



UNIVERSIDADE
DE VIGO

MÁQUINAS ASÍNCRONAS

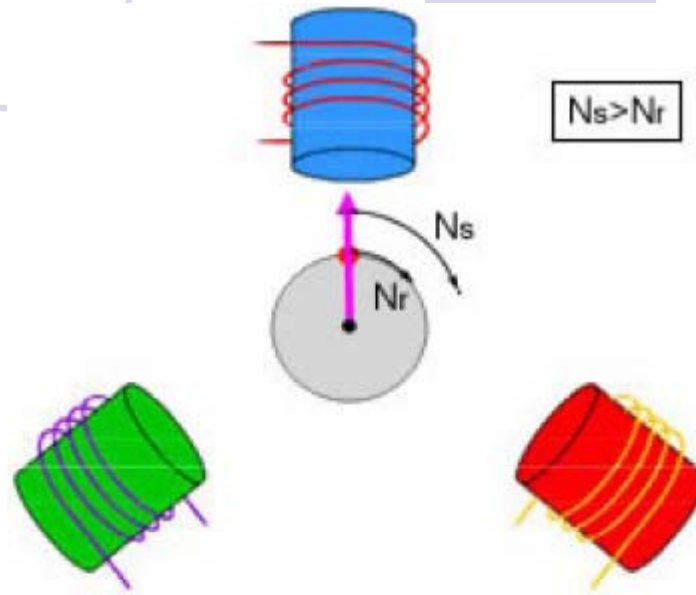
Campo magnético giratorio y devanados de las
ME de ca.

