



Capítulo 4: DEVANADOS

Universidad Técnica Federico Santa María

ELO 281 Sistemas Electromecánicos

J. Pontt O.

Felipe Leiva Cruz

4.1 Campo magnético producido en máquinas rotatorias

4.1.1 Estructura de las máquinas rotatorias

Todas las máquinas rotatorias están compuestas por uno o varios circuitos eléctricos acoplados magnéticamente. Las máquinas eléctricas constan de una parte fija o **estator** y una parte móvil, que en las máquinas rotativas se llama **rotor**.

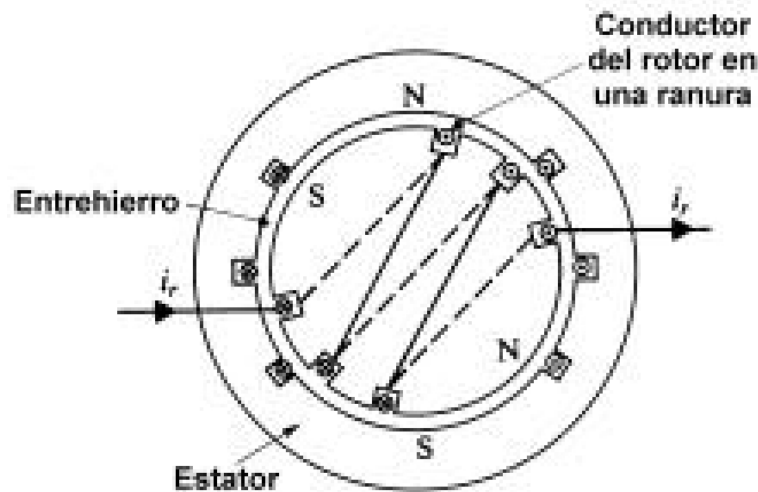


Fig.4.2.: Componentes básicas de una máquina rotatoria

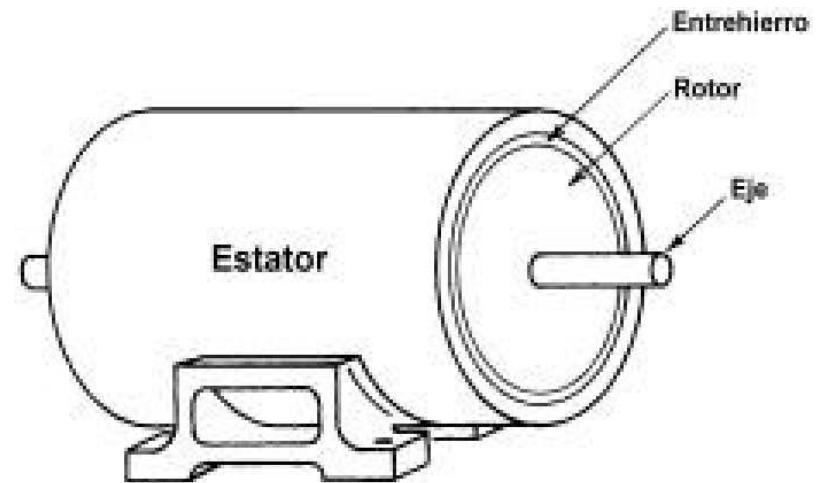


Fig.4.1.: Partes básicas de una máquina rotatoria

Entre el rotor y el estator existe un espacio de aire que se denomina **entrehierro**, que además de entregar la holgura suficiente para permitir el giro libre del rotor, es la zona del espacio donde tiene realmente lugar el proceso de conversión electromagnética.

El estator está constituido por chapas magnéticas apiladas o material ferromagnético macizo, y va alojado en una carcasa rígida que lo protege y permite su fijación a la base

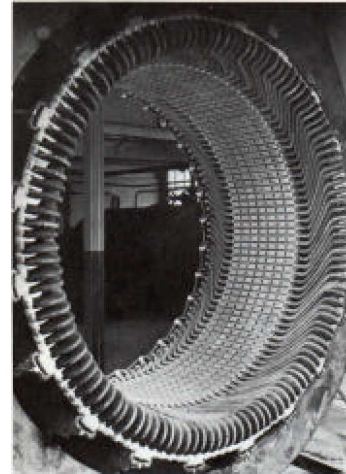
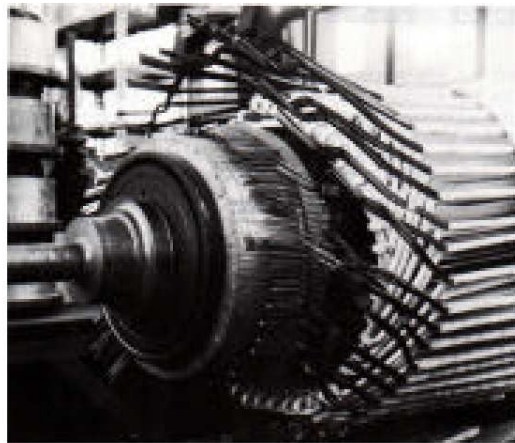
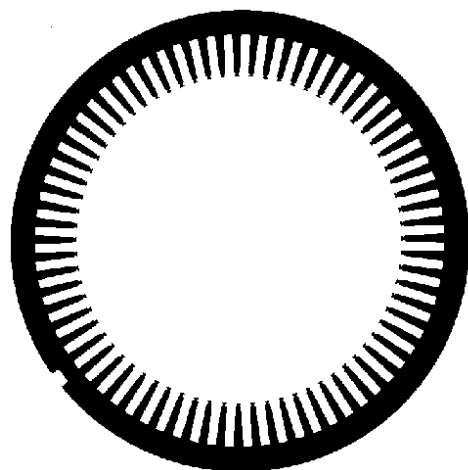


Fig.4.3. Devanado de estator de una máquina polifásica

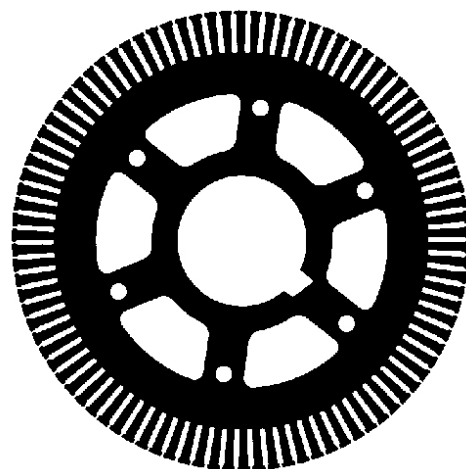


El rotor también está constituido por chapas de material ferromagnético, y va montado sobre un eje que constituye el elemento resistente, encargado de transmitir el par al sistema mecánico exterior

Fig.4.4. Devanado de rotor en proceso de montaje



a)



b)

Fig.4.5.: Chapas (láminas) de fierro de un motor de inducción. **a)** estator, **b)** rotor.



Fig.4.6.: Montaje de láminas del estator en un generador sincrónico.

4.1.2 Devanados de estator de máquinas de corriente alterna

Para las máquinas de corriente alterna es de gran importancia que la distribución espacial del campo en el entrehierro sea de tipo senoidal. Por lo tanto, el objetivo de las bobinas es producir un campo sinusoidal de la forma:

$$B(\theta) = B \cdot \text{Sen}(\theta)$$

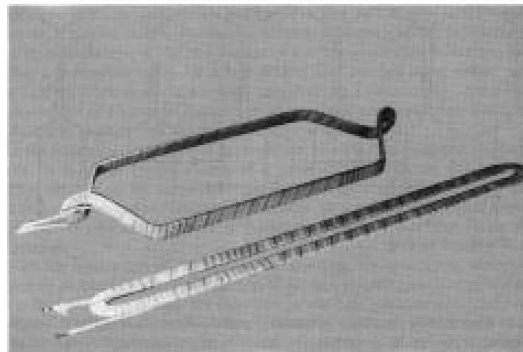


Fig.4.7.: Bobina de varias vueltas para un devanado de corriente alterna

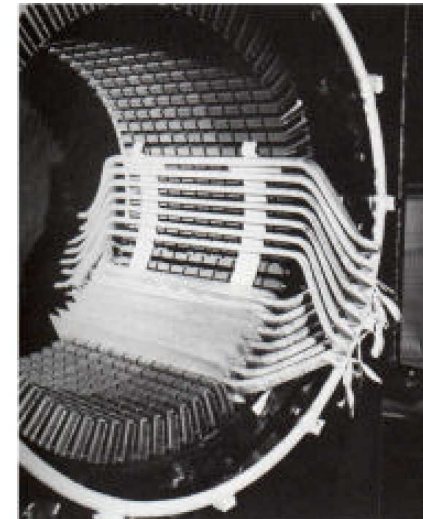


Fig.4.8.: Algunas bobinas montadas en las ranuras.

4.1.2.1 La bobina elemental

En la figura 4.9 se puede apreciar el campo producido por una bobina diametral con un par de polos, así como la trayectoria en que se realiza la integración para el cálculo del campo.

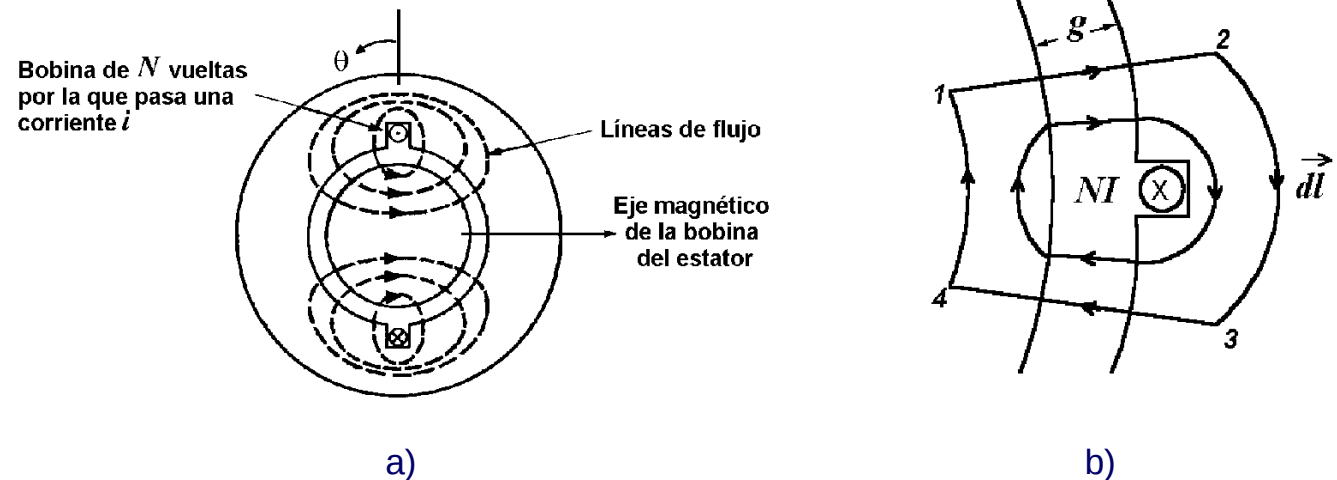


Fig.4.9.: a) Bobina concentrada elemental, b) Trayectoria de integración.

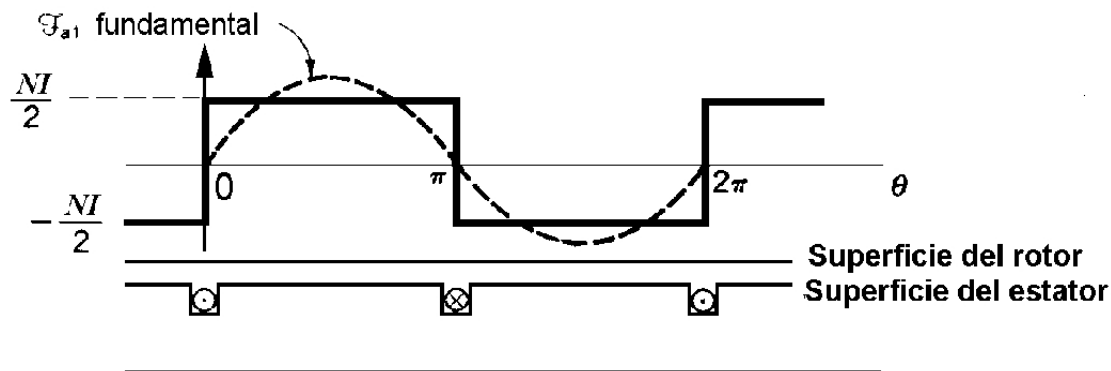


Fig.4.10.: Fuerza magnetomotriz (campo magnético) de una bobina concentrada en dos ranuras.

En la figura 4.10 es posible observar la forma de onda que adopta la caída de tensión en el entrehierro, producido por una bobina con dos ranuras.

