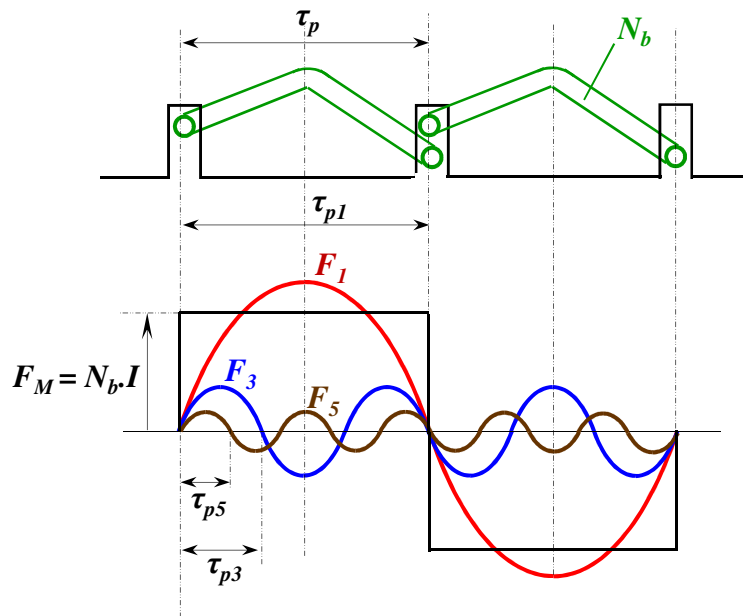


**CAMPOS MAGNÉTICOS HARMÔNICOS NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**



1 BOBINA CONCENTRADA COM Nº DE ESPIRAS  $N_b$

→ PRODUZ DISTRIBUIÇÃO DE F.M.M RETANGULAR :

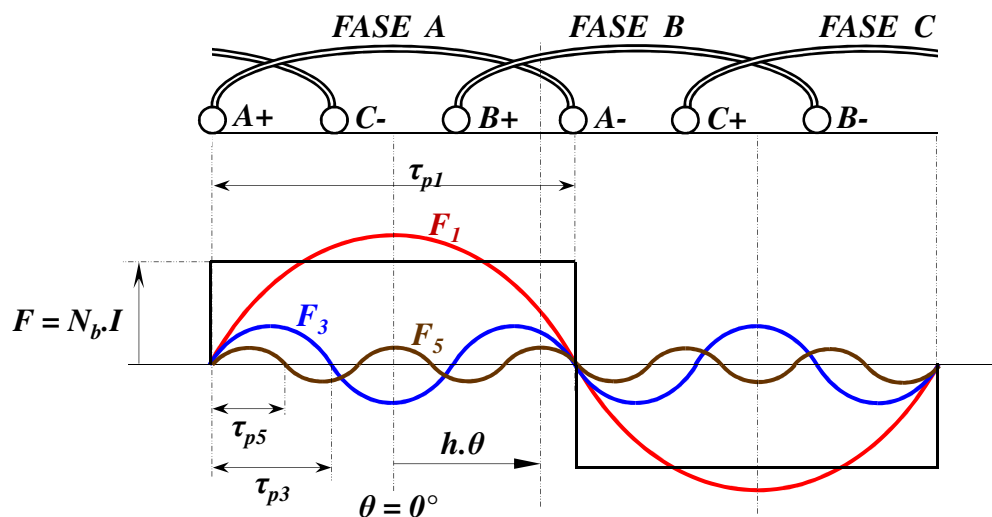
$$\rightarrow F_M = N_b \cdot I = F_1 \cdot \cos \theta + F_3 \cdot \cos 3\theta + F_5 \cdot \cos 5\theta + \dots + F_h \cdot \cos h\theta$$

DECOMPOSIÇÃO EM SÉRIE DE FOURIER DA ONDA RETANGULAR

$$\rightarrow F_{1p} = \frac{4}{\pi} F_M : \text{COMPONENTE FUNDAMENTAL DE CAMPO}$$

$$\rightarrow F_{3p} = \frac{1}{3} \cdot \frac{4}{\pi} F_M : \text{COMPONENTE DE 3º HARMÔNICO DE CAMPO}$$

$$\rightarrow F_{hp} = \frac{1}{h} \cdot \frac{4}{\pi} F_M : \text{COMPONENTE HARMÔNICO DE CAMPO DE ORDEM } h$$



EM ENROLAMENTOS TRIFÁSICOS, CADA UMA DAS FASES FICA COM A DISTRIBUIÇÃO DE F.M.M. AFETADA DO CONTEÚDO HARMÔNICO INDICADO ACIMA:

$$\rightarrow F_A(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot \theta$$

$$\rightarrow F_B(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot (\theta - 120^\circ)$$

$$\rightarrow F_C(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot (\theta - 240^\circ)$$

