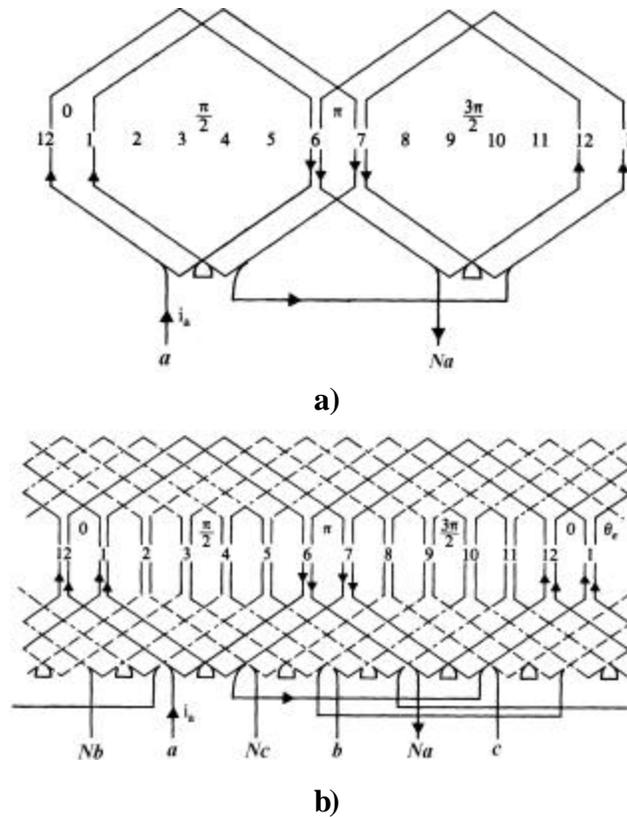


Fig.4.31.: Construcción del devanado de la figura 4.29: a) Una fase; b) Las tres fases.

4.1.3) Devanados de estator de máquinas de corriente continua.

- ➔ **Objetivo del devanado de estator:** producir un campo en el entrehierro, constante en el tiempo y fijo en el espacio.
- ➔ Devanado del estator = devanado de campo.

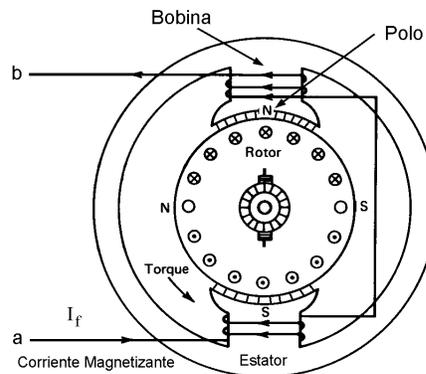


Fig.4.32.: Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de 2 polos.

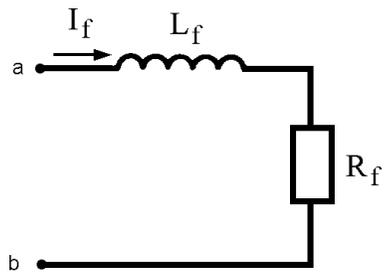


Fig.4.33.: Circuito equivalente del devanado de campo.

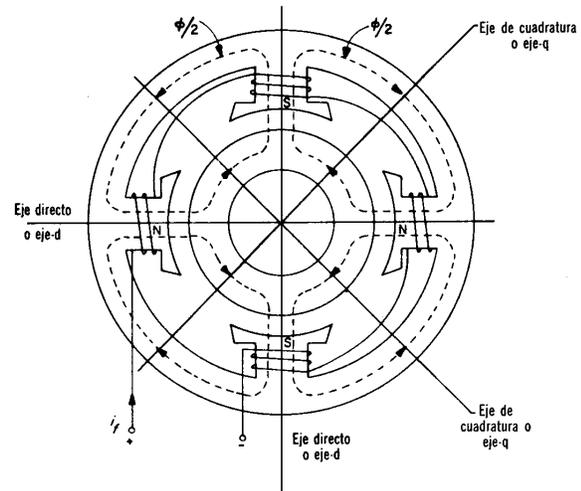


Fig.4.34.: Devanado de estator de 4 polos de una máquina de corriente continua.

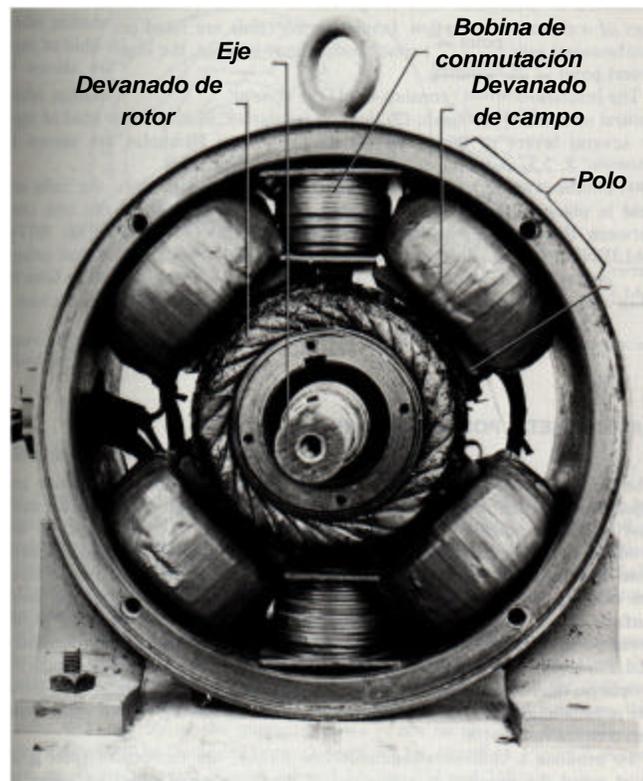


Fig.4.35.: Máquina de corriente continua de 4 polos.

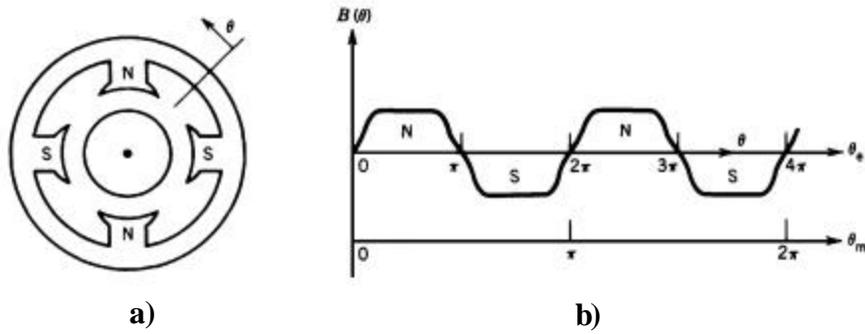


Fig.4.36.: Distribución de campo en un devanado de 4 polos.

