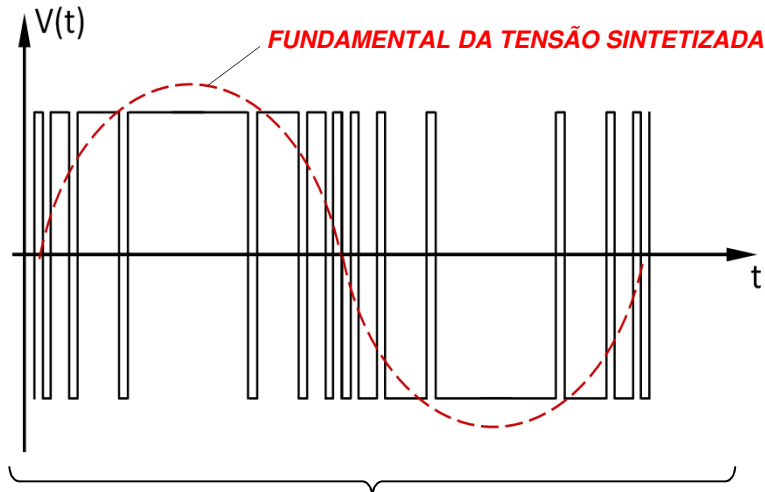


FORMAS ALTERNATIVAS DE MODULAÇÃO DA TENSÃO SINTETIZADA - PROBLEMAS ASSOCIADOS

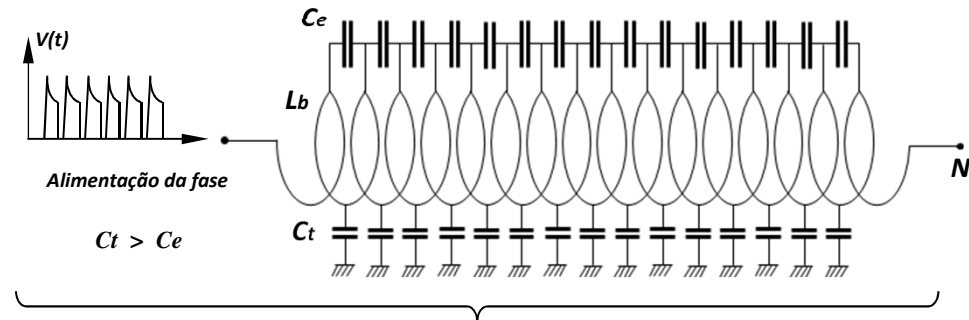


MODULAÇÃO "PWM" PARA MINIMIZAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO DA TENSÃO RESULTANTE → FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO DE 3 A 20 kHz

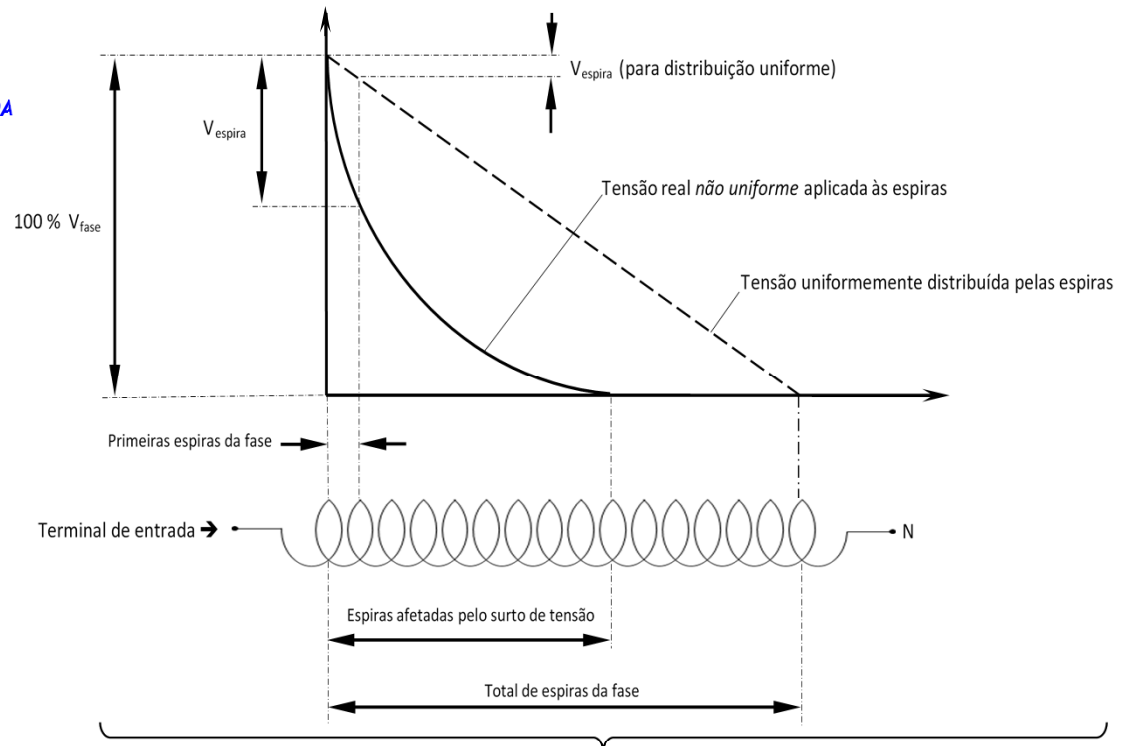
ALGUNS ASPECTOS DA ALIMENTAÇÃO DE MOTORES DE INDUÇÃO COM INVERSORES ESTÁTICOS:

DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DA TENSÃO ENTRE ESPIRAS DENTRO DA FASE, SOLICITANDO MAIS FORTEMENTE AS ESPIRAS INICIAIS → EVENTUAL SURGIMENTO DE EFEITO CORONA QUE DEGRADA O ISOLAMENTO DOS CONDUTORES, REQUERENDO USUALMENTE ISOLAMENTO ESPECIAL

COMPONENTE DE ALTA FREQUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO PROVOCA ACOPLAMENTO CAPACITIVO COM O ROTOR, INDUZINDO ALI CARGAS ELÉTRICAS QUE ESCOAM PARA A TERRA ATRAVÉS DOS MANCAIS, DANIFICANDO-OS → REQUER USUALMENTE MANCAIS ISOLADOS OU ESCOVAS DE ATERRAMENTO



ALIMENTAÇÃO DAS FASES POR MEIO DE PULSOS COM TEMPOS DE SUBIDA DE ATÉ 3 kV/μs  
→ MODELO DA FASE COM CAPACITÂNCIAS DISTRIBUÍDAS PARA TERRA (Ct) E ENTRE FASES (Ce)



RESULTA DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DA TENSÃO ENTRE ESPIRAS

## EFEITO DOS HARMÔNICOS NAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS

**PRINCIPAIS TIPOS DE HARMÔNICOS NAS MÁQUINAS DE INDUÇÃO:**

### 1) HARMÔNICOS INERENTES AO MOTOR

→ HARMÔNICOS DE F.M.M. DE CAMPO GIRANTE ( HARMÔNICOS ESPACIAIS DE CAMPO )

→ HARMÔNICOS DEVIDOS À PRESENÇA DE RANHURAS ( NO ROTOR )

→ PRINCIPAIS EFEITOS : **PERTURBAÇÕES NA CURVA DE CONJUGADO – DIFICULDADE DE PARTIDA – RUÍDO E VIBRAÇÃO**

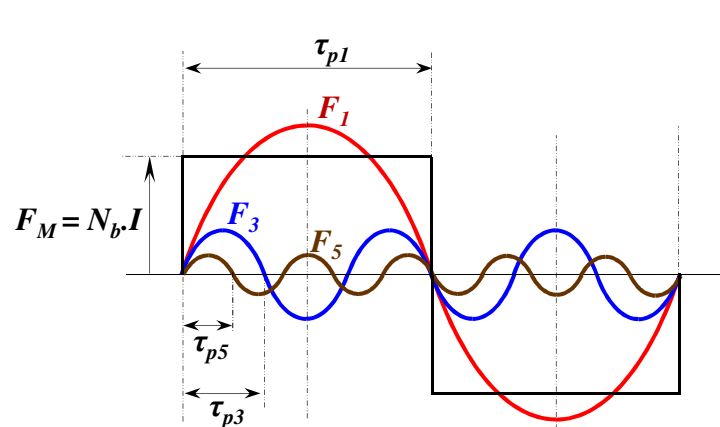
### 2) HARMÔNICOS DEVIDOS À ALIMENTAÇÃO

→ HARMÔNICOS GERADOS POR INVERSORES ESTÁTICOS ( TENSÕES E CORRENTES NÃO SENOIDAIS – HARMÔNICOS TEMPORAIS DE CAMPO )