**CAMPOS MAGNÉTICOS HARMÔNICOS NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**

$$F_A(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot \theta ; F_B(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot (\theta - 120^\circ) ; F_C(\theta, t) = F_M(t) \cdot \cos h \cdot (\theta - 240^\circ) \rightarrow F_{RES}(\theta, t) = F_A(\theta, t) + F_B(\theta, t) + F_C(\theta, t)$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot \cos \omega t \cdot \cos h \cdot \theta + F_M \cdot \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos h \cdot (\theta - 120^\circ) + F_M \cdot \cos(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos h \cdot (\theta - 240^\circ) = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \cdot \theta + \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos h \cdot (\theta - 120^\circ) + \cos(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos h \cdot (\theta - 240^\circ)]$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \theta + \cos(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(h\theta - 120 \cdot h) + \cos(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos(h\theta - 240 \cdot h)] = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \theta + (\cos \omega t \cdot \cos 120 + \sin \omega t \cdot \sin 120) \cdot (\cos h \theta \cdot \cos 120 \cdot h + \sin h \theta \cdot \sin 120 \cdot h) + (\cos \omega t \cdot \cos 240 + \sin \omega t \cdot \sin 240) \cdot (\cos h \theta \cdot \cos 240 \cdot h + \sin h \theta \cdot \sin 240 \cdot h)]$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \theta + (-1/2 \cos \omega t + \sqrt{3}/2 \sin \omega t) \cdot (\cos h \theta \cdot \cos 120 \cdot h + \sin h \theta \cdot \sin 120 \cdot h) + (-1/2 \cos \omega t - \sqrt{3}/2 \sin \omega t) \cdot (\cos h \theta \cdot \cos 240 \cdot h + \sin h \theta \cdot \sin 240 \cdot h)]$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \theta - 1/2 \cos \omega t \cdot \cos h \theta \cdot \cos 120 \cdot h - 1/2 \cos \omega t \cdot \sin h \theta \cdot \sin 120 \cdot h + \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \cos h \theta \cdot \cos 120 \cdot h + \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h \theta \cdot \sin 120 \cdot h - 1/2 \cos \omega t \cdot \cos h \theta \cdot \cos 240 \cdot h - 1/2 \cos \omega t \cdot \sin h \theta \cdot \sin 240 \cdot h - \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \cos h \theta \cdot \cos 240 \cdot h - \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h \theta \cdot \sin 240 \cdot h]$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\cos \omega t \cdot \cos h \theta - 1/2 \cos \omega t \cdot \cos h \theta \cdot (\cos 120 \cdot h + \cos 240 \cdot h) - 1/2 \cos \omega t \cdot \sin h \theta \cdot (\sin 120 \cdot h + \sin 240 \cdot h) + \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \cos h \theta \cdot (\cos 120 \cdot h - \cos 240 \cdot h) + \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h \theta \cdot (\sin 120 \cdot h - \sin 240 \cdot h)]$$

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\underbrace{\cos \omega t \cdot \cos h \theta \cdot (1 - 1/2 \cos 120 \cdot h - 1/2 \cos 240 \cdot h)}_A - \underbrace{1/2 \cos \omega t \cdot \sin h \theta \cdot (\sin 120 \cdot h + \sin 240 \cdot h)}_B + \underbrace{\sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \cos h \theta \cdot (\cos 120 \cdot h - \cos 240 \cdot h)}_C + \underbrace{\sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h \theta \cdot (\sin 120 \cdot h - \sin 240 \cdot h)}_D]$$

**→ B e C : SEMPRE NULOS, PARA QUALQUER VALOR DE h**

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [\underbrace{\cos \omega t \cdot \cos h \theta \cdot (1 - 1/2 \cos 120 \cdot h - 1/2 \cos 240 \cdot h)}_A + \underbrace{\sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h \theta \cdot (\sin 120 \cdot h - \sin 240 \cdot h)}_D]$$

**PARA:  $h = 1$  →  $A = 1 - 1/2 \cdot \cos 120^\circ - 1/2 \cdot \cos 240^\circ = 1,5$  ;  $D = \sin 120^\circ - \sin 240^\circ = \sqrt{3}/2 + \sqrt{3}/2 = \sqrt{3}$**

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [1,5 \cdot \cos \omega t \cdot \cos h \theta + \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \sin \omega t \cdot \sin h \theta] = 1,5 \cdot F_M \cdot (\cos \omega t \cdot \cos h \theta + \sin \omega t \cdot \sin h \theta) = 1,5 \cdot F_M \cdot \cos(h \cdot \theta - \omega t)$$

$$F_{RES}(\theta, t) = 1,5 \cdot F_M \cdot \cos(\theta - \omega t)$$

**→ EQ. DE ONDA DO CAMPO ROTATIVO FUNDAMENTAL**

**OBSERVADOR QUE ACOMPANHA A ONDA DE CAMPO VERIFICANDO SEMPRE A SUA MAGNITUDE MÁXIMA, DEVE SE DESLOCAR NO TEMPO AO LONGO DO ÂNGULO  $\theta$  COM VELOCIDADE TAL QUE:  $\theta - \omega t = 0$**