4.1.4) Devanados de rotores

4.1.4.1) El rotor devanado con anillos deslizantes.

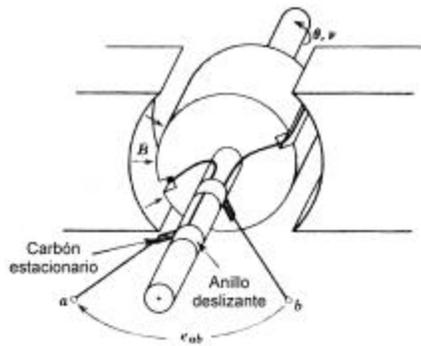


Fig.4.37.: Una bobina del rotor conectada por anillos deslizantes.

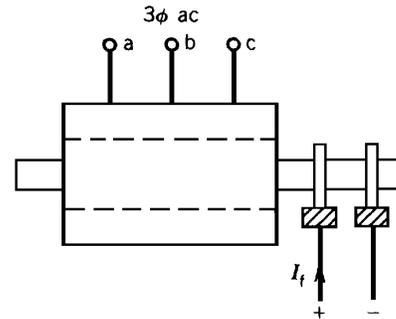


Fig.4.38.: Inyección de corriente al rotor mediante anillos deslizantes.

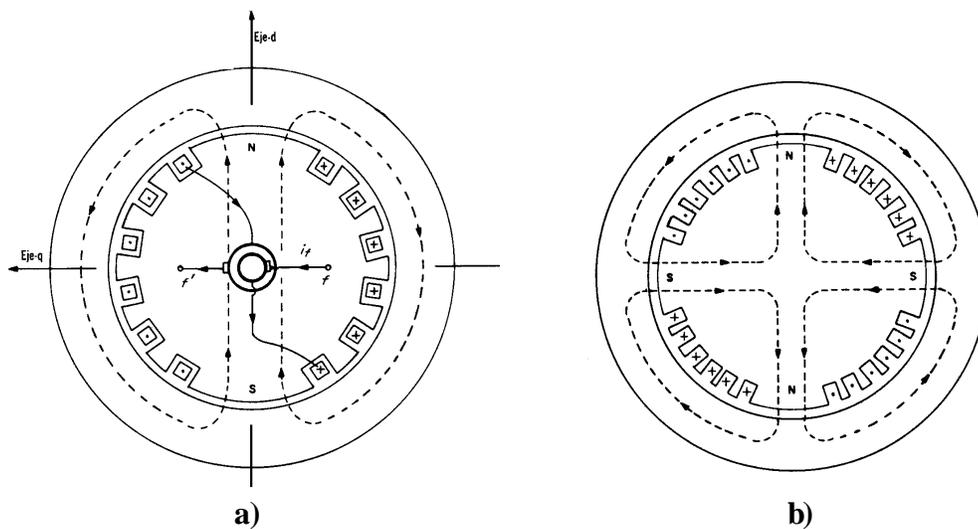


Fig.4.39.: Devanado monofásico alimentado por anillos deslizantes: **a)** de 2 polos; **b)** de 4 polos. Usado en máquinas sincrónicas.

➔ **Rotores de polos salientes.**

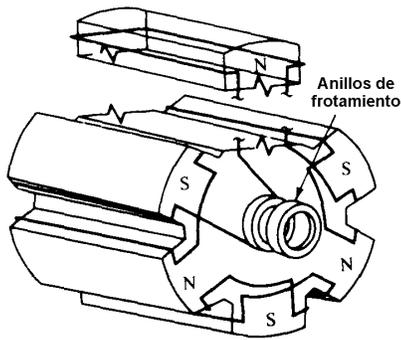


Fig.4.40.: Devanados de rotor de 6 polos.

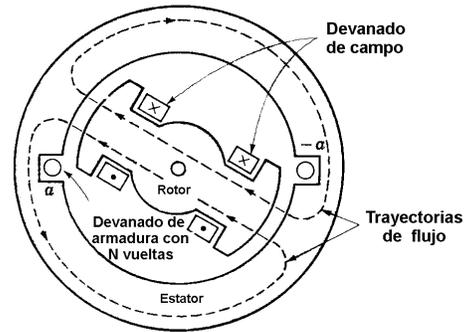


Fig.4.41.: Devanados de rotor de 2 polos.

➔ **Rotores de polos salientes.**

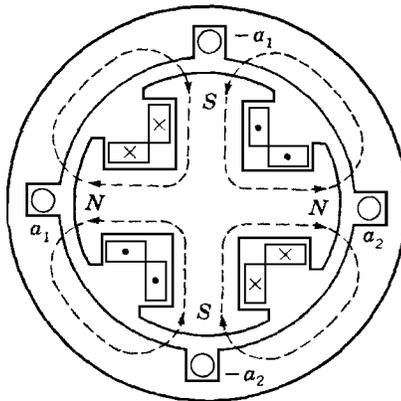


Fig.4.42.: Rotor de 4 polos.



Fig.4.43.: Sector de una máquina de 12 polos.

➔ **Devanado de rotor trifásico con anillos deslizantes.**

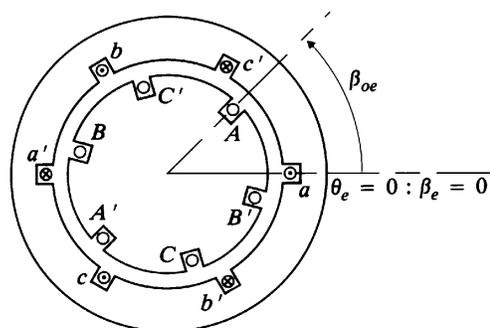


Fig.4.44.: Máquina con devanados trifásicos en el estator y en el rotor.

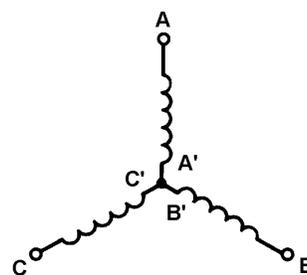


Fig.4.45.: Devanado trifásico del rotor.