→ **ALIMENTAÇÃO DESEQUILIBRADA**

→ PRINCIPAIS EFEITOS : **PERDAS ADICIONAIS NOS ENROLAMENTOS E NO NÚCLEO**

### 1A) HARMÔNICOS INERENTES AO MOTOR - HARMÔNICOS DE F.M.M. DO ESTATOR OU HARMÔNICOS ESPACIAIS DE CAMPO



CAMPO GIRANTE TOTAL RESULTANTE NO ENTREFERRO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA COM ENROLAMENTO TRIFÁSICO :  $F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta \pm \omega t)$

**COMPONENTES TRIPLAS** :  $h = 3.n$  ;  $n = 1, 3, 5, 7, \dots$  →  $F_{RES}(\theta, t) = 0$  → **INEXISTENTES NO TRIFÁSICO**

**COMPONENTES DE SEQUÊNCIA POSITIVA** :  $h = 6.n + 1$  ;  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  ( $h = 1; 7; 13; 19, \dots$ )

$F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta - \omega t)$  → **SEQUÊNCIA POSITIVA**

**MAGNITUDE** :  $1,5.F'_M - F'_M = 1/h \cdot F_M$

**VELOCIDADE SÍNCRONA** :  $\omega_s = +\omega/h$

**COMPONENTES DE SEQUÊNCIA NEGATIVA** :  $h = 6.n - 1$  ;  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$  ( $h = 5; 11; 17; 23, \dots$ )

$F_{RES}(\theta, t) = 1,5.F'_M \cdot \cos(h\theta + \omega t)$  → **SEQUÊNCIA NEGATIVA**

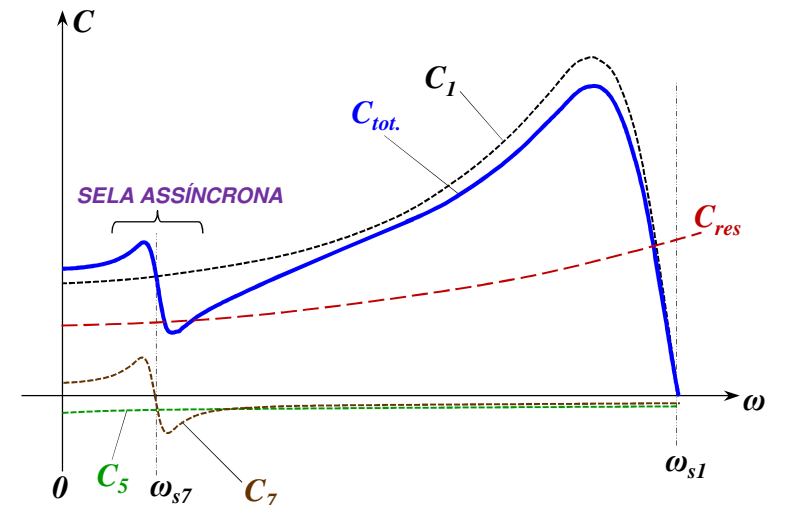
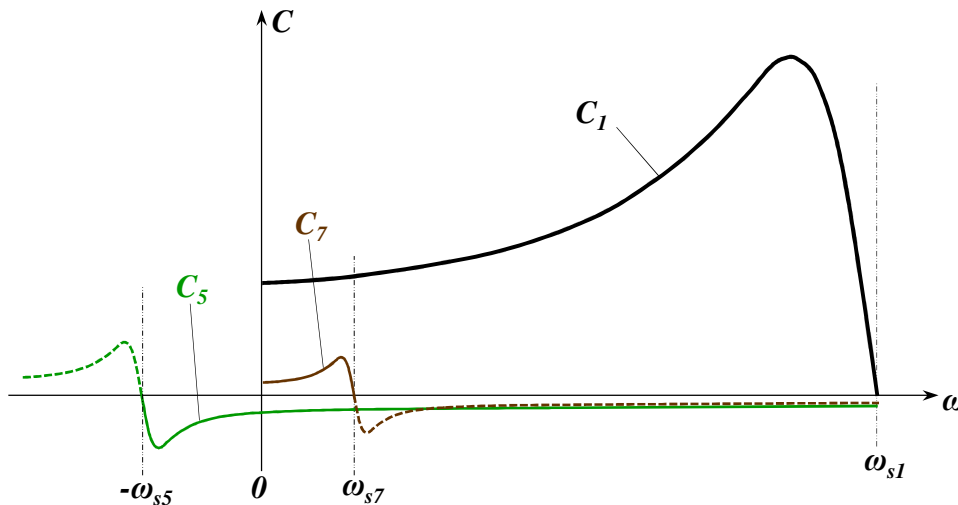
**MAGNITUDE** :  $1,5.F'_M - F'_M = 1/h \cdot F_M$