**→ SUA VELOCIDADE É PORTANTO IGUAL À VELOCIDADE SÍNCRONA DO CAMPO FUNDAMENTAL:  $\omega_s = d\theta/dt = \omega$**

## CAMPOS MAGNÉTICOS HARMÔNICOS NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

$$F_{RES}(\theta, t) = F_M \cdot [ \underbrace{\cos \omega t \cdot \cos h\theta \cdot (1 - 1/2 \cos 120h - 1/2 \cos 240h)}_A + \sqrt{3}/2 \sin \omega t \cdot \sin h\theta \cdot (\underbrace{\sin 120h - \sin 240h}_D) ]$$

PARA:  $h = 3 \rightarrow A = 1 - 1/2 \cdot \cos 360^\circ - 1/2 \cdot \cos 720^\circ = 0$  ;  $D = \sin 360^\circ - \sin 720^\circ = 0$

$F_{RES}(\theta, t) = 0 \rightarrow$  NÃO EXISTEM COMPONENTES DE CAMPO ROTATIVO DE 3ª ORDEM NO ENROLAMENTO TRIFÁSICO

PARA:  $h = 5 \rightarrow A = 1 - 1/2 \cdot \cos 600^\circ - 1/2 \cdot \cos 1200^\circ = 1,5$  ;  $D = \sin 600^\circ - \sin 1200^\circ = -\sqrt{3}$

$$F_{RES}(\theta, t) = F'_M \cdot [ 1,5 \cdot \cos \omega t \cdot \cos h\theta + \sqrt{3}/2 \cdot -\sqrt{3} \sin \omega t \cdot \sin h\theta ] = 1,5 \cdot F'_M \cdot (\cos \omega t \cdot \cos h\theta - \sin \omega t \cdot \sin h\theta) = 1,5 \cdot F'_M \cdot \cos (h\theta + \omega t)$$

$$F_{RES}(\theta, t) = 1,5 \cdot F'_M \cdot \cos (5\theta + \omega t)$$

$\rightarrow$  EQ. DE ONDA DO COMPONENTE DE 5ª

HARMÔNICO DE CAMPO ROTATIVO :

$\rightarrow$  MAGNITUDE :  $F'_M = 1/5 \cdot F_M$

OBSERVADOR QUE ACOMPANHA A ONDA DE CAMPO VERIFICANDO SEMPRE A SUA MAGNITUDE MÁXIMA, DEVE SE DESLOCAR NO TEMPO AO LONGO DO ÂNGULO  $\theta$  COM VELOCIDADE TAL QUE:  $5\theta + \omega t = 0$

$\rightarrow$  SUA VELOCIDADE É PORTANTO IGUAL À VELOCIDADE SÍNCRONA DO COMPONENTE DE CAMPO DE 5ª ORDEM :

$\omega_s = d\theta/dt = -\omega / 5 \rightarrow$  5ª HARMÔNICO SE DESLOCA EM SENTIDO CONTRÁRIO AO CAMPO FUNDAMENTAL, COM 1/5 DA SUA VELOCIDADE

PARA:  $h = 7 \rightarrow A = 1 - 1/2 \cdot \cos 840^\circ - 1/2 \cdot \cos 1680^\circ = 1,5$  ;  $D = \sin 840^\circ - \sin 1680^\circ = \sqrt{3}$

$$F_{RES}(\theta, t) = F'_M \cdot [ 1,5 \cdot \cos \omega t \cdot \cos h\theta + \sqrt{3}/2 \cdot \sqrt{3} \sin \omega t \cdot \sin h\theta ] = 1,5 \cdot F'_M \cdot (\cos \omega t \cdot \cos h\theta + \sin \omega t \cdot \sin h\theta) = 1,5 \cdot F'_M \cdot \cos (h\theta - \omega t)$$

$$F_{RES}(\theta, t) = 1,5 \cdot F'_M \cdot \cos (7\theta - \omega t)$$

$\rightarrow$  EQ. DE ONDA DO COMPONENTE DE 7ª

HARMÔNICO DE CAMPO ROTATIVO :

$\rightarrow$  MAGNITUDE :  $F'_M = 1/7 \cdot F_M$

OBSERVADOR QUE ACOMPANHA A ONDA DE CAMPO VERIFICANDO SEMPRE A SUA MAGNITUDE MÁXIMA, DEVE SE DESLOCAR NO TEMPO AO LONGO DO ÂNGULO  $\theta$  COM VELOCIDADE TAL QUE:  $7\theta - \omega t = 0$

$\rightarrow$  SUA VELOCIDADE É PORTANTO IGUAL À VELOCIDADE SÍNCRONA DO COMPONENTE DE CAMPO DE 7ª ORDEM :

$\omega_s = d\theta/dt = \omega / 7 \rightarrow$  7ª HARMÔNICO SE DESLOCA NO MESMO SENTIDO DO CAMPO FUNDAMENTAL, COM 1/7 DA SUA VELOCIDADE

**CAMPOS MAGNÉTICOS HARMÔNICOS NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA****CAMPO GIRANTE TOTAL RESULTANTE NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA COM ENROLAMENTO TRIFÁSICO**