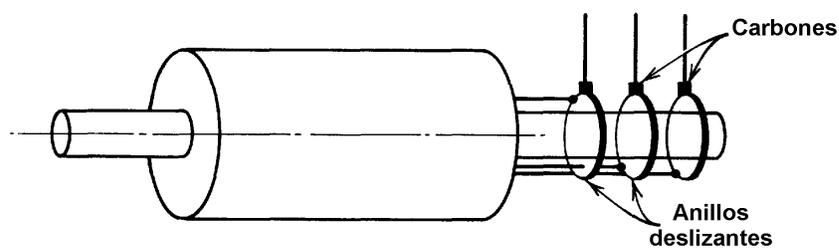


Fig.4.46.: Rotor devanado trifásico con sus tres anillos deslizantes.

4.1.4.2) El rotor jaula de ardilla.

No tiene contactos deslizantes.

Las corrientes son inducidas por el campo en el entrehierro.

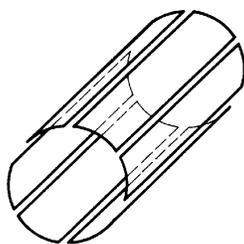


Fig.4.47.: Sobre el origen del rotor jaula de ardilla.

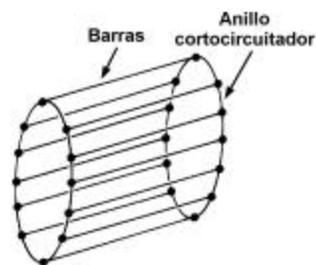
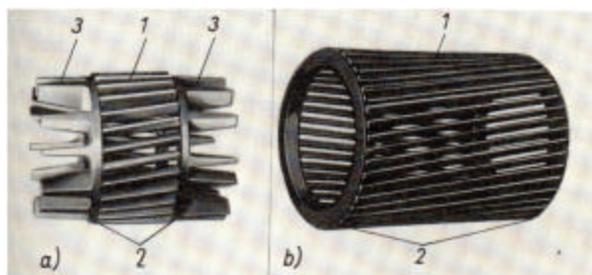


Fig.4.48.: Esquema básico de un rotor jaula de ardilla.



Fig.4.49.: Rotor jaula de ardilla. La jaula es de aluminio fundido.



Barras.
Anillos cortocircuitados.
Aletas de ventilación.

Fig.4.50.: Rotor jaula de ardilla. a) de aluminio fundido; b) de cobre soldado.

4.1.4.3) El devanado de rotor con conmutador.

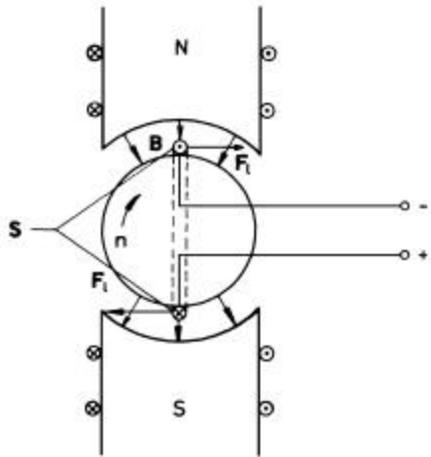


Fig.4.51.: Mecanismo de generación de fuerza (torque) en un motor de corriente continua.

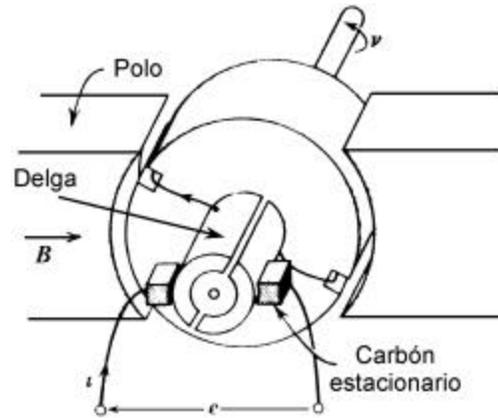


Fig.4.52.: Principio de una bobina de rotor alimentada por un conmutador de dos delgas.

- ➔ **Conmutador:** es el conjunto de delgas y carbones.
- ➔ **Objetivo del conmutador:** conmutar las corrientes por la bobina del rotor.

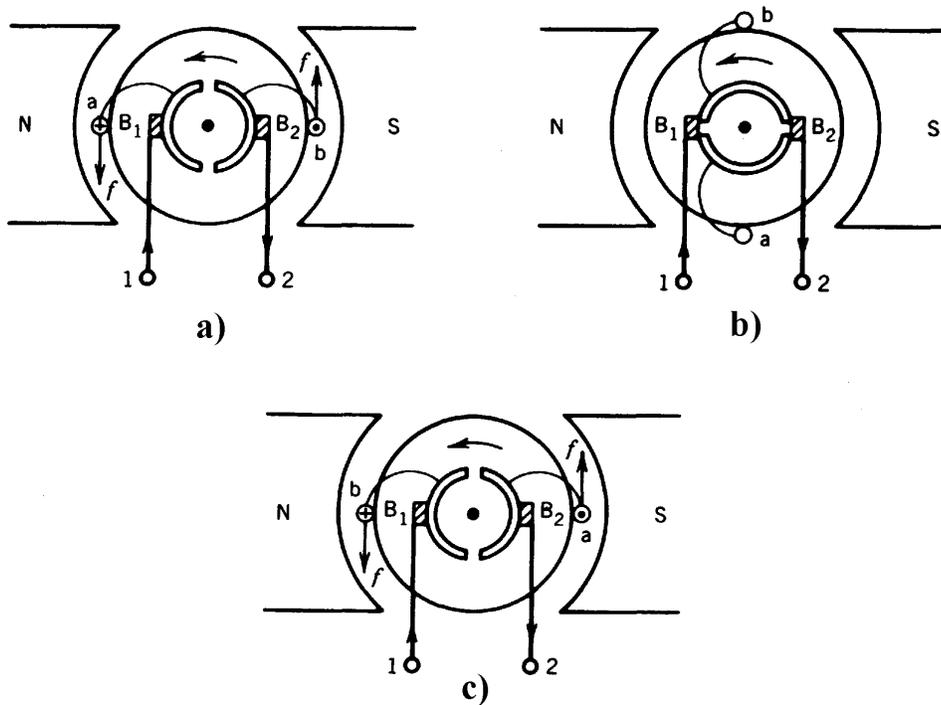


Fig.4.53.: Principio de funcionamiento de un conmutador de dos delgas.

