

## PARTE 6

# MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

( *“DE ALIMENTAÇÃO CHAVEADA”* )

## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### CLASSE DE ACIONAMENTOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL DE “AMPLA UTILIZAÇÃO”

( CONCORRE DIRETAMENTE COM MOTOR BRUSHLESS E MOTOR DE INDUÇÃO ASSOCIADO A INVERSOR DE FREQUENCIA )

#### SISTEMA COM VANTAGENS INERENTES:

MOTOR → CONSTRUÇÃO SIMPLES E ROBUSTA - **ROTOR PASSIVO**

ALIMENTADOR → SIMPLES COM “POUCAS” CHAVES – **CORRENTE UNIDIRECIONAL**

PERMITE AJUSTE LIMITADO DE CARACTERÍSTICAS EXTERNAS  $C - \omega$  ( A PARTIR DO CONTROLE )

PERMITE ELEVADA ROTAÇÃO DE OPERAÇÃO

APRESENTA GRANDE DISPONIBILIDADE DE POTÊNCIA ESPECÍFICA ( kW / m<sup>3</sup> )

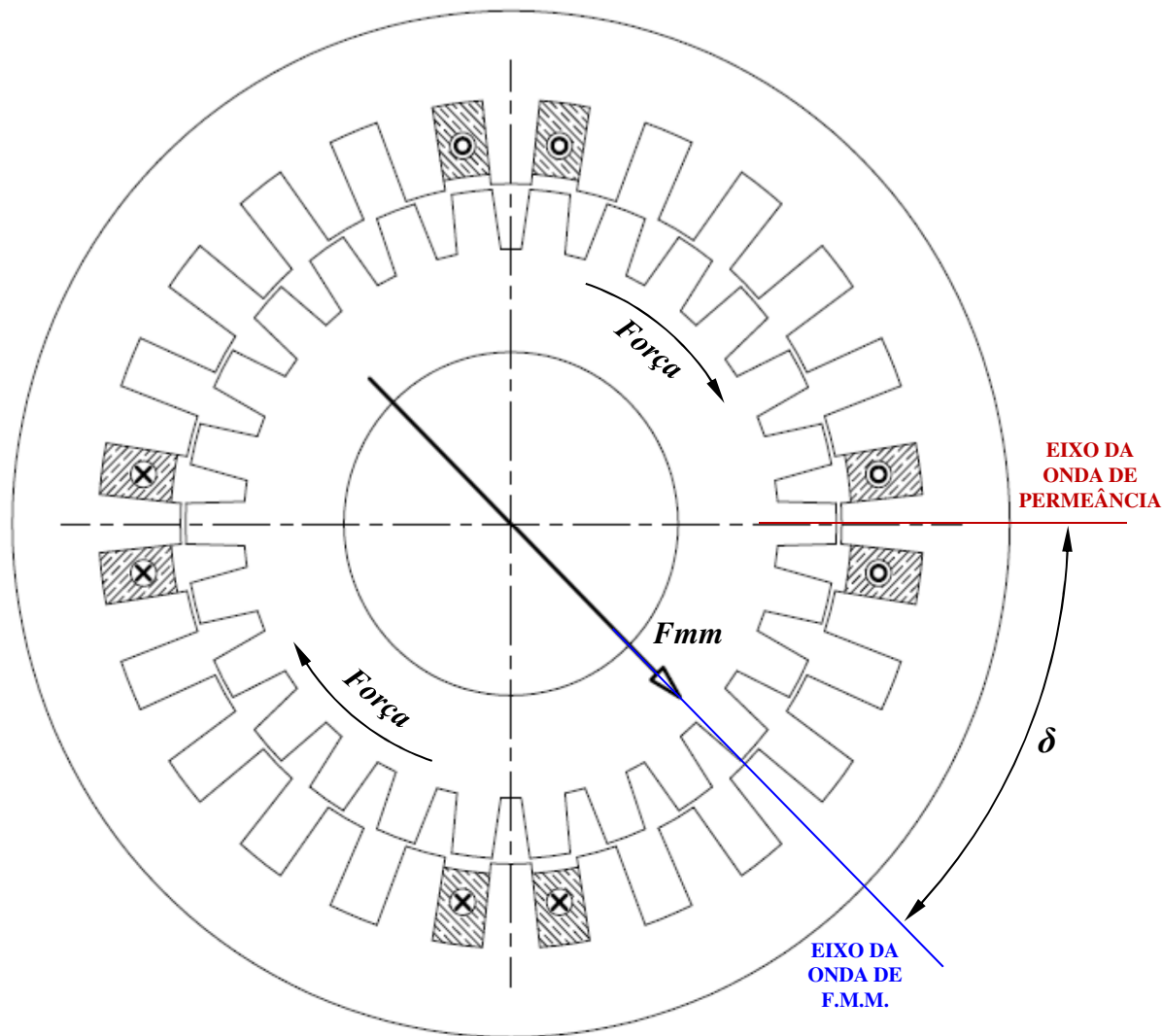
#### DESVANTAGENS:

PULSAÇÃO DE CONJUGADO ELEVADA

RUÍDO AUDÍVEL E VIBRAÇÃO ASSOCIADA

## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### BASE DO FUNCIONAMENTO → CONSTRUÇÃO “VERNIER”