Manuel Pérez Donsión

Departamento de Ingeniería Eléctrica

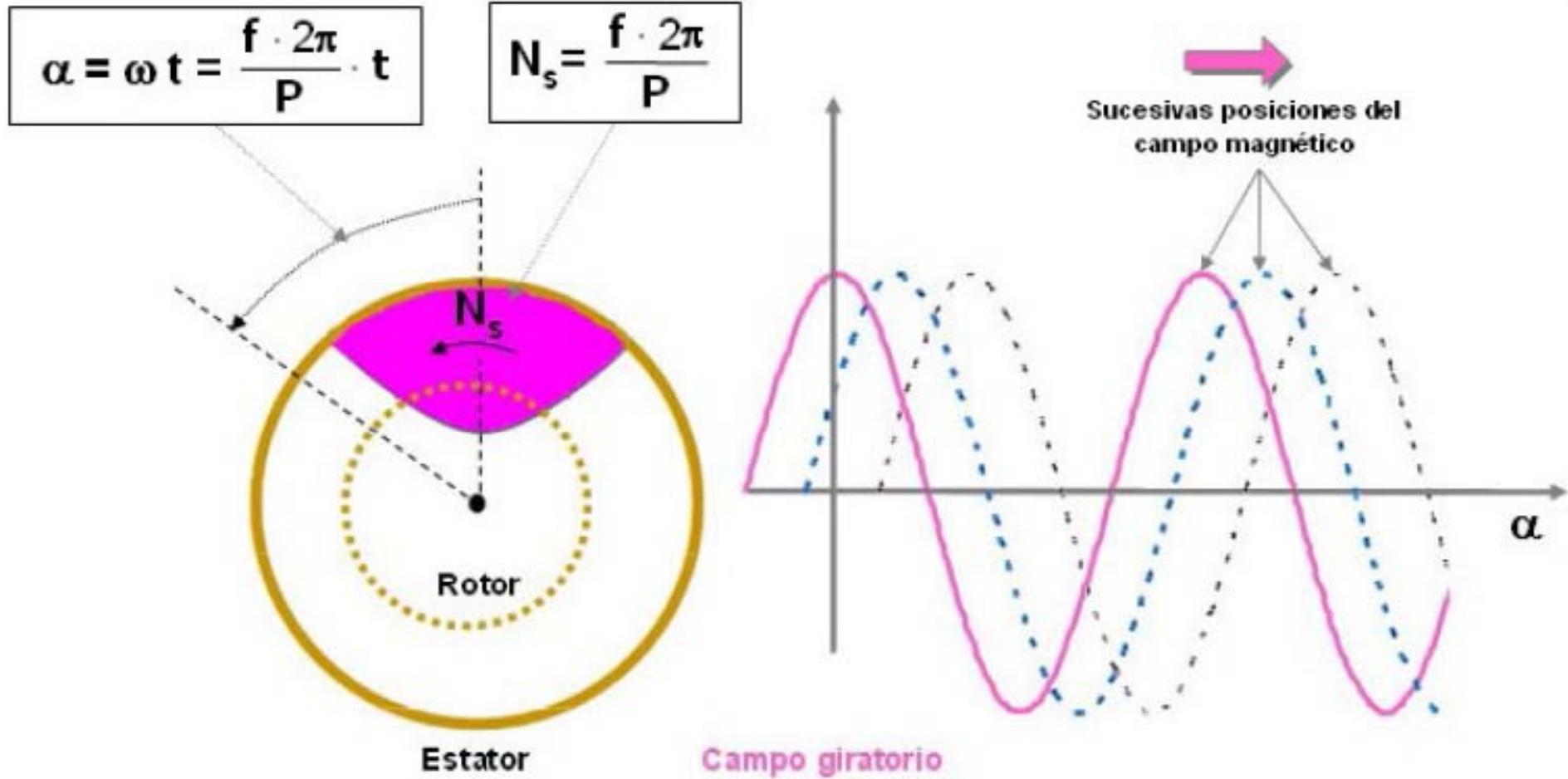
Universidad de Vigo

Campo magnético giratorio



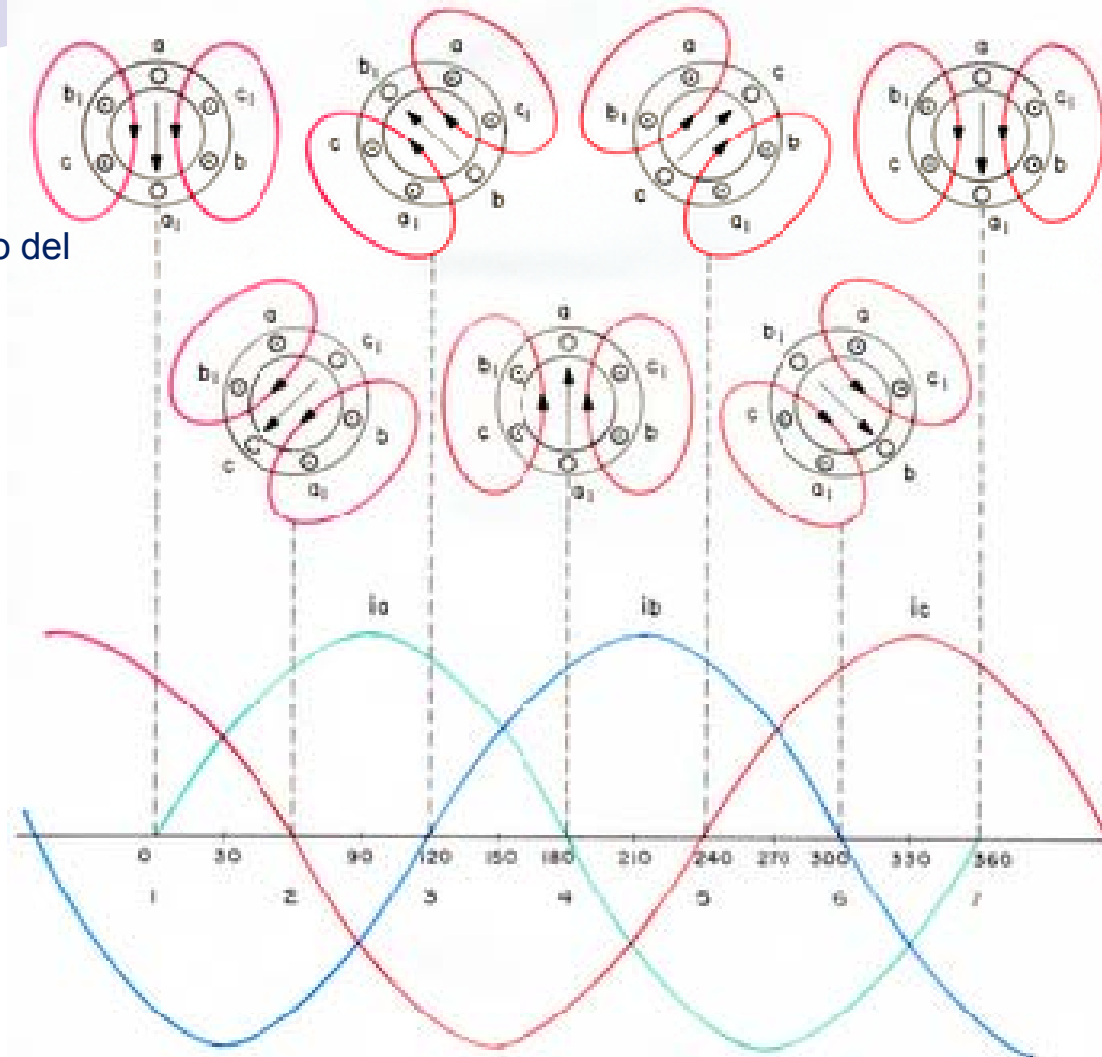
El Campo magnético giratorio se obtiene con tres devanados desfasados **120°** (acoplados en estrella o triángulo) y conectados a un sistema trifásico de c. a. Si por el arrollamiento polifásico del estator del motor de una máquina síncrona o asíncrona circula una corriente de pulsación **w** y si hay **p** pares de polos, se origina un campo magnético giratorio de p pares de polos y que giran a la velocidad **w/p** (Teorema de Ferraris). Si el campo tiene distribución senoidal:

Campo magnético giratorio



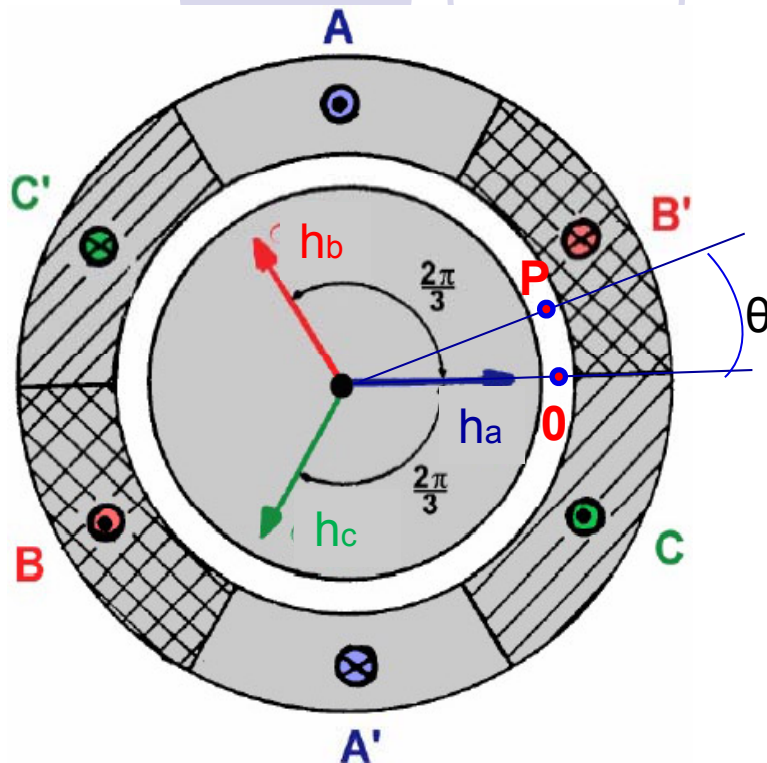
Campo magnético giratorio

Sentido de giro del campo



CAMPO MAGNÉTICO GIRATORIO PRODUCIDO EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO DE DOS POLOS

Campo magnético giratorio



Campo magnético en P debido a cada fase:

$$h_a(\theta, t) = H_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(p\theta)$$

$$h_b(\theta, t) = H_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$h_c(\theta, t) = H_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Campo magnético resultante en P

(suma aritmética al ser radiales)