**VELOCIDADE SÍNCRONA** :  $\omega_s = -\omega/h$

OCORREM MESMO COM CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO SENOIDAL

• TORQUES PARASITAS PRODUZIDOS POR HARMÔNICOS DE CAMPO ROTATIVO :

EXEMPLO DO EFEITO DE COMPONENTES DE 5º E 7º HARMÔNICOS ESPACIAIS



→ CAMPOS HARMÔNICOS INTERAGEM COM O ROTOR DE FORMA SIMILAR AO CAMPO FUNDAMENTAL

→ CADA CAMPO HARMÔNICO PRODUZ SUA PRÓPRIA CARACTERÍSTICA INDIVIDUAL DE TORQUE

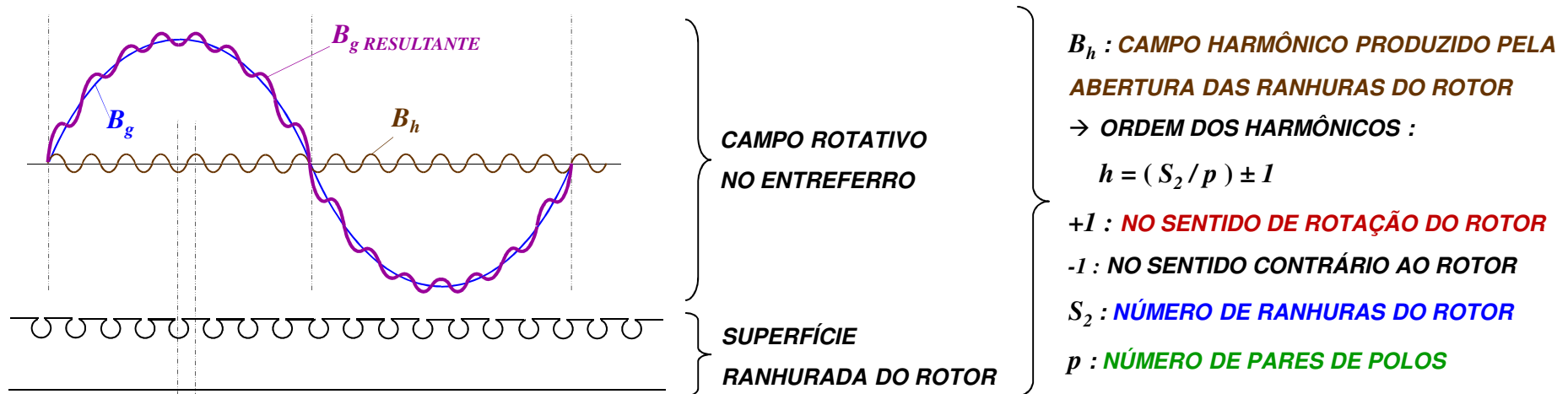
→ CURVAS DE TORQUE HARMÔNICO SE COMPÕEM COM A CURVA DE CAMPO FUNDAMENTAL

→ CURVA RESULTANTE FICA PERTURBADA PELA PRESENÇA DE TORQUES PARASITAS

→ FORMAÇÃO DA “SELA ASSÍNCRONA”

→ PODE COMPROMETER A ACELERAÇÃO DA CARGA

→ CAMPOS HARMÔNICOS PODEM SER MINIMIZADOS ATRAVÉS DE APRIMORAMENTOS ADOTADOS NA EXECUÇÃO DO ENROLAMENTO DO ESTATOR: DISTRIBUIÇÃO + ENCURTAMENTO DE PASSO

1B) HARMÔNICOS INERENTES AO MOTOR - HARMÔNICOS DEVIDOS À PRESENÇA DE RANHURAS NO ROTORPRINCIPAIS EFEITOS:

- CAMPO HARMÔNICO DE F.M.M. DO ESTATOR COM PASSO POLAR IGUAL À DISTÂNCIA ENTRE RANHURAS DO ROTOR :

