

PARTE 7

MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA DE  
COMUTAÇÃO ELETRÔNICA – “BRUSHLESS DC”

**CARACTERIZAÇÃO GERAL DOS MOTORES BRUSHLESS**

**UTILIZAÇÃO CRESCENTE E INTENSIVA EM DIVERSOS TIPOS DE ACIONAMENTOS**

**MÁQUINAS DE MÉDIO E GRANDE PORTE (  $100 \text{ kW} < P_{\text{nom}} < 10 \text{ MW}$  )**

**UTILIZADO COMO MOTOR SÍNCRONO EM PROPULSÃO NAVAL E FERROVIÁRIA**

**→ *ELEVADO DESEMPENHO - MASSA E VOLUME REDUZIDOS***

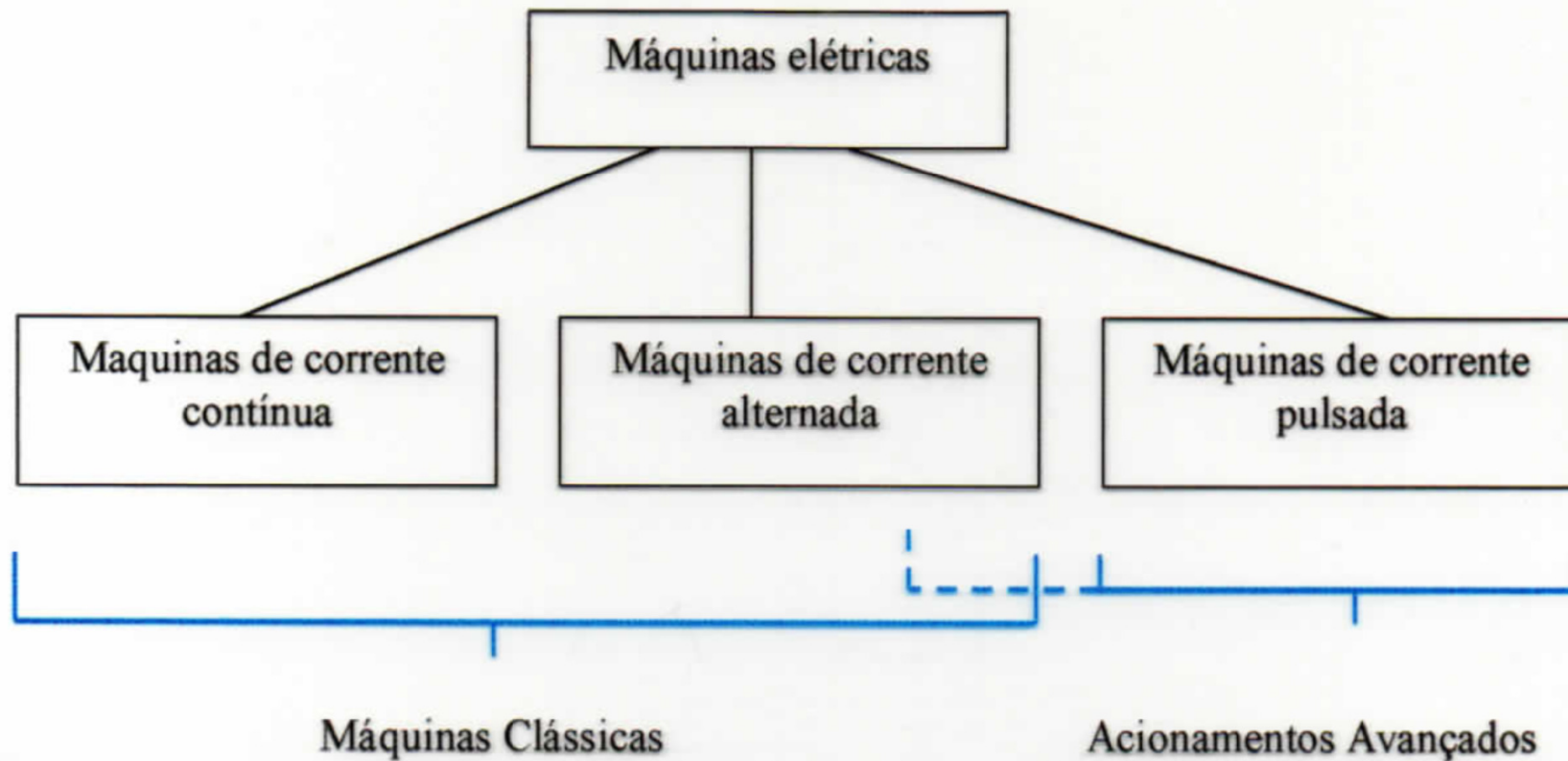
**MÁQUINAS DE PEQUENO PORTE (  $P_{\text{nom}} < 10 \text{ kW}$  )**

**USO GERAL EM PEQUENOS ACIONAMENTOS – CONTROLE – ELETRODOMÉSTICOS – AUTOMOTIVO**

**→ *REDUÇÃO DE CUSTO – CONFIABILIDADE***

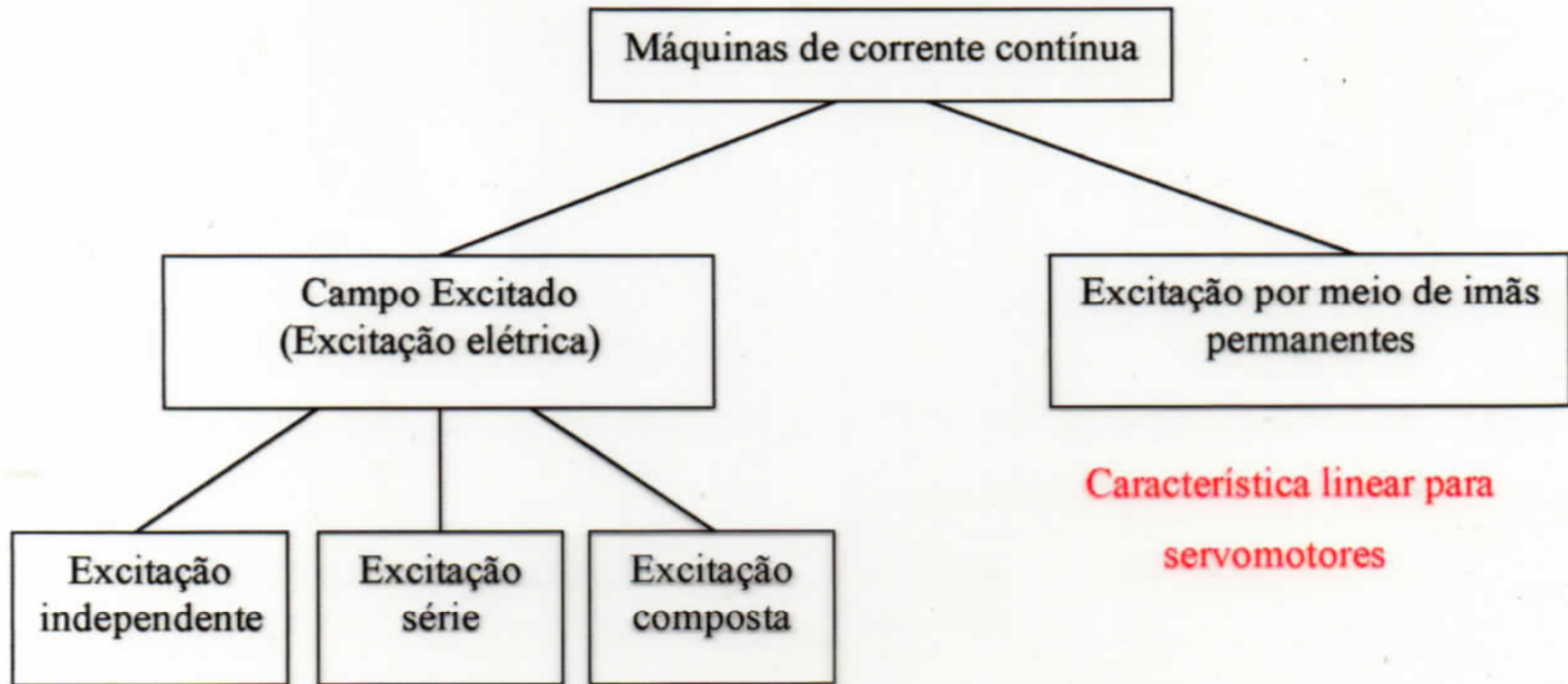
PREÂMBULO GERAL SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA A COMPOSIÇÃO DOS ACIONAMENTOS

Máquinas Elétricas - Classificação Geral



## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

PREÂMBULO GERAL SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA A COMPOSIÇÃO DOS ACIONAMENTOS



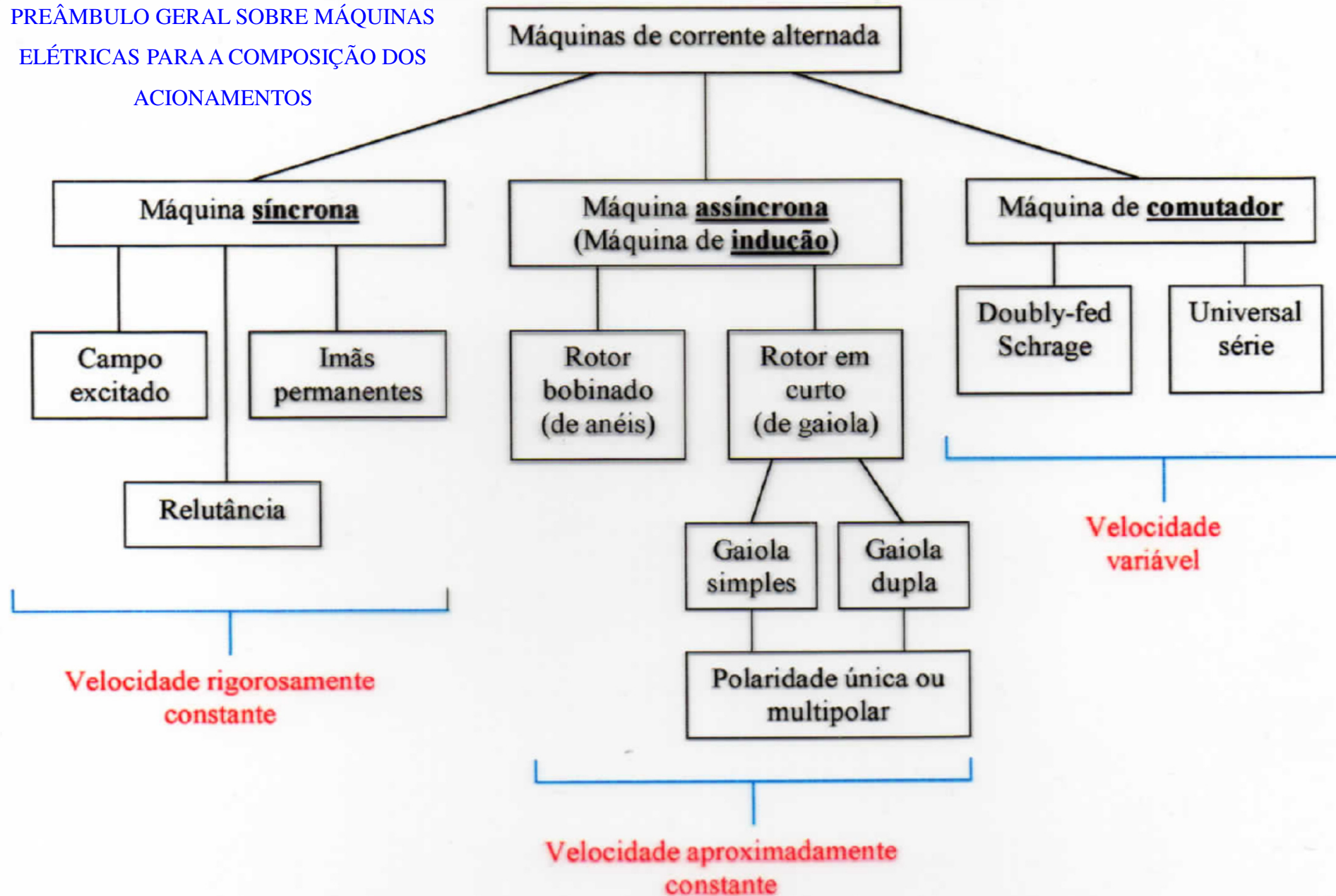
Característica linear para  
servomotores

Tipo de excitação define a característica externa

Depende da aplicação

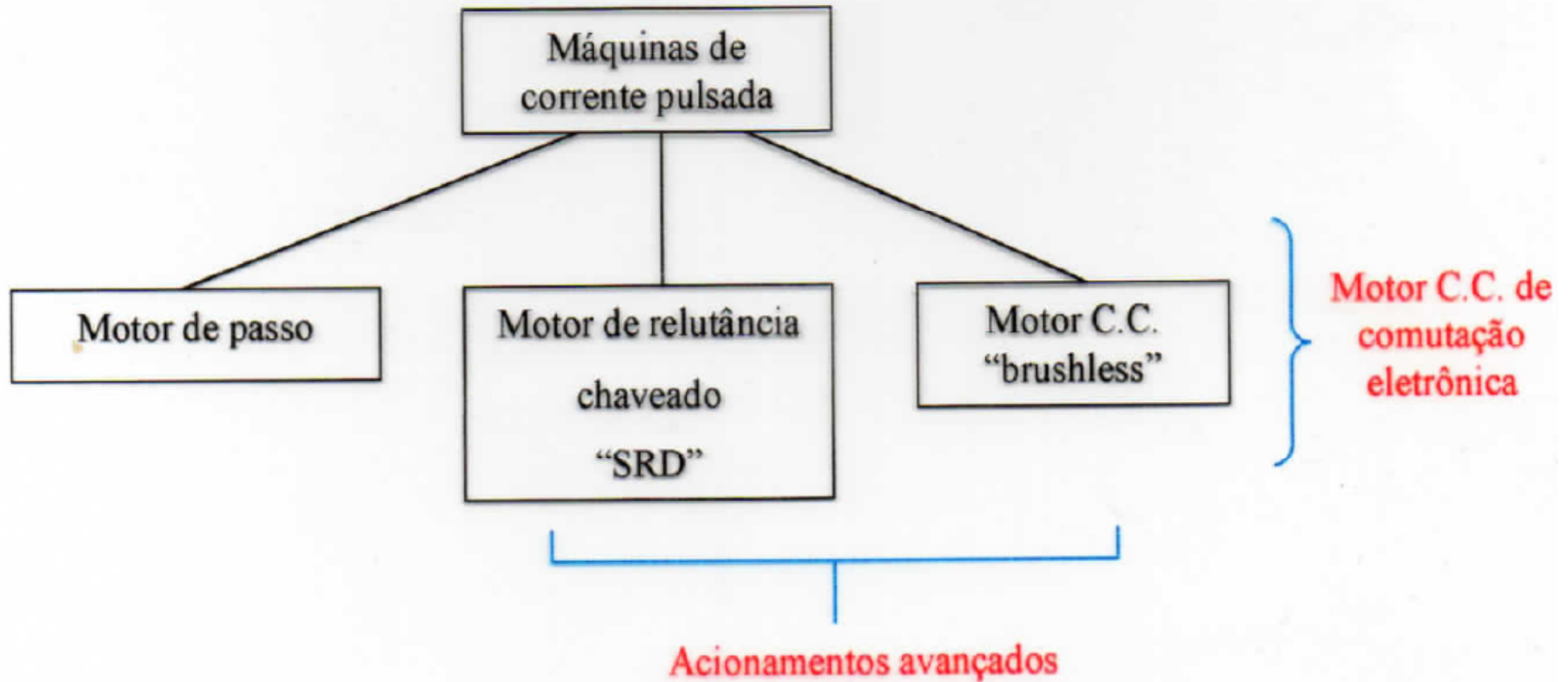
## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