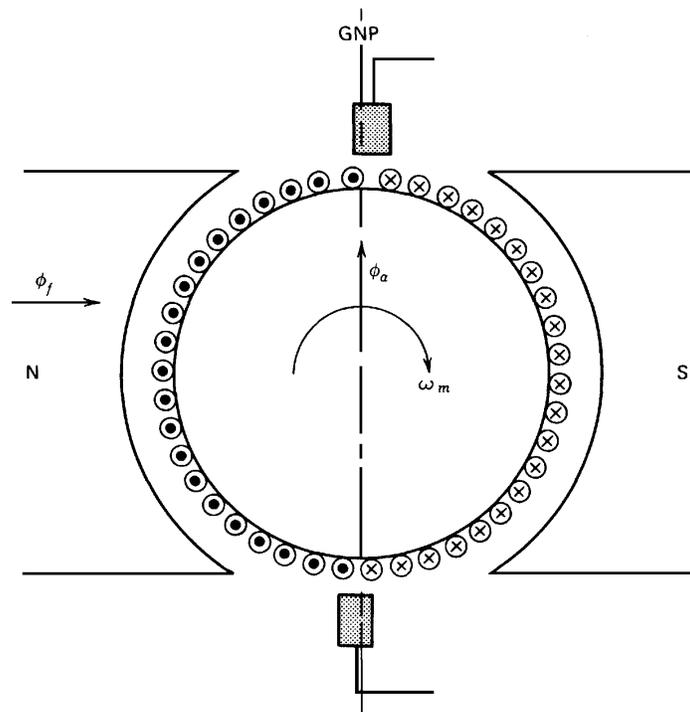


Fig.4.54.: Distribución de corriente en una máquina de corriente continua.

Objetivo: la distribución de corrientes por el rotor se mantiene constante con respecto al estator.

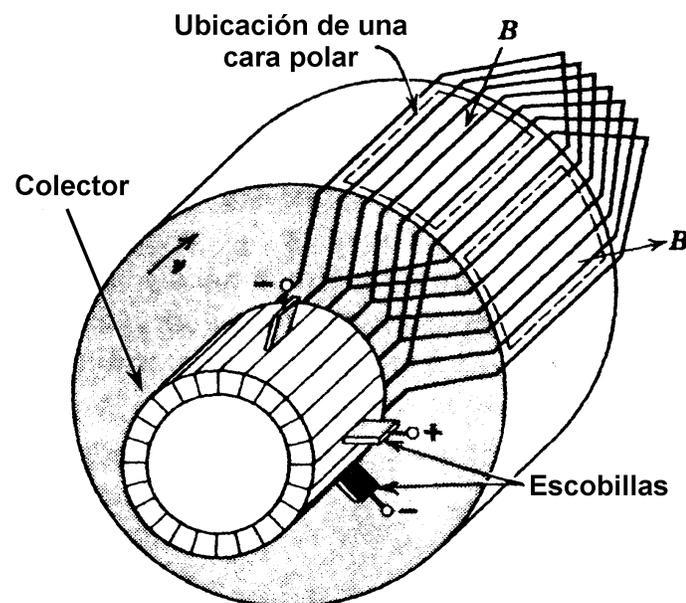


Fig.4.55.: Devanado de rotor de varias delgas y varios pares de polos.