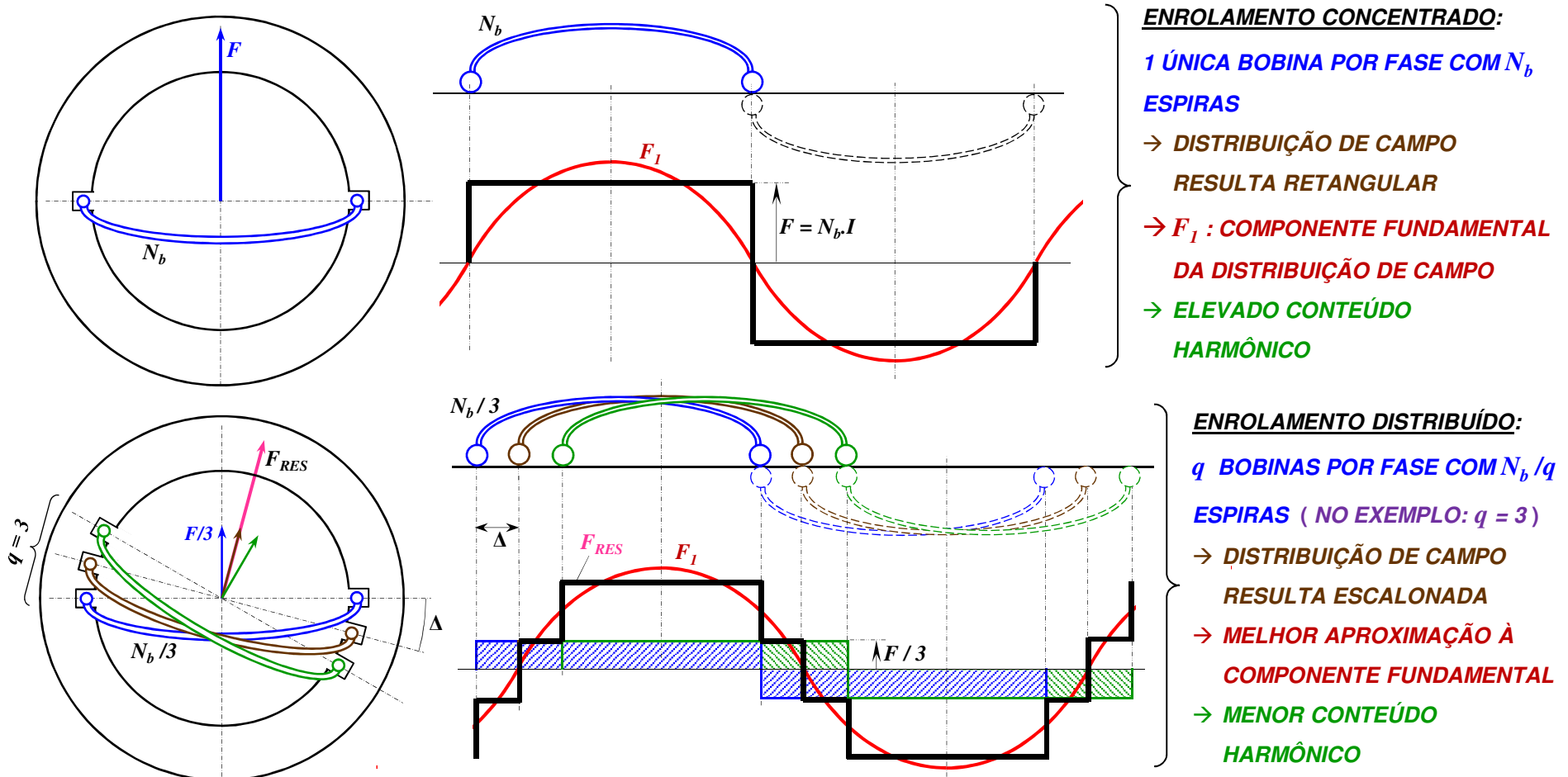
$$F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta \pm \omega t)$$

**COMPONENTE FUNDAMENTAL :  $h = 1 \rightarrow F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(\theta - \omega t) \rightarrow$  SEQUÊNCIA POSITIVA****MAGNITUDE :  $1,5.F'_M$** **VELOCIDADE SÍNCRONA :  $\omega_s = \omega$** **COMPONENTES TRIPLAS :  $h = 3.n ; n = 1, 3, 5, 7, \dots \rightarrow F_{RES}(\theta, t) = 0 \rightarrow$  INEXISTENTES NO TRIFÁSICO****COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA :  $h = 6.n + 1 ; n = 0, 1, 2, 3, \dots$  ( $h = 1 ; 7 ; 13 ; 19 \dots$ )** **$F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta - \omega t) \rightarrow$  SEQUÊNCIA POSITIVA****MAGNITUDE :  $1,5.F'_M - F'_M = 1/h \cdot F'_M$** **VELOCIDADE SÍNCRONA :  $\omega_s = + \omega / h$** **COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA :  $h = 6.n - 1 ; n = 1, 2, 3, 4, \dots$  ( $h = 5 ; 11 ; 17 ; 23 \dots$ )** **$F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta + \omega t) \rightarrow$  SEQUÊNCIA NEGATIVA****MAGNITUDE :  $1,5.F'_M - F'_M = 1/h \cdot F'_M$** **VELOCIDADE SÍNCRONA :  $\omega_s = - \omega / h$** **COMPONENTES HARMÔNICOS DE CAMPO GIRANTE PERTURBAM A OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA, NOTADAMENTE NA REGIÃO DA PARTIDA  $\rightarrow$  NECESSÁRIOS MÉTODOS PARA SUA MINIMIZAÇÃO**