PREÂMBULO GERAL SOBRE MÁQUINAS  
ELÉTRICAS PARA A COMPOSIÇÃO DOS  
ACIONAMENTOS



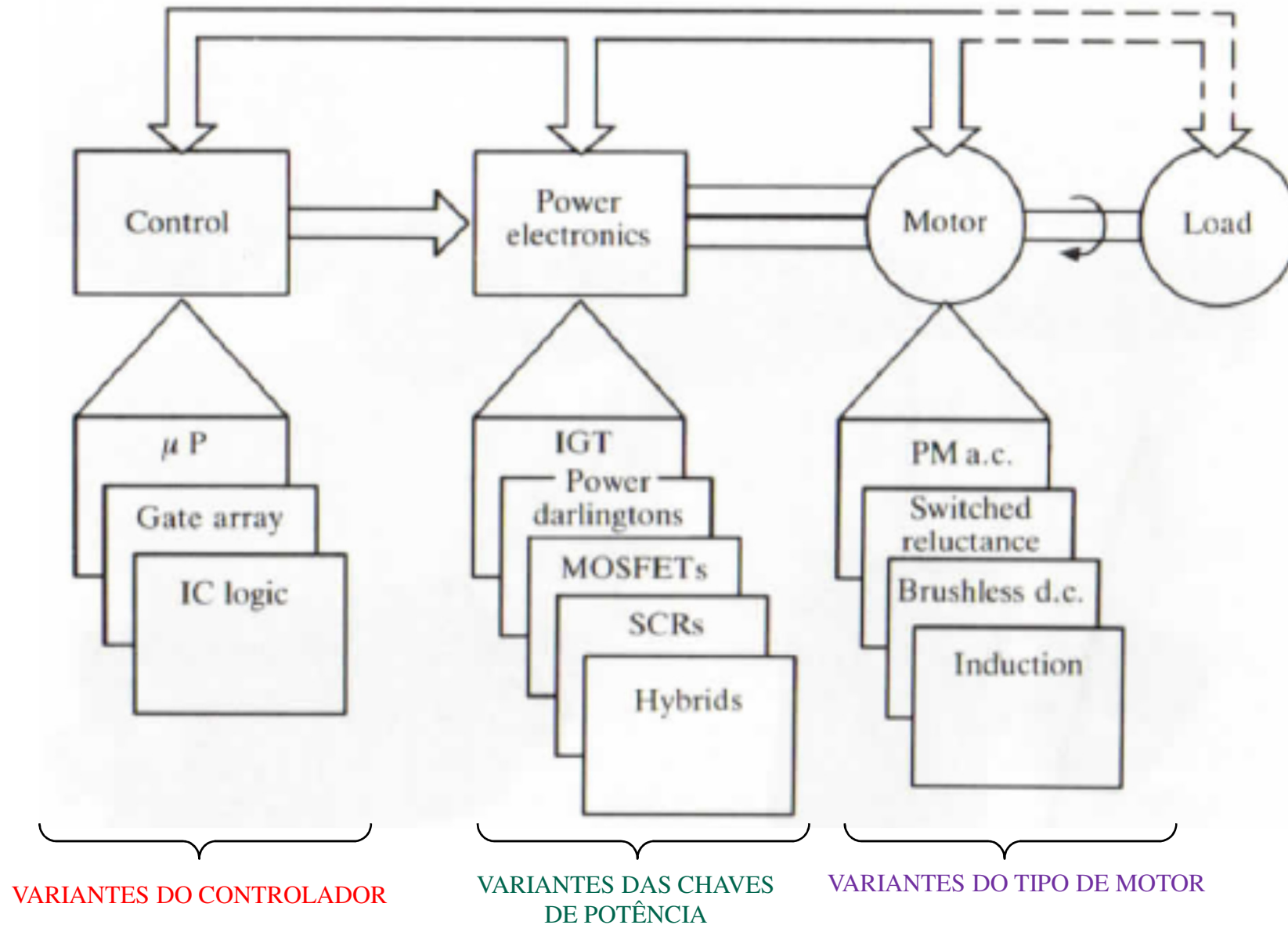
## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

PREÂMBULO GERAL SOBRE MÁQUINAS ELÉTRICAS PARA A COMPOSIÇÃO DOS ACIONAMENTOS



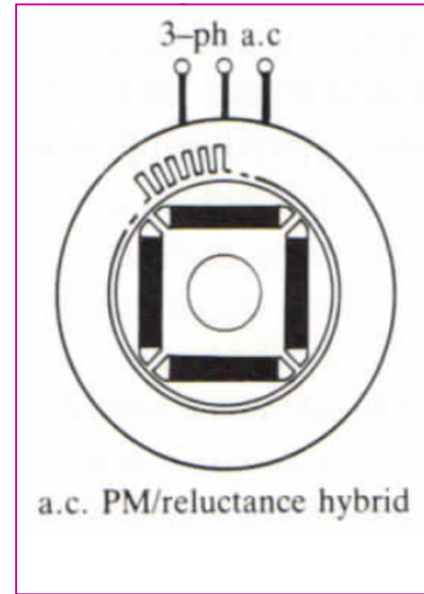
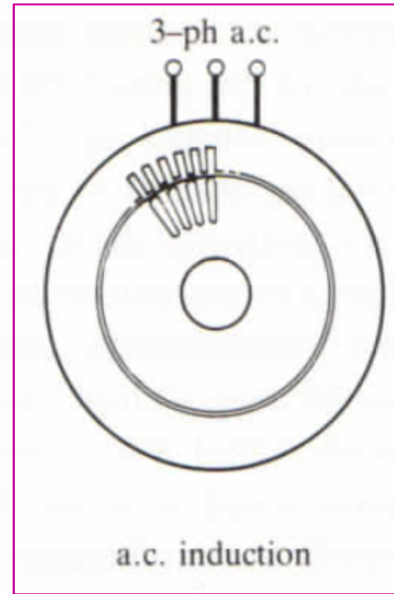
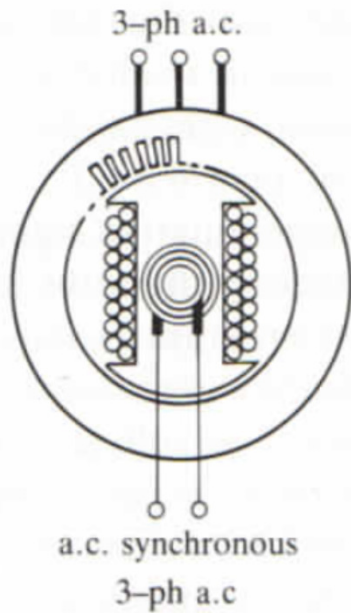
## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### CARACTERIZAÇÃO GENÉRICA DOS ACIONAMENTOS “AVANÇADOS”

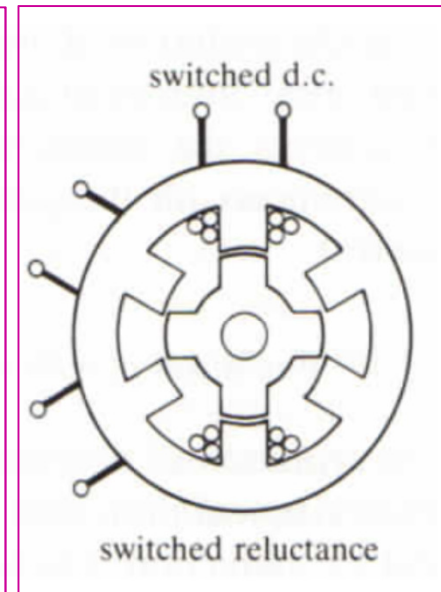
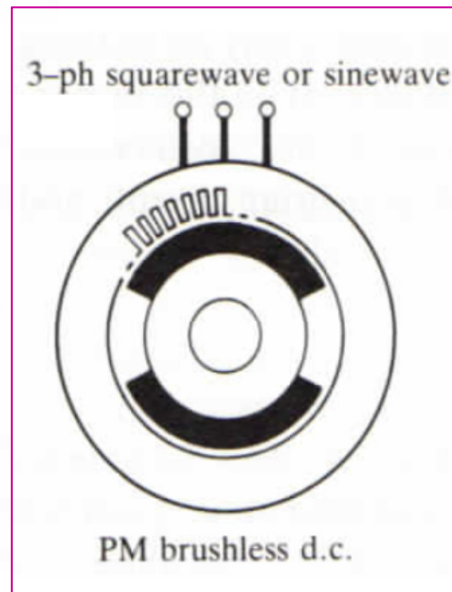
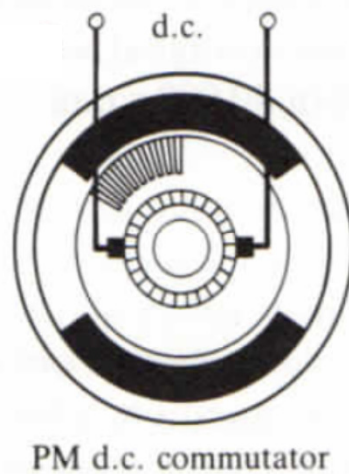
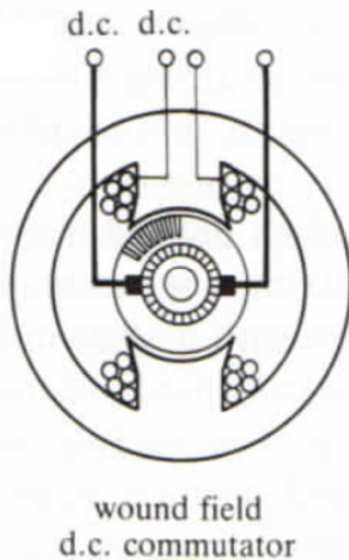


# PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

## VARIANTES DOS TIPOS DE MOTOR APLICADOS NOS ACIONAMENTOS



MOTORES COMUMENTE  
EMPREGADOS PARA  
IMPLEMENTAÇÃO DOS  
ACIONAMENTOS  
“AVANÇADOS”

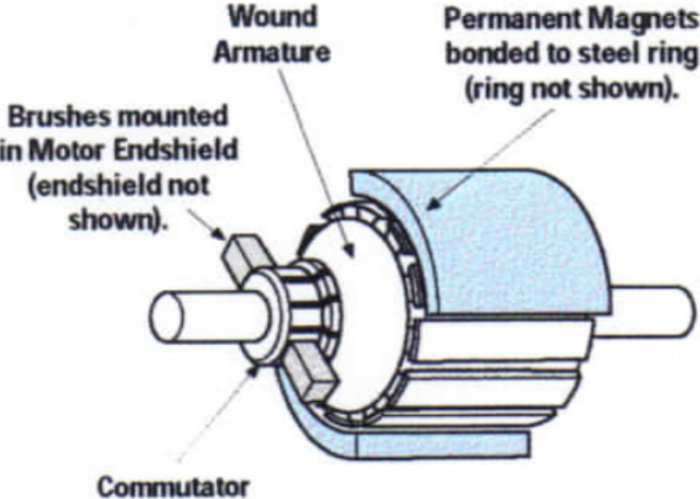
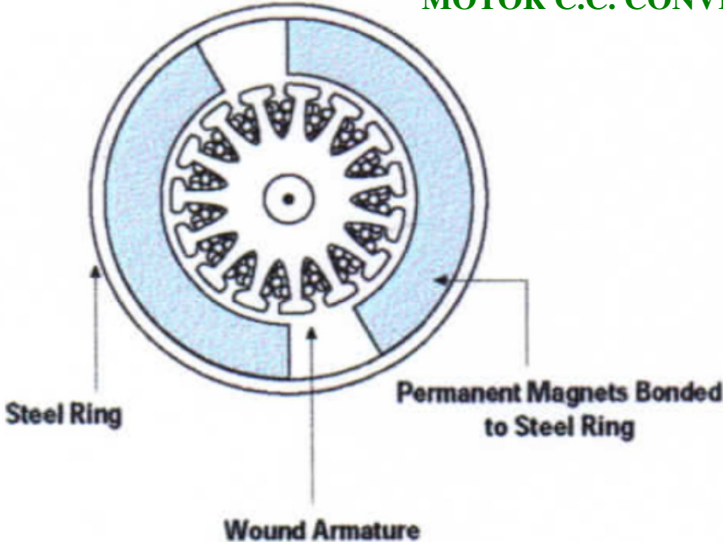




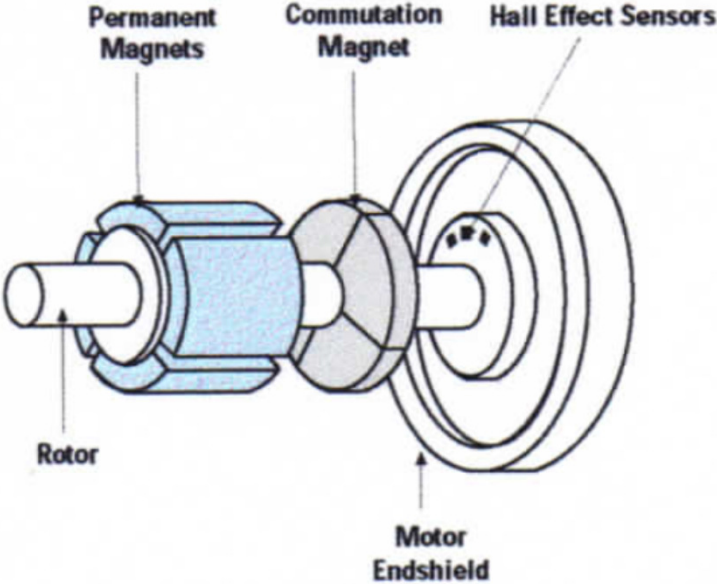
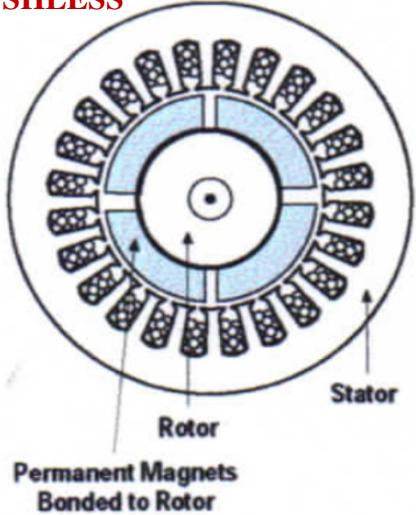
**PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”**