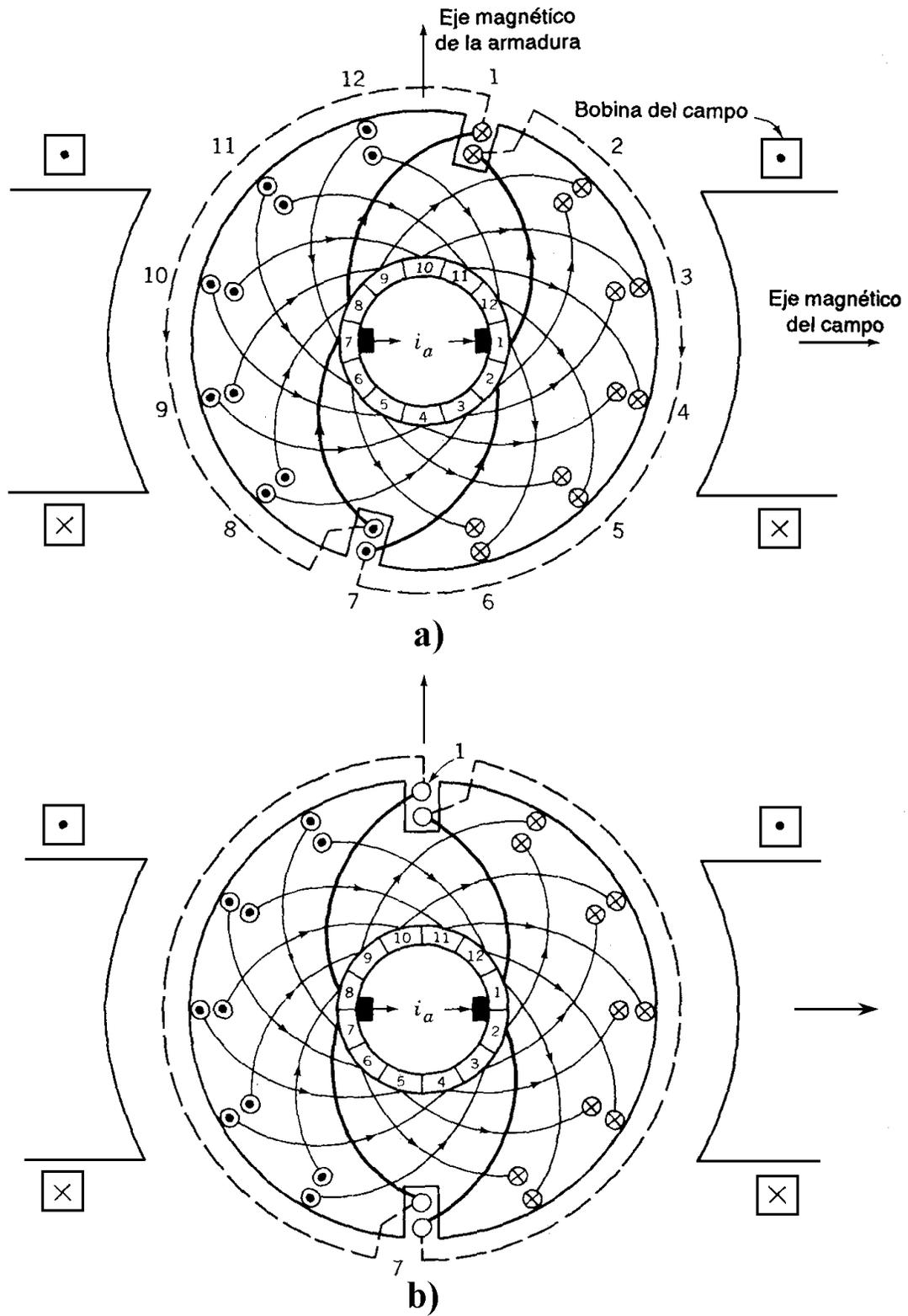
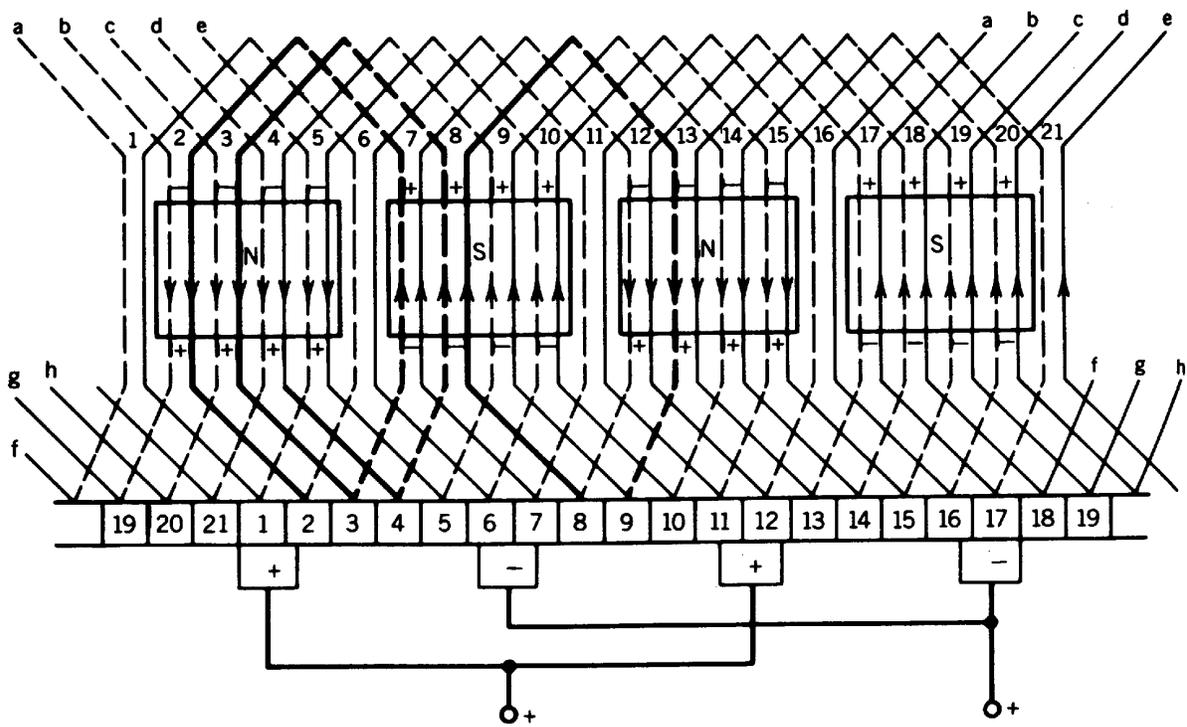


Fig.4.56. : Devanado de rotor con conmutador.(2 polos).



a)

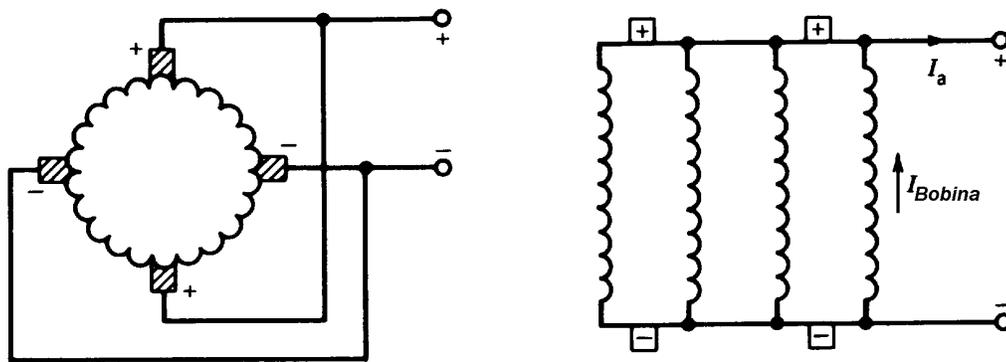


Fig.4.57.: Devanado de rotor con conmutador de 4 polos:
a) conexionado; **b)** circuitos equivalentes.

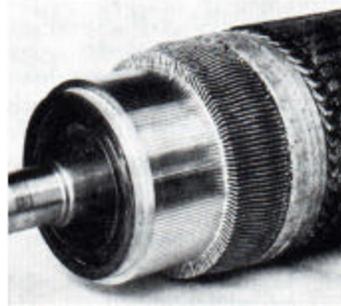


Fig.4.58.: Vista de un rotor con colector.

4.2) TENSIONES INDUCIDAS EN DEVANADOS DE MÁQUINAS ROTATORIAS.

4.2.1) Tensiones inducidas en la bobina elemental.