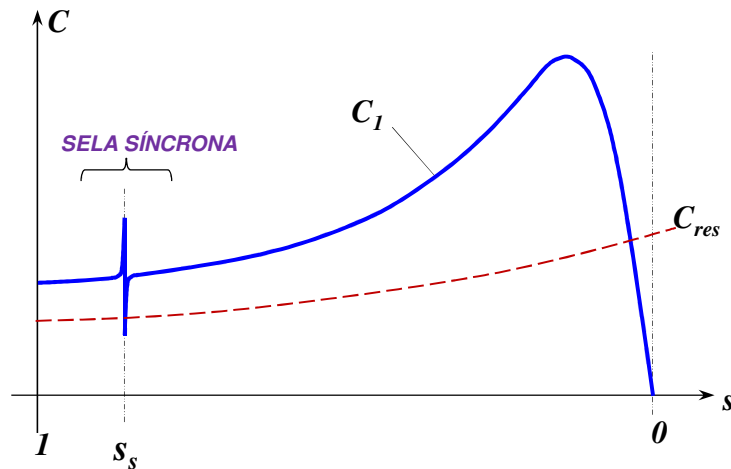
→ EXCITAÇÃO DE INTENSAS CORRENTES HARMÔNICAS NO ROTOR

- HARMÔNICOS DE ROTOR E ESTATOR DE MESMA ORDEM  $h$  FICAM ESTACIONÁRIOS UM EM RELAÇÃO AO OUTRO PARA UMA

DETERMINADA VELOCIDADE DO ROTOR, CORRESPONDENTE AO ESCORREGAMENTO:  $s_s = \frac{1 - 1/h}{1 + 1/h}$

→ FORMAÇÃO DA “SELA SÍNCRONA”

1B) HARMÔNICOS INERENTES AO MOTOR - HARMÔNICOS DEVIDOS À PRESENÇA DE RANHURAS NO ROTOR



**EXEMPLO:**

**MOTOR DE 4 POLOS, COM 28 RANHURAS NO ROTOR :**  $2p = 4 \rightarrow p = 2$

**SE O ESTATOR FORMAR HARMÔNICO DE CAMPO ROTATIVO DE 13ª ORDEM:**

$N_{s13} = 1800 / 13 = 138,46 \text{ RPM} \rightarrow$  **SEQUÊNCIA DIRETA**

**HARMÔNICOS DO ROTOR:**  $h = (S_2/p) \pm 1 = (28/2) \pm 1 = 15$  OU 13 ( NÃO EXISTE 15º NO ESTATOR )

$h = 13$  NO ROTOR  $\rightarrow$  **RODA EM SENTIDO CONTRÁRIO AO ROTOR**

$$s_s = \frac{1 - 1/h}{1 + 1/h} = \frac{1 - 1/13}{1 + 1/13} = 0,857 \rightarrow N_r = (1 - s) \cdot N_s = 257,14 \text{ RPM}$$

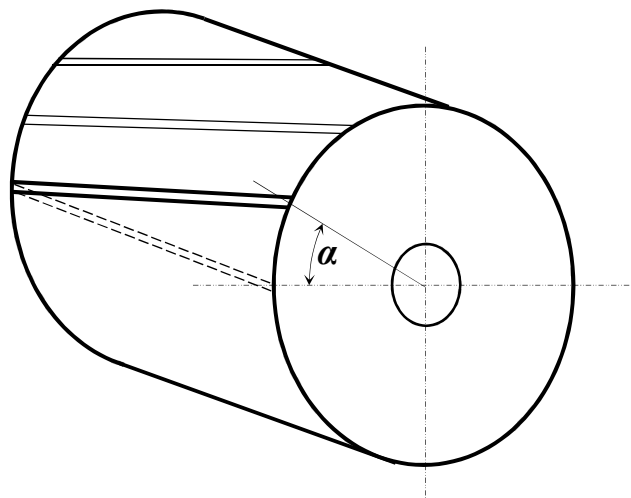
**FREQÜÊNCIA DAS CORRENTES NO ROTOR:**  $f_2 = s \cdot f_1 \rightarrow 0,857 \times 60 = 51,42 \text{ Hz}$

**COMPONENTE DE 13ª ORDEM DO ROTOR, NO SEU REFERENCIAL:**

$51,42 / 60 \times 138,46 = 118,66 \text{ RPM}$  ( EM RELAÇÃO AO ROTOR, RODANDO EM SENTIDO CONTRÁRIO )