ASPECTOS CONSTRUTIVOS COMPARATIVOS ENTRE O MOTOR C.C. CONVENCIONAL E O MOTOR C.C. BRUSHLESS

**MOTOR C.C. CONVENCIONAL**

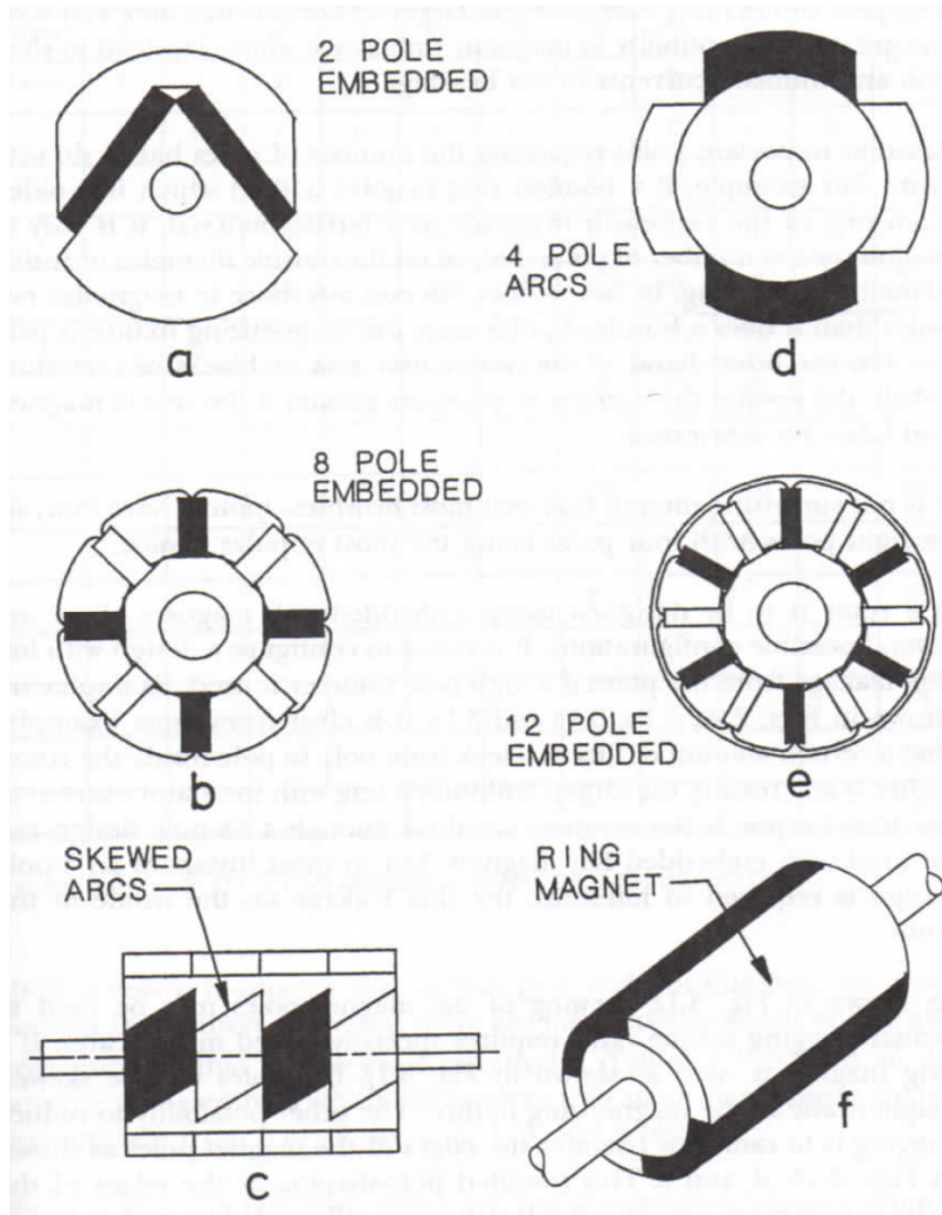


**MOTOR C.C. BRUSHLESS**



## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### ALGUMAS TOPOLOGIAS MAGNÉTICAS PARA O ROTOR DE MOTORES C.C. BRUSHLESS



a) b) e) : IMÃS PERMANENTES INTERIORES  
→ FIXAÇÃO PELO ALOJAMENTO MECÂNICO

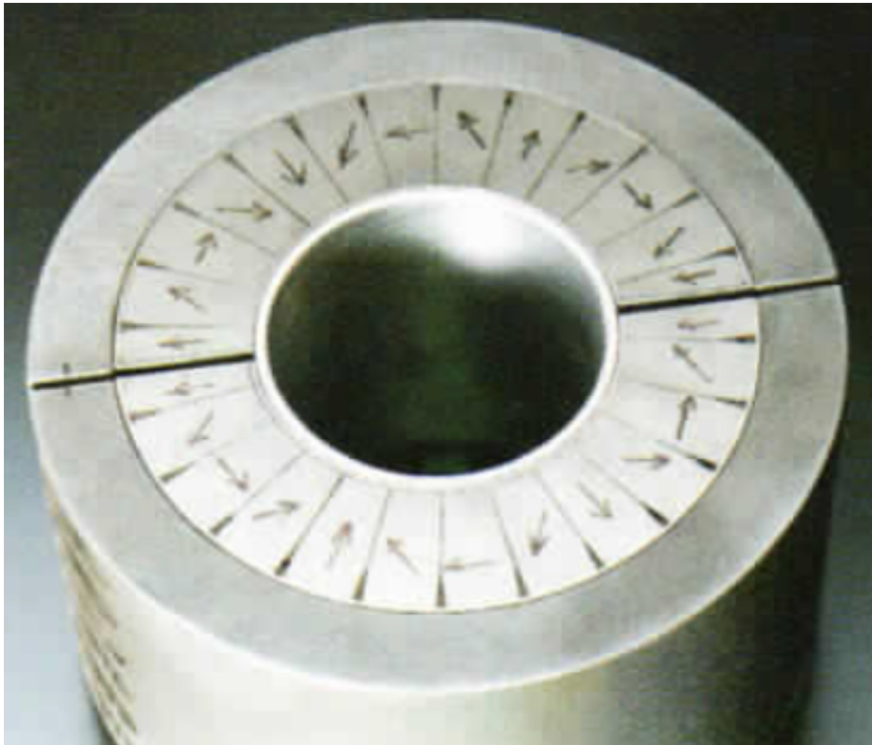
d) : IMÃS PERMANENTES SUPERFICIAIS  
→ FIXAÇÃO POR MEIO DE COLAGEM

c) : IMÃS PERMANENTES SUPERFICIAIS INCLINADOS  
→ FIXAÇÃO POR MEIO DE COLAGEM

f) : IMÃ PERMANENTE EM FORMA DE ANEL  
CONTÍNUO MAGNETIZADO COM O NÚMERO DE  
POLOS ADEQUADO

## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS



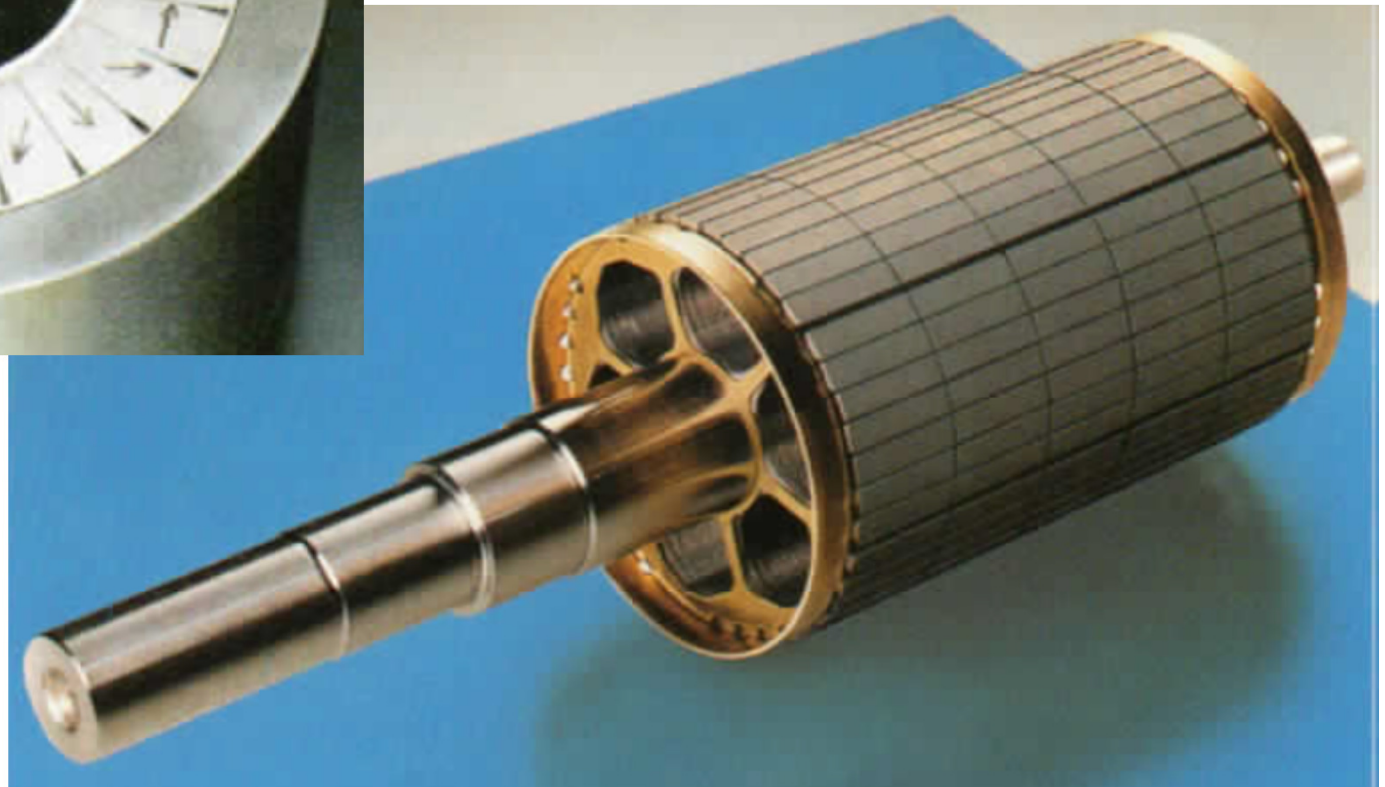
**ROTOR EXTERNO COM ÍMÃS COLADOS**

→ CONFIGURAÇÃO “HALBACH”

→ MAGNETIZAÇÃO COM ORIENTAÇÃO ESPACIAL VARIÁVEL

### ROTOR INTERNO COM ÍMÃS SUPERFICIAIS COLADOS

→ EM APLICAÇÕES MAIS CRÍTICAS, OS ÍMÃS RECEBEM UMA CINTA DE FIBRA DE VIDRO OU FIBRA DE CARBONO SOBRE OS MESMOS PARA AUMENTO DA RETENÇÃO MECÂNICA