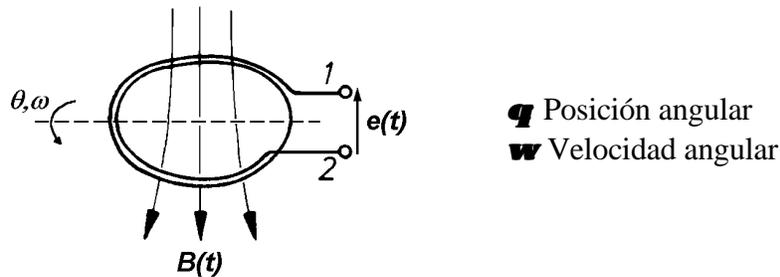


Fig.4.59.: Bobina en un campo magnético.

$$e(t) = \frac{d\Psi}{dt}(\theta, t) = \frac{\partial\Psi}{\partial t} + \frac{\partial\Psi}{\partial\theta} \cdot \omega \tag{4.19}$$

Tensión de transformación

Tensión de rotación

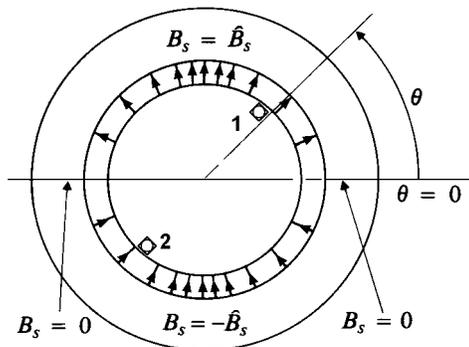


Fig.4.60.: Bobina del rotor en campo magnético producido por el estator.

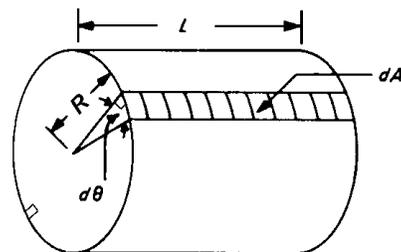


Fig.4.61.: Dimensiones del rotor.

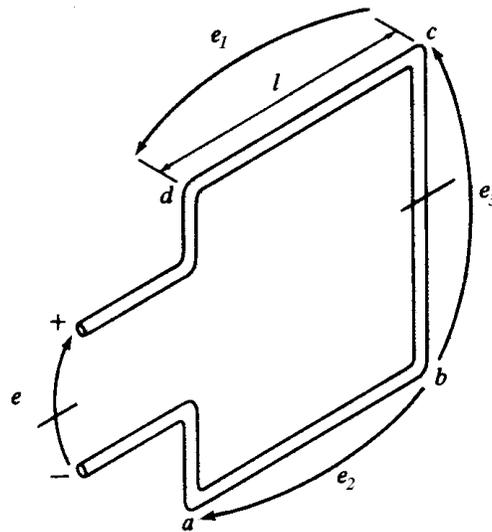


Fig.4.62.: Tensiones en la bobina elemental.

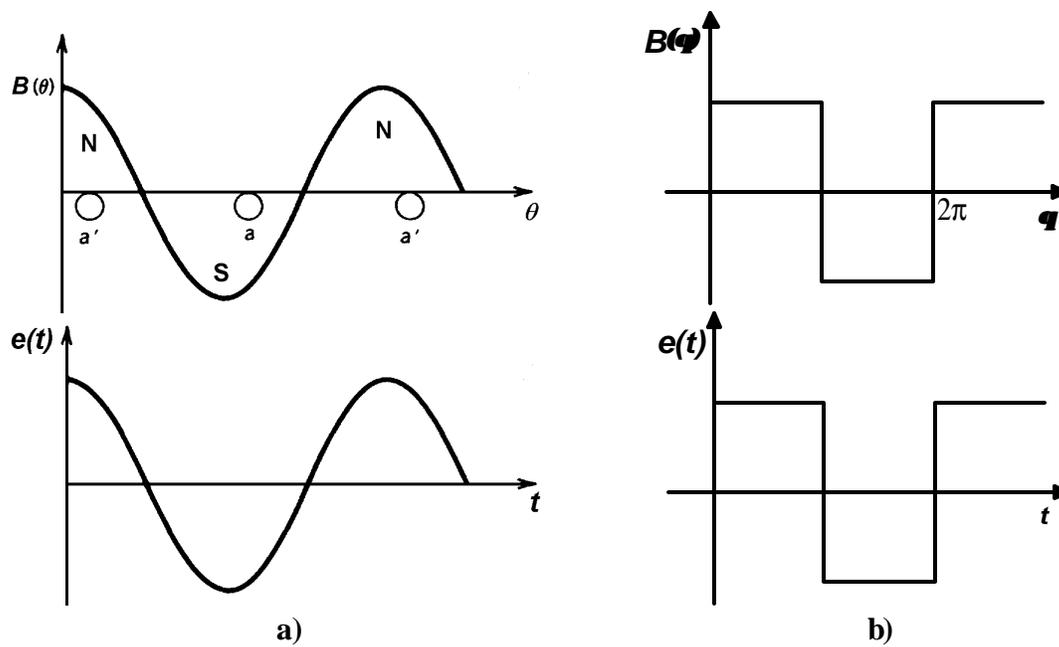


Fig.4.63.: Tensión inducida en una bobina que gira a velocidad fija con campo: a) sinusoidal; b) rectangular.

4.2.2) Tensiones inducidas en bobinas desplazadas geoméricamente.

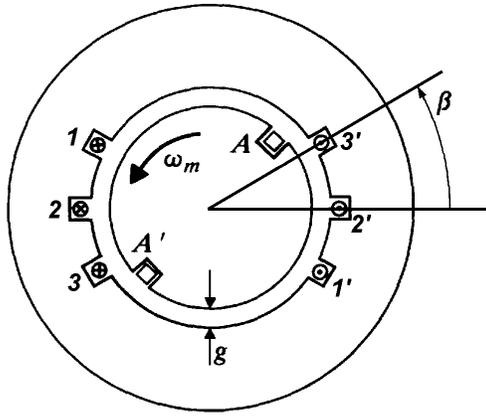


Fig.4.64.: Bobinas de estator desplazadas en ángulo β .

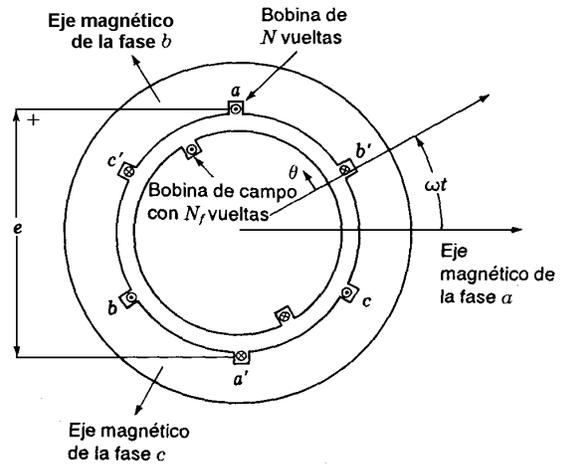


Fig.4.65.: Bobinas de estator desplazadas en 120° .