**ROTAÇÃO DA COMPONENTE DE 13ª HARMÔNICO DO ROTOR EM RELAÇÃO AO ESTATOR:**

$257,14 - 118,66 = 138,46 \text{ RPM} \rightarrow$  **SÍNCRONA COM O 13º HARMÔNICO DO ESTATOR**

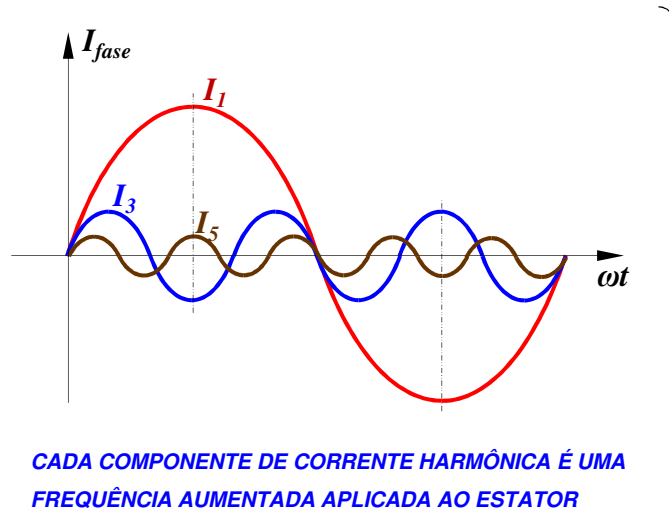


**PROBLEMAS PODEM SER MINIMIZADOS POR:**

$\rightarrow$  **ADEQUADA ESCOLHA DOS NÚMEROS DE RANHURAS DE ESTATOR E ROTOR :** e.g.  $S_2 \neq S_1 \pm n \cdot 2p$  ;  $n : 0; 1; 2; \dots$

$\rightarrow$  **INCLINAÇÃO DAS RANHURAS EM RELAÇÃO À GERATRIZ DO CILÍNDRICO - "SKEW" - A INCLINAÇÃO PODE SER TANTO NO ESTATOR QUANTO NO ROTOR**

2) HARMÔNICOS DEVIDOS À ALIMENTAÇÃO - HARMÔNICOS GERADOS POR INVERSORES ESTÁTICOS ( TENSÕES E CORRENTES NÃO SENOIDAIS – HARMÔNICOS TEMPORAIS DE CAMPO )



$$i(t) = I_1 \cdot \text{sen} \omega t + I_3 \cdot \text{sen} 3\omega t + I_5 \cdot \text{sen} 5\omega t + I_7 \cdot \text{sen} 7\omega t + \dots$$

COMPONENTES DE CORRENTE DE ALTA FREQUÊNCIA

APLICANDO AS CORRENTES HARMÔNICAS AO ENROLAMENTO TRIFÁSICO DO ESTATOR:

COMPONENTES DE CAMPO ROTATIVO :  $F_{RES}(\theta, t) = 1,5 \cdot F'_M \cdot \cos(\theta \mp h \cdot \omega t)$

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

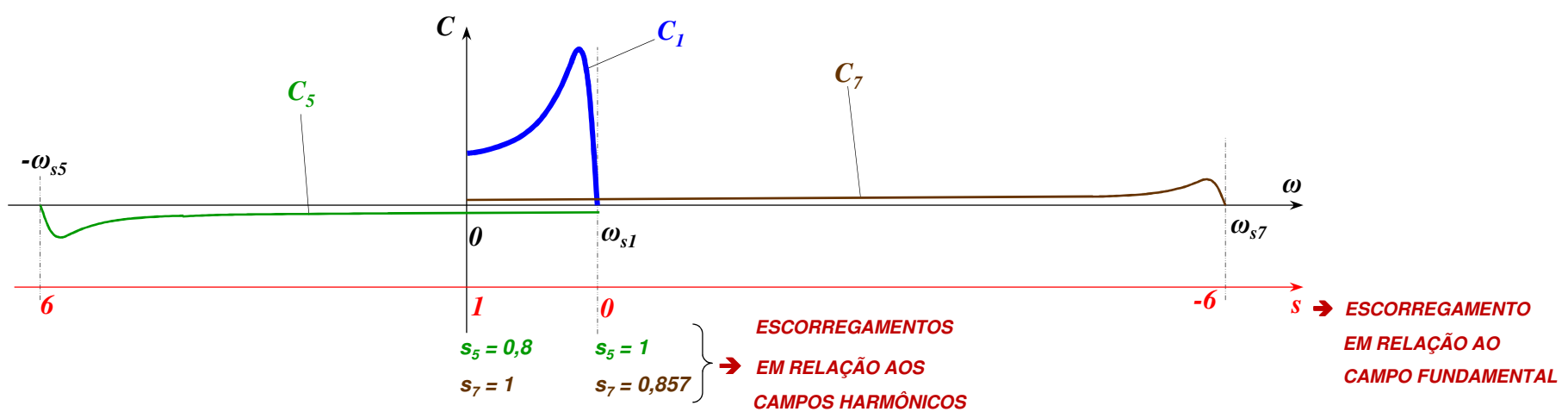
VELOCIDADE SÍNCRONA :  $\omega_s = \pm h \cdot \omega$