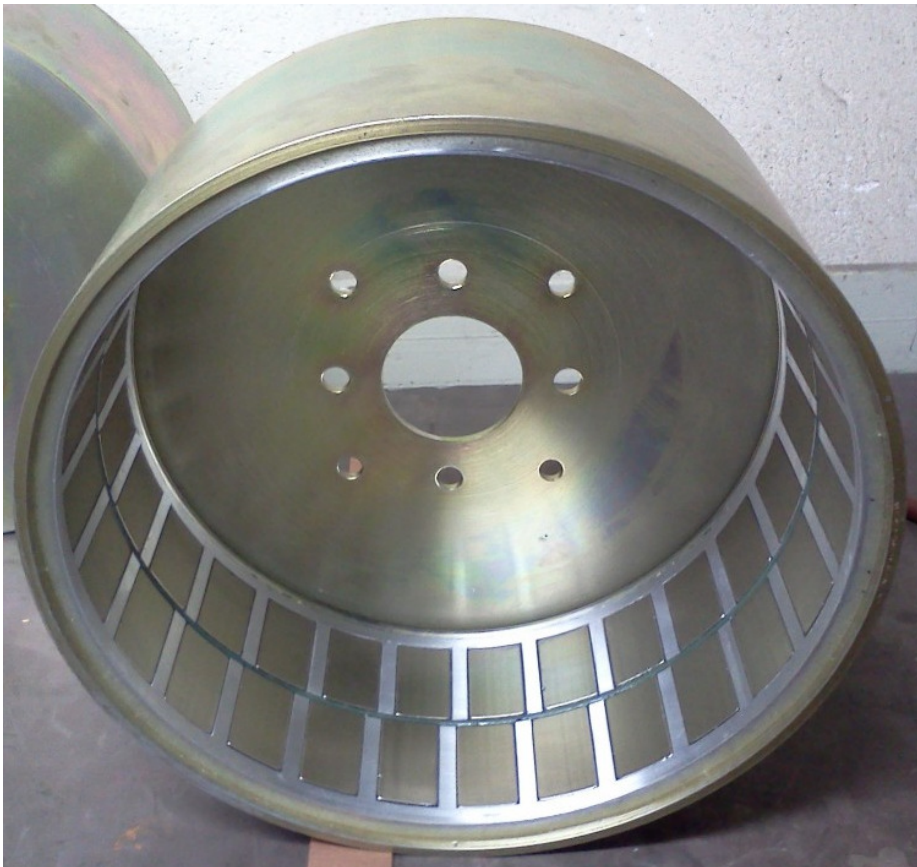


## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

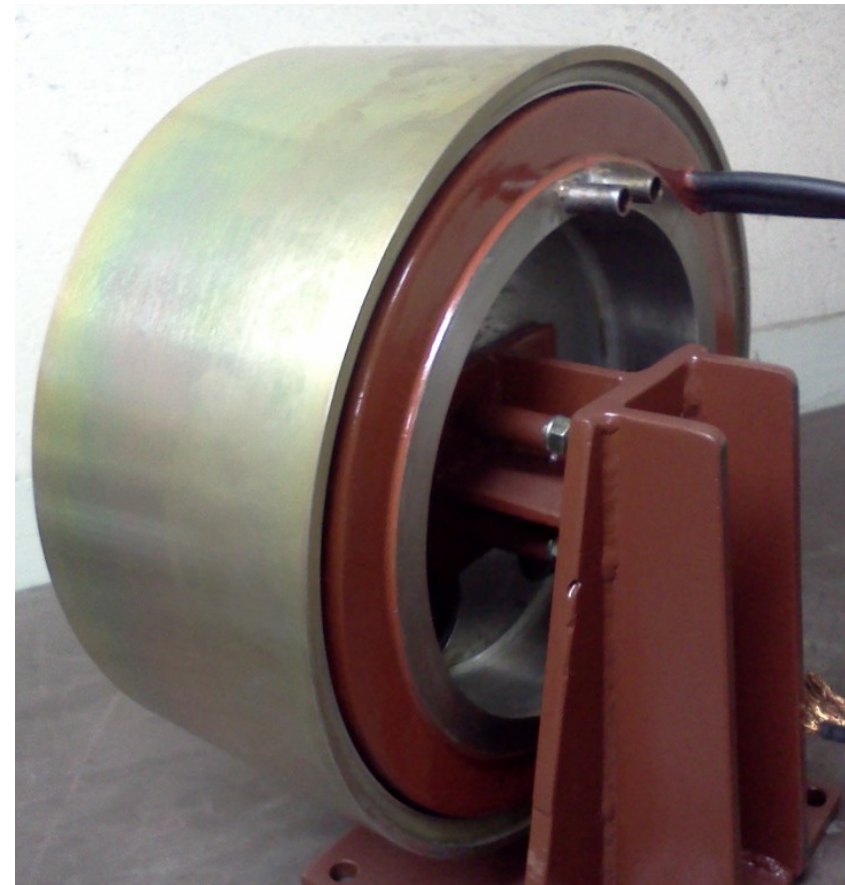
### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS

#### ROTOR EXTERNO COM ÍMÃS SUPERFICIAIS COLADOS

→ O DESLOCAMENTO AXIAL PERMITE A MINIMIZAÇÃO DE TORQUES PARASITAS ( “COGGING TORQUE” )



#### MOTOR BRUSHLESS DE ROTOR EXTERNO E ESTATOR RESFRIADO A ÁGUA – USO VEICULAR

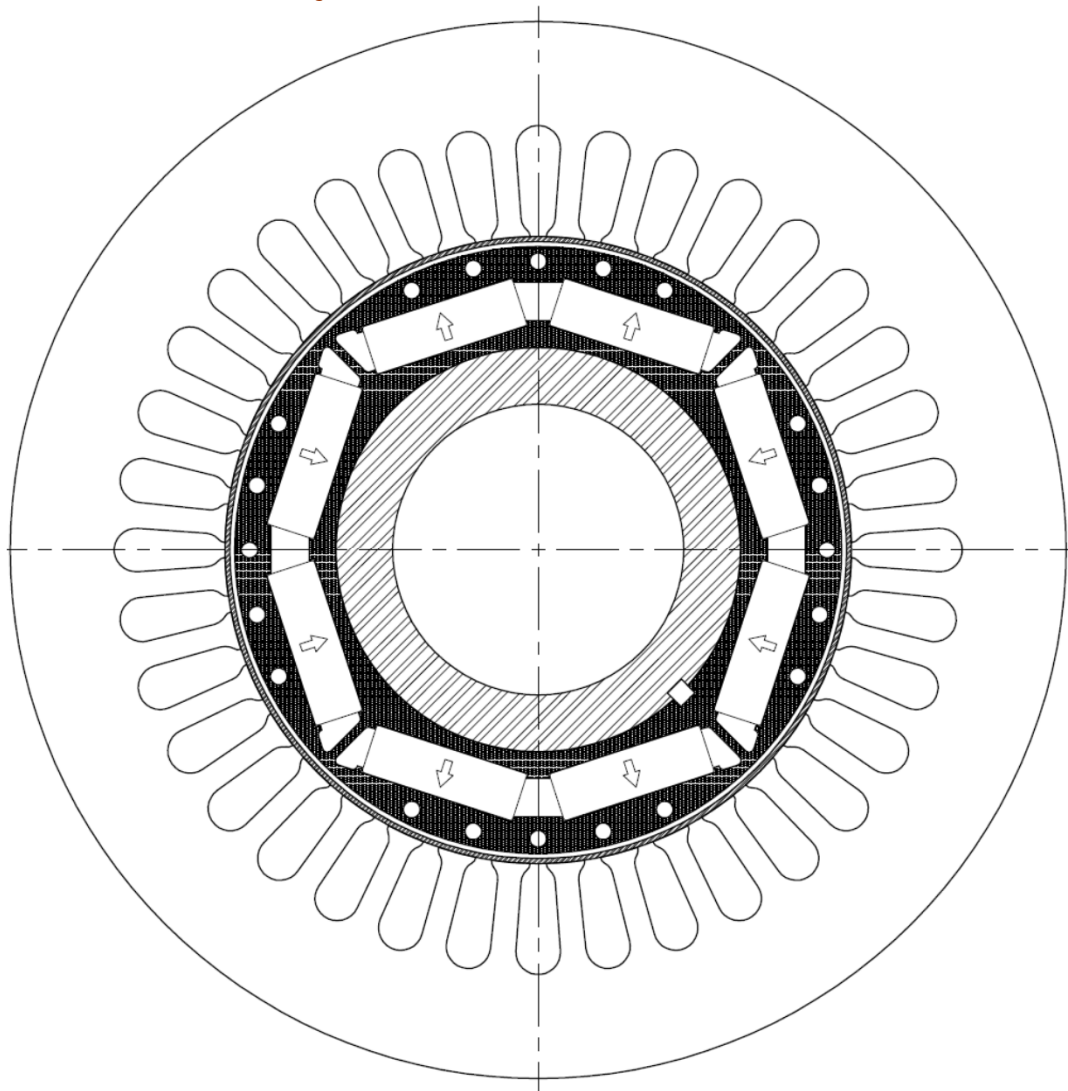


## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS

ROTOR COM ÍMÃS INTERIORES INSERIDOS EM CANALETAS

→ CONFIGURAÇÃO DOTADA DE PONTES MAGNÉTICAS SATURÁVEIS

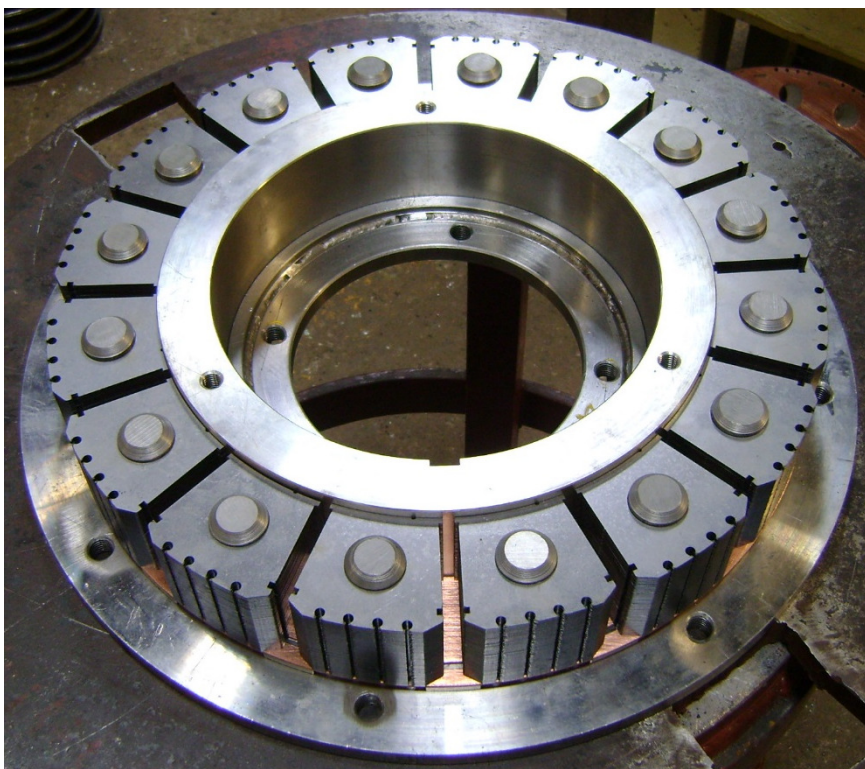


## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS

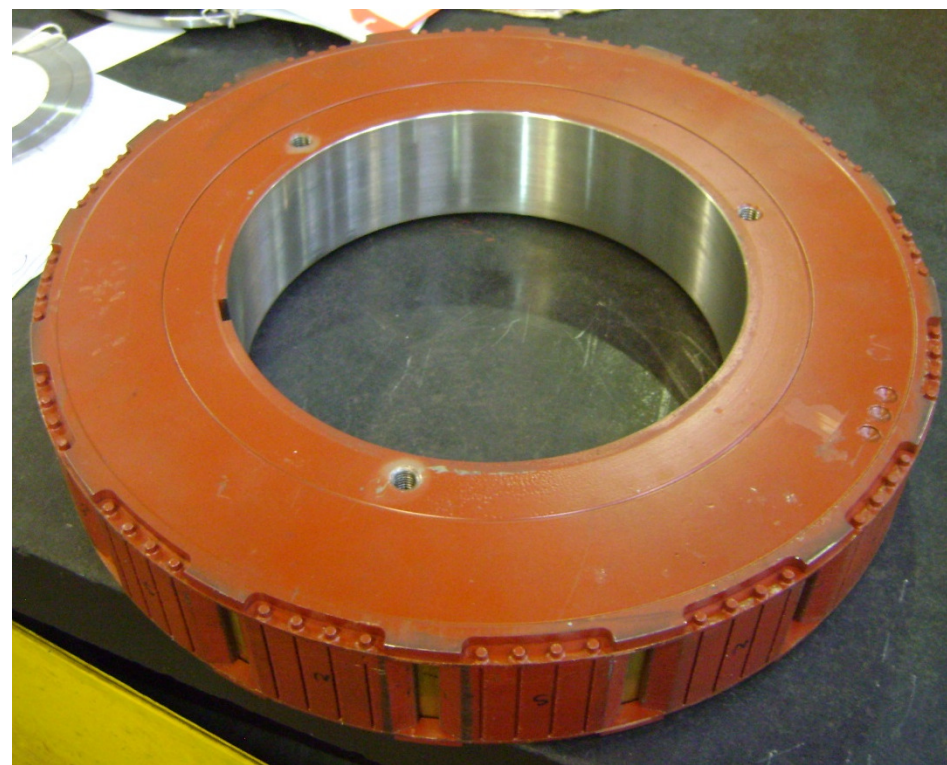
#### ROTOR COM ÍMÃS INTERNOS ALOJADOS EM CANALETAS

→ CONFIGURAÇÃO COM CUBO E LATERAIS DE MATERIAL AMAGNÉTICO E PINOS DE RETENÇÃO



#### ROTOR ACABADO COM ÍMÃS INSERIDOS E TRAVADOS

→ ROTOR DOTADO DE GAIOLA DE AMORTECIMENTO

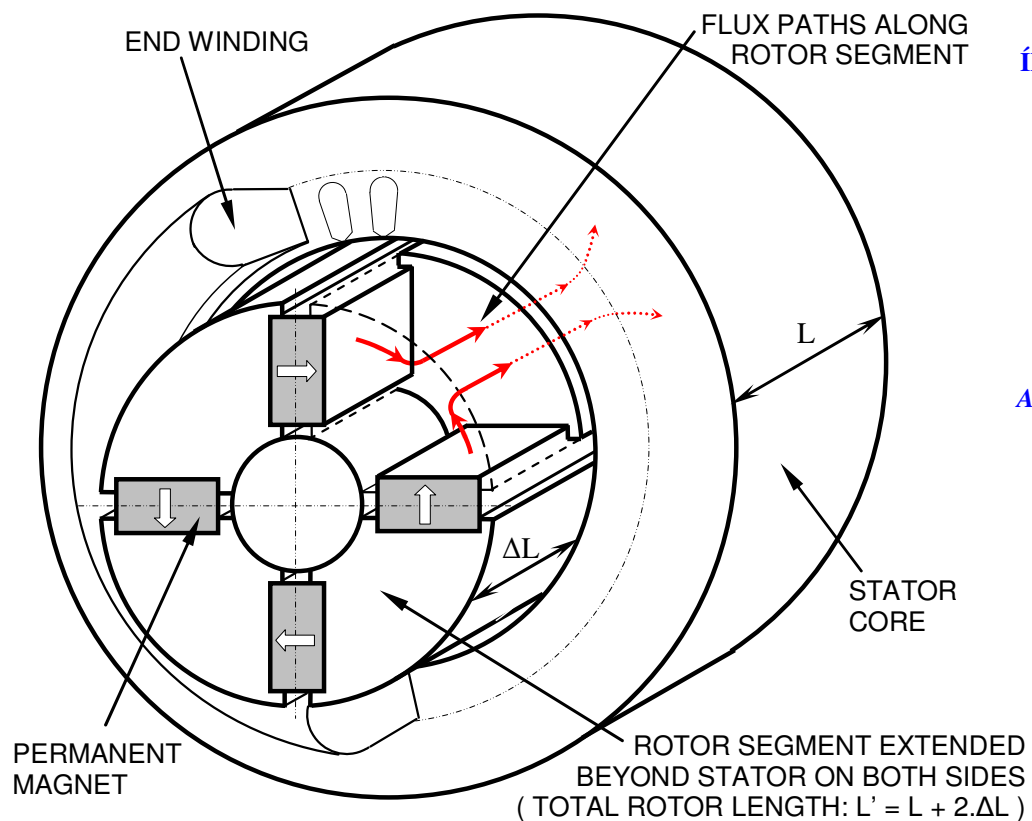


## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS

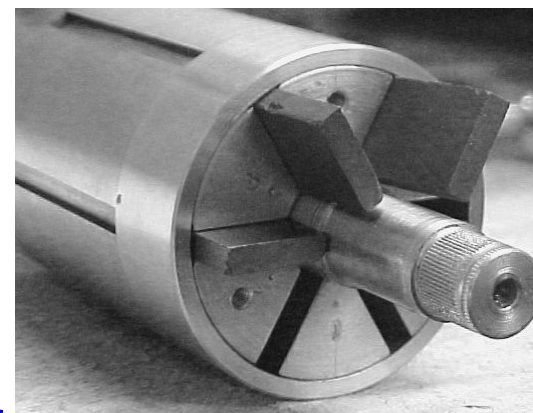
**ROTOR COM ÍMÃS INTERNOS E SEGMENTOS MAGNÉTICOS QUE SE PROJETAM ALÉM DO COMPRIMENTO DO ESTATOR**