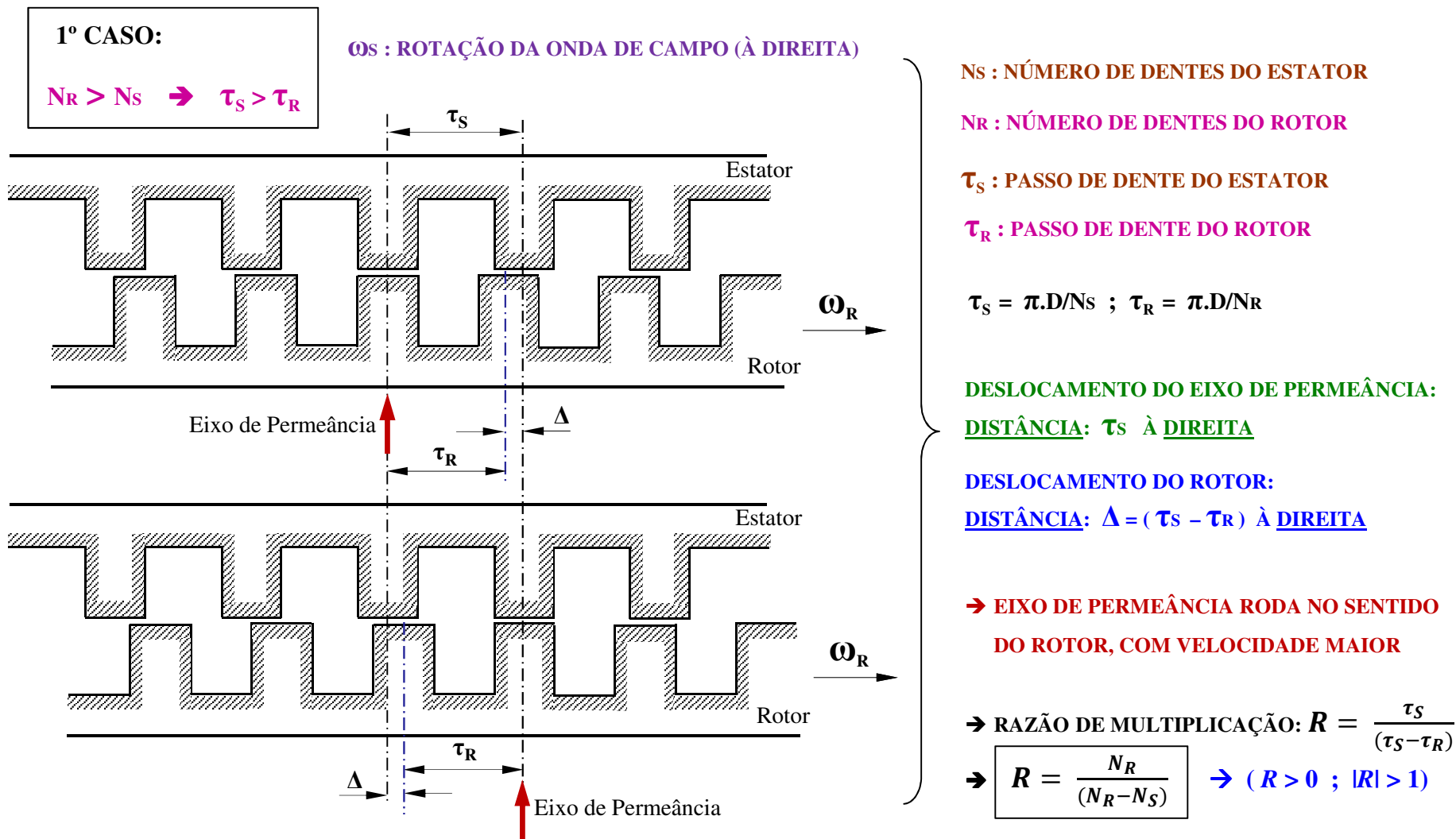
ESTRUTURA MAGNÉTICA DUPLAMENTE RANHURADA, COM NÚMEROS DE DENTES DIFERENTES ENTRE SI NO ESTATOR E NO ROTOR

ALINHAMENTO MAGNÉTICO OBTIDO PELO PRINCÍPIO DA MÍNIMA RELUTÂNCIA: TORQUE DESENVOLVIDO NO SENTIDO DO ALINHAMENTO ENTRE OS EIXOS DE FMM E DE PERMEÂNCIA

MOTOR É **SÍNCRONO** – ONDA DE PERMEÂNCIA FICA EM SINCRONISMO COM A ONDA DE FMM, COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO ROTOR DIFERENTE DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA ONDA DE CAMPO

## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### EFEITO VERNIER: RELAÇÃO ENTRE ROTAÇÃO DA ONDA DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ E ROTAÇÃO DO ROTOR



**ROTOR SEMPRE SE DESLOCA NO MESMO SENTIDO DA ONDA DE CAMPO COM ROTAÇÃO MENOR:  $\omega_R = (1/R) \cdot \omega_S$**

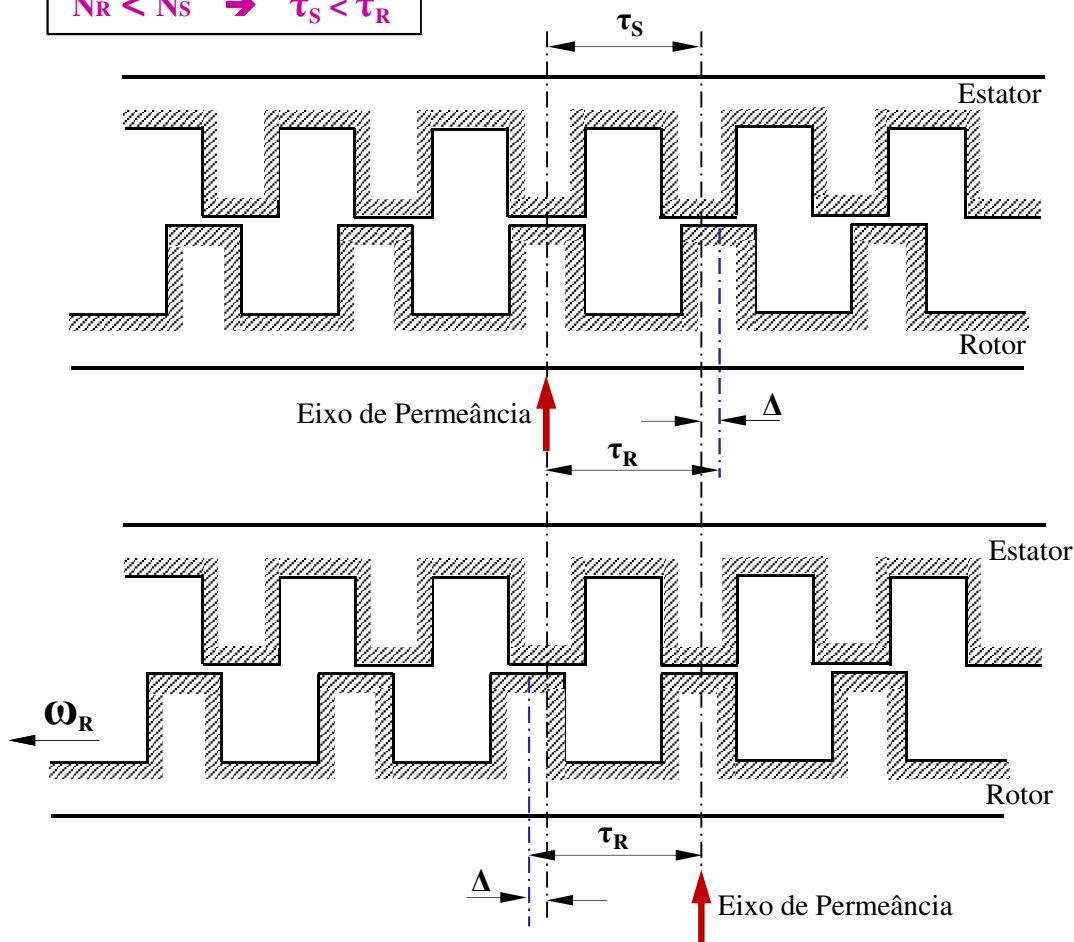
## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### RELAÇÃO ENTRE ROTAÇÃO DA ONDA DE FORÇA MAGNETOMOTRIZ E ROTAÇÃO DO ROTOR