$$h(\theta, t) = h_a(\theta, t) + h_b(\theta, t) + h_c(\theta, t)$$

$$h(\theta, t) = \frac{3}{2} H_m \cos(p\theta - \omega t)$$

p=número de pares de polos

Campo magnético en P para m fases

$$h(\theta, t) = \frac{m}{2} H_m \cos(p\theta - \omega t)$$

Campo que gira a la velocidad angular ω/p

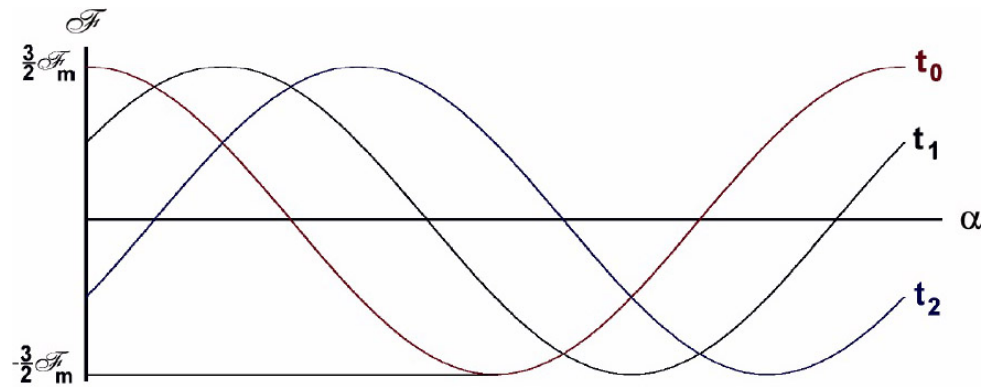
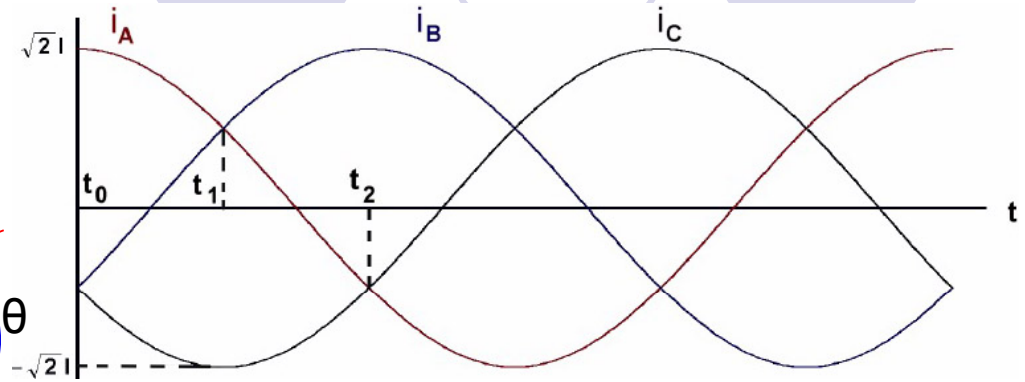
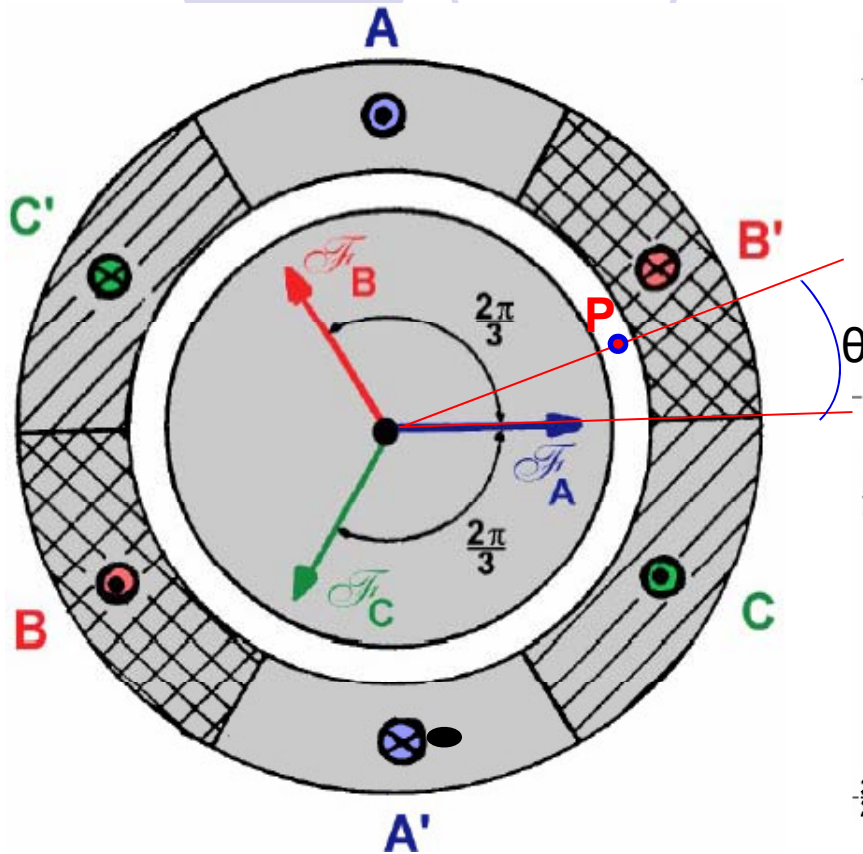
$$i_a(t) = I\sqrt{2} \cdot \cos(\omega t)$$

$$i_b(t) = I\sqrt{2} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_c(t) = I\sqrt{2} \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Campo magnético giratorio

Teorema de Ferraris



→ Sentido de giro del campo magnético

Fuerza magnetomotriz

$H = Cte$

$$F = H L = N I$$

$$\left\{ \begin{aligned} F_a(\theta, t) &= F_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(p\theta) \\ F_b(\theta, t) &= F_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ F_c(\theta, t) &= F_m \cdot \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cdot \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right.$$

Campo magnético giratorio

Campo magnético resultante en P

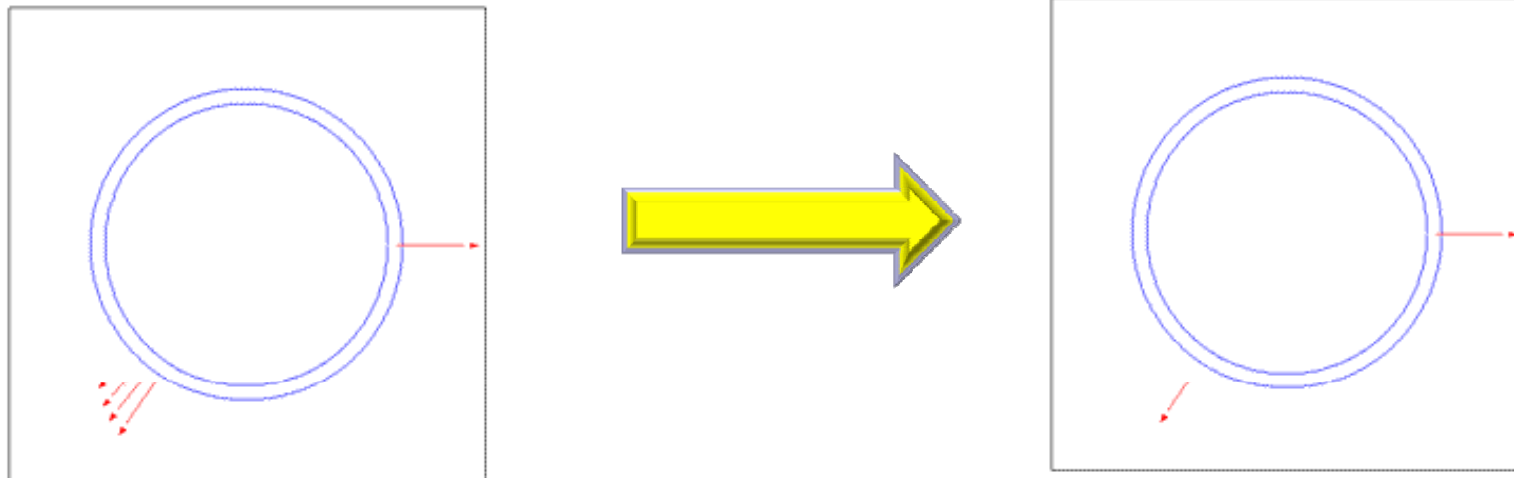
$$h(\theta, t) = \frac{3}{2} H_m \cos(p\theta - \omega t)$$

p=número de pares de polos

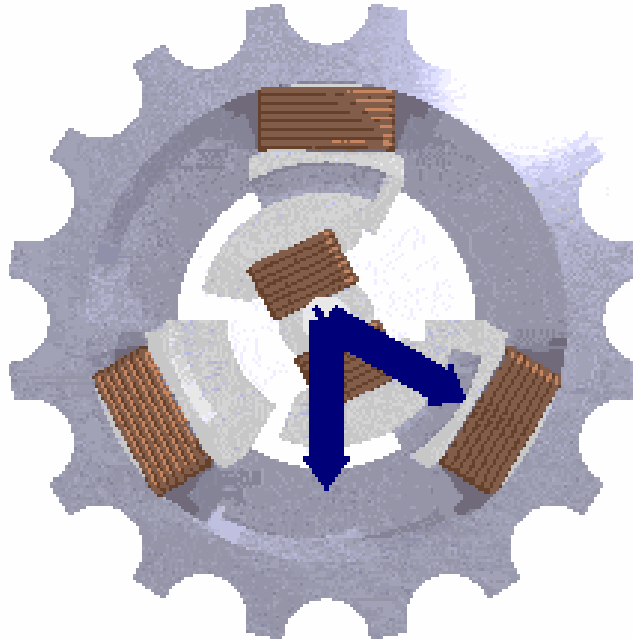
Esta expresión nos dice que la intensidad del campo magnético, h , tiene en el instante inicial un valor en 0, ($t=0$, $\theta=0$), de $3/2 H_m$ y tendrá el mismo valor en el punto P en el instante $p\theta - \omega t = 0$, en un tiempo tal que:

Luego la velocidad angular es ω/p .

$$t = \frac{\theta}{\frac{\omega}{p}}$$



Campo magnético giratorio



Teorema de Ferraris para un devanado trifásico:

Si un devanado trifásico equilibrado (constituido por tres fases idénticas desfasadas entre sí en el espacio $2\pi/3$ radianes eléctricos) se lo alimenta por un sistema trifásico equilibrado de corrientes perfectamente senoidales (igual valor eficaz y desfasadas entre sí $2\pi/3$ radianes en el tiempo) se obtiene **un campo magnético giratorio** (o una fmm giratoria) de amplitud constante (igual a $3/2$ del valor máximo de la intensidad de campo magnético H_m en el espacio) y velocidad de giro constante (w/p).