→ **TOPOLOGIA COM CONCENTRAÇÃO AXIAL DE FLUXO**



ÍMÃS INSERIDOS EM CANALETAS COM CONCENTRAÇÃO AXIAL DE FLUXO

→ **RETENÇÃO MECÂNICA POR ANÉIS AMAGNÉTICOS**



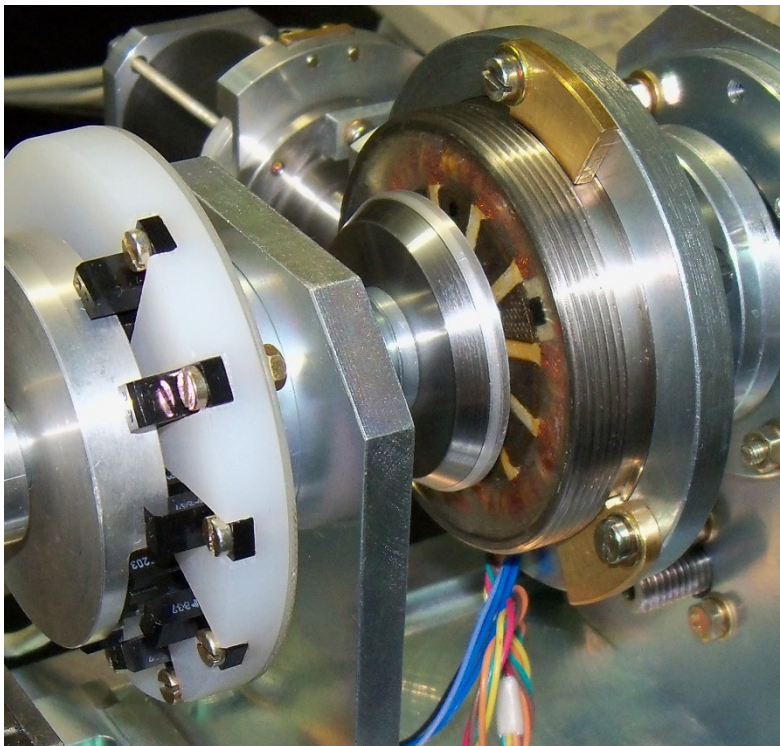
## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### EXEMPLOS CONSTRUTIVOS DE MOTORES C.C. BRUSHLESS

#### MOTOR BRUSHLESS DE FLUXO AXIAL

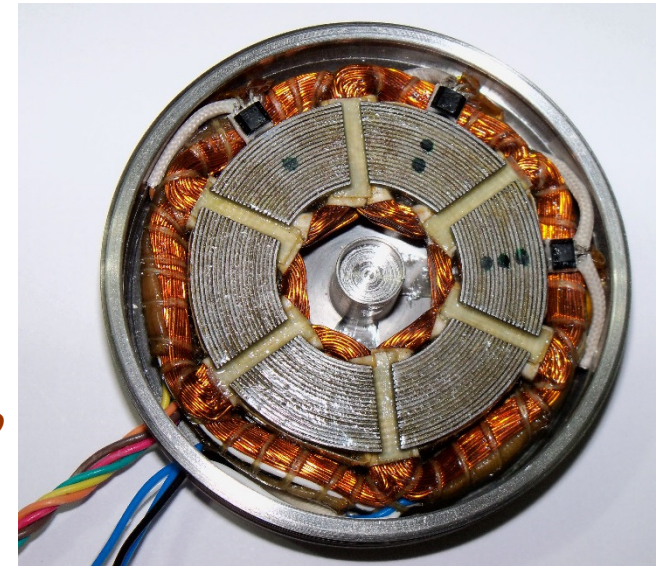
→ *USO MÉDICO (ACIONAMENTO DE BOMBA DE CIRCULAÇÃO SANGUÍNEA NO D.A.V. – DISPOSITIVO DE AUXÍLIO VENTRICULAR)*

→ *MONTADO NA BANCADA DE TESTES*



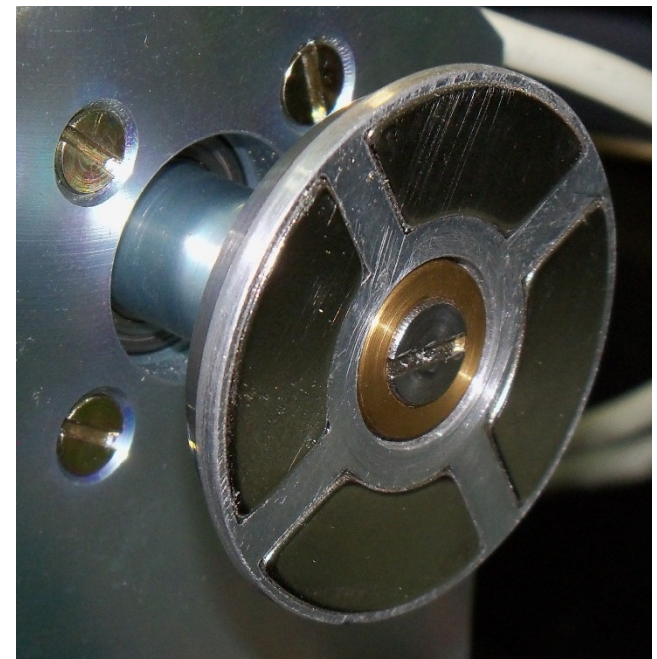
ESTATOR DE FLUXO  
AXIAL COM  
LAMINAÇÃO  
CIRCUNFERENCIAL

→ *4 POLOS - TRIFÁSICO*



ROTOR DE FLUXO  
AXIAL - 4 POLOS

→ *ÍMÃS SUPERFICIAIS  
COLADOS*



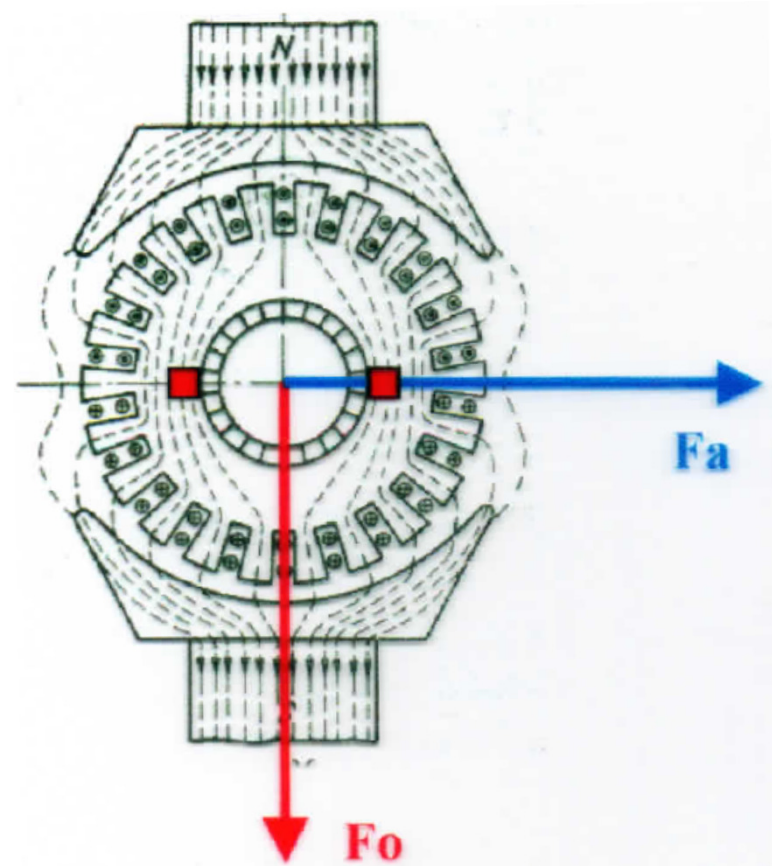


## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### CONCEITUAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO MOTOR C.C. BRUSHLESS

**$F_a$**  → FORÇA MAGNETOMOTRIZ DE REAÇÃO DE ARMADURA, PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DO ROTOR

**$F_o$**  → FORÇA MAGNETOMOTRIZ DE EXCITAÇÃO, PRODUZIDA PELO ENROLAMENTO DE CAMPO OU POR ÍMÃS PERMANENTES NO ESTATOR



OPERAÇÃO DO MOTOR C.C. CONVENCIONAL:

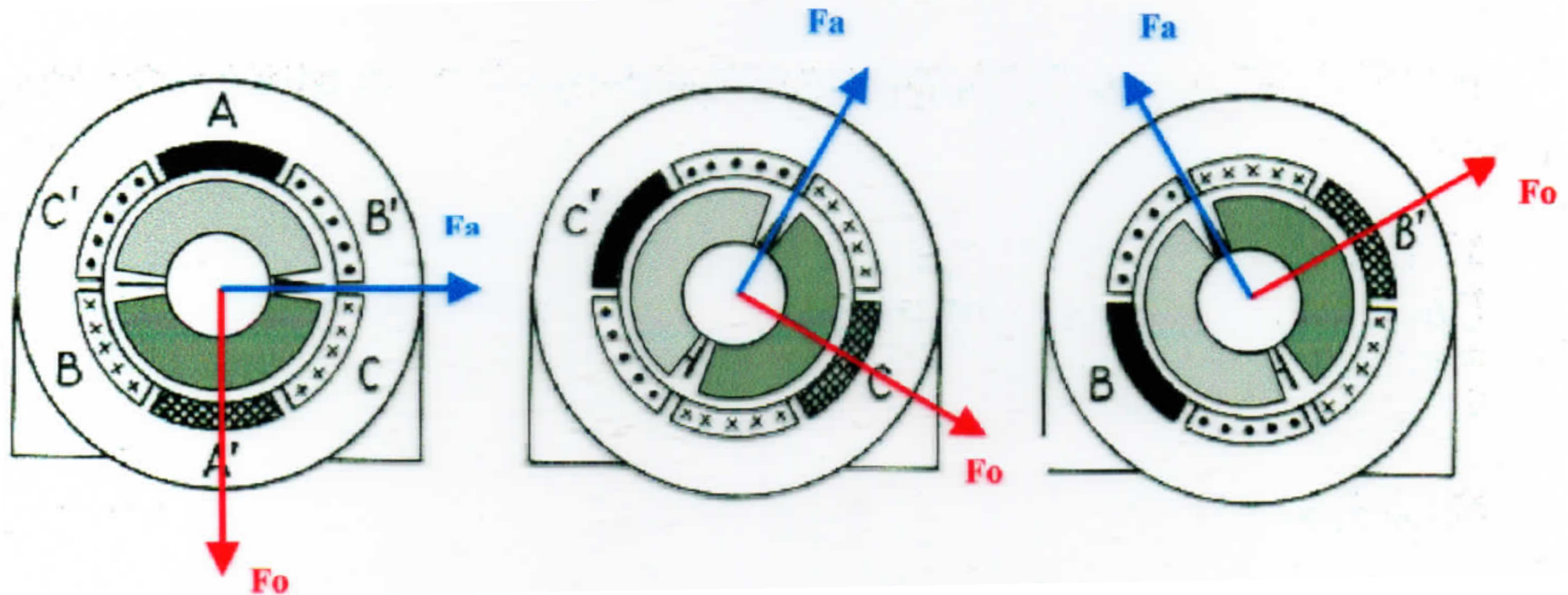
ENROLAMENTO PSEUDO-ESTACIONÁRIO ( COMUTADOR + ESCOVAS )

**$F_a$**  : PRODUZIDA SEMPRE PERPENDICULAR A  **$F_o$** , INDEPENDENTE DA POSIÇÃO E VELOCIDADE DO ROTOR

INVERSÃO DOS CONDUTORES DA ARMADURA ( COMUTAÇÃO ) REALIZADA MECANICAMENTE

## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### CONCEITUAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO MOTOR C.C. BRUSHLESS



### OPERAÇÃO DO MOTOR C.C. BRUSHLESS:

ENROLAMENTO DO ESTATOR COMPOSTO DE FASES INDIVIDUAIS COM ALIMENTAÇÃO CHAVEADA

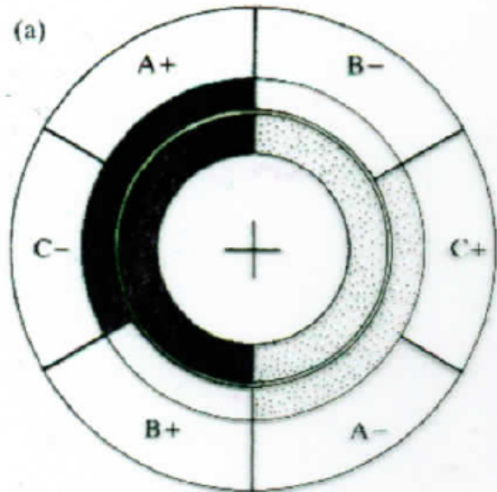
$F_o$  É SÓLIDÁRIA AO ROTOR ORIENTADA CONFORME A POSIÇÃO ANGULAR DO MESMO

$F_a$  É DESLOCADA DE MODO A SE MANTER “PERPENDICULAR” A  $F_o$  POR CHAVEAMENTO ADEQUADO DAS FASES

INVERSÃO DAS BOBINAS ESTATÓRICAS REALIZADA ELETRONICAMENTE

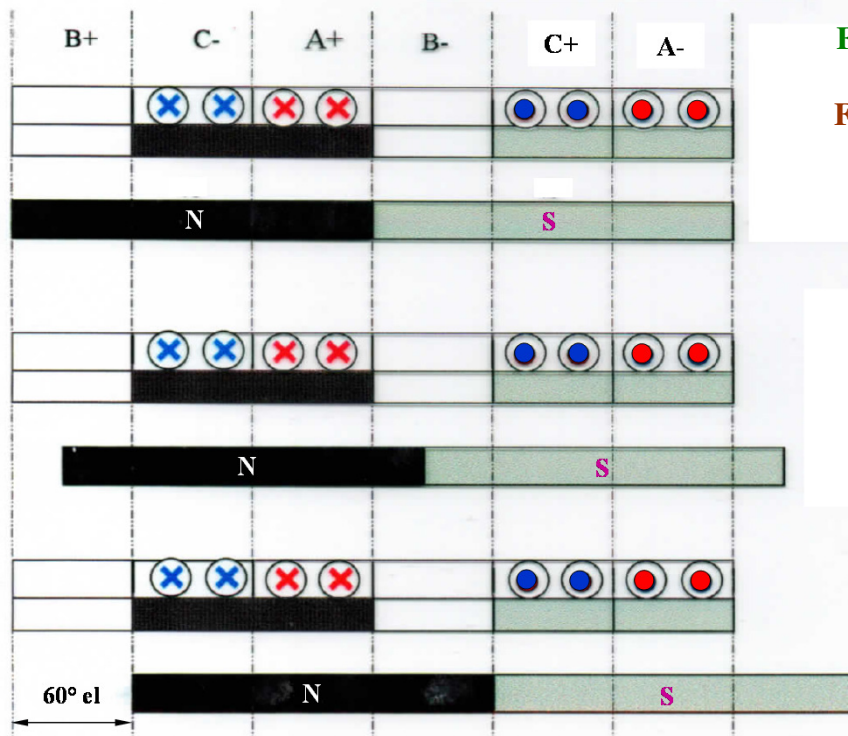
## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### CONCEITUAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO MOTOR C.C. BRUSHLESS