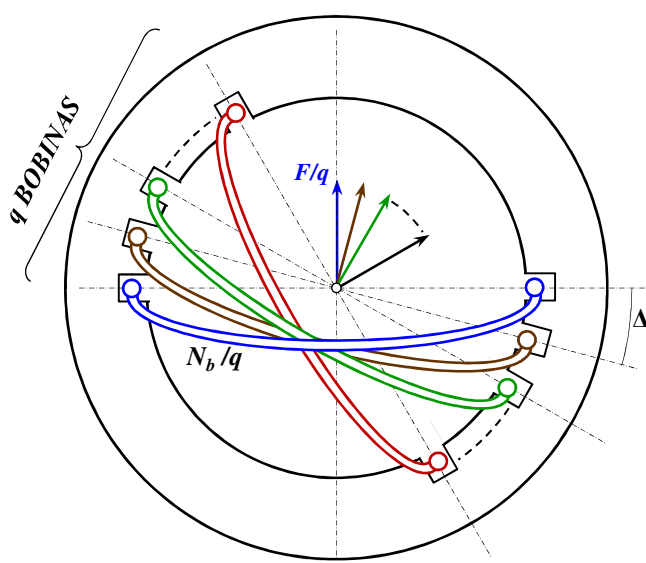
CAMPOS MAGNÉTICOS HARMÔNICOS NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

MÉTODOS DE MINIMIZAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DE CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS :

- **APRIMORAMENTO DA EXECUÇÃO DO ENROLAMENTO DE ESTATOR ( E DO ENROLAMENTO DE ROTOR NA MÁQUINA DE ANÉIS )**
- **AÇÕES SEMELHANTES ÀS ADOTADAS NA MÁQUINA SÍNCRONA PARA FILTRAR HARMÔNICOS DE TENSÃO INDUZIDA**
- **DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO AO INVÉS DE BOBINAS CONCENTRADAS**
- **ENCURTAMENTO DE PASSO DAS BOBINAS AO INVÉS DE BOBINAS DE PASSO PLENO**



**ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO:**



CADA FASE TEM A SUA BOBINA DISTRIBUÍDA EM UM GRUPO COM “q”  
FRAÇÕES, CADA FRAÇÃO CONSTITUÍDA DE  $N_b / q$  ESPIRAS

NOS ENROLAMENTOS USUAIS :  $q = \frac{N^\circ \text{ de ranhuras}}{2p \cdot m}$

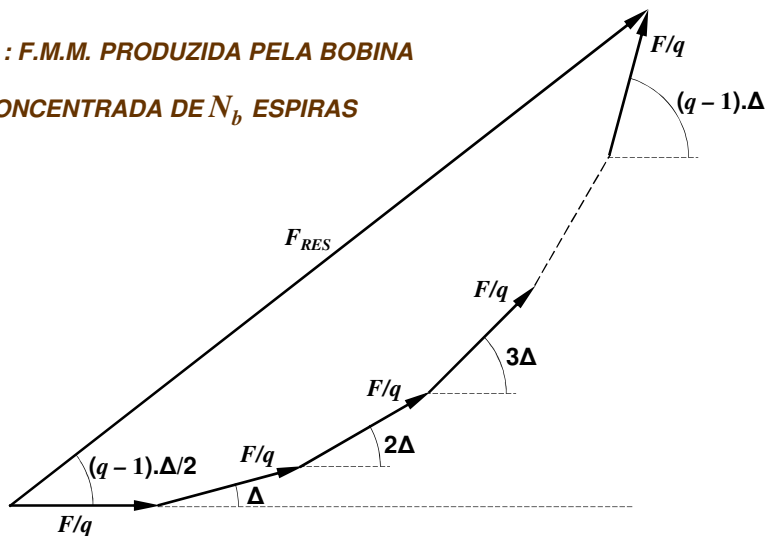
DISTÂNCIA ANGULAR ENTRE BOBINAS → PASSO DE RANHURA :  $\Delta$  (º el)

$$\Delta = \frac{360^\circ \cdot p}{N^\circ \text{ de ranhuras do estator}}$$

→  $p$  : N° DE PARES DE POLOS -  $m$  : N° DE FASES

**FORÇA MAGNETOMOTRIZ RESULTANTE NO CASO GERAL DE DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO:**

$F$  : F.M.M. PRODUZIDA PELA BOBINA  
CONCENTRADA DE  $N_b$  ESPIRAS



$F_{RES}$  : F.M.M. PRODUZIDA PELO GRUPO DE BOBINAS  
DISTRIBUÍDAS DE  $N_b / q$  ESPIRAS CADA UMA

$$F_{RES} = \frac{F}{q} \cdot \underbrace{(1 + e^{j\Delta} + e^{j2\Delta} + e^{j3\Delta} + \dots + e^{j(q-1)\Delta})}_{\sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j \cdot n \cdot \Delta} \rightarrow \text{SOMA DOS "n" TERMOS DE UMA P.G. COM RAZÃO } e^{j \cdot \Delta}}$$