Campo magnético giratorio

Teorema de Ferraris generalizado

Campo magnético en P para m fases

$$F(\theta, t) = \frac{m}{2} F_m \cdot \cos(p\theta - \omega t)$$



$$h(\theta, t) = \frac{m}{2} H_m \cos(p\theta - \omega t)$$



F_m = Valor máximo de la fmm F

H_m = Valor máximo de la intensidad de campo h

Campo que gira a la velocidad angular ω/p

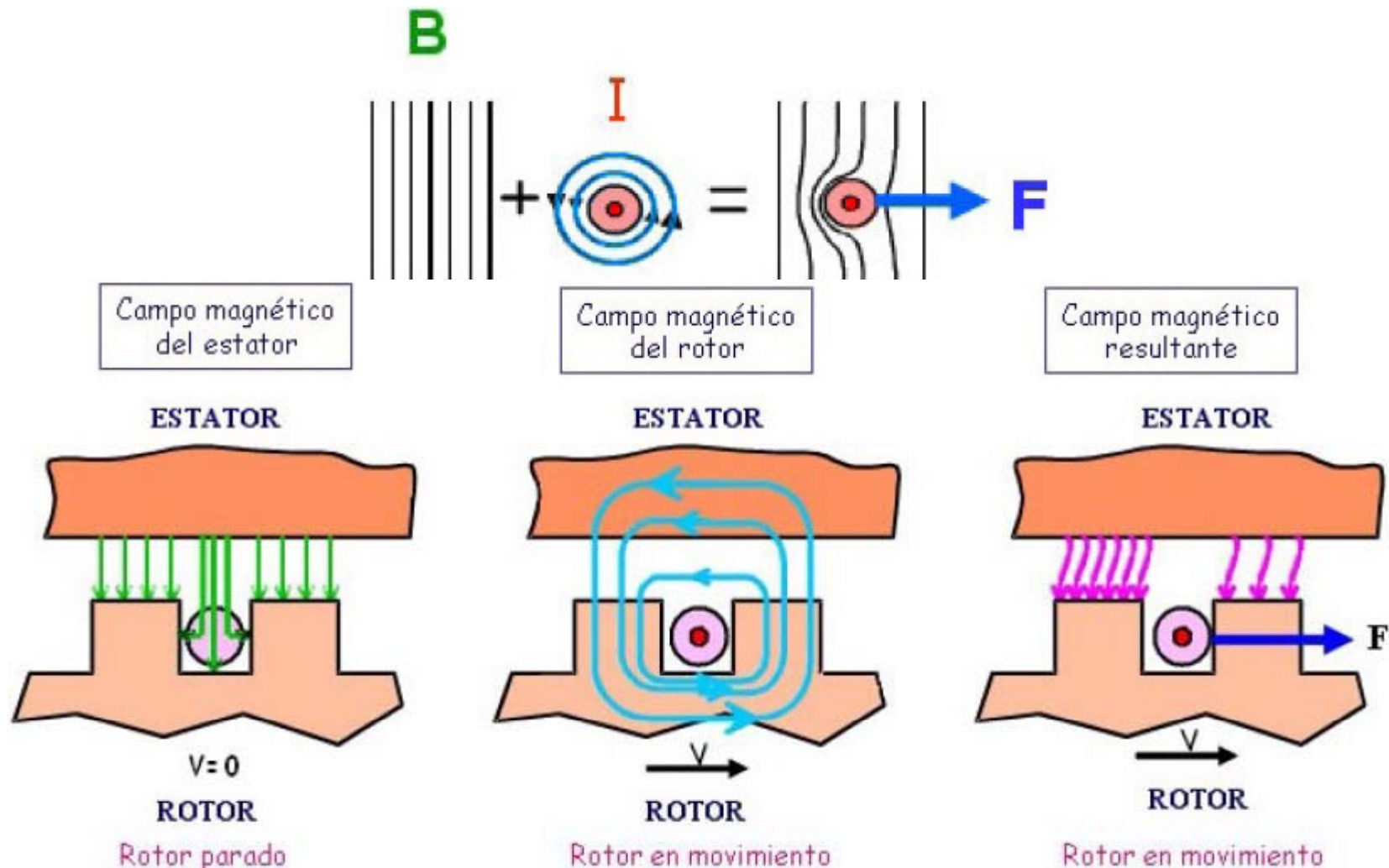
La diferencia entre la fuerza magnetomotriz **F** y la intensidad de campo **h** es la longitud media del camino que sigue el campo magnético que se supone constante (**L**).

Teorema de Ferraris para un devanado polifásico:

Cuando un devanado polifásico, constituido por m fases idénticas, de forma que entre dos fases consecutivas haya una separación en el espacio de $2\pi/m$ radianes eléctricos, se alimenta por un sistema polifásico equilibrado de m corrientes de fase, desfasadas en el tiempo $2\pi/m$ radianes, se genera en el entrehierro un campo magnético (o una fmm) que gira a una velocidad constante (ω/p) y cuyo valor máximo es $m/2$ veces el valor máximo del campo H_m en el espacio .

Campo magnético giratorio

El campo magnético giratorio origina un flujo que induce tensiones en el rotor que fuerzan la circulación de corrientes en el mismo las cuales interactúan con el campo magnético del estator. En cada conductor del rotor se produce una fuerza de valor $F = I \cdot L \cdot B$ que da lugar al par motor.



Devanados de las máquinas de c.a.

Devanados concentrados

El valor eficaz de la fuerza electromotriz en un devanado concentrado de paso diametral será:

$$E = \xi_F \cdot \bar{E} = 1.11 \cdot 4 \cdot f_r \cdot N \cdot \hat{\phi} = 4.44 \cdot f_r \cdot N \cdot \hat{\phi}$$

Devanados distribuidos

a. Ventajas del devanado distribuido.

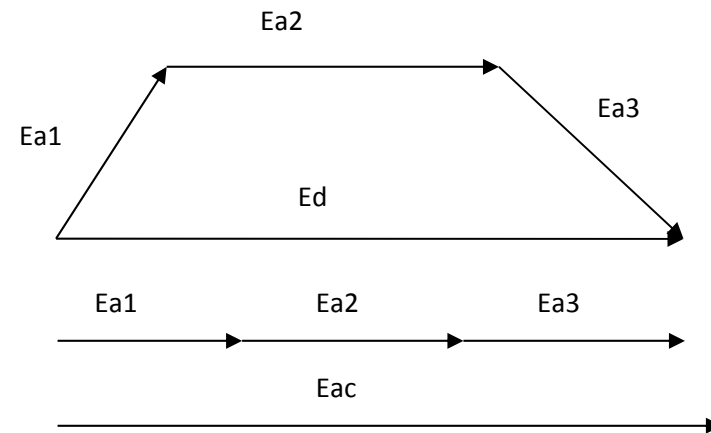
i. Economía.

Económicamente es mas rentable pues se logra un mayor aprovechamiento del espacio disponible y, por lo tanto, se ahorra material.

ii. Disminución del numero de armónicos.