DURANTE TODO O PERCURSO DE 60° el. DO ROTOR, OS CONDUTORES DO ESTATOR (A+) E (C-) ESTÃO SOB A AÇÃO DO POLO MAGNÉTICO “N” DO ROTOR, ENQUANTO OS CONDUTORES (A-) E (C+) ESTÃO SOB A AÇÃO DO POLO MAGNÉTICO “S”

→ *INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA FICA CONSTANTE NO INTERVALO*



**F.E.M. MOCIONAL INDUZIDA:**  $E = K.B.L.V = K.\phi.\omega$

**F.E.M. MECÂNICA DESENVOLVIDA:**  $F_{mec} = K.B.L.I$  OU  $C = K.\phi.I$

AO FINAL DO INTERVALO DE 60° el. A CORRENTE DE (C-) É TRANSFERIDA PARA (B-) E A CORRENTE DE (C+) PARA (B+)

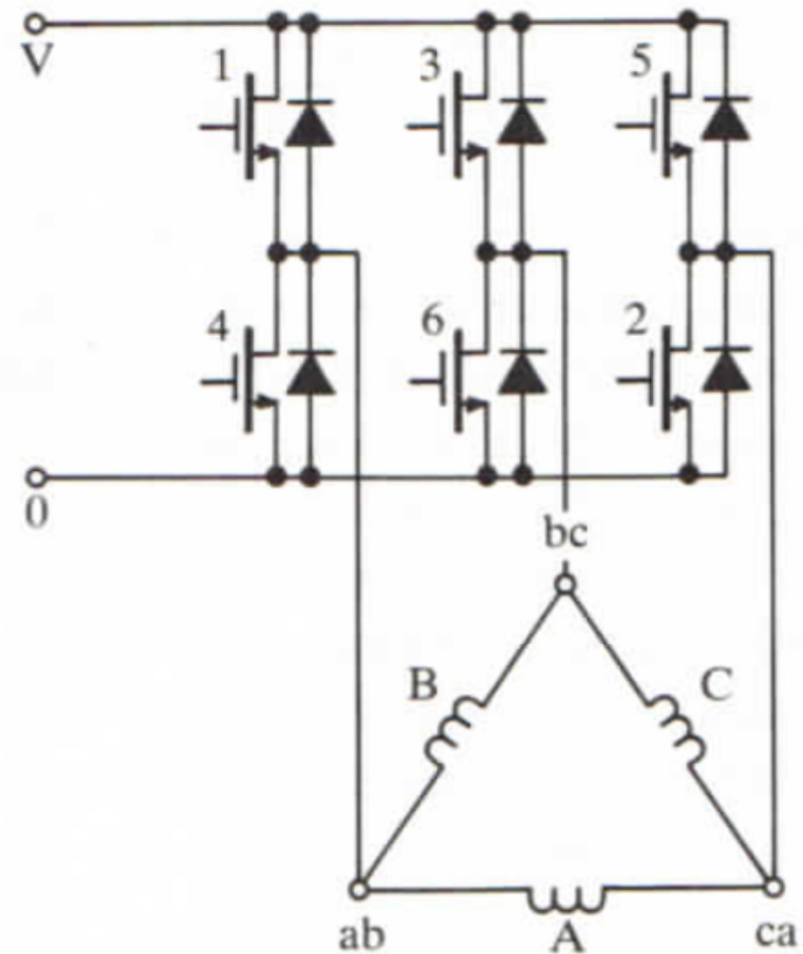
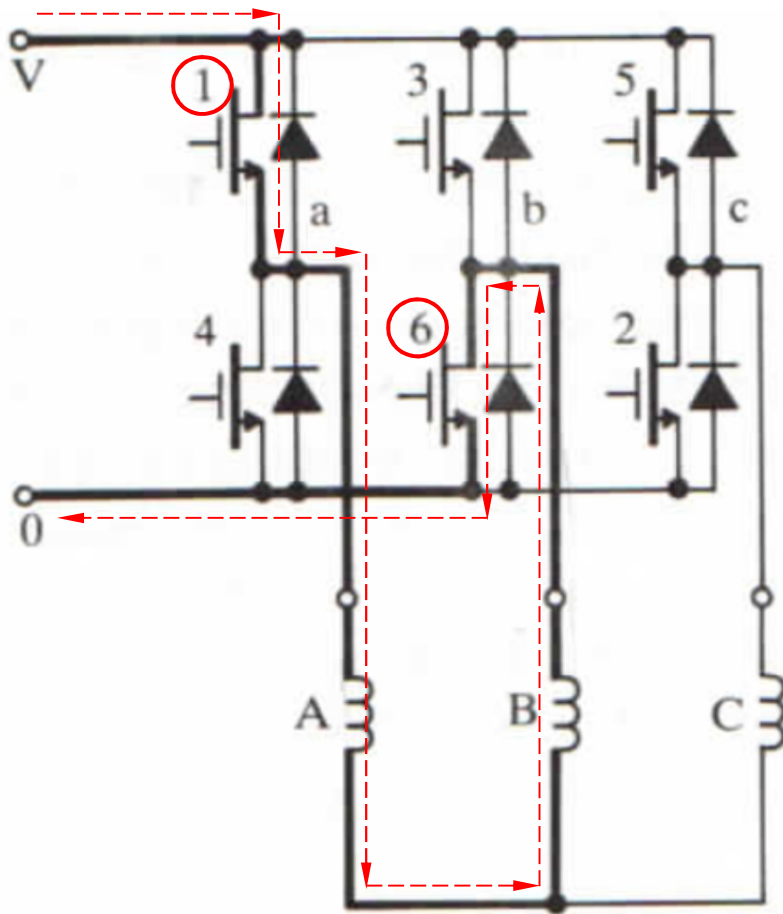
→ *INTERAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS CONTINUAM CONSTANTES NO PRÓXIMO INTERVALO*

## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### TOPOLOGIA DO CIRCUITO DE COMUTAÇÃO DAS FASES DO MOTOR C.C. BRUSHLESS

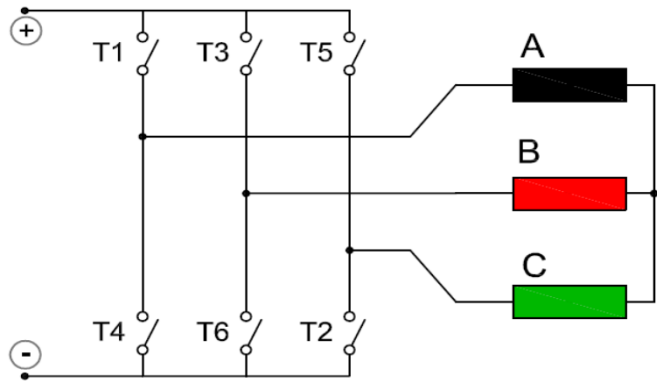
SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO → CONDUÇÃO SIMULTÂNEA DE DUAS CHAVES:

1-2 ; 2-3 ; 3-4 ; 4-5 ; 5-6 ; 6-1 ; 1-2 .....

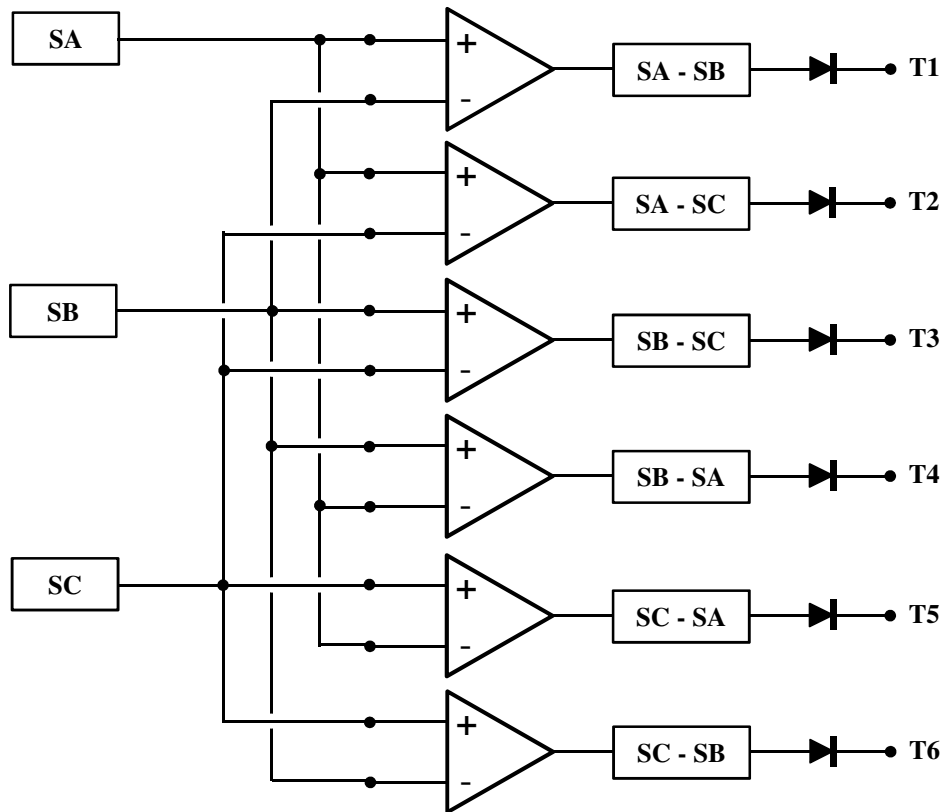


# PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

## SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES PARA COMUTAÇÃO DAS FASES DO MOTOR BRUSHLESS



**SA – SB – SC : SENSORES DE POSIÇÃO DO ROTOR**  
**→ CIRCUITO CONVERTE 3 SINAIS DOS SENSORES EM 6 SINAIS DE COMANDO DAS CHAVES**

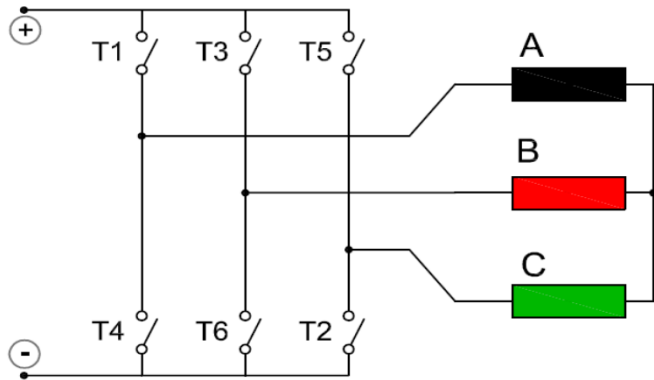


	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
SA	1	1	1	0	0	0	
SB	0	0	1	1	1	0	
SC	1	0	0	0	1	1	

	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
( SA - SB ) T1	A	A					
( SA - SC ) T2		-C	-C				
( SB - SC ) T3			B	B			
( SB - SA ) T4				-A	-A		
( SC - SA ) T5					C	C	
( SC - SB ) T6	-B						-B

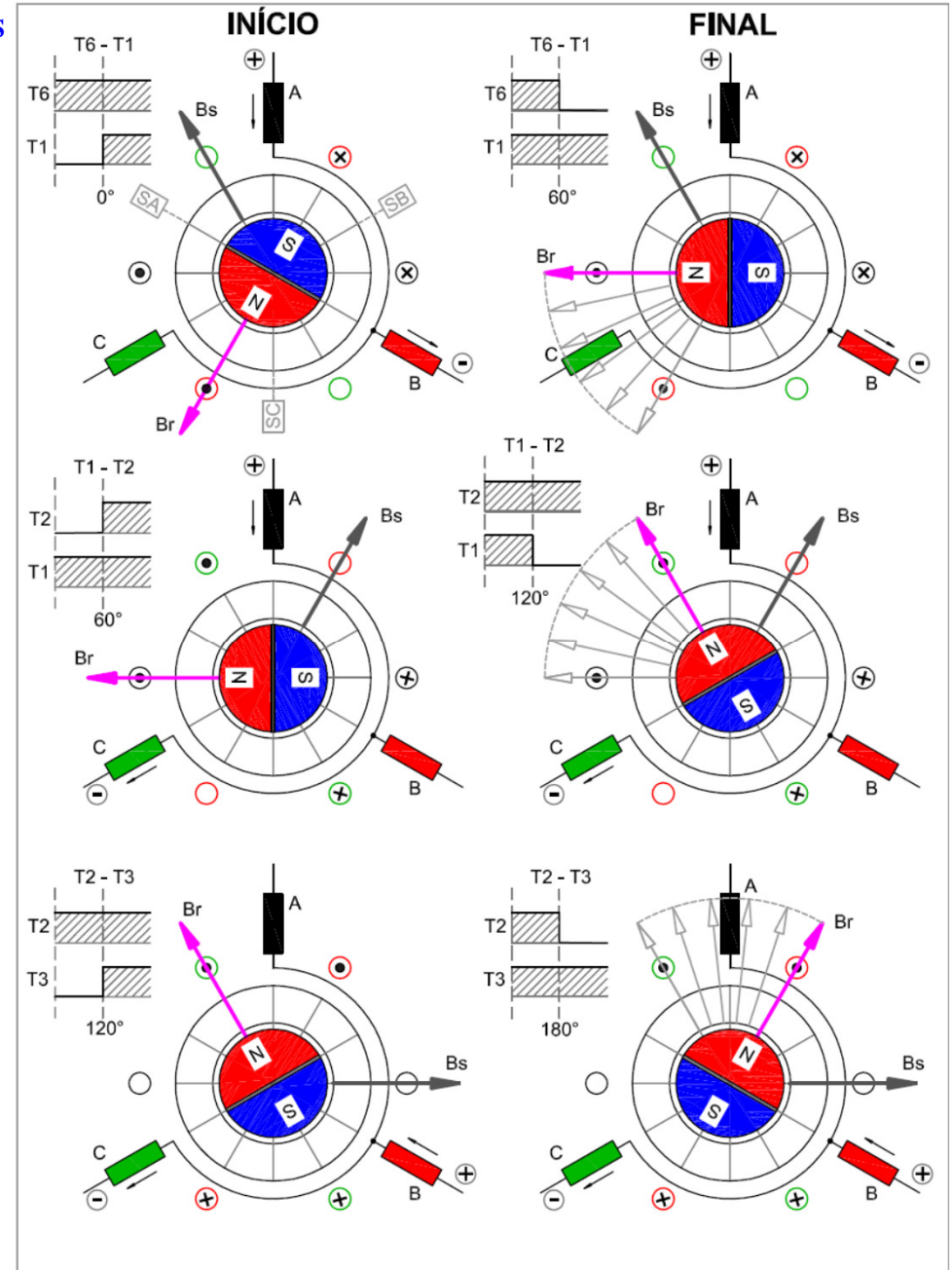
# PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