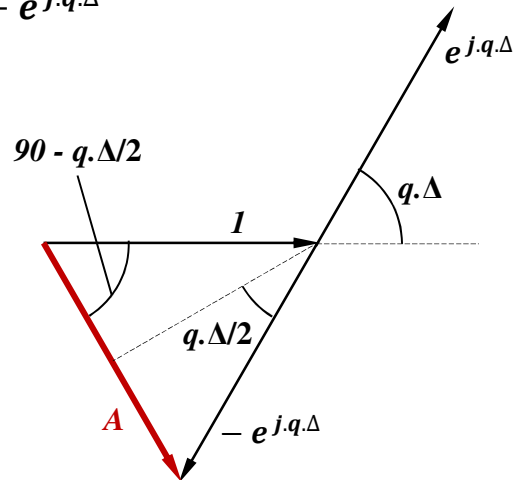
**ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO:**

$$\sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} \Rightarrow \begin{aligned} (1) \quad & \sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} = 1 + e^{j.\Delta} + e^{j.2\Delta} + e^{j.3\Delta} + \dots + e^{j.(q-1).\Delta} \\ (2) \quad & e^{j.\Delta} \cdot \sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} = e^{j.\Delta} + e^{j.2\Delta} + e^{j.3\Delta} + \dots + e^{j.(q-1).\Delta} + e^{j.q.\Delta} \end{aligned}$$

$$(1) - (2) \quad (1 - e^{j.\Delta}) \sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} = 1 - e^{j.q.\Delta} \Rightarrow \sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} = \frac{1 - e^{j.q.\Delta}}{(1 - e^{j.\Delta})} = \frac{A}{B}$$

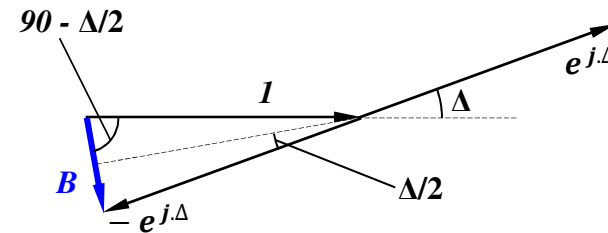
**RESOLUÇÃO GRÁFICA DOS VETORES A e B:**

$$A = 1 - e^{j.q.\Delta}$$



$$A = 2 \cdot \text{sen} \frac{q \cdot \Delta}{2} \cdot e^{-j \cdot (90 - \frac{q \cdot \Delta}{2})}$$

$$B = 1 - e^{j.\Delta}$$



$$B = 2 \cdot \text{sen} \frac{\Delta}{2} \cdot e^{-j \cdot (90 - \frac{\Delta}{2})}$$

**ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO:**

$$\sum_{n=0}^{(q-1)} e^{j.n.\Delta} = \frac{A}{B} = \frac{2 \cdot \text{sen} \frac{q \cdot \Delta}{2} \cdot e^{-j \cdot (90 - q \cdot \frac{\Delta}{2})}}{2 \cdot \text{sen} \frac{\Delta}{2} \cdot e^{-j \cdot (90 - \frac{\Delta}{2})}} = \frac{\text{sen} \frac{q \cdot \Delta}{2}}{\text{sen} \frac{\Delta}{2}} \cdot e^{+j \cdot (q-1) \cdot \frac{\Delta}{2}} \Rightarrow F_{res} = \frac{F}{q} \cdot \frac{\text{sen} \frac{q \cdot \Delta}{2}}{\text{sen} \frac{\Delta}{2}} \cdot e^{+j \cdot (q-1) \cdot \frac{\Delta}{2}}$$

**FATOR DE ATENUAÇÃO DA F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO, EM RELAÇÃO À QUE SERIA PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO CONCENTRADO:**

$$\frac{|F_{RES}|}{F} = \frac{\text{sen} \frac{q \cdot \Delta}{2}}{q \cdot \text{sen} \frac{\Delta}{2}} = K_d \rightarrow \text{FATOR DE DISTRIBUIÇÃO DO ENROLAMENTO } (K_d < 1)$$

**F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO CONCENTRADO :  $F = N_b \cdot I$**

**F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO :  $F_{RES} = N_b \cdot I \cdot K_d$**

**→ PARA A MESMA CORRENTE PERCORRENDO AMBOS, CONSIDERA-SE QUE NO ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO O Nº DE ESPIRAS EFETIVO É MENOR QUE O REAL, DADO POR:  $N_{ef} = N_b \cdot K_d$**