Con este tipo de devanado se limita el número de armónicos de la f.e.m. y de la onda de campo creada por el devanado al ser excitado.

Al distribuir el devanado en varias ranuras por polo resulta que las f.e.m. inducidas en cada una de ellas no están en fase.



Como consecuencia la f.e.m. inducida como suma vectorial de todas ellas, E_d , es menor que la f.e.m total inducida en un devanado concentrado de una sola bobina por polo y fase E_c , puesto que al haber un desfase el modulo del vector suma será menor:

$$\xi_d = \frac{E_d}{E_c} < 1$$

Factor de distribución

Devanados de las máquinas de c.a.

Clasificación

Según como se van conectando las bobinas

- Imbricados
- Ondulados

Según el orden de sucesión de lados activos

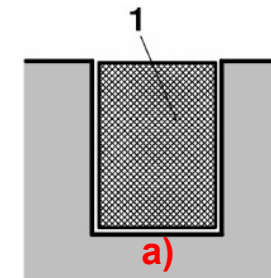
- Excéntricos
- Concéntricos

- Solapados
- Ondulados

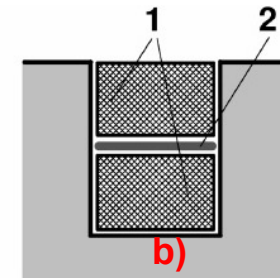
Devanado de Jaula de Ardilla

Según la forma de las cabezas de bobina

- Cadena
- Corona
- Horquilla
- Brida



a) una capa

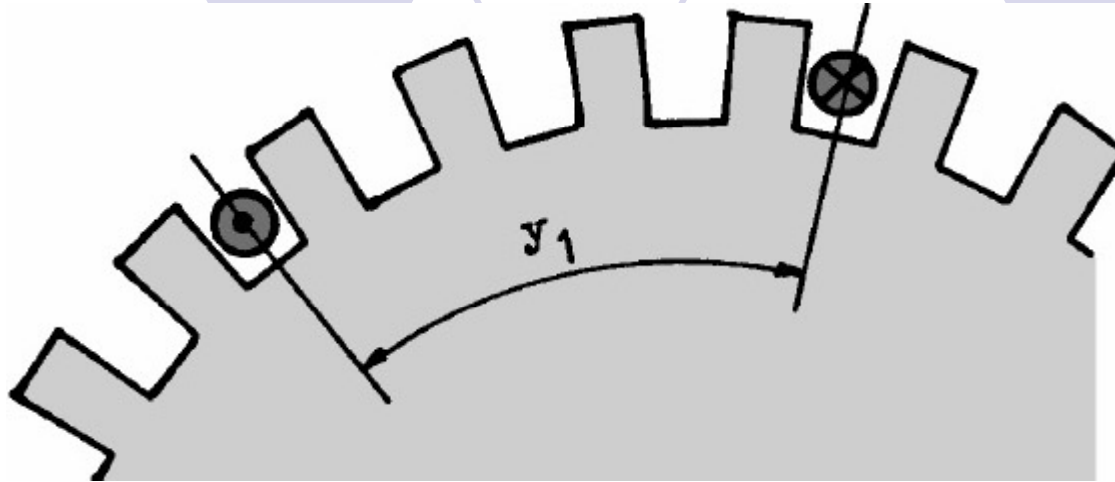


b) dos capas

Según el número de capas

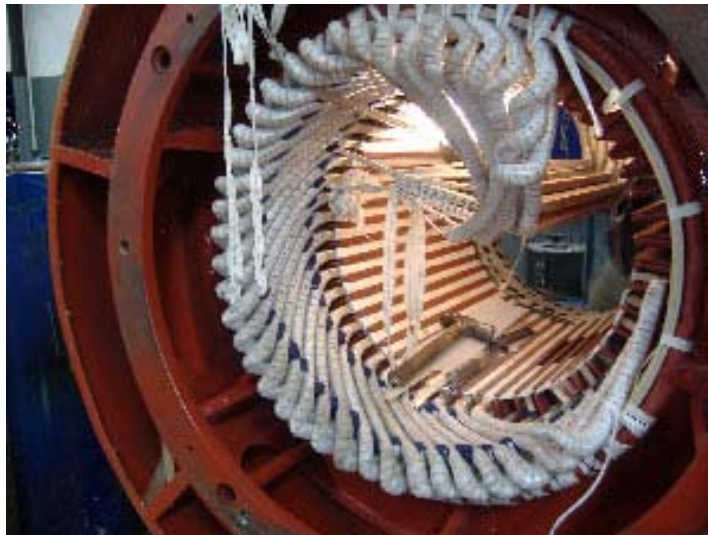
- Simple capa
 - Concéntricos de cadena
 - Solapados de corona y horquilla
 - Ondulados de horquilla y brida
- Doble capa
 - Solapados de corona y horquilla
 - Ondulados de brida

Devanados de las máquinas de c.a.



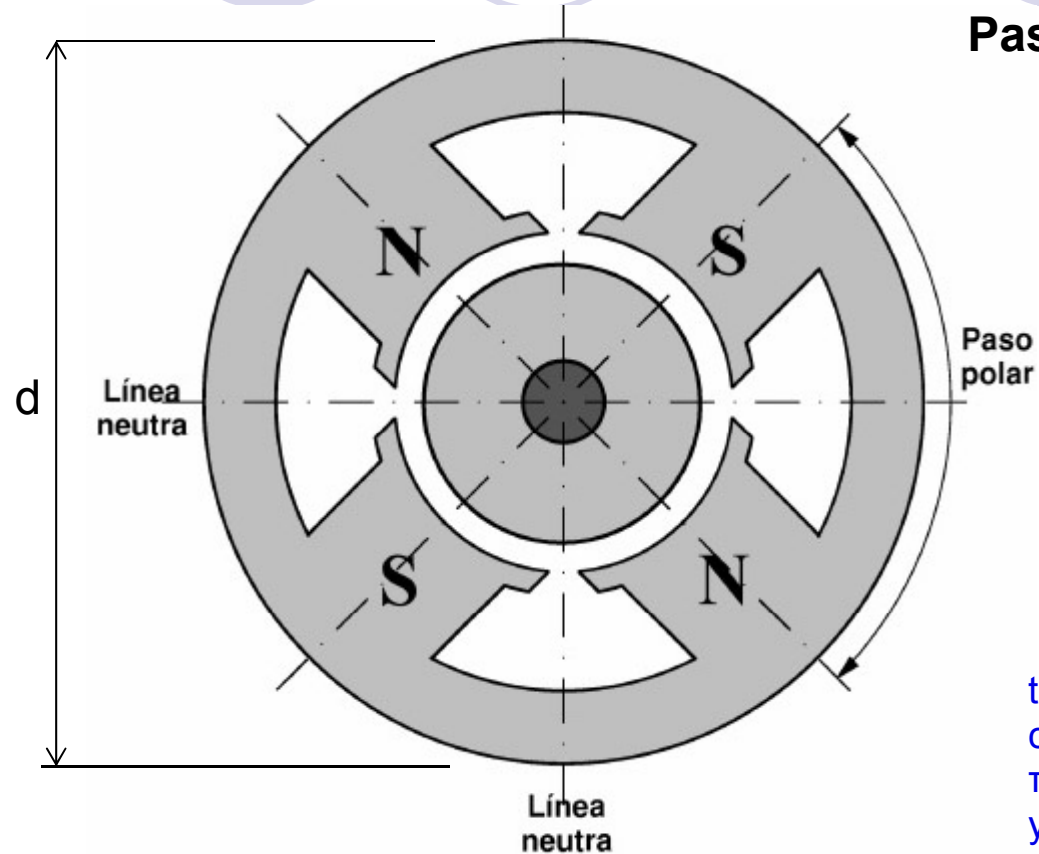
Bobina de paso y_1 igual a 4 ranuras

Se denomina **paso de bobina** a la **distancia que hay entre los dos lados activos de una misma bobina**. Al paso de bobina medido en número de ranuras se lo designara por y_1 . Los dos lados de una bobina deben estar situados frente a polos contiguos, lo que da lugar a que el paso de bobina no sea muy diferente del paso polar o distancia entre dos polos consecutivos.