El campo magnético producido por la bobina elemental esta dado por la siguiente relación:

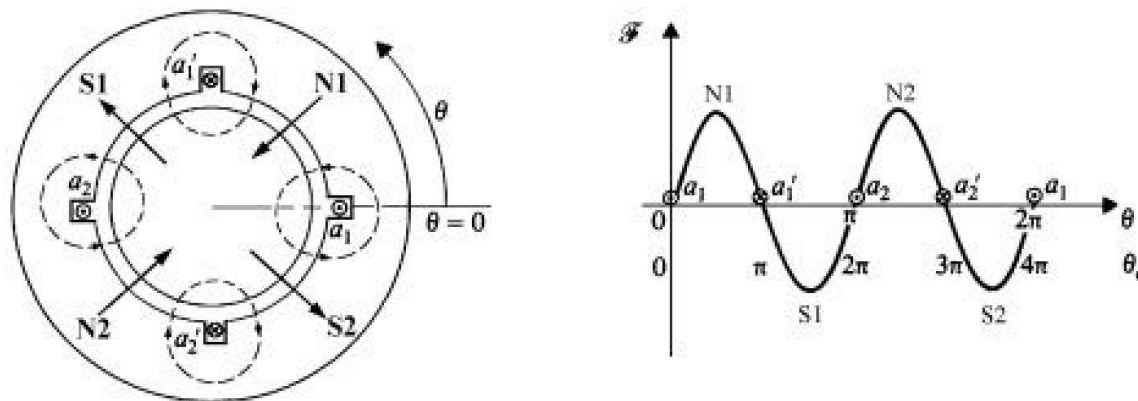
$$B(\theta) = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{\pi \cdot 2 \cdot g} \left[\text{Sen}(\theta) + \frac{1}{3} \cdot \text{Sen}(3\theta) + \frac{1}{5} \cdot \text{Sen}(5\theta) + \frac{1}{7} \cdot \text{Sen}(7\theta) + \dots \right]$$

De la misma forma, se define la fuerza magnetomotriz como:

$$F(\theta) = \frac{4 \cdot N \cdot I}{\pi \cdot 2} \left[\text{Sen}(\theta) + \frac{1}{3} \cdot \text{Sen}(3\theta) + \frac{1}{5} \cdot \text{Sen}(5\theta) + \frac{1}{7} \cdot \text{Sen}(7\theta) + \dots \right]$$

4.1.2.2 El número de pares de polo (p)

En una máquina eléctrica en general, el número de pares de polo puede ser muy superior a un solo par, lo que permite la obtención de distintas distribuciones de campo magnético



En la figura 4.11 se puede apreciar la distribución de fuerza electromotriz para una máquina de 4 polos.

Fig.4.11.: Distribución de f.m.m. de 4 polos (p=2)

Dada la distribución de los pares, a un período completo en sentido geométrico, le corresponden p períodos completos en el sentido electromagnético. Por lo tanto, es posible establecer una relación entre los ángulos geométricos y los ángulos eléctricos. Debido a que los fenómenos que ocurren en un par de polos se repetirán idénticamente p veces, se tiene la siguiente relación:

$$\theta_e = p \cdot \theta_g$$

4.1.2.3 Devanados distribuidos

Los devanados distribuidos corresponden a un procedimiento para lograr una distribución espacial del campo magnético en el entrehierro en forma senoidal. Para ello, las bobinas de una misma fase se sitúan desplazadas unas de otras por intervalos regulares.

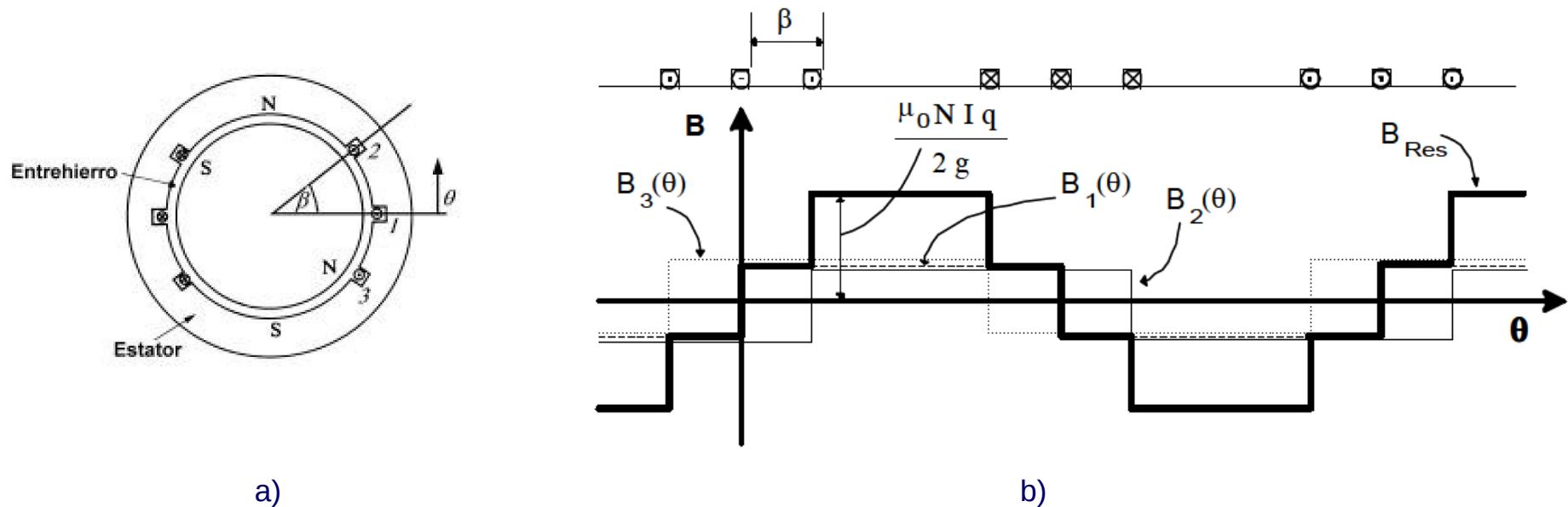


Fig.4.12.: a) Devanado de 3 bobinas. b) Campo resultante en un devanado de 3 bobinas

En la figura 4.12 se presenta un devanado de 3 bobinas, desplazadas en un ángulo beta, y el campo que resulta de dicho desplazamiento.

A continuación se presentan ejemplos de distintos devanados y la forma de onda del campo producido. El valor de p representa el número de pares de polo, y el valor de q corresponde al número de ranuras por polo.

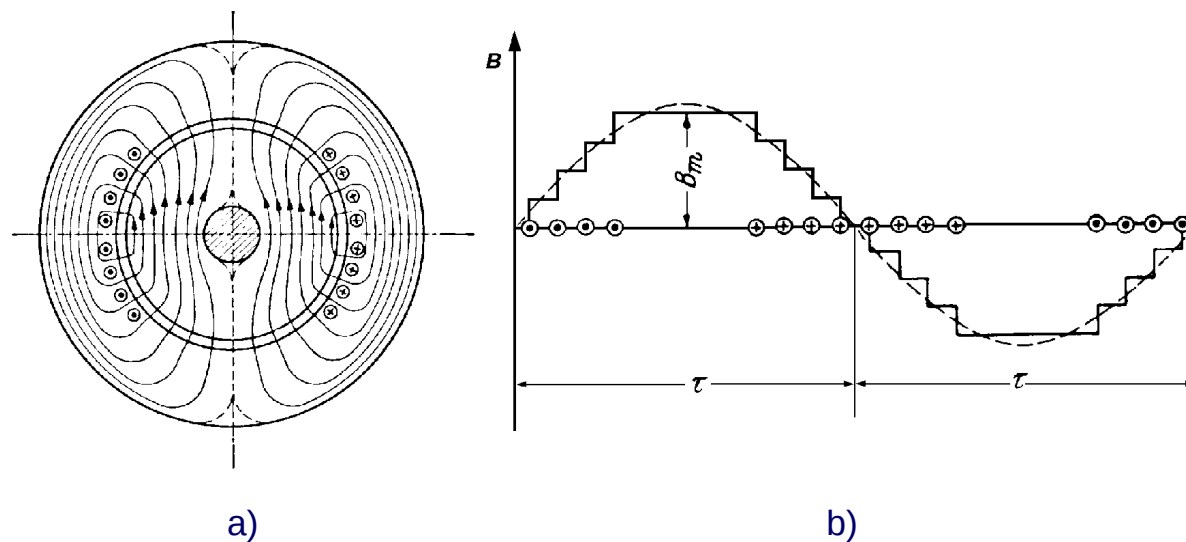


Fig.4.13: a) Devanado monofásico distribuido, $p=1$, $q=8$. b) Campo magnético resultante

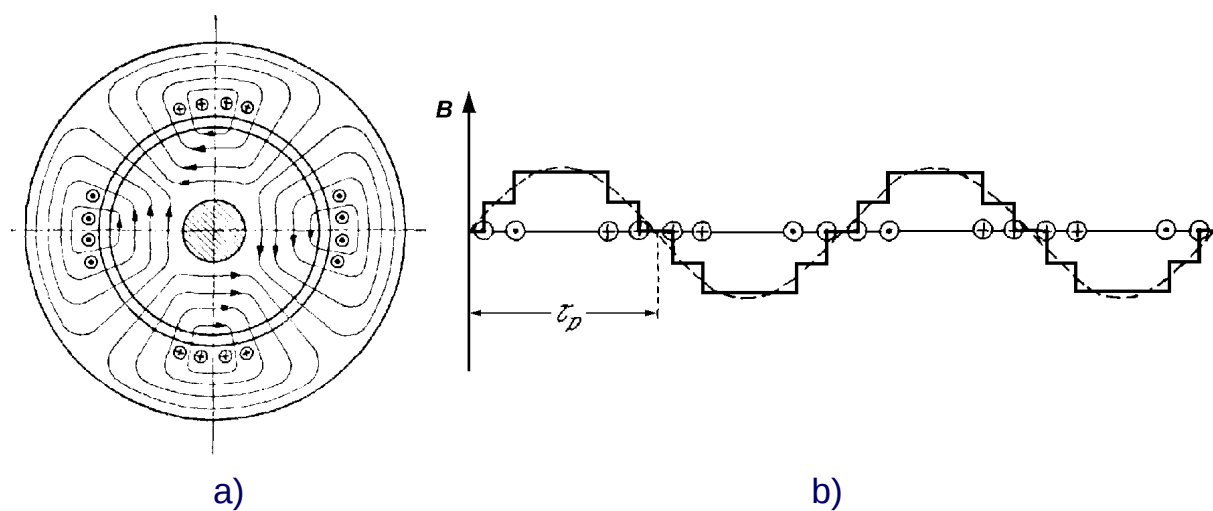
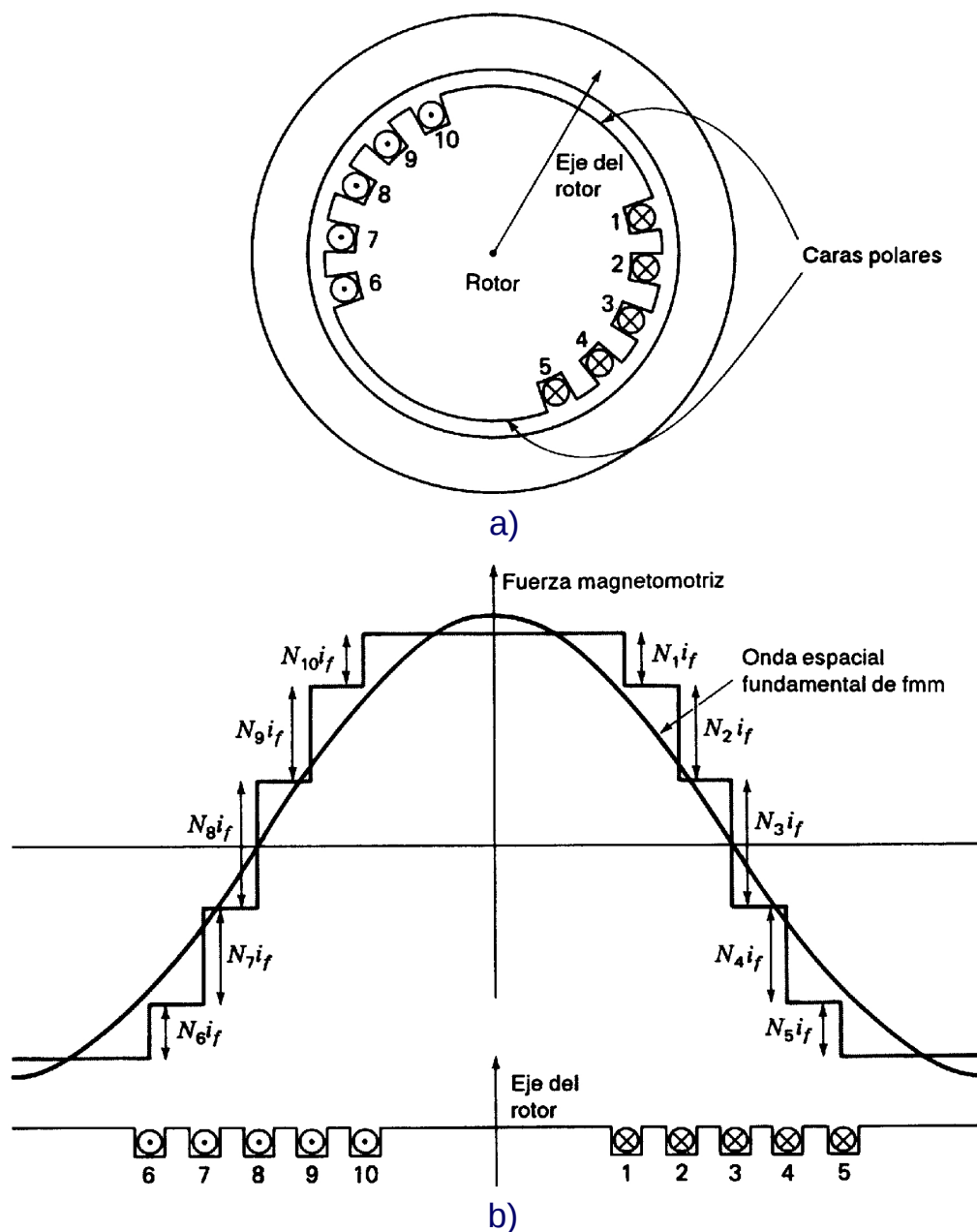


Fig.4.14: a) Devanado monofásico distribuido, $p=2$, $q=4$. b) Campo magnético resultante



La figura 4.15 muestra la manera en que se obtiene la distribución de fuerza magnetomotriz en el entrehierro, superponiendo las ondas creadas por cada una de las cinco bobinas elementales. El resultado es la forma de onda escalonada que se muestra, en la que cada discontinuidad tiene por amplitud el número de amperes-conductores situados en dicha posición, es decir, $N \cdot I$.