POSIÇÃO DO ROTOR A CADA INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES



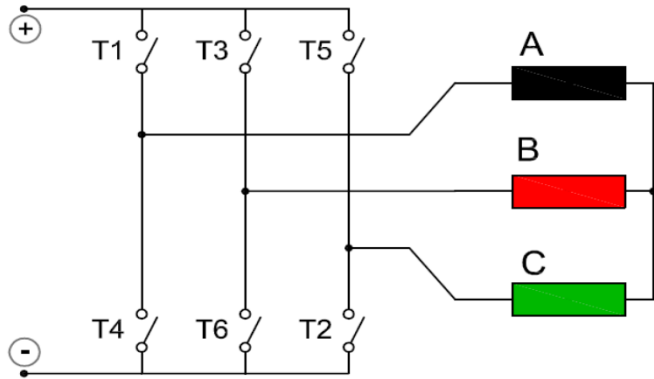
0° 60° 120° 180° 240° 300° 360°

( SA - SB )	T1	A	A				
( SA - SC )	T2		-C	-C			
( SB - SC )	T3			B	B		
( SB - SA )	T4				-A	-A	
( SC - SA )	T5					C	C
( SC - SB )	T6	-B					-B



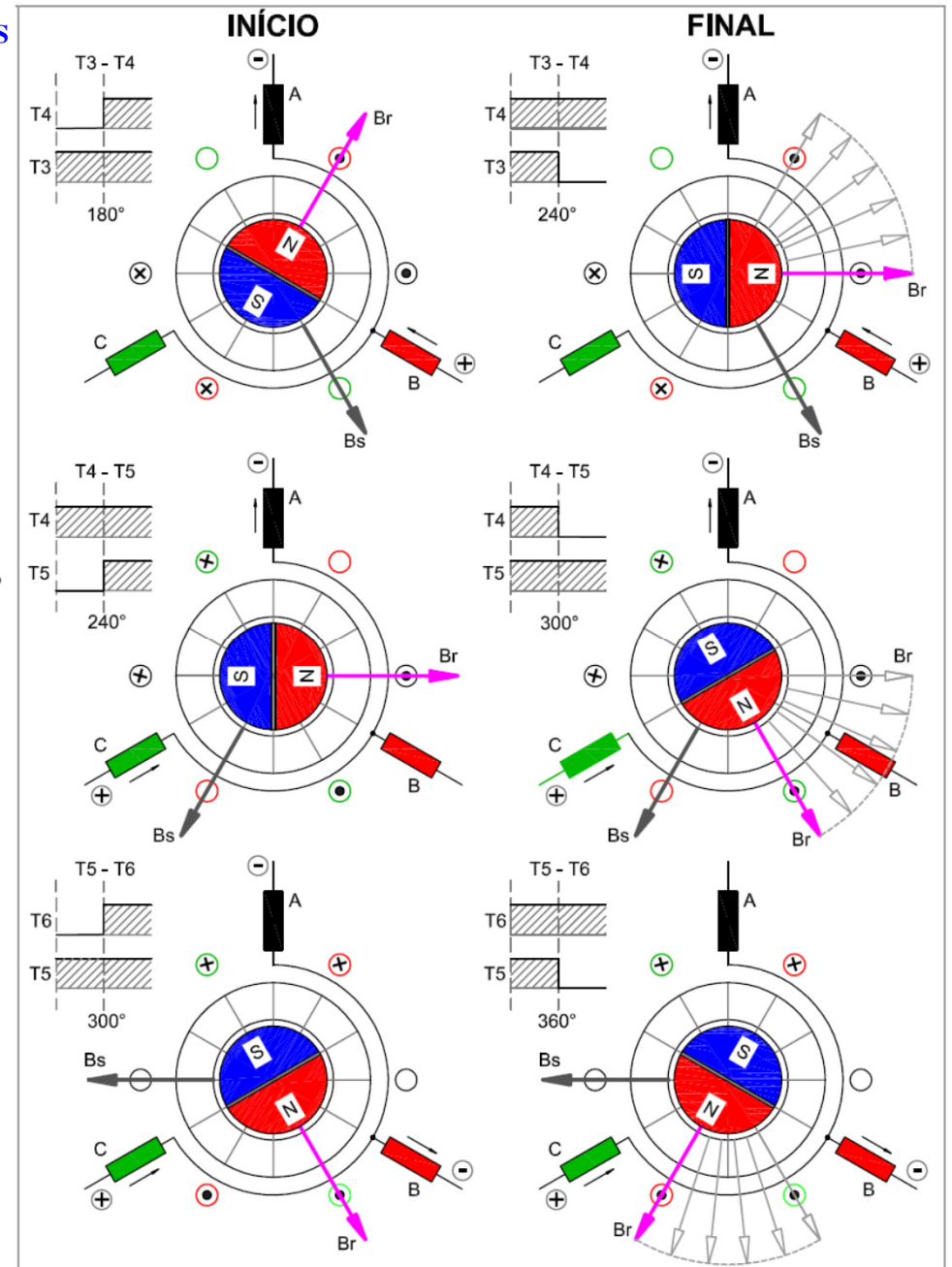
# PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

POSIÇÃO DO ROTOR A CADA INTERVALO DE CONDUÇÃO DAS CHAVES



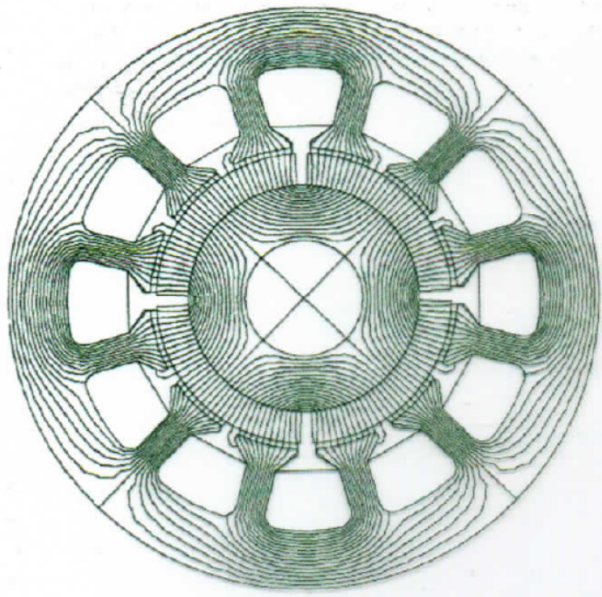
0° 60° 120° 180° 240° 300° 360°

( SA - SB )	T1	A	A				
( SA - SC )	T2		-C	-C			
( SB - SC )	T3			B	B		
( SB - SA )	T4				-A	-A	
( SC - SA )	T5					C	C
( SC - SB )	T6	-B					-B

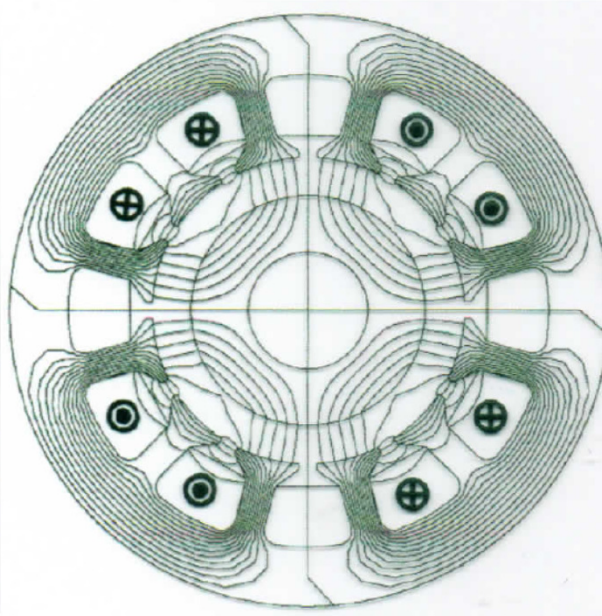


PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

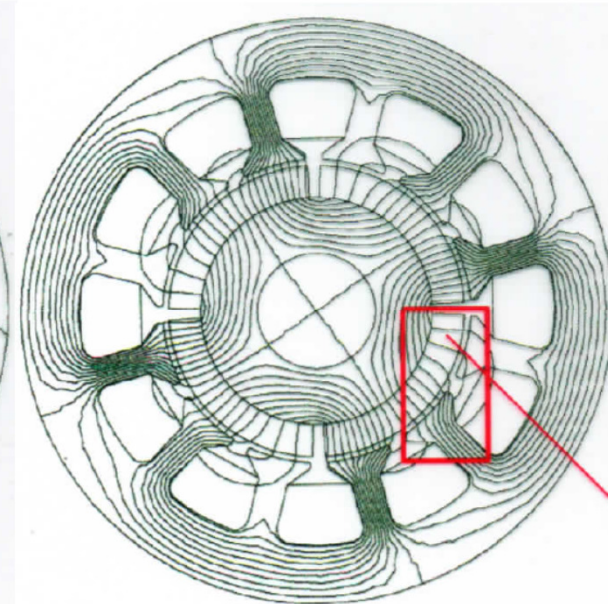
RISCO DE DESMAGNETIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES NO MOTOR C.C. BRUSHLESS



**CAMPO EXCLUSIVO DOS ÍMÃS  
PERMANENTES  
(FLUXO DE MAGNETIZAÇÃO)**



**CAMPO EXCLUSIVO DAS  
CORRENTES ESTATÓRICAS  
(FLUXO DE REAÇÃO DE ARMADURA)**

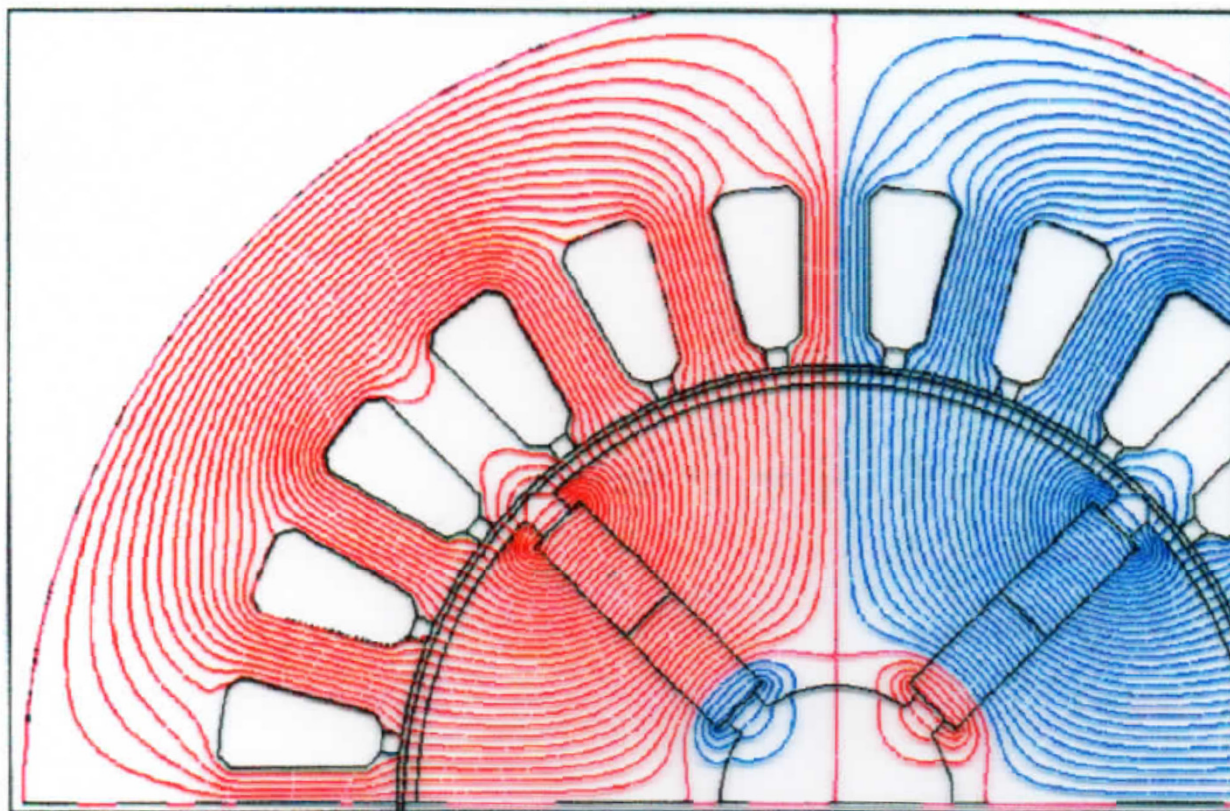


**CAMPO RESULTANTE**

***REGIÃO DO ÍMÃ PASSÍVEL  
DE DESMAGNETIZAÇÃO***



RISCO DE DESMAGNETIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES NO MOTOR C.C. BRUSHLESS



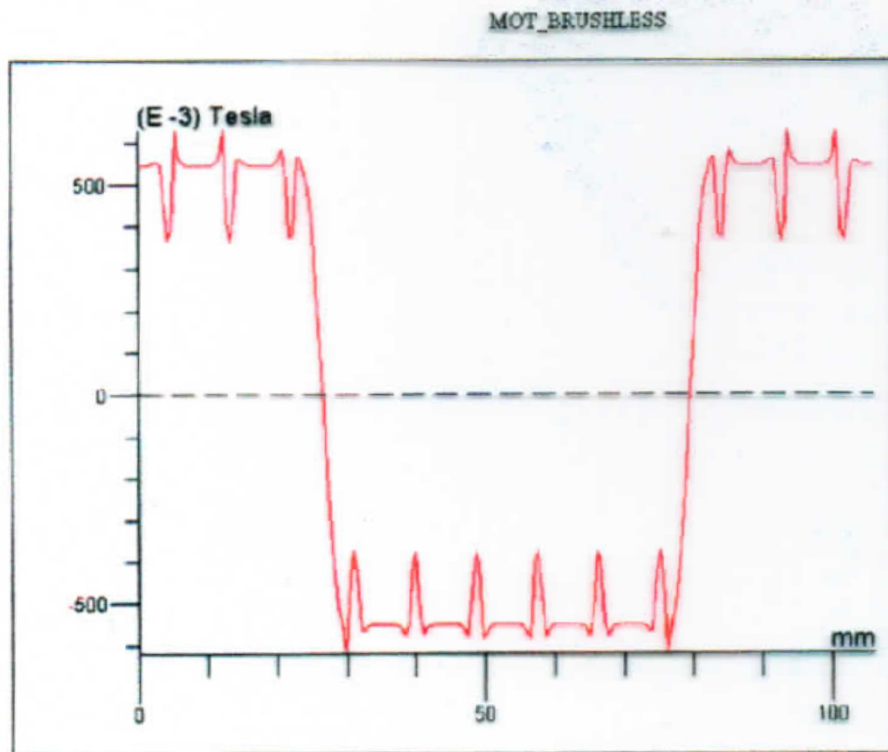
Configuração de rotor  
com ímãs  
enclausurados em  
matriz ferromagnética