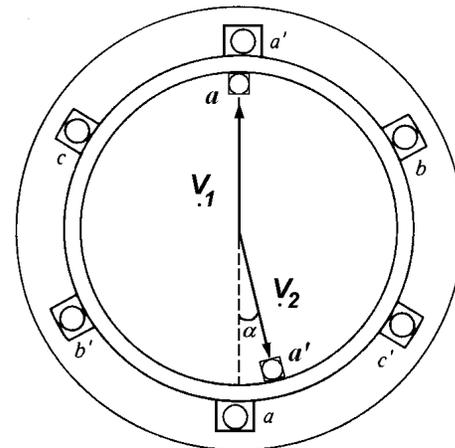
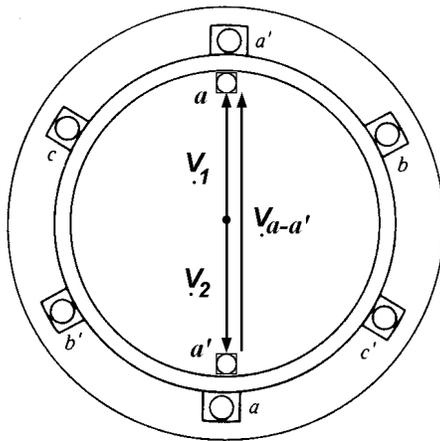


Fig.4.66.: Bobina con: a) paso polar; b) paso acortado

4.2.3) Tensiones inducidas en un devanado distribuido.

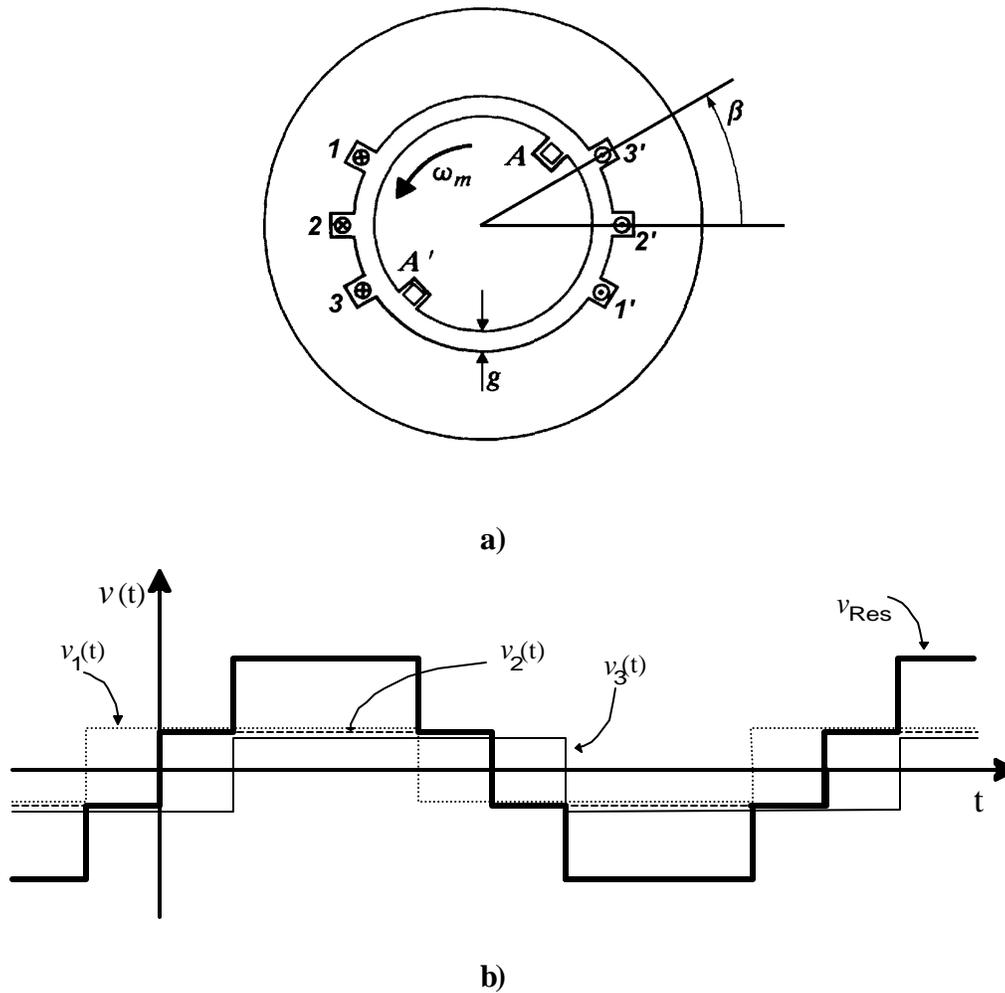


Fig.4.67.: Devanado distribuido en 6 ranuras: **a)** disposición; **b)** tensiones inducidas.

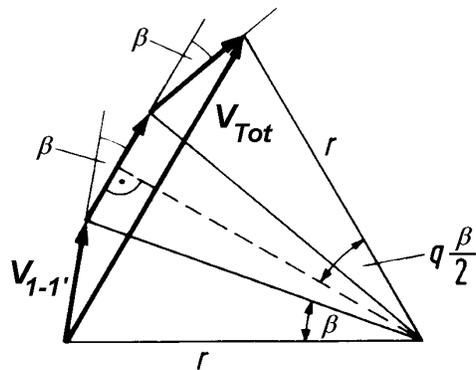


Fig.4.68.: Tensión resultante en un devanado distribuido en 6 ranuras.

4.2.4) Tensiones inducidas en el rotor de una máquina de corriente continua (Devanado con conmutador).

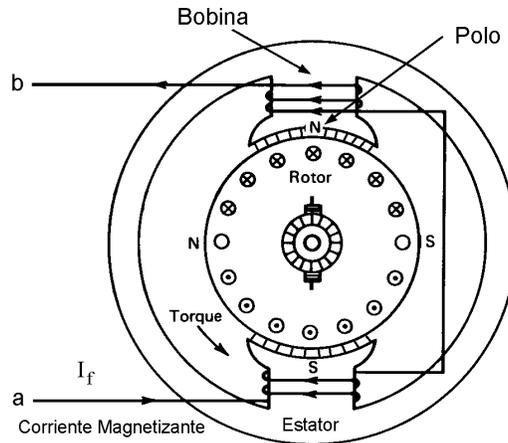


Fig.4.69.: Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de 2 polos.