2º CASO:

$$N_R < N_S \rightarrow \tau_S < \tau_R$$

$\omega_s$  : ROTAÇÃO DA ONDA DE CAMPO (À DIREITA)



$N_S$  : NÚMERO DE DENTES DO ESTATOR

$N_R$  : NÚMERO DE DENTES DO ROTOR

$\tau_S$  : PASSO DE DENTE DO ESTATOR

$\tau_R$  : PASSO DE DENTE DO ROTOR

$$\tau_S = \pi \cdot D / N_S ; \tau_R = \pi \cdot D / N_R$$

DESLOCAMENTO DO EIXO DE PERMEÂNCIA:

DISTÂNCIA:  $\tau_S$  À DIREITA

DESLOCAMENTO DO ROTOR:

DISTÂNCIA:  $\Delta = (\tau_R - \tau_S)$  À ESQUERDA

→ EIXO DE PERMEÂNCIA RODA NO SENTIDO OPOSTO AO DO ROTOR, COM VELOCIDADE MAIOR

→ RAZÃO DE MULTIPLICAÇÃO:  $R = \frac{\tau_S}{(\tau_R - \tau_S)}$

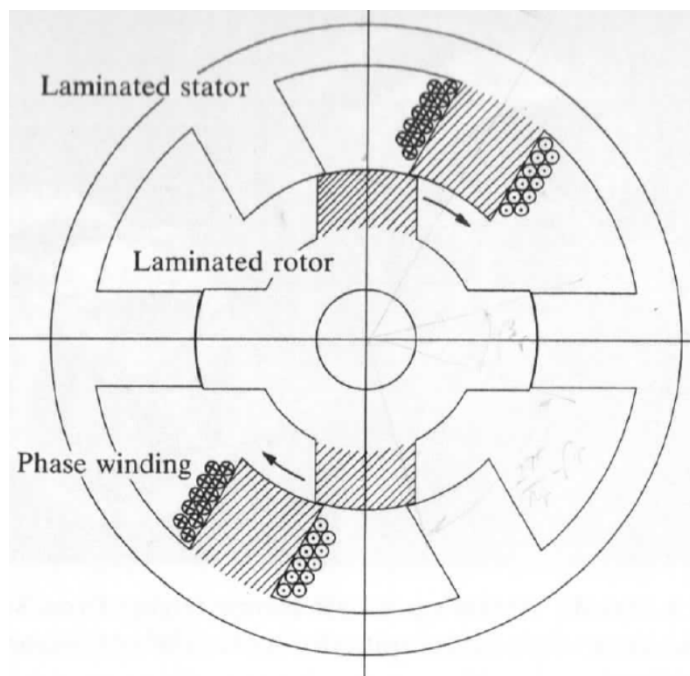
$$\rightarrow R = \frac{N_R}{(N_R - N_S)} \rightarrow (R < 0 ; |R| > 1)$$