Tareas manuales de bobinado

Devanados de las máquinas de c.a.



Paso polar:

$$t_p = \frac{\pi \cdot d}{2p}$$

$$\tau_p = \pi$$

$$y_p = \frac{K}{2p}$$

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

τ_p : Medido en radianes eléctricos

y_p : Medido en número de ranuras

K =Número total de ranuras

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

Devanados de las máquinas de c.a.

Dos de los más importantes factores a considerar, al pasar de la bobina simple elemental a los devanados prácticos son: **un mayor aprovechamiento del espacio disponible y una reducción de los armónicos.**

Concentrados

Una bobina por fase

Distribuidos

Muchas bobinas por polo y fase

Factor de distribución

Con el fin de utilizar la totalidad de la superficie del entrehierro, los devanados industriales se componen de **varias bobinas por fase, distribuidas convenientemente en ranuras equidistante.** En un devanado distribuido no todas las bobinas de una fase abarcan el mismo flujo

Paso del devanado

Diametral $y_1 = y_p$

Acortado $y_1 < y_p$

Alargado $y_1 > y_p$

Factor de paso

K = número de ranuras
 $2p$ = número de polos

$$y_p = \frac{K}{2p}$$

Con el objeto de mejorar la forma de onda de la tensión inducida o de la f.m.m. creada, los devanados, se pueden realizar con un ancho inferior a paso polar ($\pi D/2p$) (**devanados de paso acortado**) y, también, **con ranuras inclinadas.** La reducción de paso es muy fácil de realizar en los **devanados de doble capa.**