Fig.4.15: a) Devanado distribuido en un rotor cilíndrico. b) Distribución de la fuerza magnetomotriz

4.1.2.4 Devanados de doble capa

Un devanado de doble capa es aquel que presenta dos lados activos de bobina por cada ranura

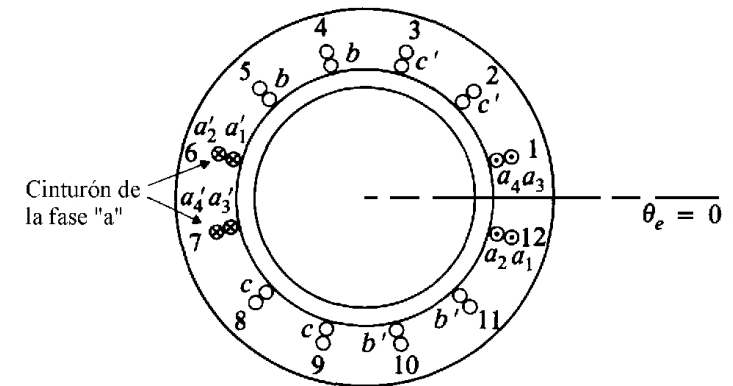
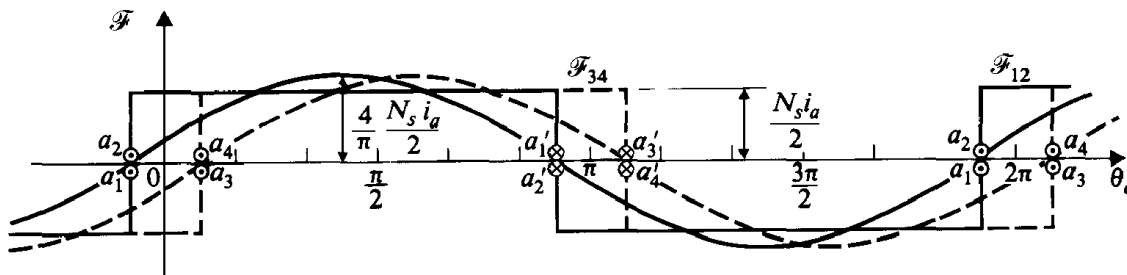


Fig.4.16.: Devanado trifásico de doble capa

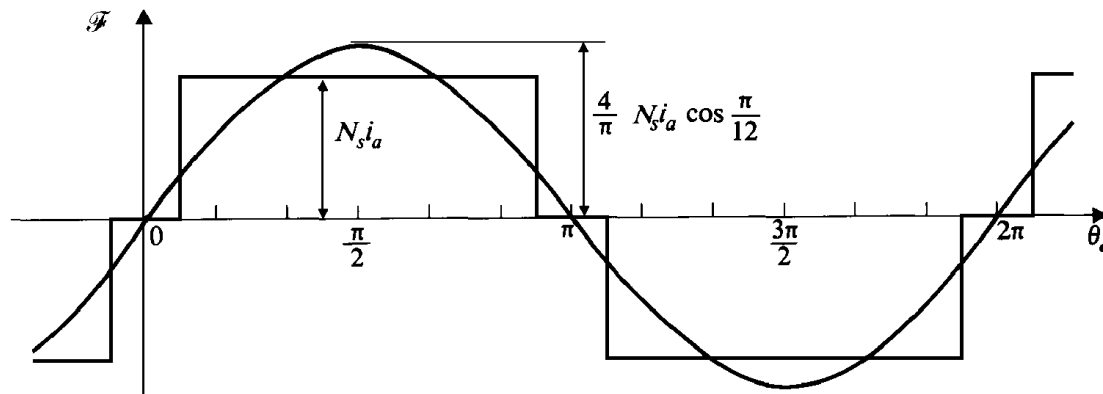
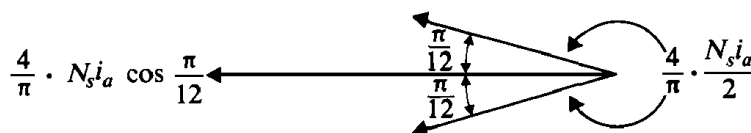


Fig.4.17.: Fuerza magnetomotriz de la fase a del devanado de doble capa de la figura 4.16.



4.1.2.5 El campo giratorio

Para obtener un campo magnético de configuración espacial fija y que gire en el espacio, se debe alimentar (por medios externos) el devanado del rotor, haciéndolo girar con velocidad angular constante. Para 2 polos, se tienen las siguientes relaciones:

$$F(\theta, t) = F_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\theta - \omega t)$$

$$B(\theta, t) = B_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\theta - \omega t)$$

Donde la velocidad del campo está dada por:

$$v(t) = \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

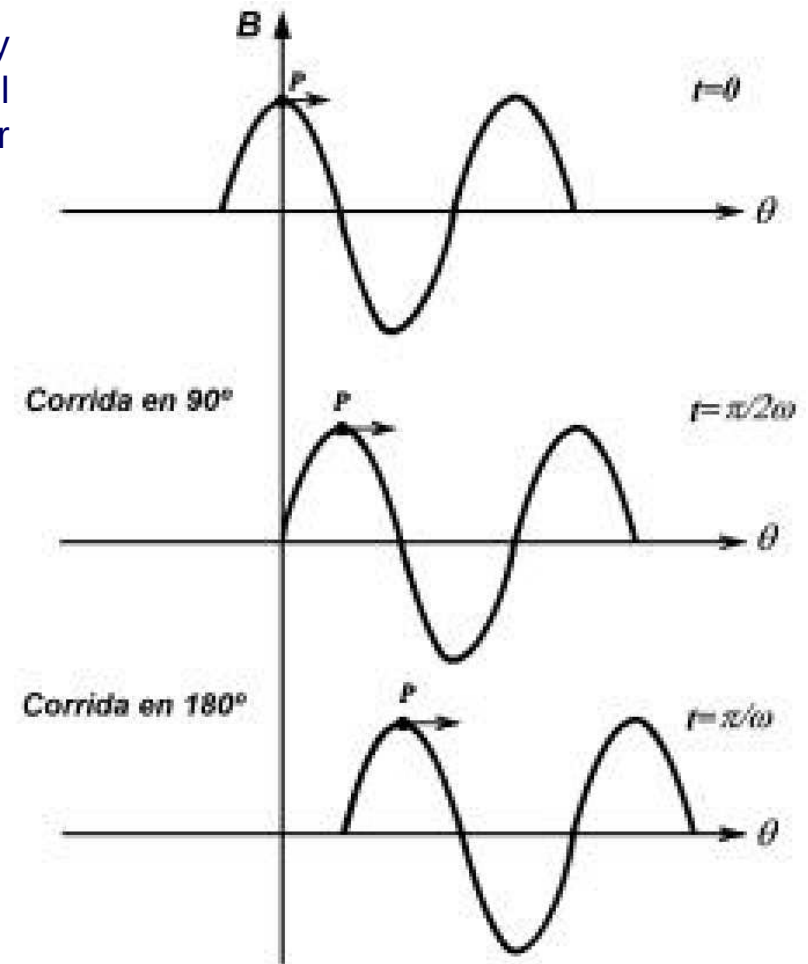


Fig.4.18.: Desplazamiento de un campo giratorio.

Es posible generalizar el resultado anterior para máquinas que posean un número p de pares de polos. Se tienen las siguientes relaciones:

$$F(\theta, t) = F_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(p\theta - \omega t)$$

$$B(\theta, t) = B_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(p\theta - \omega t)$$

Donde la velocidad del campo está dada por:

$$v(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{p}$$

4.1.2.6 Devanado monofásico alimentado con corriente alterna

Todos los análisis anteriores se realizaron basados en el supuesto de que la corriente que recorre los conductores es continua y de valor constante. Ahora, es evidente que si la corriente toma distintos valores, la amplitud de la onda de la f.m.m y de campo magnético variarían, manteniendo constante la forma y posición en el espacio. Para ello, se debe sustituir la corriente I constante por una función en el tiempo $i(t)$. Tomando esto en cuenta, se deducen las siguientes relaciones:

$$i(t) = I_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\omega t)$$

$$FMM(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\omega t) \cdot \text{Cos}(\theta)$$

$$FMM = \frac{FMM_{m\acute{a}x}}{2} \cdot [\text{Cos}(\theta - \omega t) + \text{Cos}(\theta + \omega t)]$$

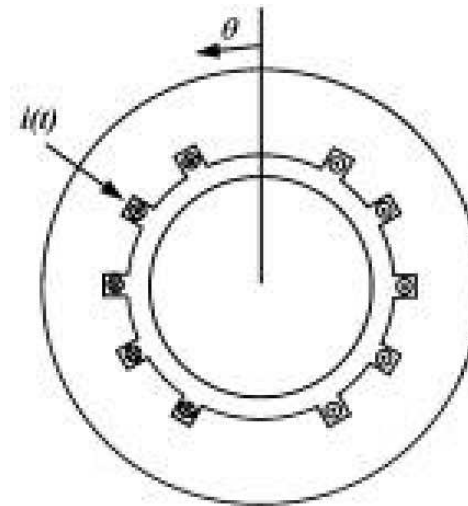


Fig.4.19.: Devanado monofásico distribuido

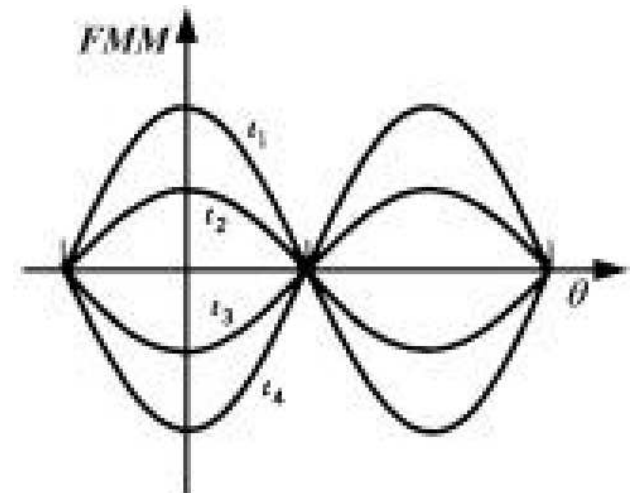


Fig.4.20.: Campo de un devanado monofásico alimentado con corriente alterna

4.1.2.7 El devanado trifásico

Un devanado trifásico posee las siguientes características:

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

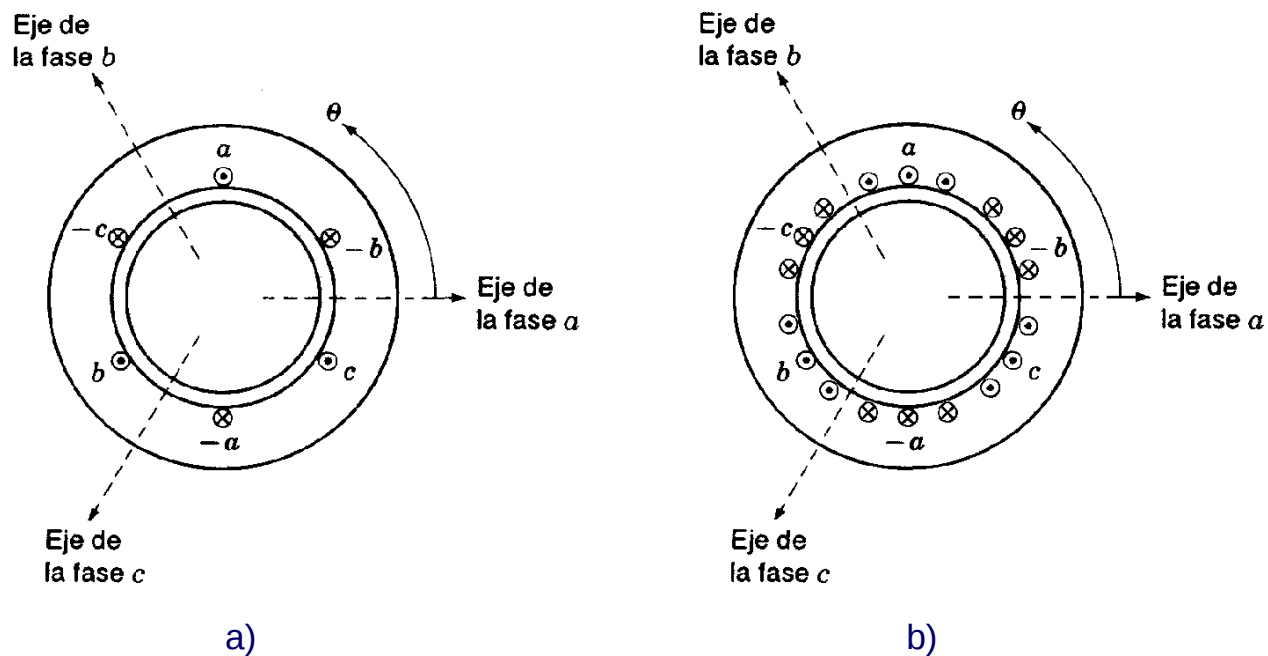


Fig.4.21. Devanado de estator trifásico de dos polos con **a)** 1 bobina por fase. **b)** 3 bobinas por fase.