ROTOR SEMPRE SE DESLOCA EM SENTIDO OPOSTO AO DA ONDA DE CAMPO COM ROTAÇÃO MENOR:  $\omega_r = (1/R) \cdot \omega_s$

DIVERSAS TOPOLOGIAS POSSÍVEIS

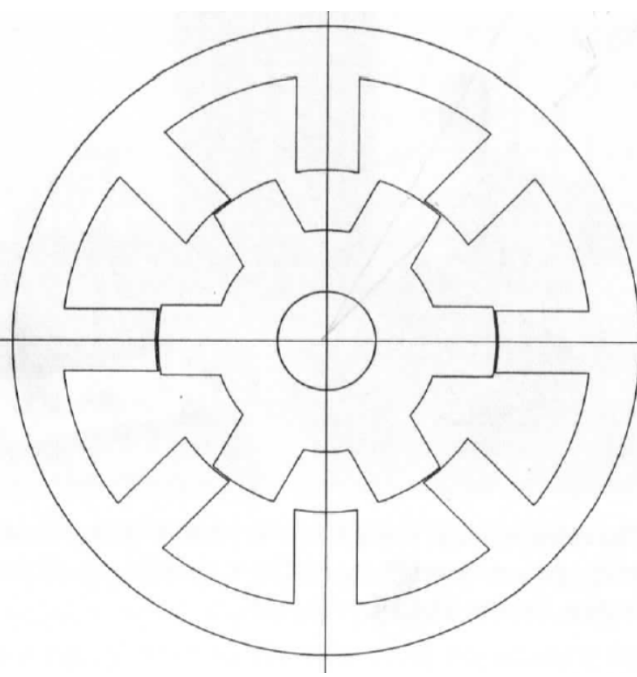
**MRC - 6/4 POLOS**

**3 FASES**



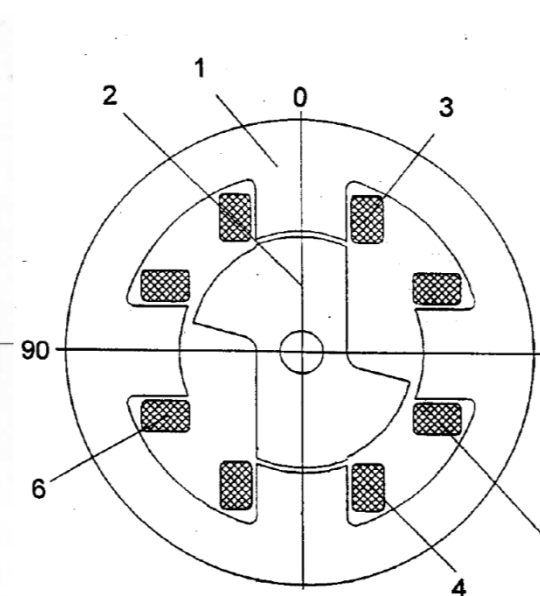
**MRC - 8/6 POLOS**

**4 FASES**



**MRC - 4/2 POLOS**

**2 FASES**

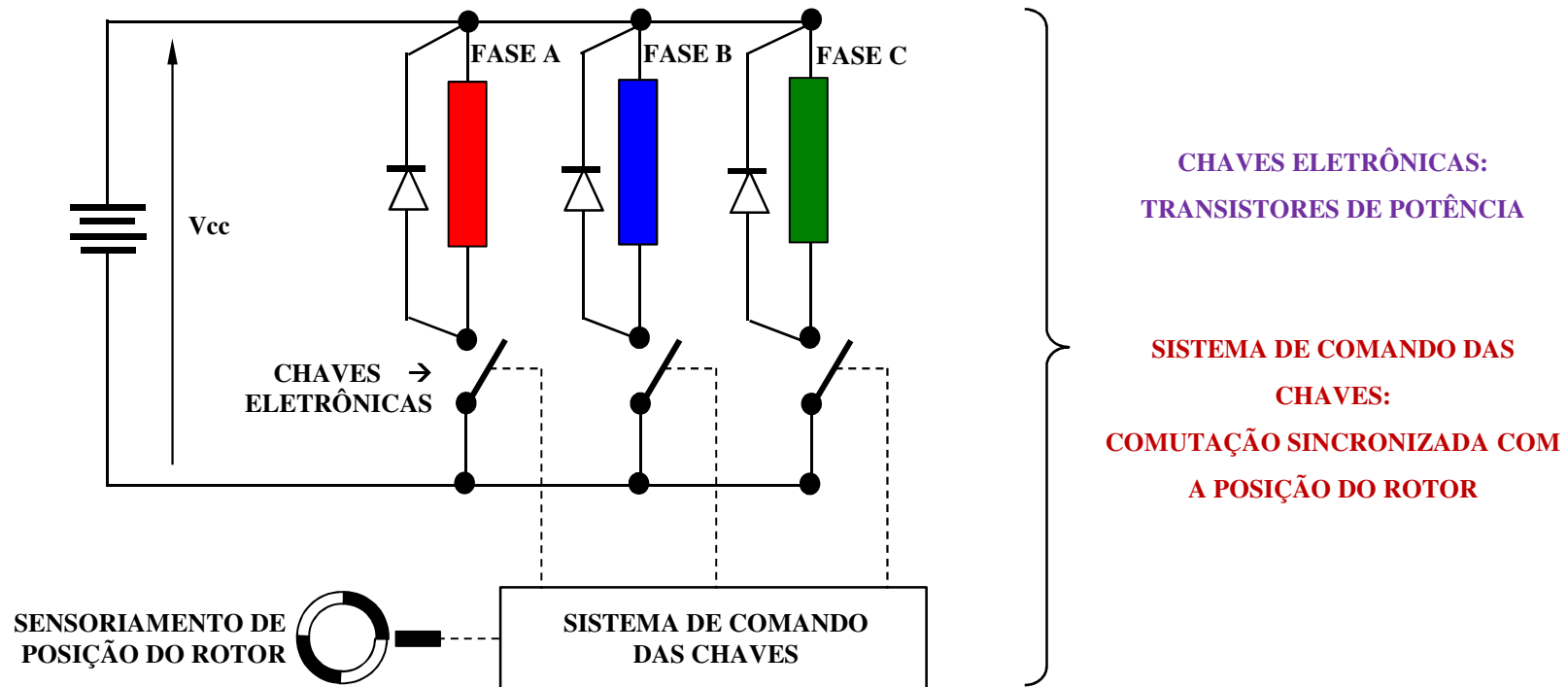


**CONFIGURAÇÃO 6/4**

**É A MAIS COMUM**

## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### CONFIGURAÇÃO ELEMENTAR DO CHAVEAMENTO DAS FASES

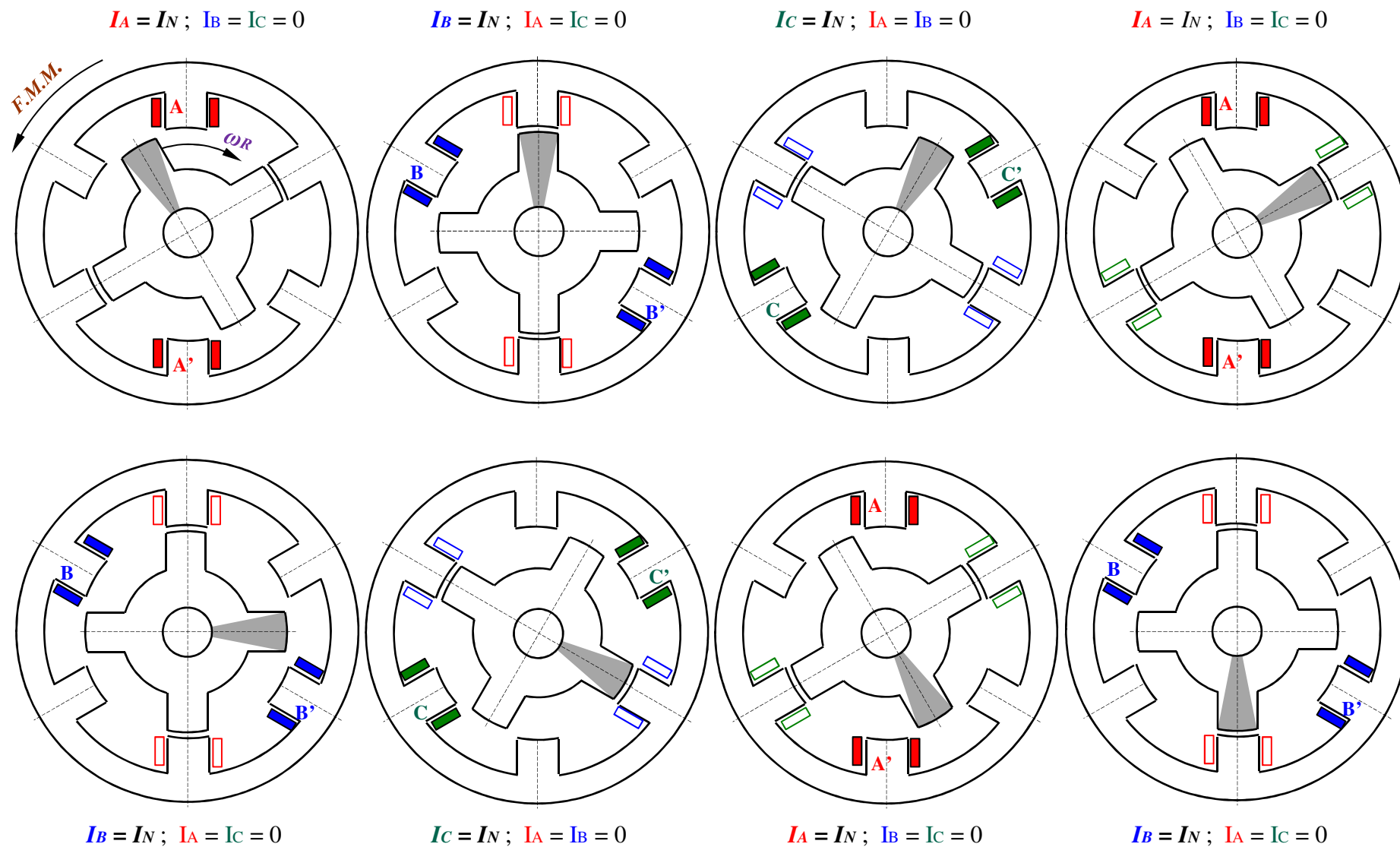


QUANTIDADE DE CHAVES E COMPLEXIDADE DO CIRCUITO DE COMUTAÇÃO

→ FUNÇÃO DO DESEMPENHO ESPERADO E DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

SEQUÊNCIA DE ALIMENTAÇÃO DAS FASES NO MRC 6 / 4



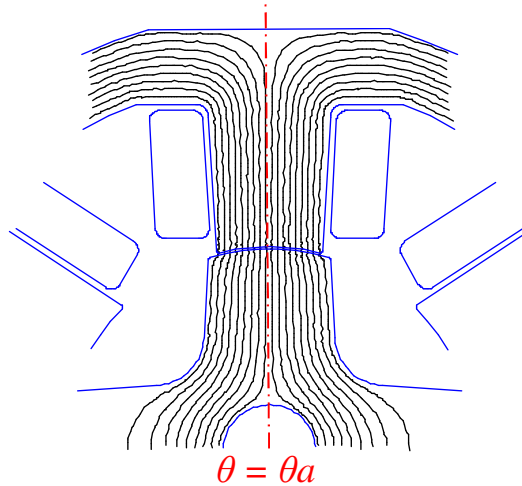