**PARA OS CAMPOS HARMÔNICOS, TODOS OS ÂNGULOS ELÉTRICOS FICAM MULTIPLICADOS PELA ORDEM  $h$  DO COMPONENTE :**

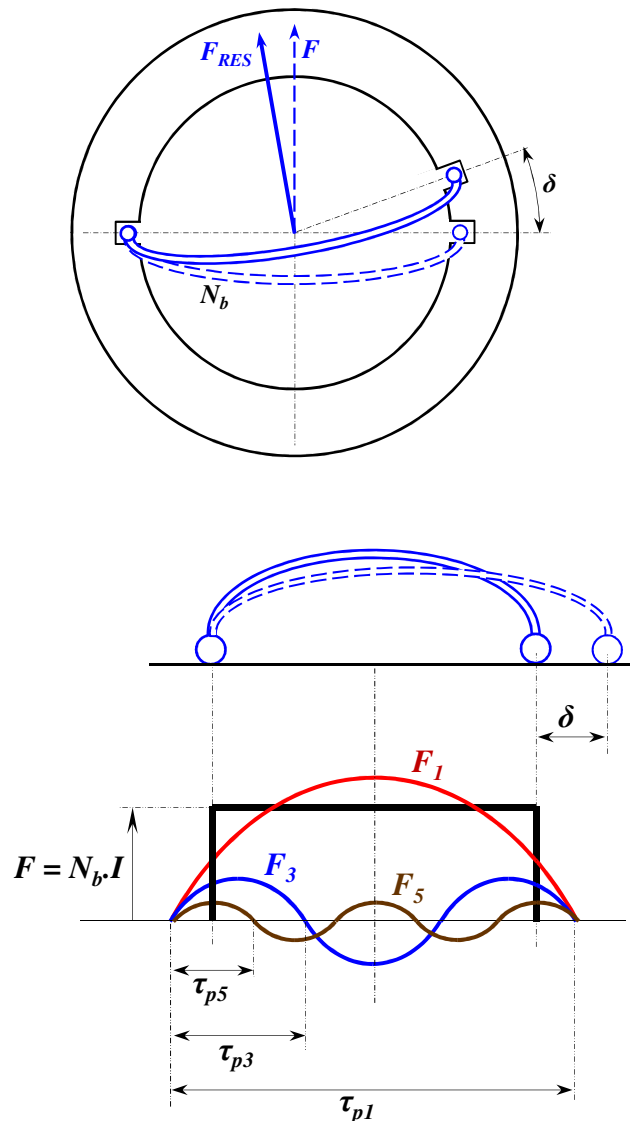
$$K_{dh} = \frac{\text{sen} \frac{q \cdot h \cdot \Delta}{2}}{q \cdot \text{sen} \frac{h \cdot \Delta}{2}}$$

**FATOR DE DISTRIBUIÇÃO HARMÔNICO DO ENROLAMENTO:**

**PARA COMPONENTE FUNDAMENTAL:  $h = 1 \rightarrow K_{dh} \approx 1$  ; EMBORA SEMPRE  $< 1$**

**PARA COMPONENTES HARMÔNICOS:  $h = 5 ; 7 ; 11 ; 13 \dots \rightarrow K_{dh} \ll 1$**



**ENROLAMENTO COM ENCURTAMENTO DE PASSO:****ENROLAMENTO DE PASSO PLENO:****BOBINA COM PASSO IGUAL AO PASSO POLAR**

→ DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO RESULTA RETANGULAR COM F.M.M. DE MESMA ABRANGÊNCIA DA ONDA FUNDAMENTAL

→  $F_1$  : COMPONENTE FUNDAMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO

→ ELEVADO CONTEÚDO HARMÔNICO

**ENROLAMENTO COM PASSO ENCURTADO:****BOBINAS COM PASSO INFERIOR AO PASSO POLAR**

→ DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO RESULTA RETANGULAR, PORÉM COM F.M.M. DE ABRANGÊNCIA REDUZIDA EM RELAÇÃO À ONDA FUNDAMENTAL

→ MELHOR APROXIMAÇÃO À COMPONENTE FUNDAMENTAL

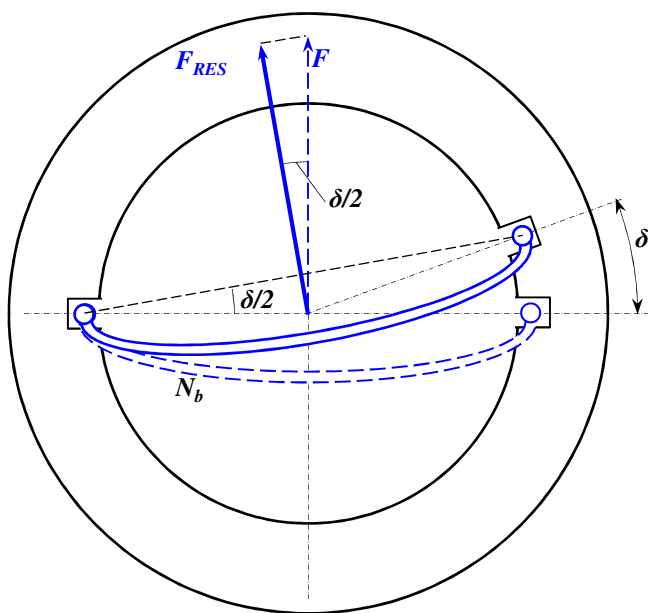
→ MENOR CONTEÚDO HARMÔNICO

ÂNGULO DE ENCURTAMENTO:  $\delta$  (°el)