En el devanado trifásico se deben cumplir las siguientes relaciones:

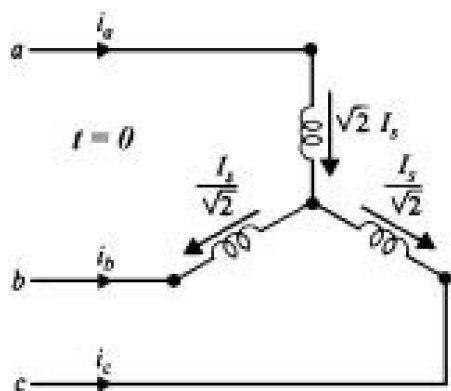
$$FMM_a(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\omega t) \cdot \text{Cos}(\theta)$$

$$FMM_b(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\omega t - 120) \cdot \text{Cos}(\theta - 120)$$

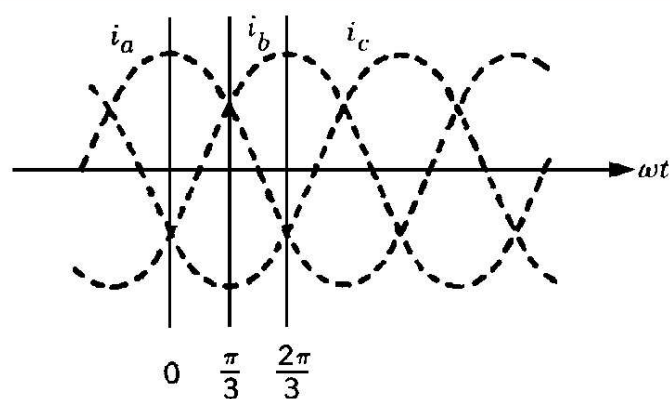
$$FMM_c(t) = FMM_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\omega t - 240) \cdot \text{Cos}(\theta - 240)$$

$$FMM_{res}(t) = FMM_a + FMM_b + FMM_c$$

$$FMM_{res}(t) = \frac{3}{2} FMM_{m\acute{a}x} \cdot \text{Cos}(\theta - \omega t)$$

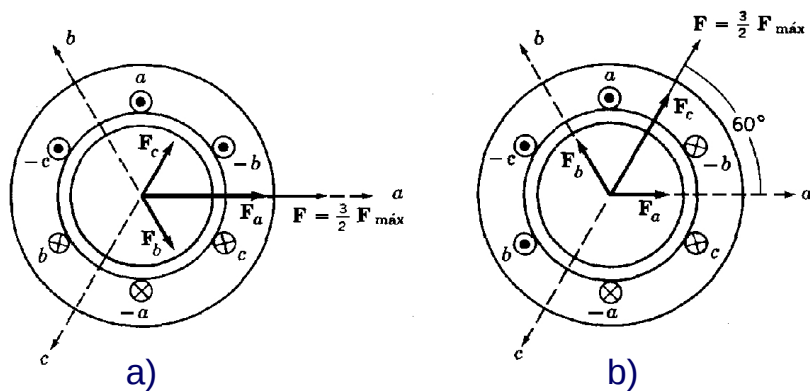


a)



b)

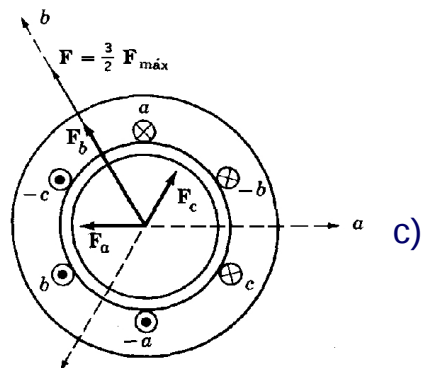
Fig.4.22.: a) Devanado trifásico en estrella. b) Corrientes trifásicas.



a)

b)

Fig.4.23.: Campo giratorio producido por el devanado trifásico. a) $\omega t = 0$ b) $\omega t = \pi/3$ y c) $\omega t = 2\pi/3$



c)

4.1.2.8 Construcción de un devanado trifásico

Las siguientes figuras muestran de qué forma está construido un devanado trifásico.

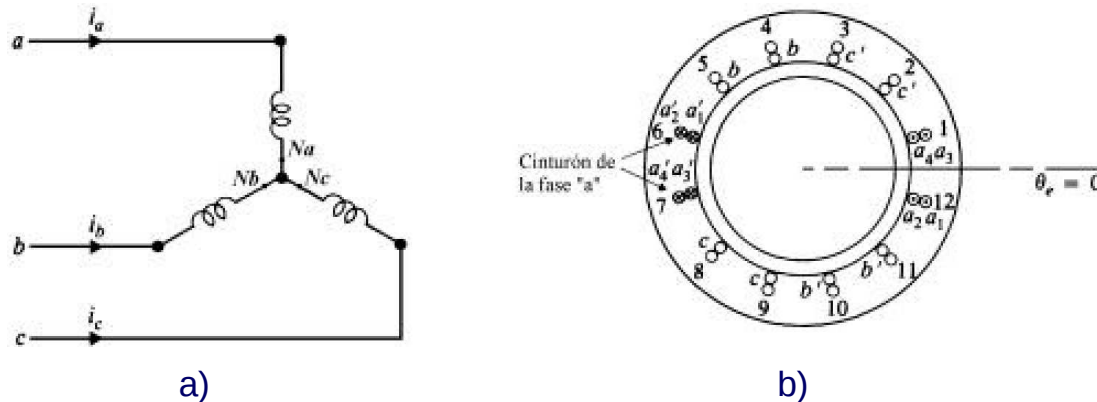


Fig.4.24: Devanado trifásico de dos polos, doble capa **a)** Conexión externa. **b)** Ranuras del estator.

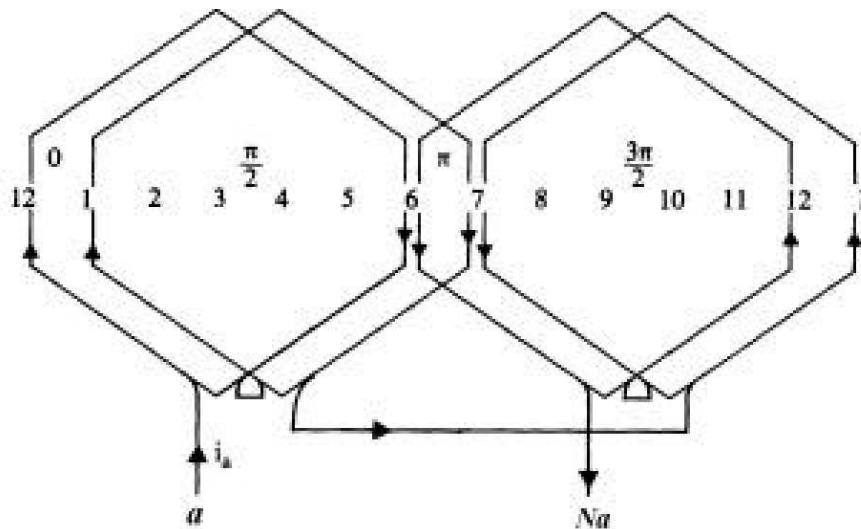


Fig.4.25: Construcción de una fase del devanado de la figura 4.24

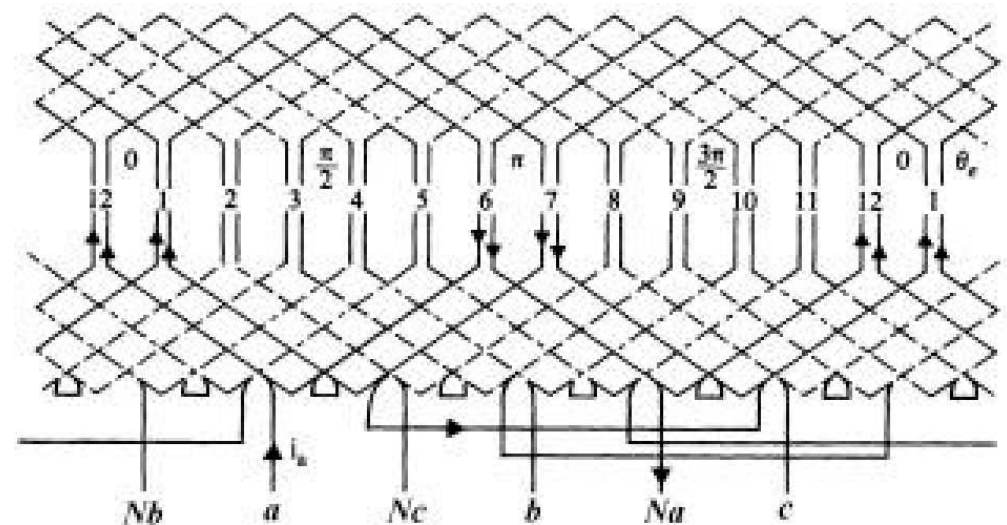


Fig.4.26: Construcción de las tres fases del devanado de la figura 4.24

4.1.3 Devanados de estator de máquinas de corriente continua

El objetivo del devanado de estator es producir un campo en el entrehierro, constante en el tiempo y fijo en el espacio. El devanado de estator se conoce como devanado de campo.

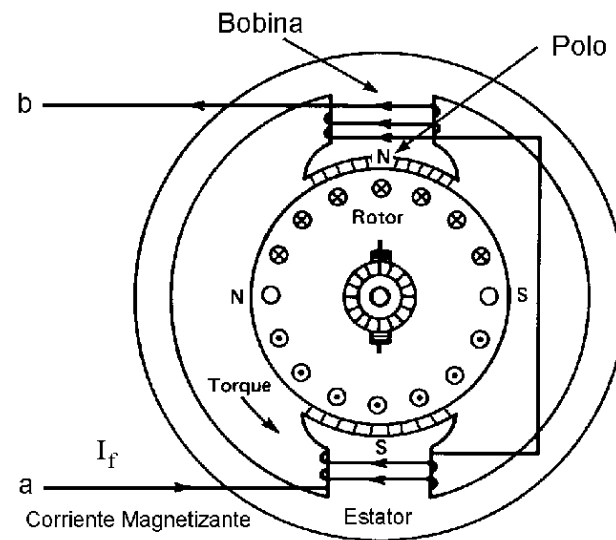
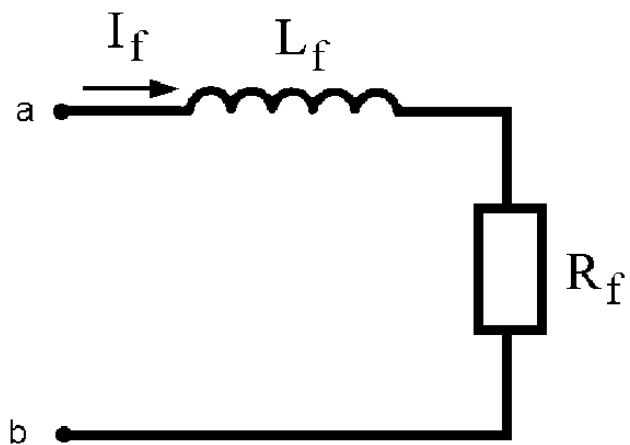
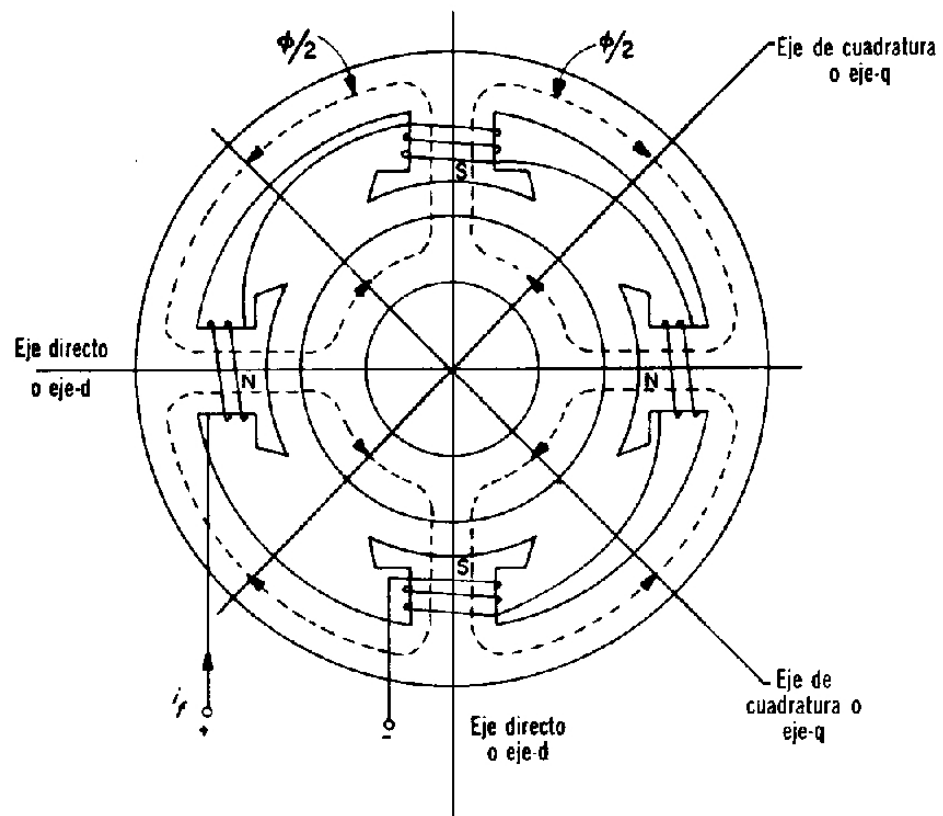


Fig.4.27. Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de dos polos.



a)



b)

Fig.4.28.: **a)** Circuito equivalente del devanado de campo. **b)** Devanado de estator de 4 polos de una máquina de corriente continua.