Ranuras

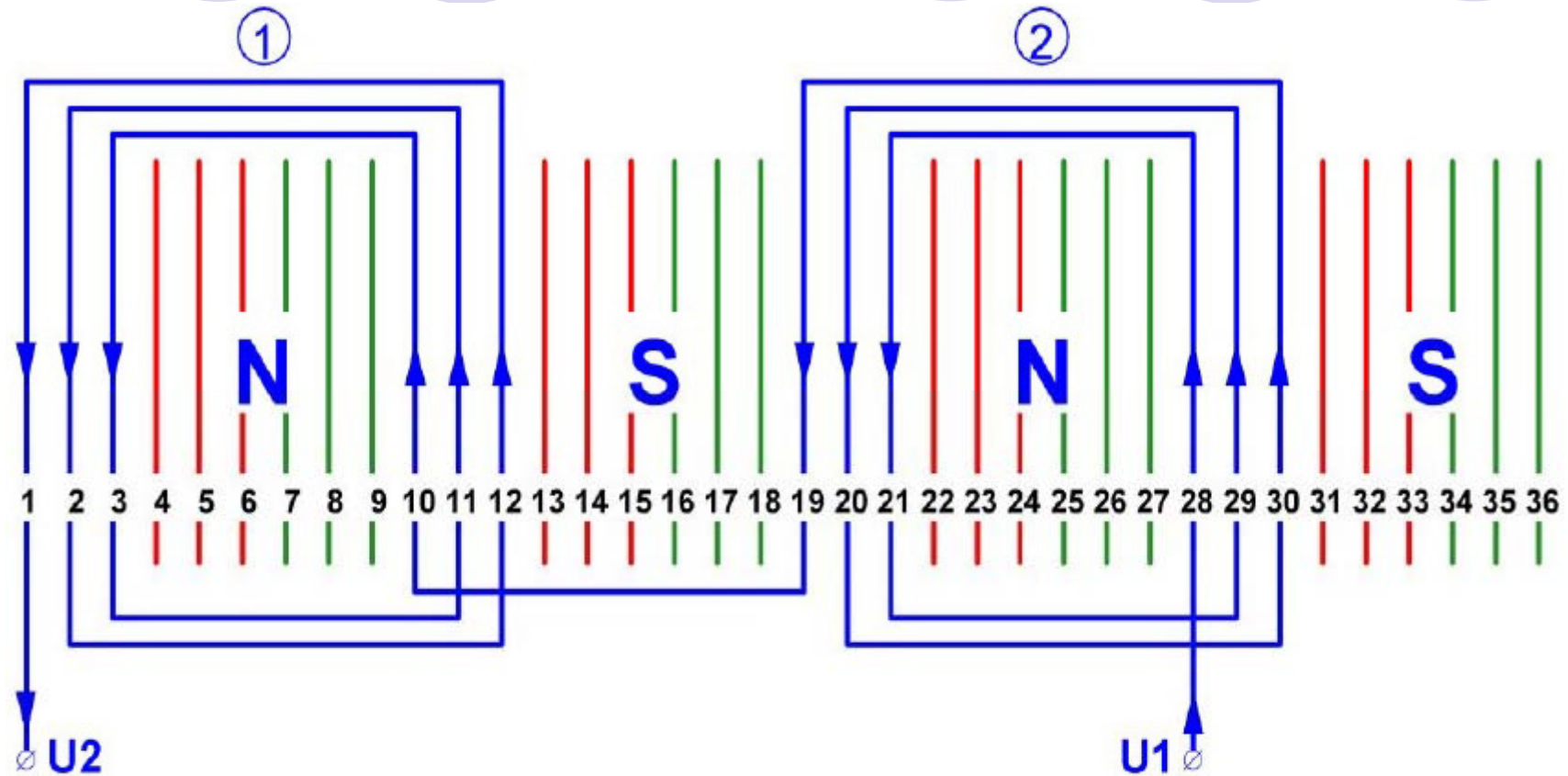
Longitudinales

Inclinadas

Factor de inclinación de ranuras

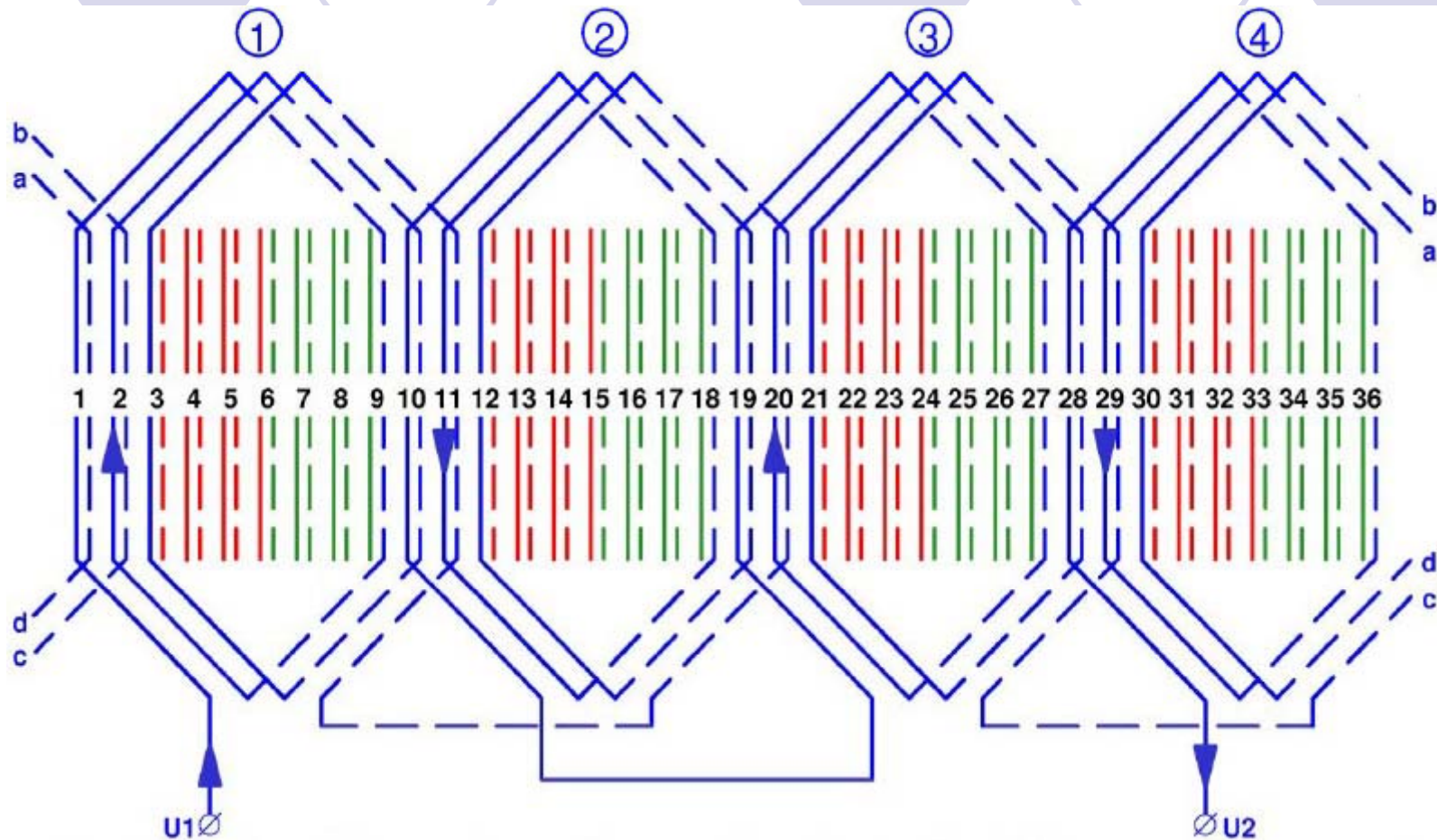
La principal ventaja del acortamiento de paso consiste en la posibilidad de eliminar determinados armónico de la onda de f.e.m. y a su vez reducir la longitud de las cabezas de bobina.

Devanados de las máquinas de c.a.



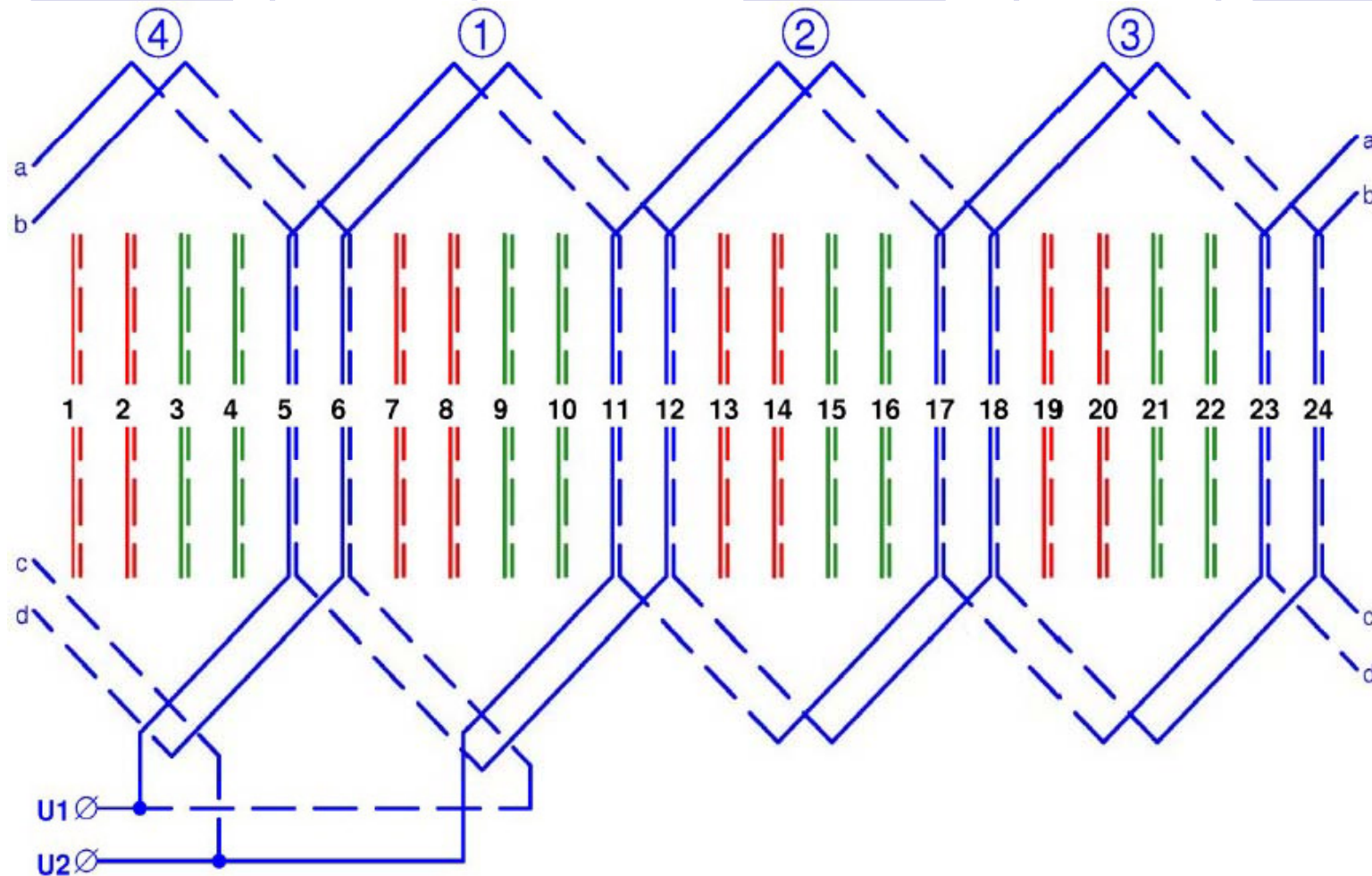
Bobinado trifásico concéntrico por polos consecuentes, de 4 polos, simple capa, 2 grupos polares por fase de 3 bobinas cada uno, $K = 36$ ranuras, $q = 3$ ranuras por polo y fase, $a' = 1$ rama en paralelo. Los dos grupos polares se han marcado como 1 y 2. Sólo se ha dibujado una de las tres fases.

Devanados de las máquinas de c.a.