NECESSÁRIOS 4 CICLOS DE ALIMENTAÇÃO EM CADA FASE POR REVOLUÇÃO DO ROTOR  $\rightarrow f[\text{Hz}] = N_R \cdot n_R [\text{RPS}]$



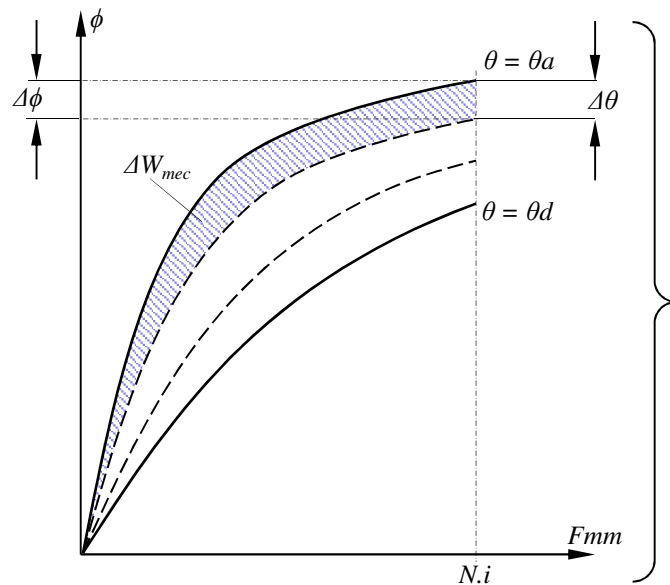
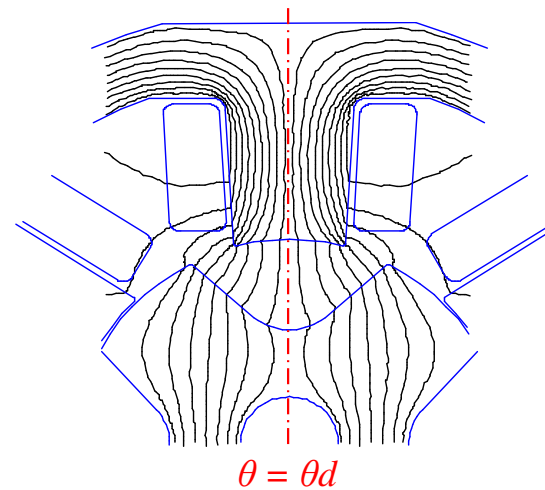
# PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

## NATUREZA DO TORQUE DESENVOLVIDO

ALINHAMENTO TOTAL ENTRE DENTES



DESALINHAMENTO TOTAL ENTRE DENTES



CURVAS CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO MOTOR DE RELUTÂNCIA:  
 PARA CADA POSIÇÃO ANGULAR DO ROTOR, CORRESPONDE UMA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

ÁREA SOB CADA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO:

$$\int \phi(\theta, i) \cdot d(N \cdot i) = W'_{mag}(\theta, i)$$

$W'_{mag}$  : CO-ENERGIA MAGNÉTICA ASSOCIADA AO CIRCUITO MAGNÉTICO

TORQUE ELETROMAGNÉTICO DESENVOLVIDO:

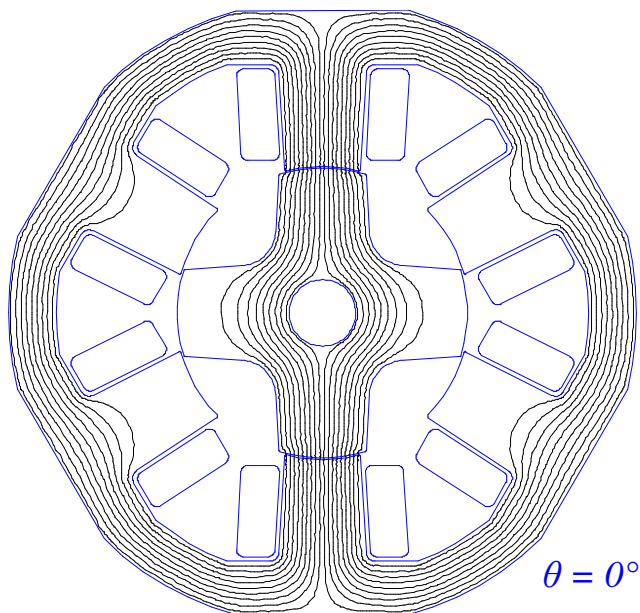
$$C = C(\theta, i) = \frac{\partial W'_{mag}(\theta, i)}{\partial \theta}$$