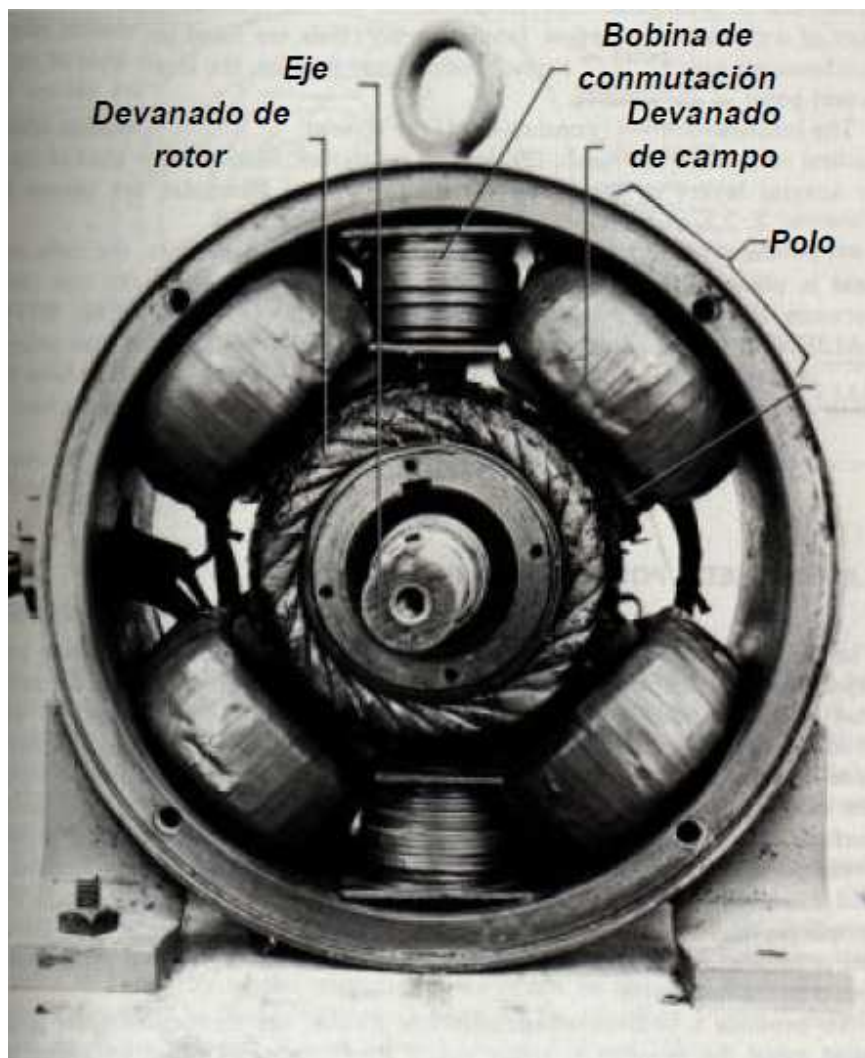


Fig.4.29.: Máquina de corriente continua de 4 polos.

En la figura 4.29 se presenta una imagen de una máquina de corriente continua real, con las distintas partes que la conforman. En la figura 4.30 se muestra como se distribuye el campo en un devanado de 4 polos.

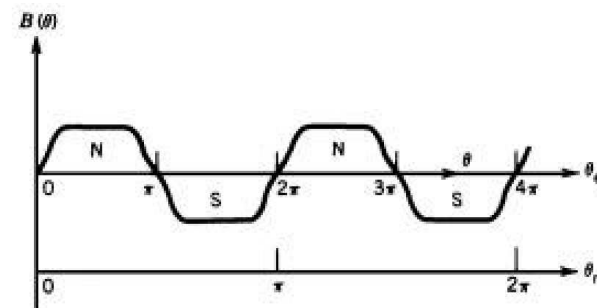
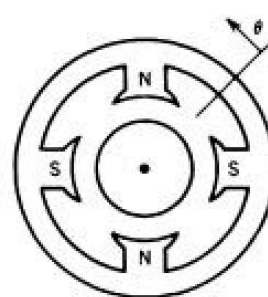


Fig.4.30.: Distribución de campo en un devanado de 4 polos.

4.1.4 Devanados de rotores

4.1.4.1 El rotor devanado con anillos deslizantes

El rotor de anillos deslizantes está formado por un devanado trifásico, conectados generalmente en estrella con los otros extremos libres conectados a anillos conductores, aislados entre sí y respecto del eje, sobre los que hacen contacto unas escobillas de grafito.

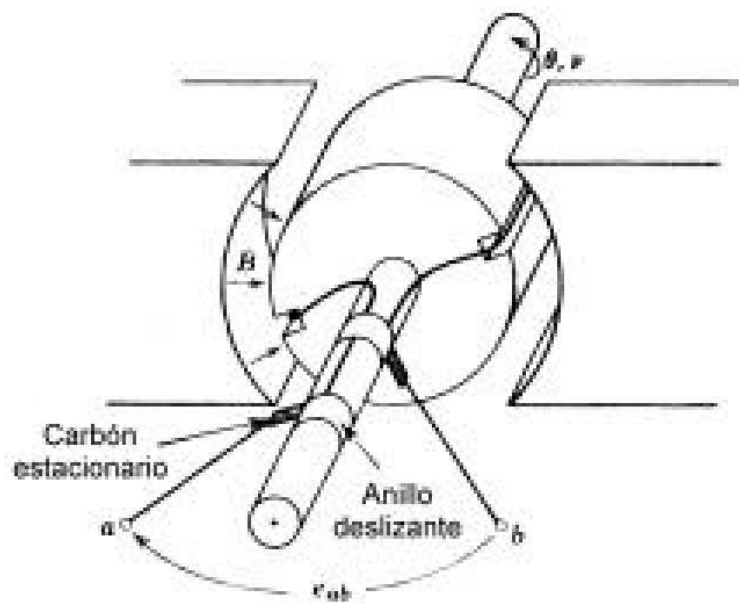


Fig.4.31.: Una bobina del rotor conectada por anillos deslizantes.

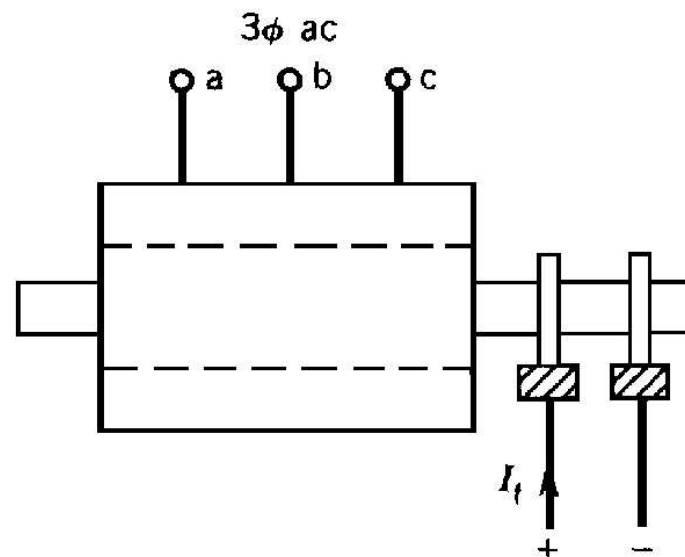
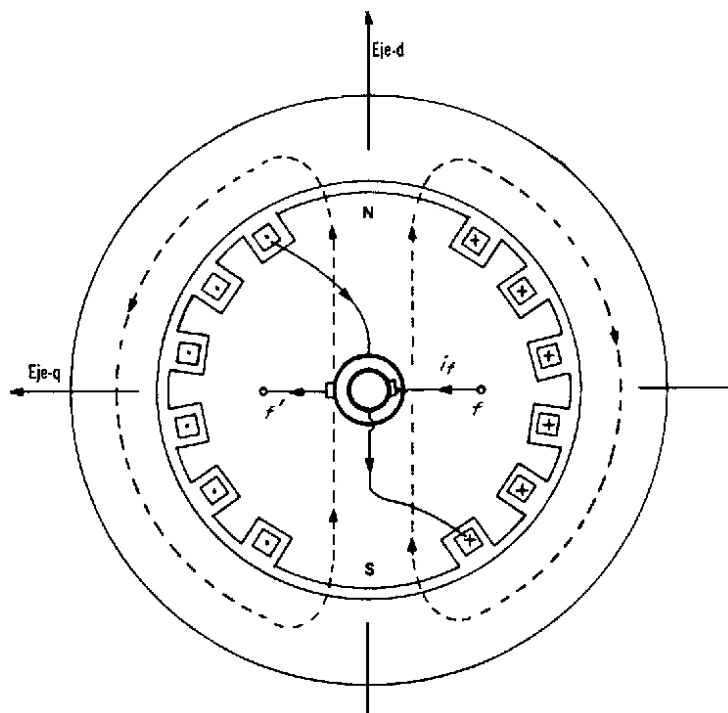
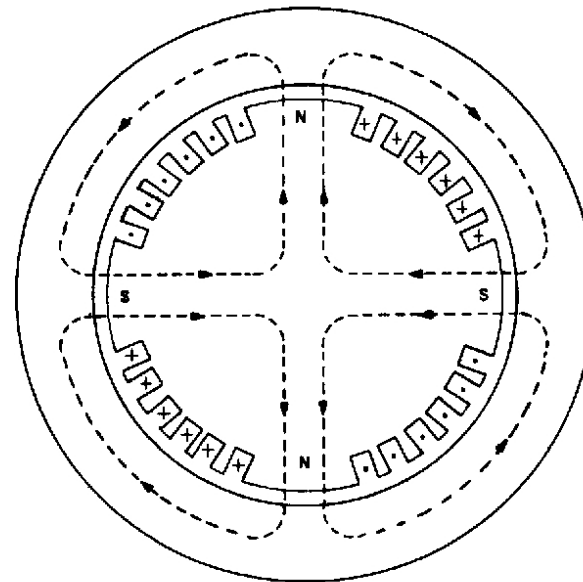


Fig.4.32.: Inyección de corriente al rotor mediante anillos deslizantes.



a)



b)

Fig.4.33. Devanado monofásico alimentado por anillos deslizantes. **a)** de 2 polos. **b)** de 4 polos. Usado en máquinas sincrónicas.

- Rotores de polo saliente

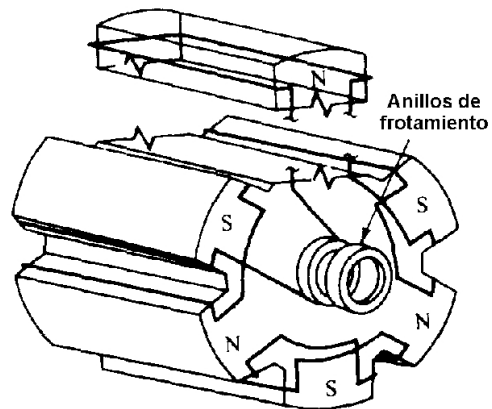


Fig.4.34.: Devanados de rotor de 6 polos.

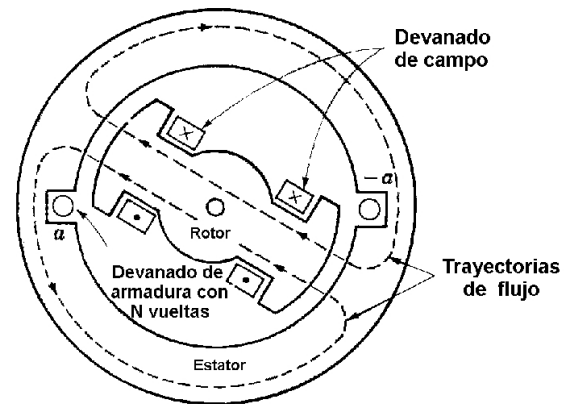


Fig.4.35.: Devanados de rotor de 2 polos.

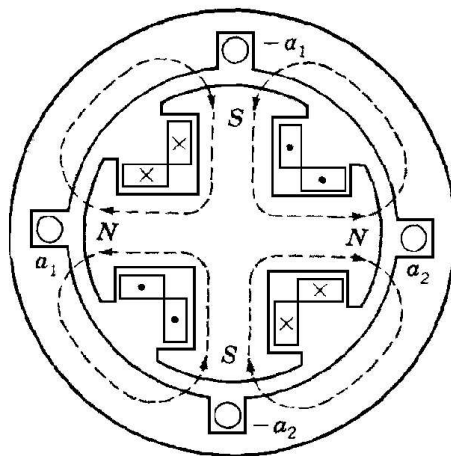


Fig.4.36.: Rotor de 4 polos.

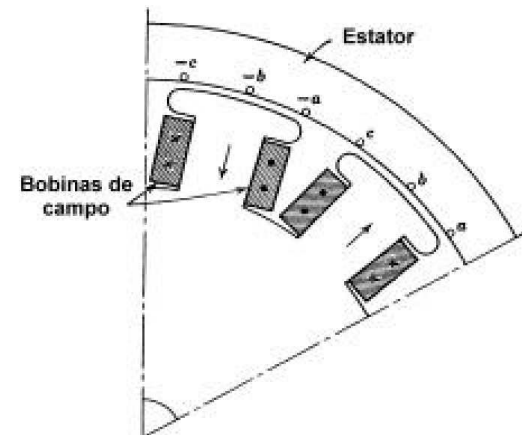


Fig.4.37.: Sector de una máquina de 12 polos.