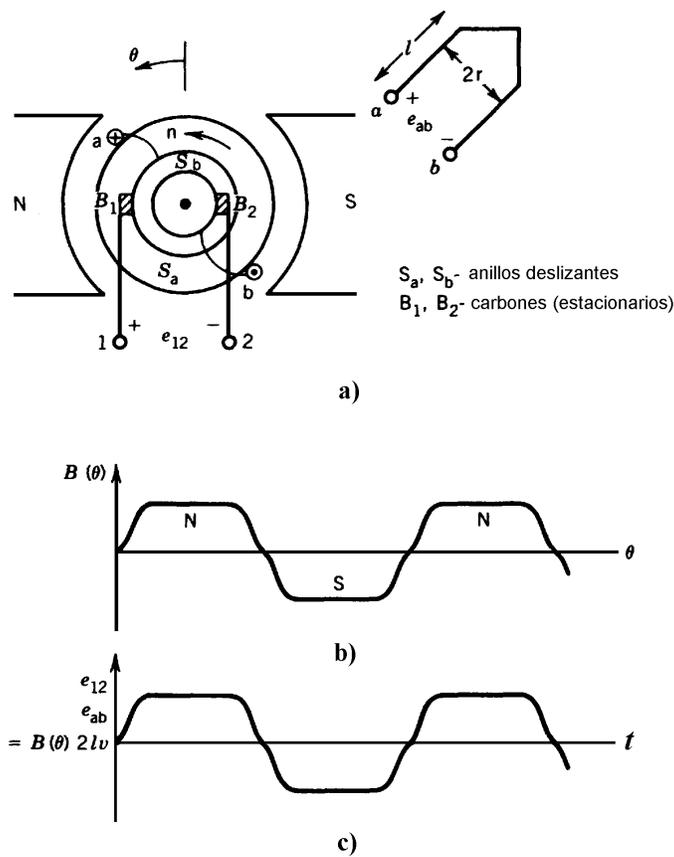


Fig.4.70.: Máquina de corriente continua elemental (con una bobina en el rotor y anillos deslizantes): **a)** disposición de la bobina; **b)** campo; **c)** tensión inducida.

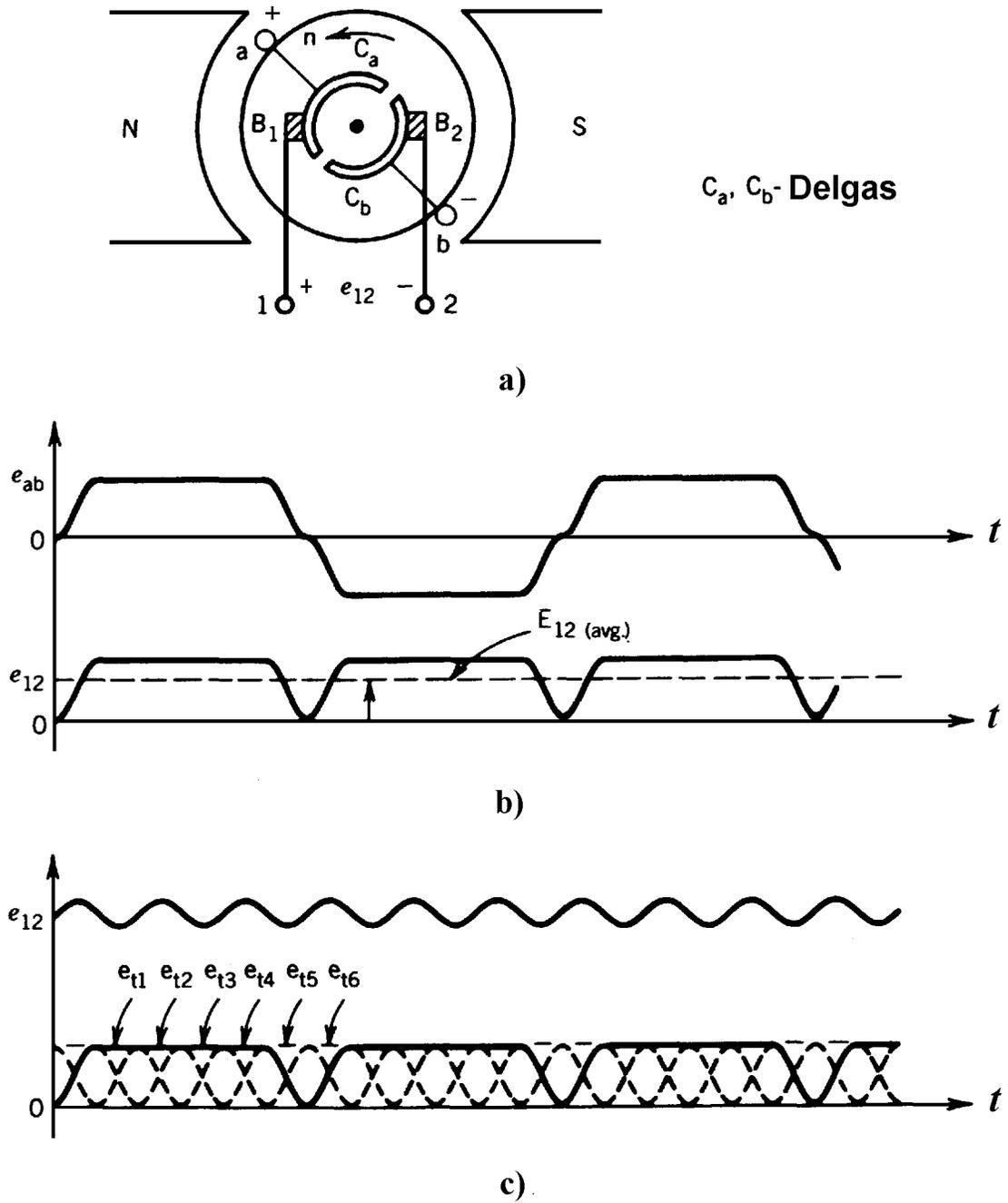


Fig.4.71.: Máquina de corriente continua elemental (con 1 bobina en el rotor y un conmutador de 2 delgas): **a)** disposición de la bobina; **b)** y **c)** tensiones inducidas.