→  $\Delta W_{mec}$  : ENERGIA MECÂNICA CONVERTIDA NO INTERVALO  $\Delta \theta$

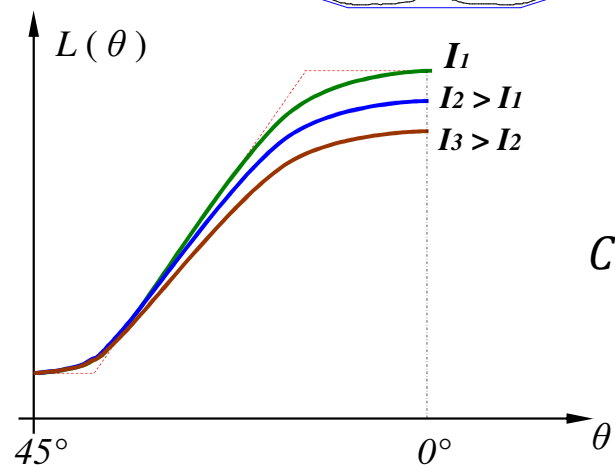
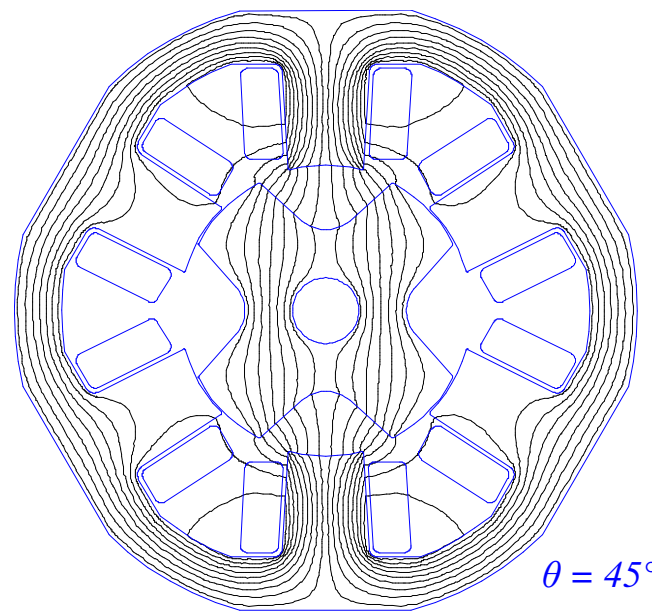
PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

NATUREZA DO TORQUE DESENVOLVIDO

ALINHAMENTO TOTAL ENTRE DENTES

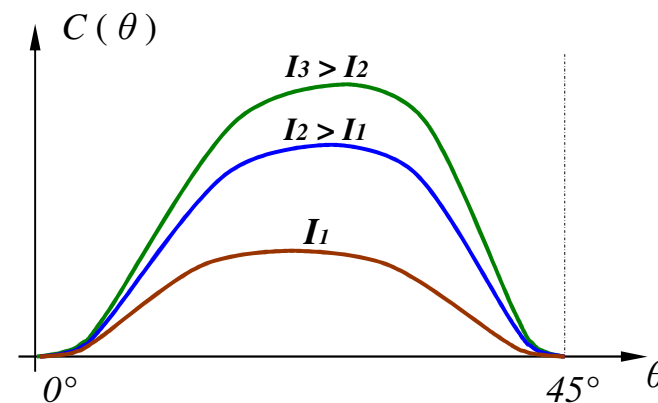


DESALINHAMENTO TOTAL ENTRE DENTES



COMPORTAMENTO DA INDUTÂNCIA

$$C(\theta; i) = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL(\theta; i)}{d\theta}$$



COMPORTAMENTO DO TORQUE

## PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

### CIRCUITO ELÉTRICO POR FASE DO MOTOR DE RELUTÂNCIA

CIRCUITO R-L  $\rightarrow v = r \cdot i + \frac{d(N\Phi)}{dt} \quad N \cdot \Phi = L \cdot i \quad L = L(\theta, i)$

DESCONSIDERANDO A RESISTÊNCIA:  $v = \frac{d(Li)}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega$

POTÊNCIA ELEMENTAR DESENVOLVIDA NA FASE:  $dp = v \cdot di = L \cdot \frac{di}{dt} \cdot di + i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \cdot di$

POTÊNCIA ELÉTRICA TOTAL NA FASE  $\rightarrow p = \int v \cdot di = \int \left( L \cdot \frac{di}{dt} \right) \cdot di + \int \left( i \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega \right) \cdot di$

$$p = \frac{d}{dt} \int L \cdot i \cdot di + \omega \cdot \frac{dL}{d\theta} \int i \cdot di \quad \rightarrow \quad p = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \cdot \omega$$