Devanado de rotor trifásico con anillos deslizantes

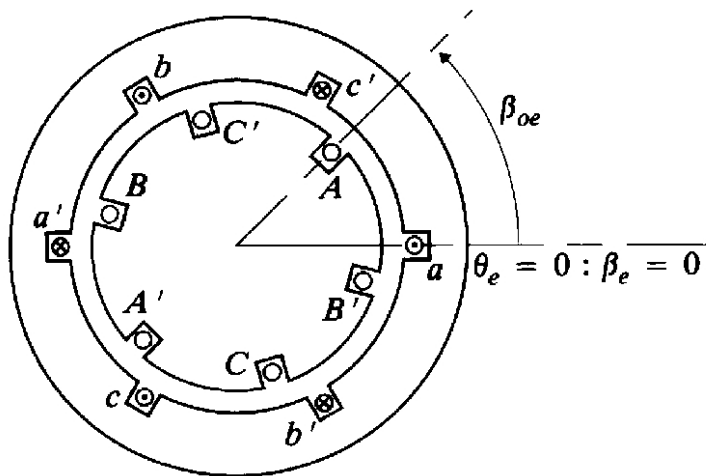


Fig.4.38.: Máquinas con devanados trifásicos en el estator y en el rotor.

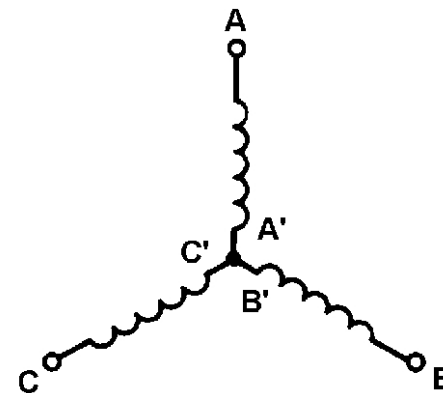


Fig.4.39.: Devanado trifásico de rotor.

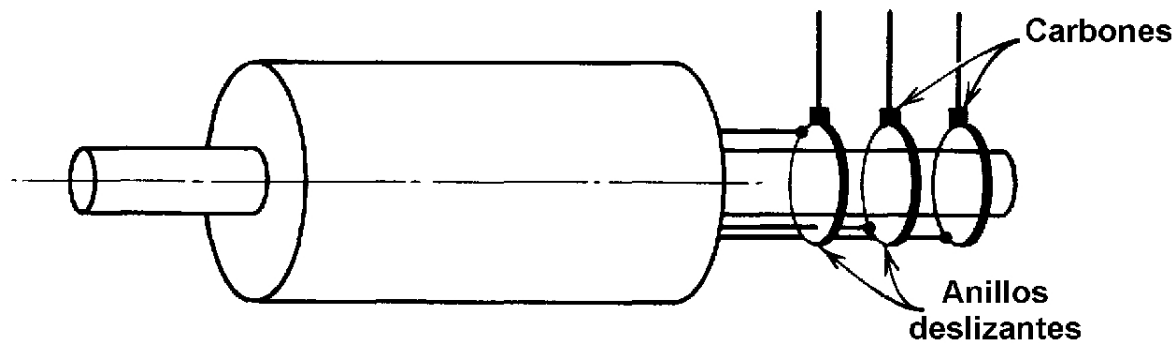


Fig.4.40.: Rotor devanado trifásico con sus tres anillos deslizantes.

4.1.4.2 El rotor jaula de ardilla

El rotor jaula de ardilla no contiene contactos deslizantes. Las corrientes son inducidas por el campo en el entrehierro.

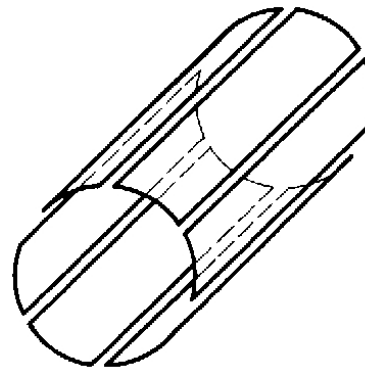


Fig.4.41.: Sobre el origen del rotor jaula de ardilla.

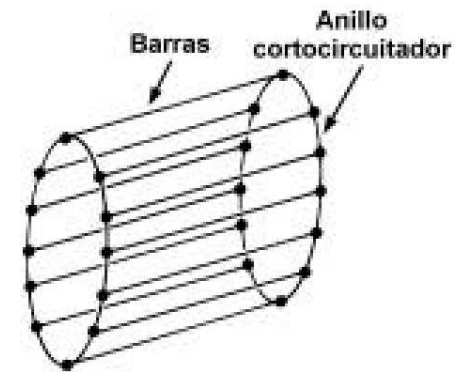


Fig.4.42.: Esquema básico de un rotor jaula de ardilla.



Fig.4.43.: Rotor jaula de ardilla.

Los huecos de las ranuras se rellenan de barras de aluminio fundido que se unen en ambos extremos del rotor mediante anillos de cortocircuito conductores, que adoptan la forma de una jaula de ardilla.

4.1.4.3 El devanado de rotor con conmutador

El conmutador es el conjunto de delgas y carbones que tiene como objetivo conmutar las corrientes que pasan por la bobina del rotor

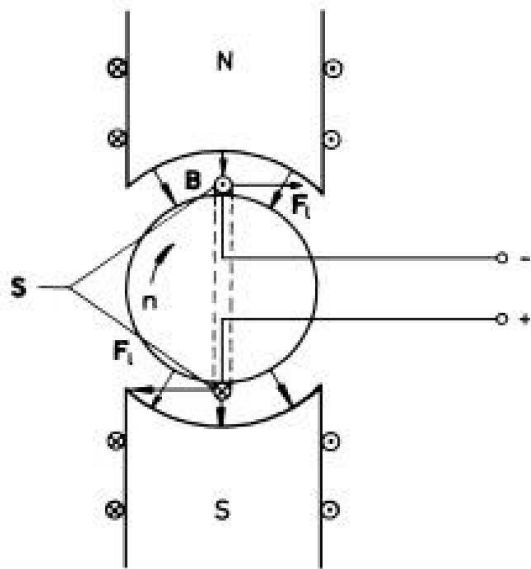


Fig.4.44.: Mecanismo de generación de fuerza (torque) en un motor de corriente continua.

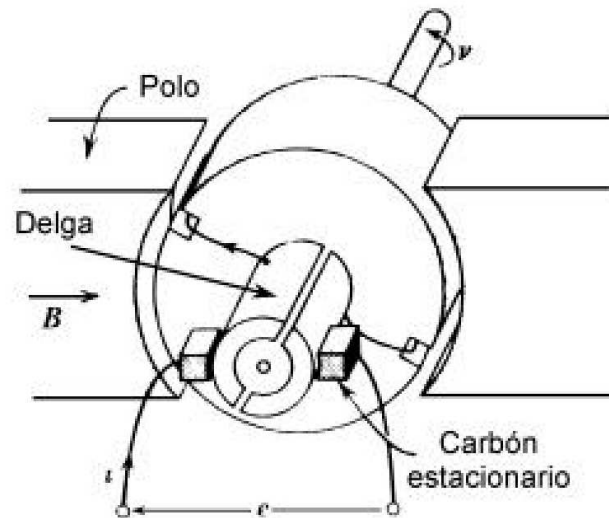


Fig.4.45.: Principio de una bobina de rotor alimentada por un conmutador de dos delgas.

El fenómeno conocido como conmutación es aquel que consiste en el cambio en el sentido de la corriente (y de la fuerza electromotriz inducida) producto del paso de los conductores activos por las líneas neutras magnéticas.

La conmutación comienza cuando la delga a la que está conectada la sección que va a conmutar empieza a hacer contacto con la escobilla, y finaliza cuando dicha delga abandona el contacto con la misma.

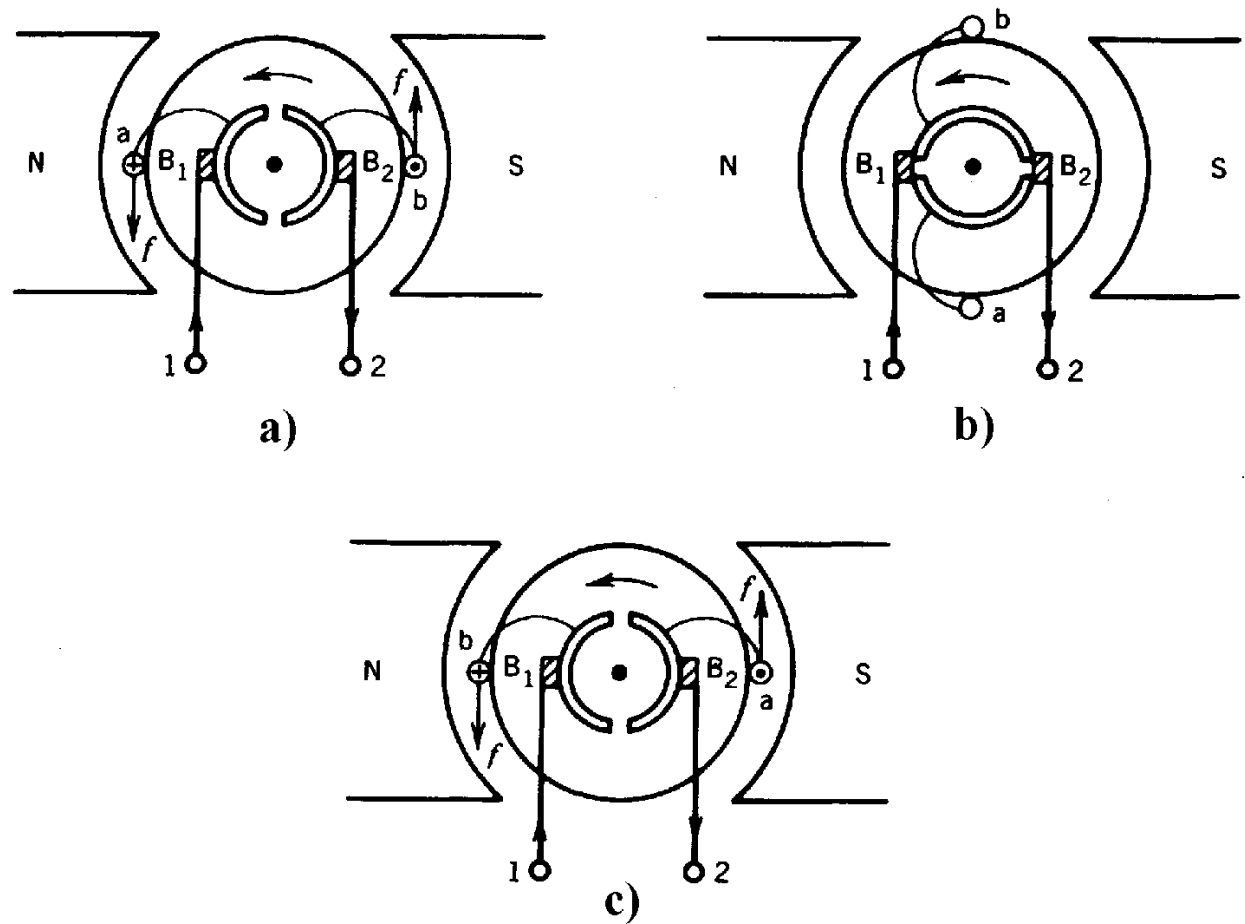


Fig.4.46.: Principio de funcionamiento de un conmutador de dos delgas.

Es importante hacer notar el hecho de que la distribución de corrientes que atraviesa el rotor se mantiene constante con respecto al estator.

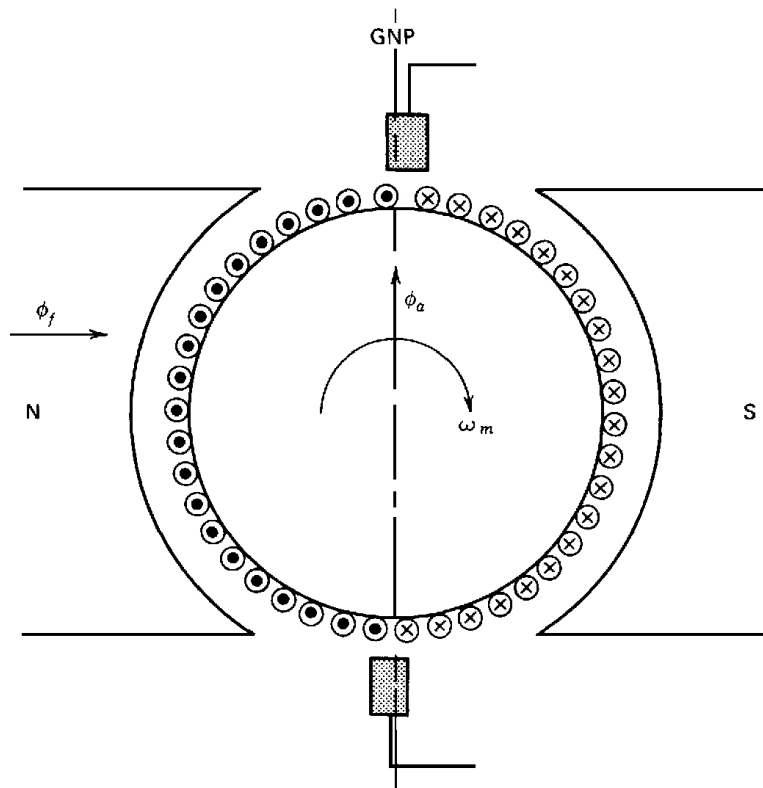


Fig.4.47.: Distribución de corriente en una máquina de corriente continua.