$h = 6n + 1 ; n = 0, 1, 2, 3 \dots$  (  $h = 1 ; 7 ; 13 ; 19 \dots$  ) → SEQUÊNCIA POSITIVA

$h = 6n - 1 ; n = 1, 2, 3 \dots$  (  $h = 5 ; 11 ; 17 ; 23 \dots$  ) → SEQUÊNCIA NEGATIVA

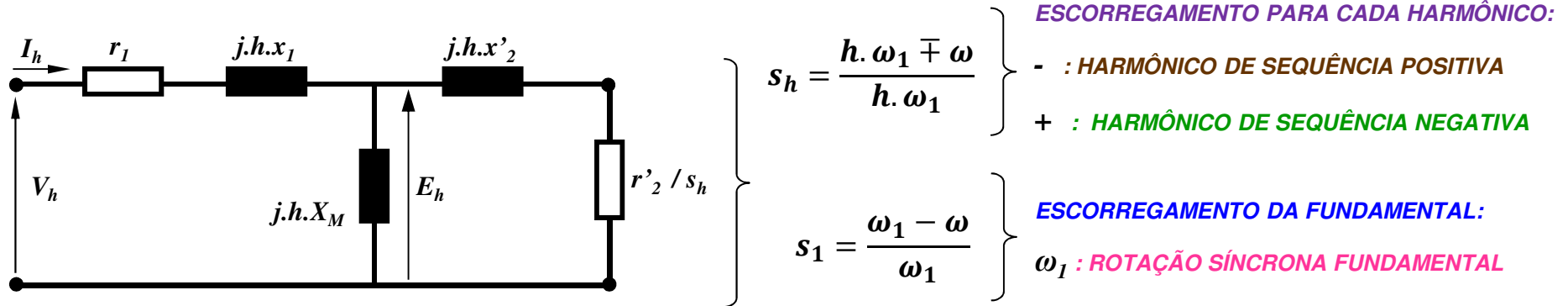
$h = 3n ; n = 1, 3, 5 \dots$  (  $h = 3 ; 9 ; 15 ; 21 \dots$  ) → SEQUÊNCIA ZERO ( NÃO FORMA CAMPO )

HARMÔNICOS TEMPORAIS TÊM PEQUENO EFEITO SOBRE A CURVA DE TORQUE FUNDAMENTAL → PRINCIPAL EFEITO SE DÁ NAS PERDAS



2) HARMÔNICOS DEVIDOS À ALIMENTAÇÃO - EFEITO SOBRE AS PERDAS JOULE

CIRCUITO EQUIVALENTE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA:

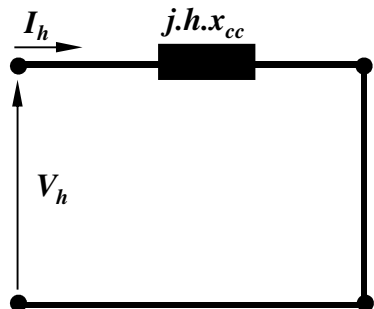


$$\omega = (1 - s) \cdot \omega_1 \rightarrow s_h = \frac{(h \mp 1) \pm s_1}{h}; \quad h = 5; 7; 11; \dots$$

QUALQUER QUE SEJA  $s_1$  (ENTRE 0 E 1; FAIXA NORMAL DE OPERAÇÃO DO MOTOR)  $\rightarrow s_h \approx 1$

**CONCLUSÃO** : EM RELAÇÃO AOS HARMÔNICOS TEMPORAIS, O MOTOR SE COMPORTA SEMPRE COMO SE ESTIVESSE APROXIMADAMENTE EM CURTO ( ROTOR BLOQUEADO )