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

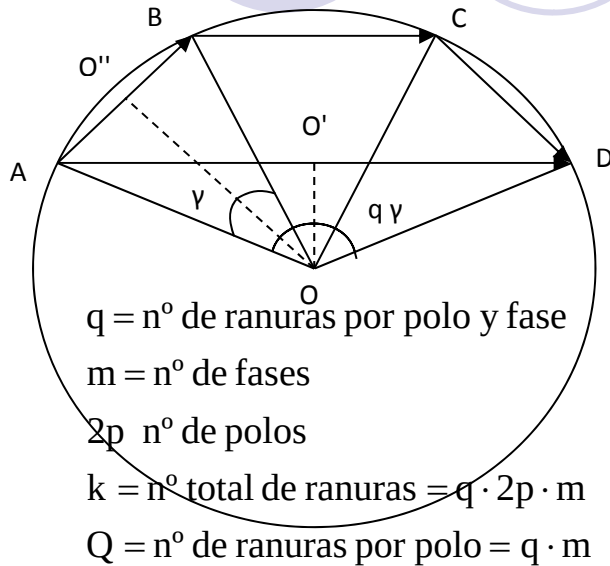
Devanados de las máquinas de c.a.



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

Devanados de las máquinas de c.a.

Factor de distribución



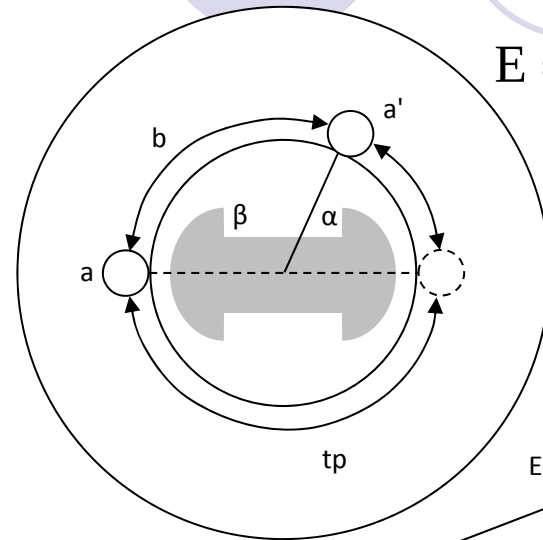
$$\xi_d = \frac{\text{cuerda}}{\text{arco}} = \frac{2 \cdot R \cdot \sin \frac{q \cdot \gamma}{2}}{R \cdot (q \cdot \gamma)} = \frac{\sin \frac{90}{m}}{q \cdot \sin \frac{90}{Q}}$$

γ = ángulo eléctrico que forman entre si las distintas ranuras donde esta distribuido el devanado.

γ_g = ángulo geométrico que forman entre si dichas ranuras.

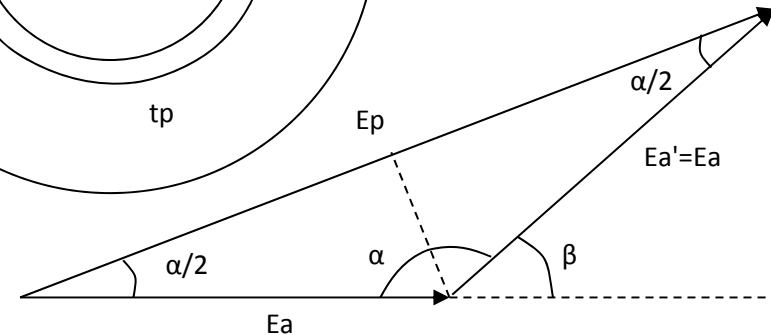
$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \gamma_g \cdot p \\ \gamma_g = \frac{360}{k} \end{array} \right\} \Rightarrow \gamma = \gamma_g \cdot p = \frac{360}{k} \cdot p = \frac{360 \cdot p}{2p \cdot q \cdot m} = \frac{180}{q \cdot m} = \frac{180}{Q}$$

Devanado de paso acortado



$$E = \xi_d \cdot \xi_p \cdot F \cdot N \cdot \hat{\phi} \cdot 4.44$$

$$E = \xi_d \cdot \xi_p \cdot E_c$$



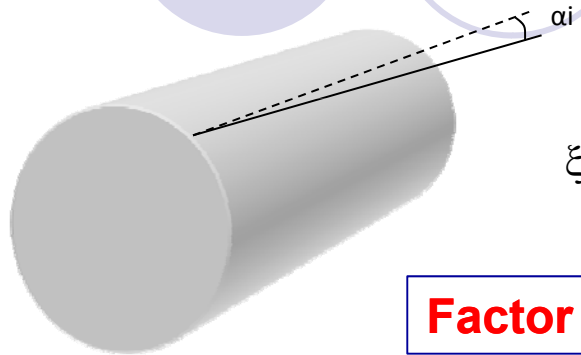
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Paso diametral} \Rightarrow E_{vp} = 2Ea \\ \text{Paso acortado} \Rightarrow E_p = 2Ea \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow \xi_p = \frac{E_p}{E_{vp}} < 1$$

Factor de paso acortado

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = 180 - \beta \\ \frac{\alpha}{2} = 90 - \frac{\beta}{2} \end{array} \right\} \Rightarrow \xi_p = \frac{E_p}{E_{vp}} = \frac{2Ea \cdot \cos \frac{\alpha}{2}}{2Ea} = \cos \frac{\alpha}{2} = \cos \left(90 - \frac{\beta}{2} \right) = \sin \frac{\beta}{2}$$

Devanados de las máquinas de c.a.

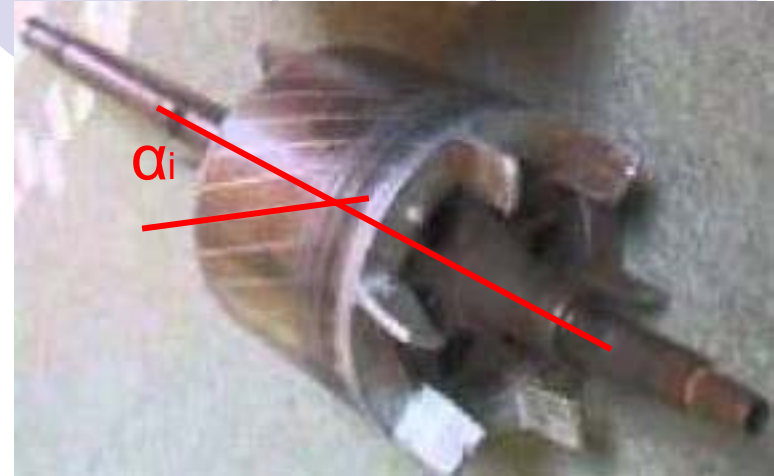
Devanado alojado en ranuras inclinadas



$$\xi_i = \frac{\sin \frac{\alpha_i}{2}}{\frac{\alpha_i}{2}}$$

Factor de ranura

Donde α_i es el ángulo de inclinación.



Como consecuencia de los factores vistos anteriormente, la expresión general de la f.e.m. inducida en un devanado constituido por bobinas de paso acortado y ranuras inclinadas en un campo de variación senoidal será:

$$E = \xi_d \cdot \xi_p \cdot \xi_i \cdot 4,44 \cdot N \cdot f_r \cdot \hat{\phi}$$

$$\xi = \xi_d \cdot \xi_p \cdot \xi_i$$

Factor de devanado (k)

Si $N' = 2N$, número total de conductores en serie por fase

$$E = \xi_F \cdot \underbrace{\xi_d \cdot \xi_p \cdot \xi_i}_{\text{Factor de devanado } \xi} \cdot 4 \cdot N \cdot f_r \cdot \hat{\phi} = 4 \cdot \xi_F \cdot \xi \cdot N \cdot f_r \cdot \hat{\phi} = \underbrace{2 \cdot \xi_F \cdot \xi}_{\substack{\text{Factor de Kapp} \\ \xi_K = 2 \cdot \xi_F \cdot \xi}} \cdot N' \cdot f \cdot \hat{\phi}$$