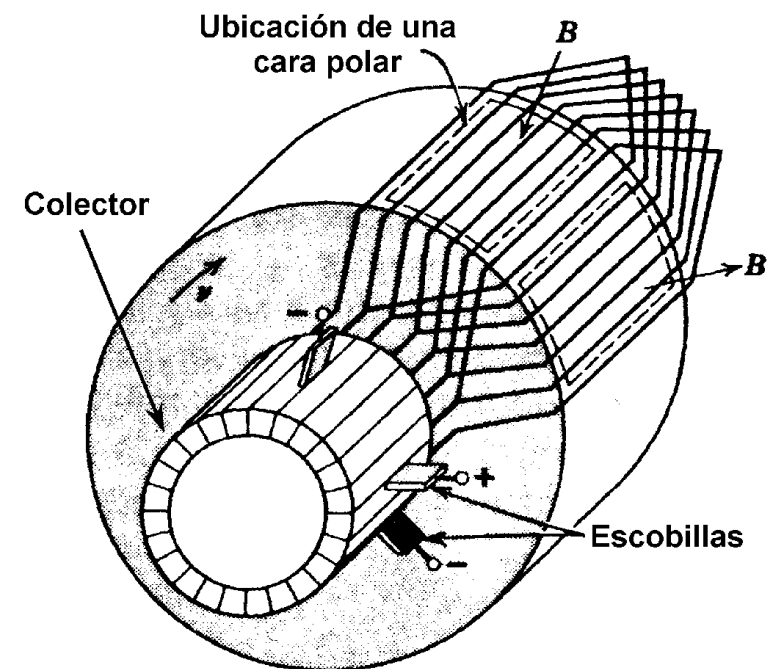


Fig.4.48.: Devanado de rotor de varias dalgas y varios pares de polo.

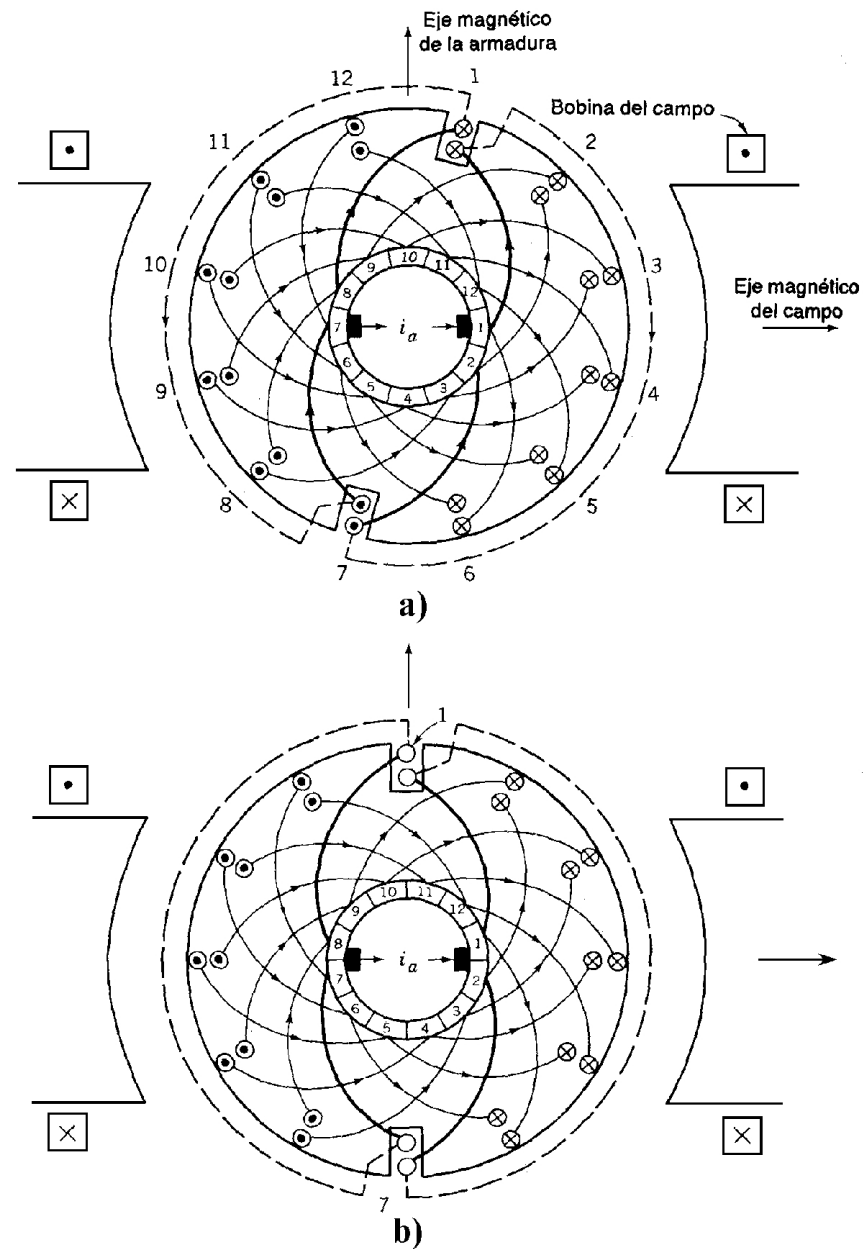
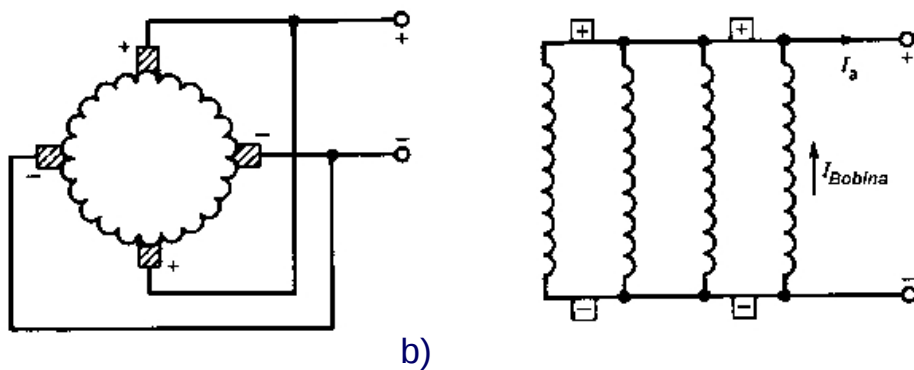


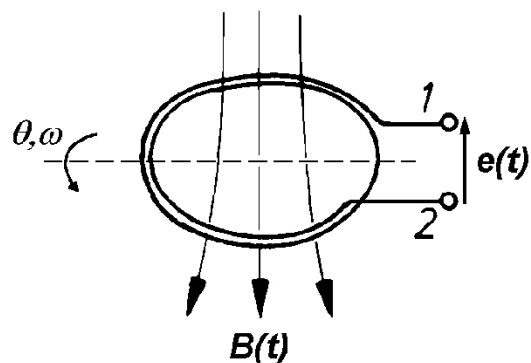
Fig.4.49.: Devanado de rotor con conmutador (2 polos).



32

4.2 Tensiones inducidas en devanados de máquinas rotatorias

4.2.1 Tensiones inducidas en la bobina elemental



$$e(t) = \frac{d\psi}{dt}(t, \theta) = \frac{d\psi}{dt} + \frac{d\psi}{d\theta} \cdot \omega$$

En el lado derecho de esta ecuación, el primer elemento, es decir, la derivada con respecto al tiempo, se conoce como **Tensión de transformación**, mientras que la derivada con respecto al ángulo corresponde a la **Tensión de rotación**.

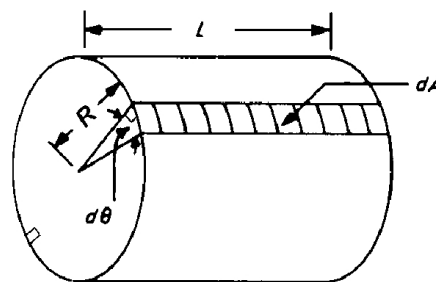
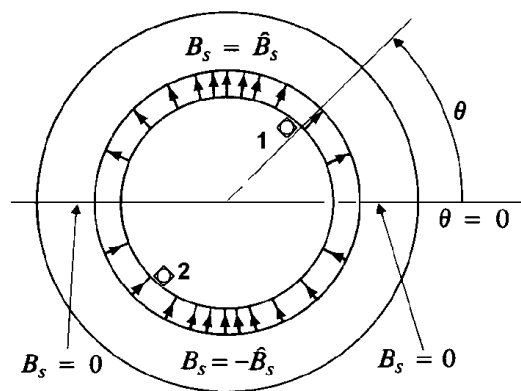
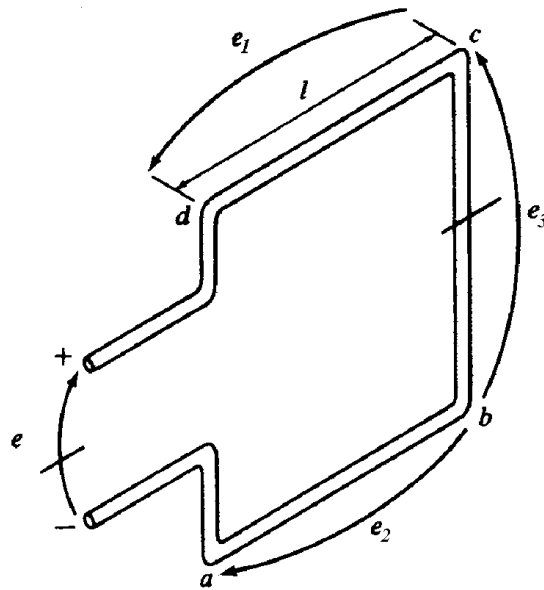


Fig.4.52.: Bobina del rotor en campo magnético producido por el estator.

Fig.4.52.: Dimensiones del rotor.



Las tensiones inducidas corresponden a los efectos que producen los campos magnéticos en las máquinas eléctricas sobre los devanados de las mismas, es decir, las fuerzas electromagnéticas que inducen cuando un flujo magnético que los atraviesa varía en el tiempo.

Fig.4.53.: Tensiones en la bobina elemental.

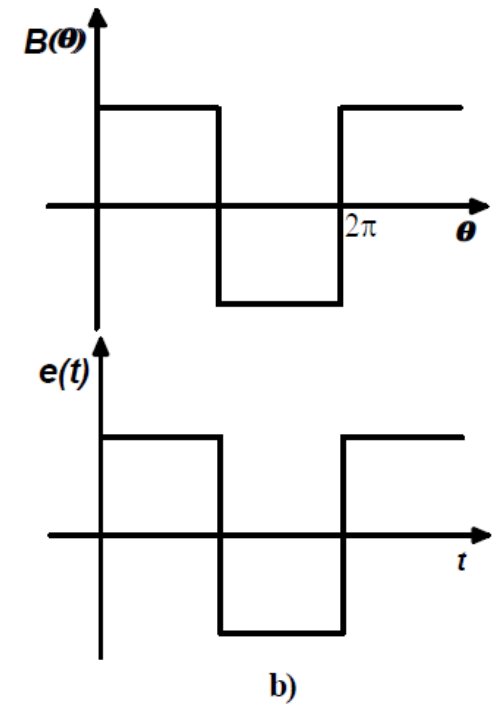
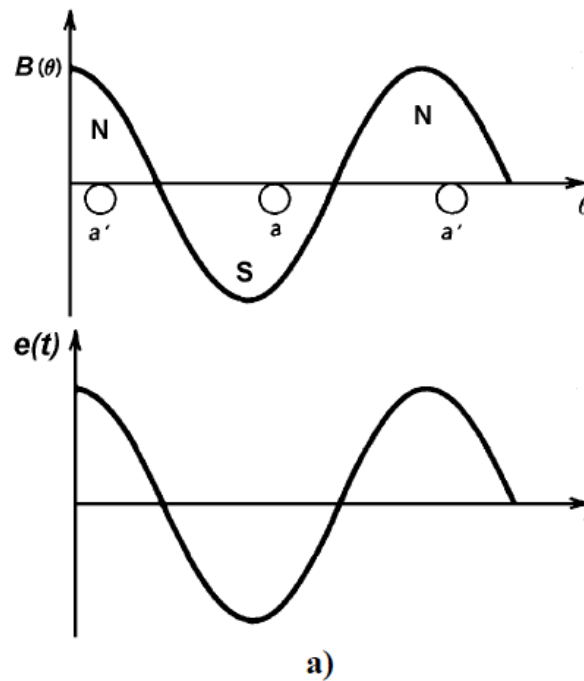


Fig.4.54.: Tensión inducida en una bobina que gira a velocidad fija con campo **a)** sinusoidal, **b)** rectangular.

4.2.2 Tensiones inducidas en bobinas desplazadas geométricamente

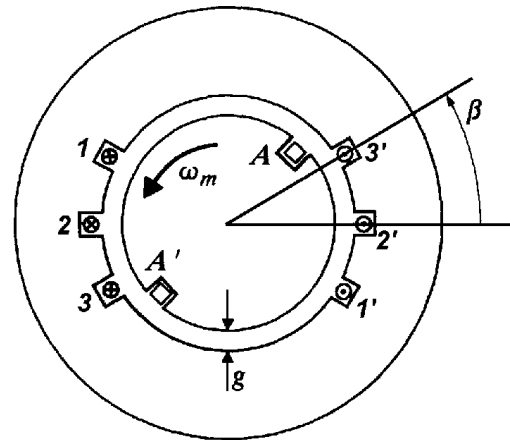


Fig.4.55.: Bobinas de estator desplazadas en ángulo beta.