POTÊNCIA  
ELÉTRICA  
SUPRIDA À FASE

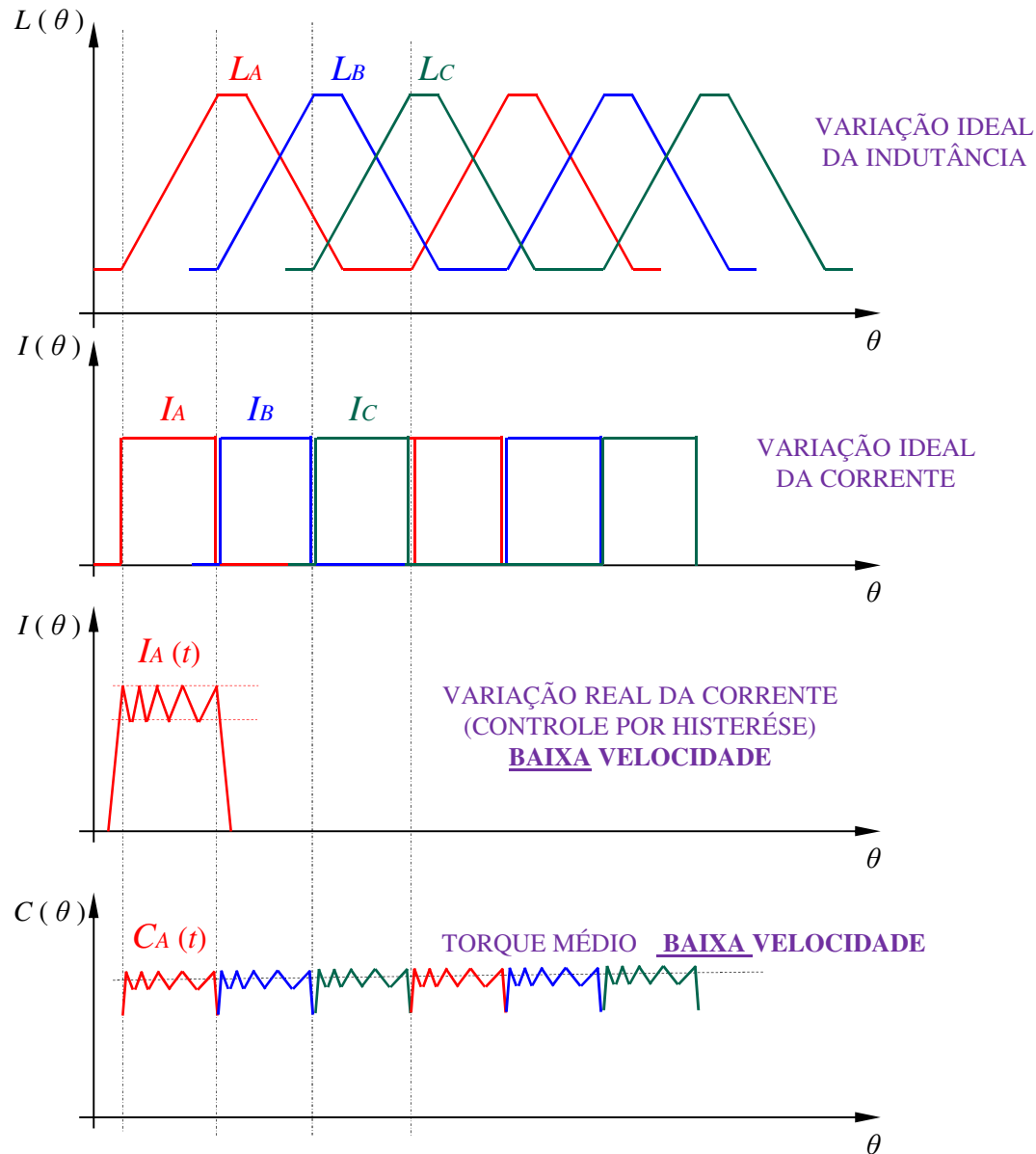
VARIÇÃO NO TEMPO DA  
ENERGIA MAGNÉTICA  
ARMAZENADA

POTÊNCIA  
MECÂNICA  
CONVERTIDA

$P_{mec} = C \cdot \omega$

$C = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}$

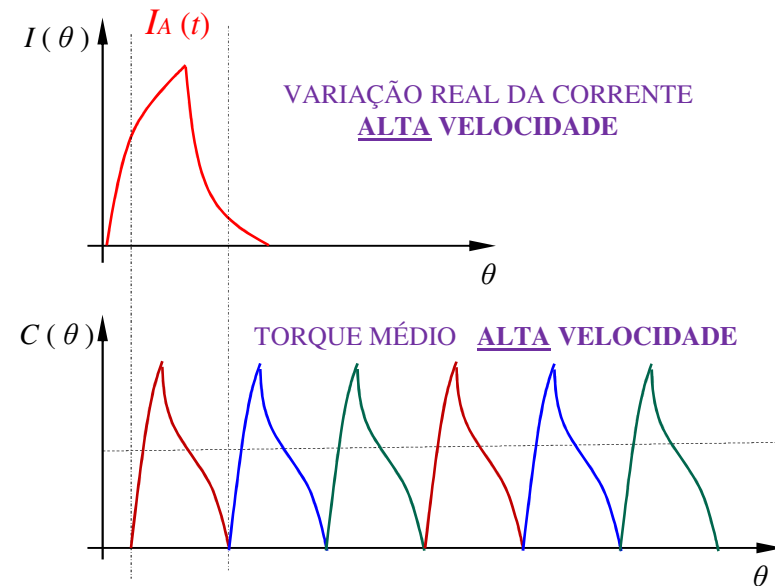
PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS



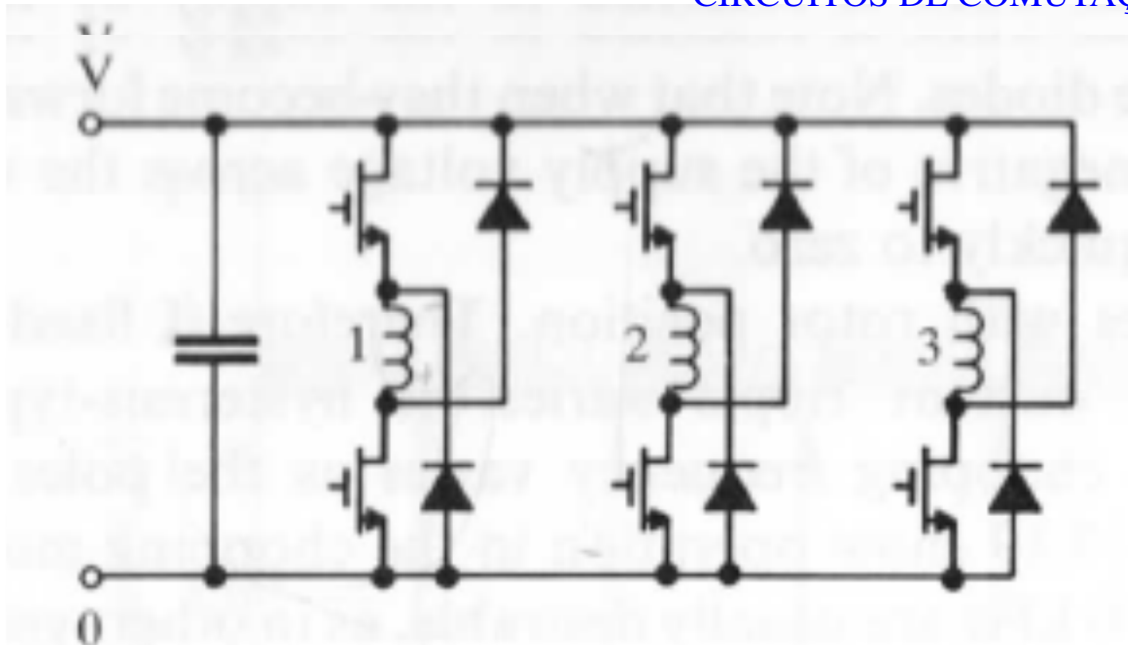
TOQUE TOTAL DESENVOLVIDO:

ALIMENTAÇÃO DAS 3 FASES DE  
FORMA SEQUENCIAL

CARACTERÍSTICAS EM BAIXA E ALTA  
VELOCIDADE DIFEREM PELO  
COMPORTAMENTO DA CORRENTE



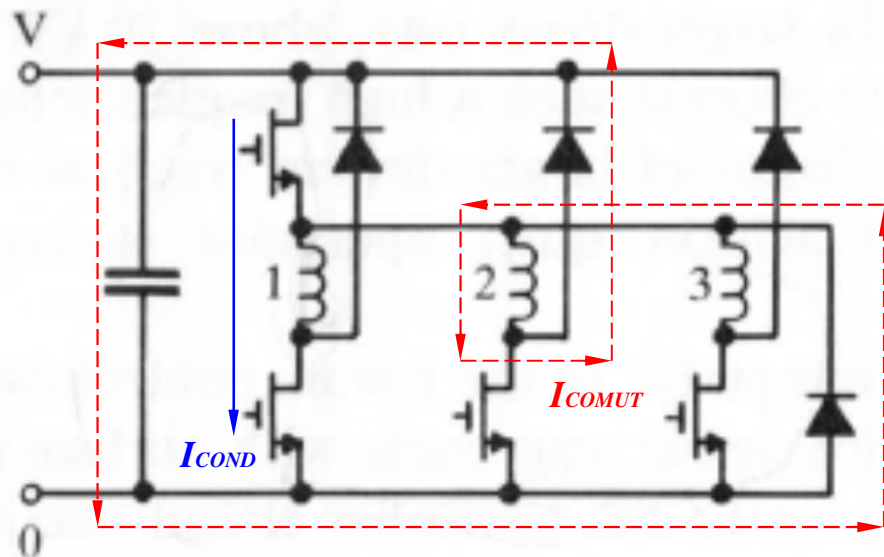
CIRCUITOS DE COMUTAÇÃO



CIRCUITO COM 6 CHAVES PARA O RÁPIDO DESCARREGAMENTO DE CORRENTE DE CADA FASE

CHAVES INFERIORES → COMUTAÇÃO

CHAVES SUPERIORES → CONTROLE DA CORRENTE

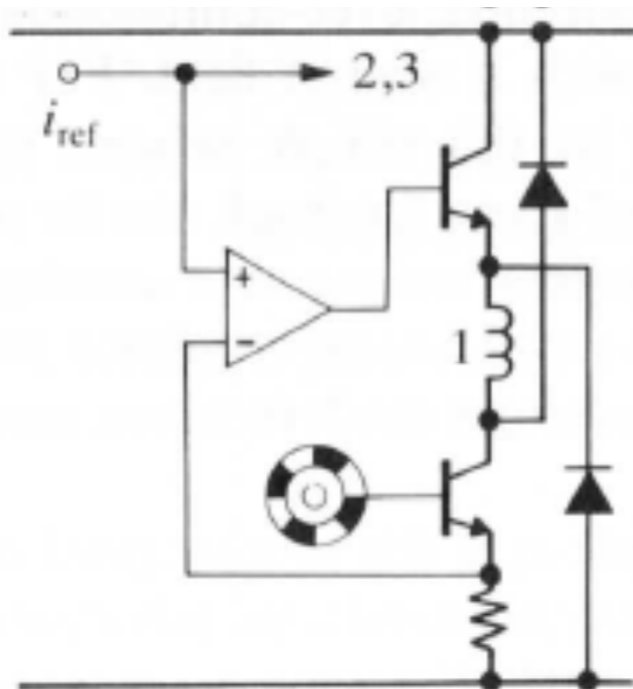


CIRCUITO COM 4 CHAVES MAIS SIMPLES E MAIS ECONÔMICO

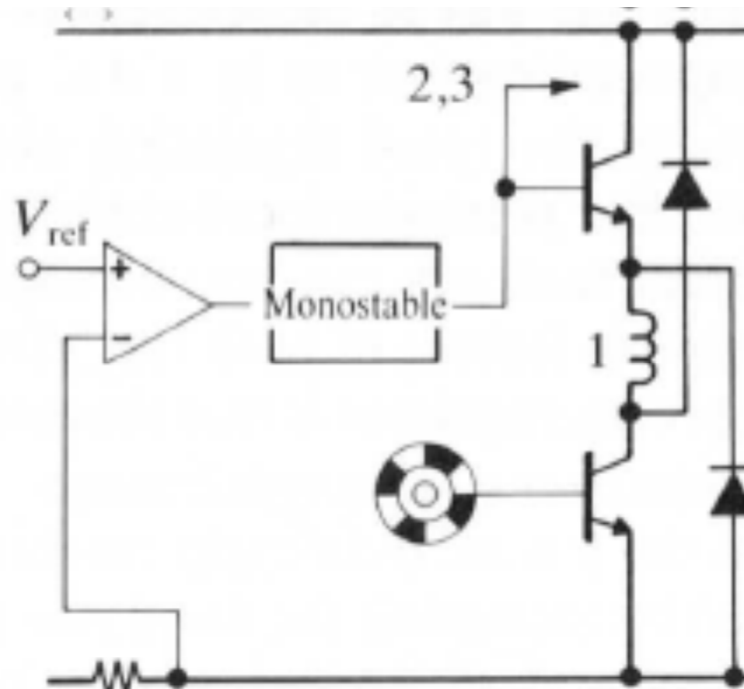
CHAVES INFERIORES → COMUTAÇÃO

CHAVE SUPERIOR → CONTROLE DA CORRENTE

CIRCUITOS DE CONTROLE DA CORRENTE



CONTROLE POR HISTERESE



CONTROLE POR MODULAÇÃO DE LARGURA DE PUSO - PWM

PEA – 5728 - Parte 6: MOTORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

CARACTERÍSTICA EXTERNA - CAMPO DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADE EM FUNÇÃO DO TIPO DE CONTROLE DA CORRENTE