CIRCUITO EQUIVALENTE PARA OS COMPONENTES HARMÔNICOS :



$$I_h = \frac{V_h}{h \cdot x_{cc}} = \frac{V_1/h}{h \cdot x_{cc}} = \frac{V_1}{h^2 \cdot x_{cc}} \quad \text{EM p.u.} \rightarrow i_h(\text{pu}) = \frac{1}{h^2 \cdot x_{cc}(\text{pu})} = \frac{I_{cc}(\text{pu})}{h^2}$$

VALOR EFICAZ DA CORRENTE AFETADA DOS COMPONENTES HARMÔNICOS :

$$I_{ef}(\text{pu}) = \sqrt{I_{1(\text{pu})}^2 + I_{5(\text{pu})}^2 + I_{7(\text{pu})}^2 + \dots} = \sqrt{I_{1(\text{pu})}^2 + \underbrace{\sum I_h^2(\text{pu})}_{\text{RESPONSÁVEL PELO INCREMENTO DAS PERDAS JOULE}}}$$

RESPONSÁVEL PELO INCREMENTO DAS PERDAS JOULE

2) HARMÔNICOS DEVIDOS À ALIMENTAÇÃO - EFEITO SOBRE AS PERDAS JOULE**EXEMPLO** : ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL, COM HARMÔNICOS DE ORDEM 5 E 7 :MOTOR DE INDUÇÃO COM CORRENTE DE PARTIDA USUAL :  $I_{cc} = 6 pu$ 

CORRENTE EFICAZ DO ESTATOR:

$$I_{ef(pu)} = \sqrt{I_{1(pu)}^2 + \left(\frac{I_{cc(pu)}}{5^2}\right)^2 + \left(\frac{I_{cc(pu)}}{7^2}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{6}{25}\right)^2 + \left(\frac{6}{49}\right)^2} = \sqrt{1 + 0,24^2 + 0,122^2} = 1,035 pu$$

**INCREMENTO NA PERDA JOULE** :  $(1,035)^2 = 1,072 pu \rightarrow$  7,2% A MAIS DE PERDA EM RELAÇÃO À ALIMENTAÇÃO SENOIDAL2) HARMÔNICOS DEVIDOS À ALIMENTAÇÃO - EFEITO SOBRE AS PERDAS NO FERRO

$$V = 4,44 \cdot f \cdot N_f \cdot \phi_p \cdot K_e \rightarrow V_h = \frac{V_1}{h} = 4,44 \cdot h \cdot f \cdot N_f \cdot \phi_h \cdot K_e \rightarrow \phi_h = \frac{V_1}{4,44 \cdot f \cdot N_f \cdot K_e} \cdot \frac{1}{h^2} = \frac{1}{h^2} \cdot \phi_p$$

$$\phi_p = B \cdot S \rightarrow B_h = \frac{1}{h^2} \cdot B \rightarrow \text{EM TODAS AS REGIÕES DO CIRCUITO MAGNÉTICO CONSTITUÍDAS DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO}$$

**PERDA NO FERRO:**

$$p_{FE-1} = k_H \cdot B_1^{1,6} \cdot f_1 + k_F \cdot B_1^2 \cdot f_1^2 \rightarrow p_{FE-h} = k_H \cdot B_h^{1,6} \cdot f_h + k_F \cdot B_h^2 \cdot f_h^2 \rightarrow p_{FE-h} = k_H \cdot B_1^{1,6} \cdot \left(\frac{1}{h^2}\right)^{1,6} \cdot h \cdot f_1 + k_F \cdot B_1^2 \cdot \left(\frac{1}{h^2}\right)^2 \cdot h^2 \cdot f_1^2$$

$$p_{FE-h} \cong k_H \cdot B_1^{1,6} \cdot \frac{1}{h^3} \cdot h \cdot f_1 + k_F \cdot B_1^2 \cdot \frac{1}{h^4} \cdot h^2 \cdot f_1^2 = k_H \cdot B_1^{1,6} \cdot \frac{1}{h^2} \cdot f_1 + k_F \cdot B_1^2 \cdot \frac{1}{h^2} \cdot f_1^2 = \frac{1}{h^2} \cdot p_{FE-1}$$

$$p_{FE-tot} \cong p_{FE-1} \cdot \left(1 + \sum \frac{1}{h^2}\right)$$