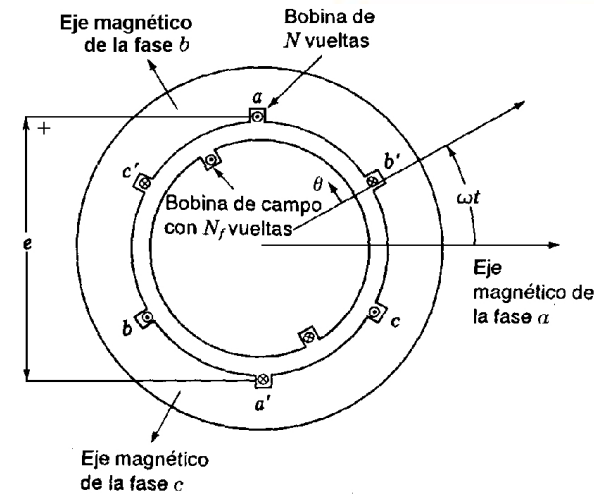


Fig.4.56.: Bobinas de estator desplazadas en 120° .

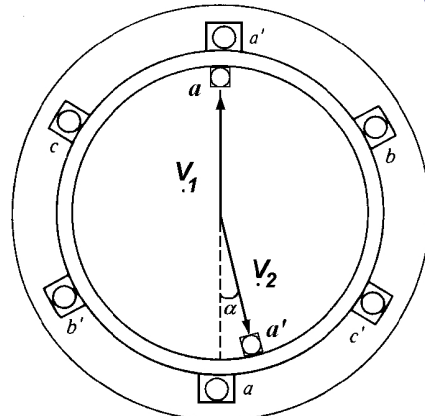
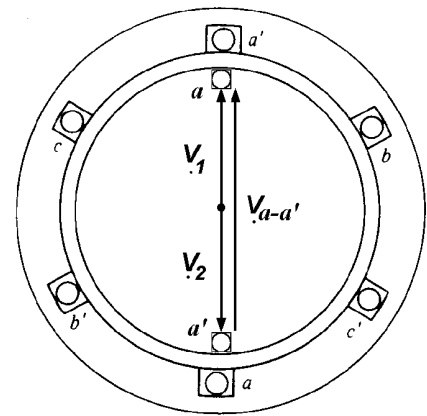
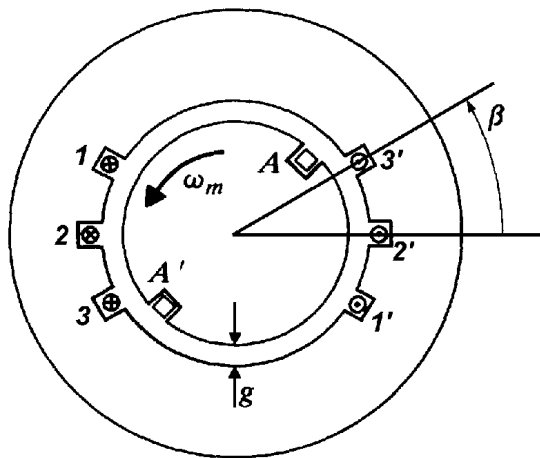


Fig.4.57.: Bobina con paso polar.

Fig.4.58.: Bobina con paso acortado.

4.2.2 Tensiones inducidas en un devanado distribuido



En el caso de las tenciones inducidas en un devanado distribuido, la f.e.m. total inducida en el devanado por un campo giratorio será la suma de los valores de cada bobina conectada en serie.

Fig.4.59.: Distribución en un devanado distribuido en 6 ranuras.

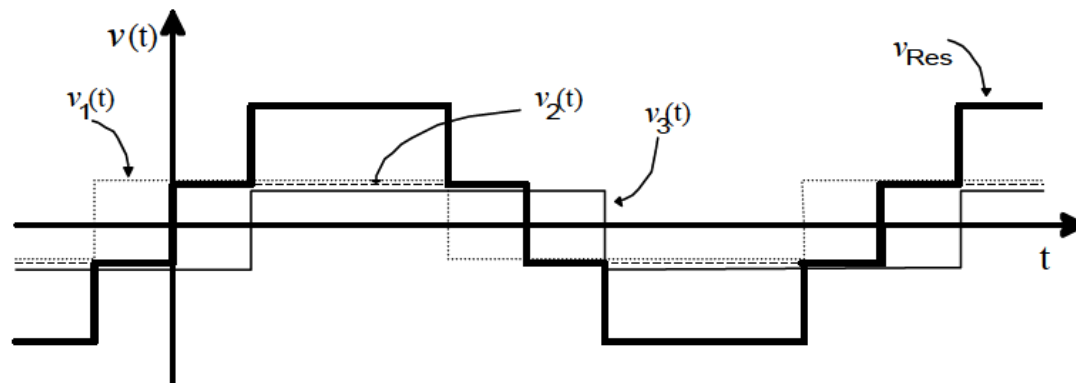


Fig.4.60.: Tensiones inducidas en un devanado distribuido en 6 ranuras.

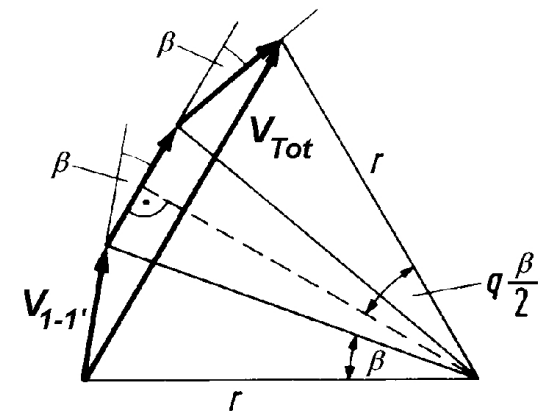


Fig.4.61.: Tensión resultante en un devanado distribuido de 6 ranuras.

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

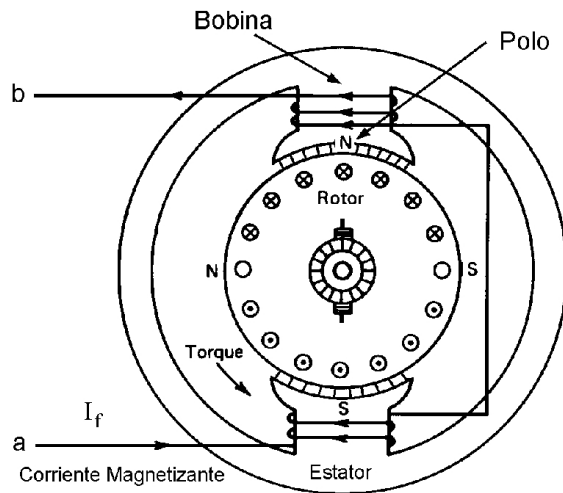
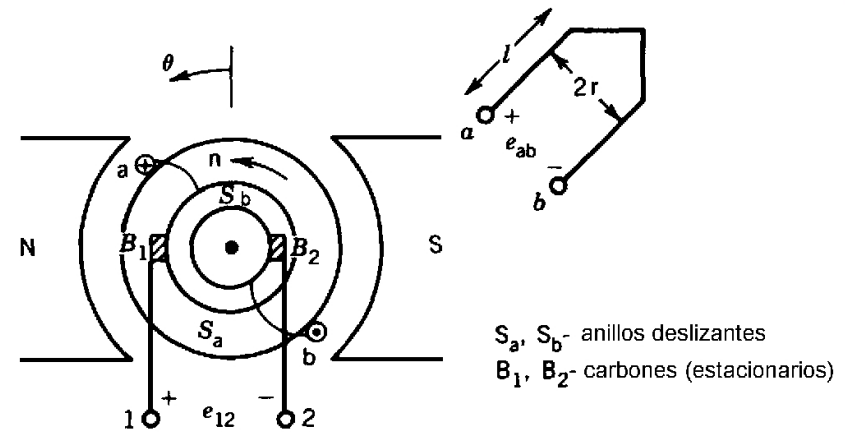
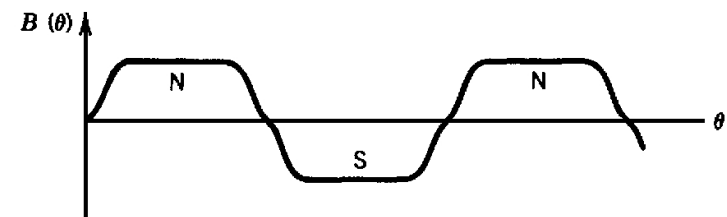


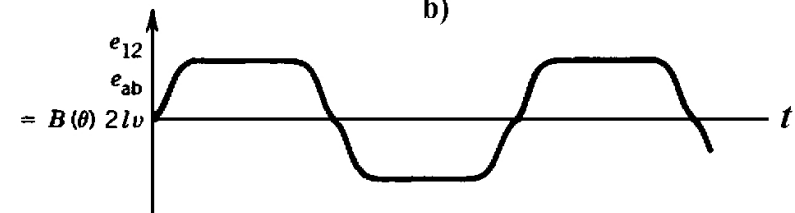
Fig.4.62.: Devanado de campo (estator) de una máquina de corriente continua de 2 polos.



a)



b)



c)

Fig.4.63.: Máquina de corriente continua elemental (con una bobina en el rotor y anillos deslizantes, **a)** Disposición de la bobina, **b)** campo, **c)** tensión inducida.

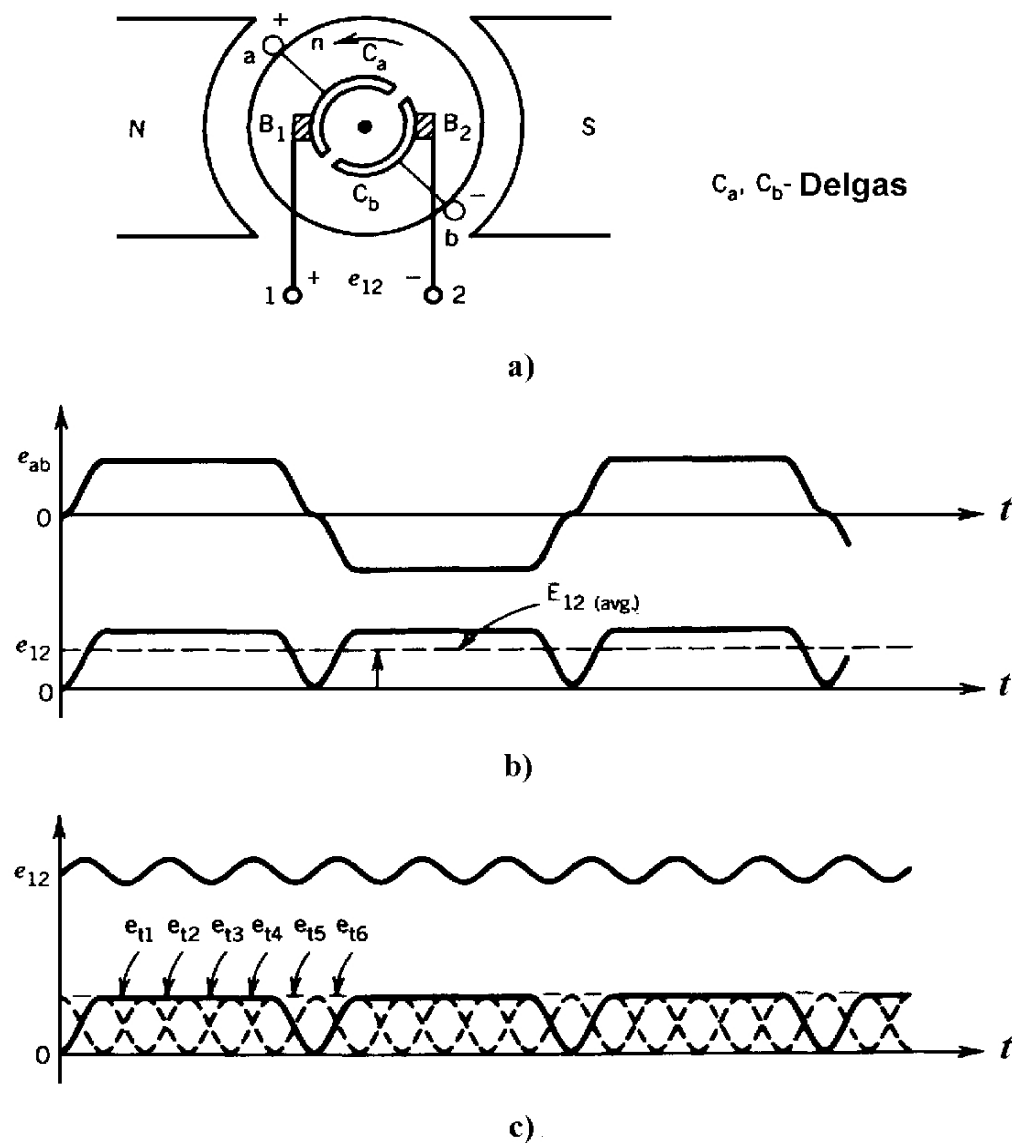


Fig.4.64.: Máquina de corriente continua elemental (con una bobina en el rotor y un conmutador de 2 delgas), **a)** Disposición de la bobina, **b)** y **c)** tensiones inducidas.