$\delta = n \cdot \Delta$  ;  $n$  : NÚMERO INTEIRO → ENCURTAMENTO SEMPRE FEITO DE RANHURA EM RANHURA, OBRIGANDO O ÂNGULO DE ENCURTAMENTO SER MÚLTIPLO INTEIRO DO PASSO DE RANHURA

**IDÉIA CENTRAL DO ENCURTAMENTO: REDUZIR OU ELIMINAR O FLUXO HARMÔNICO NO ENTREFERRO ( NO EXEMPLO, ENCURTAMENTO IGUAL AO PASSO POLAR DO 5º HARMÔNICO → PASSO “SINTONIZADO” NO HARMÔNICO DE 5ª ORDEM, ELIMINANDO ESSE COMPONENTE )**

## ENROLAMENTO COM ENCURTAMENTO DE PASSO:



$F$  : F.M.M. PRODUZIDA PELA BOBINA  
PASSO PLENO DE  $N_b$  ESPIRAS

$F_{RES}$  : F.M.M. PRODUZIDA PELA BOBINA  
DE PASSO ENCURTADO DE  $N_b$  ESPIRAS

$$F_{RES} = F \cdot \cos \frac{\delta}{2} \cdot e^{j \frac{\delta}{2}}$$

FATOR DE ATENUAÇÃO DA F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DE PASSO ENCURTADO, EM RELAÇÃO À QUE SERIA PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DE PASSO PLENO:

$$\frac{|F_{RES}|}{F} = \cos \frac{\delta}{2} = K_c \rightarrow \text{FATOR DE CORDA DO ENROLAMENTO } (K_c < 1)$$

F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO PASSO PLENO :  $F = N_b \cdot I$

F.M.M. PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DE PASSO ENCURTADO :  $F_{RES} = N_b \cdot I \cdot K_c$

→ PARA A MESMA CORRENTE PERCORRENDO AMBOS, CONSIDERA-SE QUE NO ENROLAMENTO ENCURTADO O Nº DE ESPIRAS EFETIVO É MENOR QUE O REAL, DADO POR:  $N_{ef} = N_b \cdot K_c$

PARA OS CAMPOS HARMÔNICOS, TODOS OS ÂNGULOS ELÉTRICOS FICAM MULTIPLICADOS PELA ORDEM  $h$  DO COMPONENTE :

$$K_{ch} = \cos \frac{h \cdot \delta}{2}$$

FATOR DE CORDA ( OU DE ENCURTAMENTO ) HARMÔNICO DO ENROLAMENTO:

PARA COMPONENTE FUNDAMENTAL:  $h = 1 \rightarrow K_{ch} \approx 1$  ; EMBORA SEMPRE  $< 1$

PARA COMPONENTES HARMÔNICOS:  $h = 5 ; 7 ; 11 ; 13 \dots \rightarrow K_{ch} \ll 1$

**OS ENROLAMENTOS USUAIS DAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO SÃO DOTADAS DE DISTRIBUIÇÃO + ENCURTAMENTO**

**O FATOR DE ATENUAÇÃO DA F.M.M. PRODUZIDA POR UM ENROLAMENTO DISTRIBUÍDO E ENCURTADO, EM RELAÇÃO A UM ENROLAMENTO ISENTO DESSES APRIMORAMENTOS, TAMBÉM QUANTIFICADO PELO N° DE ESPIRAS EFETIVO, JÁ CONSIDERANDO O CONTEÚDO HARMÔNICO, É DADO POR:**

$$N_{efh} = N_b \cdot K_{dh} \cdot K_{ch} = N_b \cdot K_{eh} \rightarrow K_{eh} = K_{dh} \cdot K_{ch} : \text{FATOR DE ENROLAMENTO PARA O HARMÔNICO DE ORDEM } h$$

**PARA COMPONENTE FUNDAMENTAL:  $h = 1 \rightarrow K_{eh} \approx 1$  ; EMBORA SEMPRE  $< 1$**

**PARA COMPONENTES HARMÔNICOS:  $h = 5 ; 7 ; 11 ; 13 \dots\dots \rightarrow K_{eh} \ll 1$**

**CONTEÚDO HARMÔNICO GLOBAL DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA :**

$$C_h = \sqrt{\frac{\left(\frac{K_{e5}}{5}\right)^2 + \left(\frac{K_{e7}}{7}\right)^2 + \left(\frac{K_{e11}}{11}\right)^2 \dots\dots + \left(\frac{K_{ei}}{i}\right)^2}{N^\circ \text{ de harmônicos considerados da } 5^{\text{a}} \text{ até a } i^{\text{a}}}}$$

**$C_h$  : PARÂMETRO PARA COMPARAÇÃO DE QUALIDADE DE ENROLAMENTOS COM RESPEITO AO TEOR DE HARMÔNICOS PRODUZIDOS NA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ROTATIVO  $\rightarrow$  EM GERAL SE CONSIDERA OS COMPONENTES ÍMPARES ATÉ A 17ª OU 23ª ORDEM ( LEMBRANDO QUE INEXISTEM OS MÚLTIPLOS DE 3 EM ENROLAMENTOS TRIFÁSICOS )**