MENOR  
SUSCEPTIBILIDADE À  
DESMAGNETIZAÇÃO

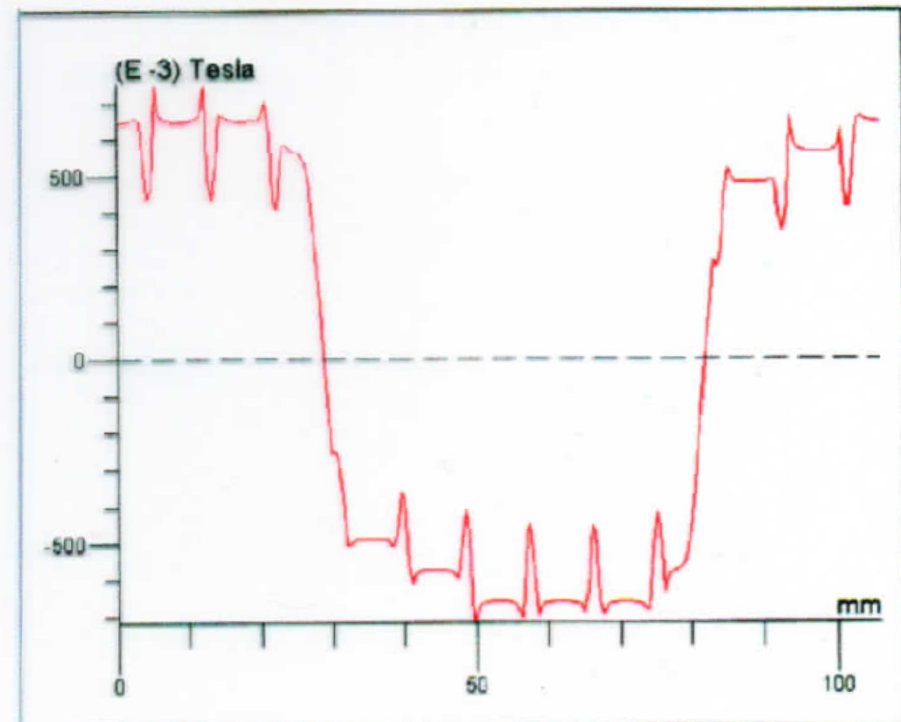
**PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”**

**RISCO DE DESMAGNETIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES NO MOTOR C.C. BRUSHLESS**

**Distribuição de induções magnéticas no entreferro**



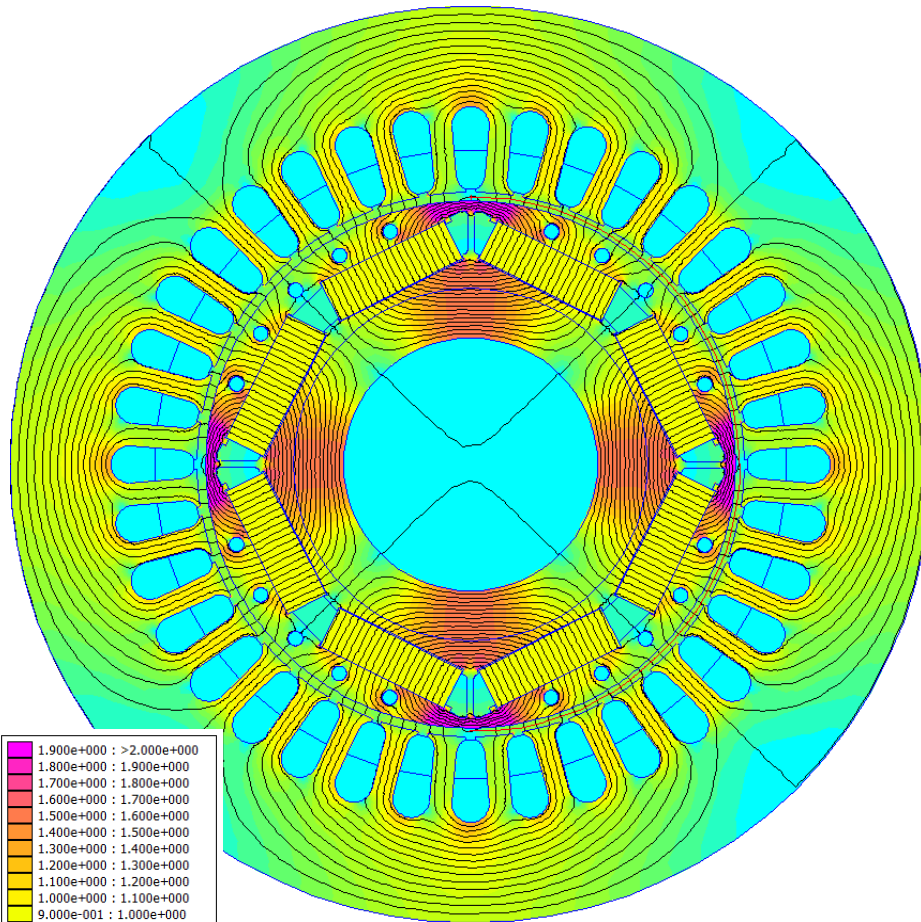
**EM VAZIO**



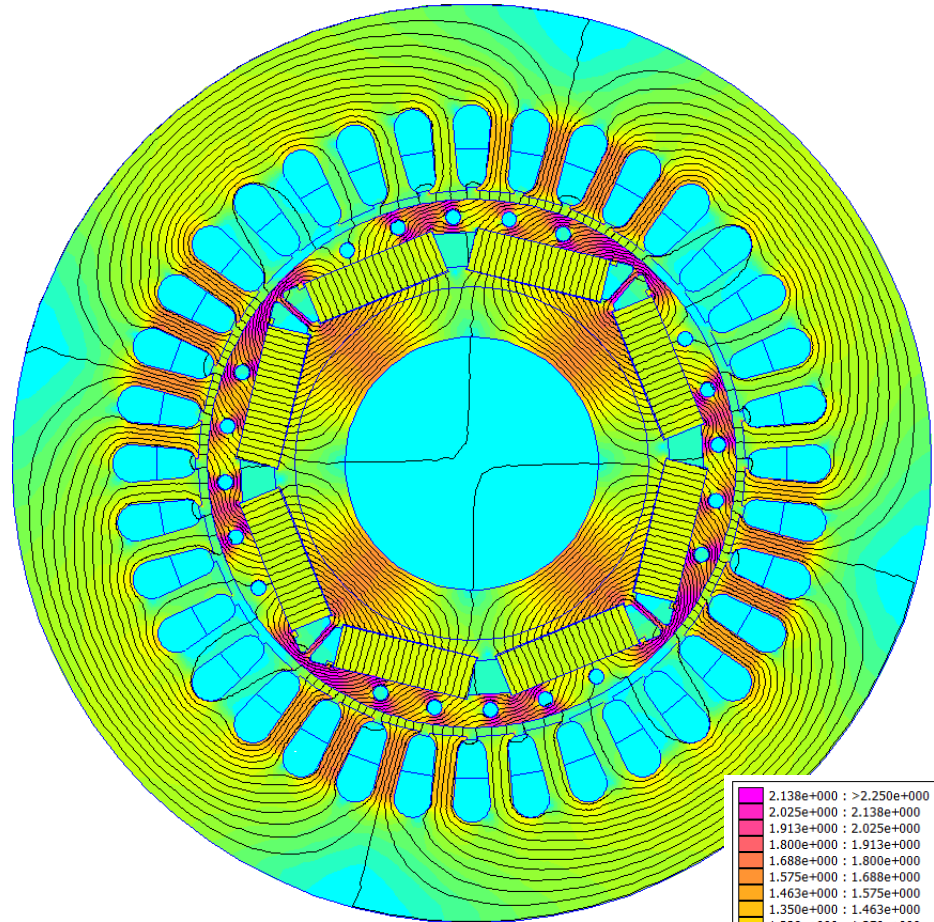
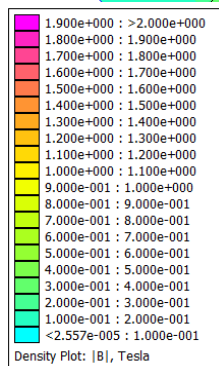
**EM CARGA**

# PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

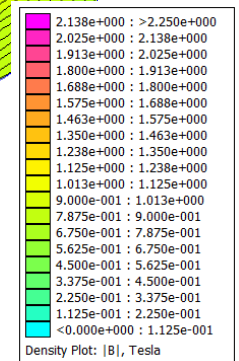
## DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO MOTOR C.C. BRUSHLESS



**OPERAÇÃO EM VAZIO**

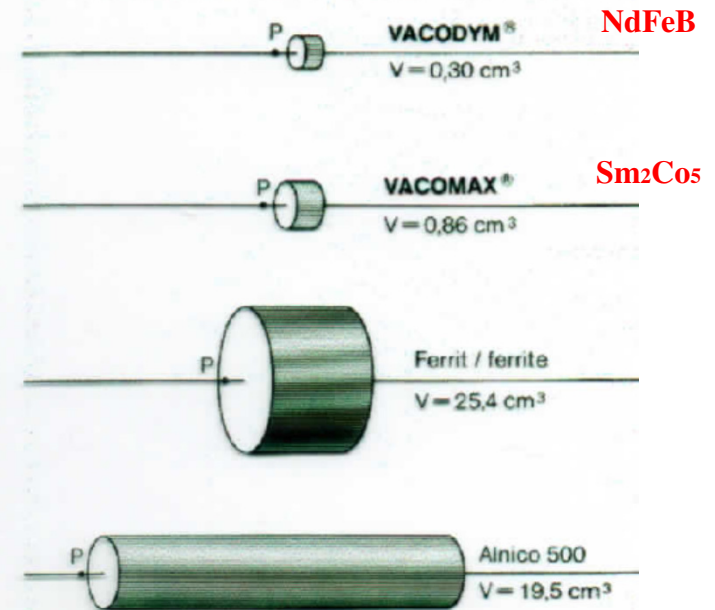
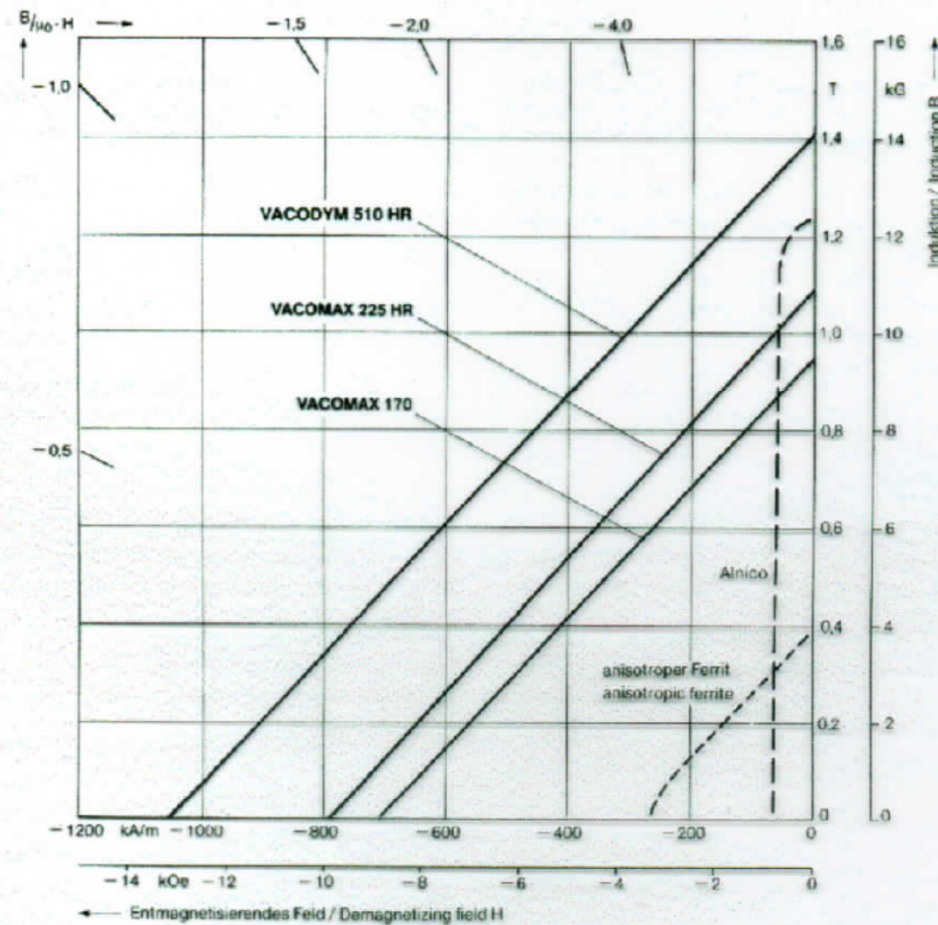


**OPERAÇÃO EM CARGA**



## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### VOLUMES RELATIVOS DE ÍMÃS PERMANENTES UTILIZADOS EM MOTORES C.C. BRUSHLESS

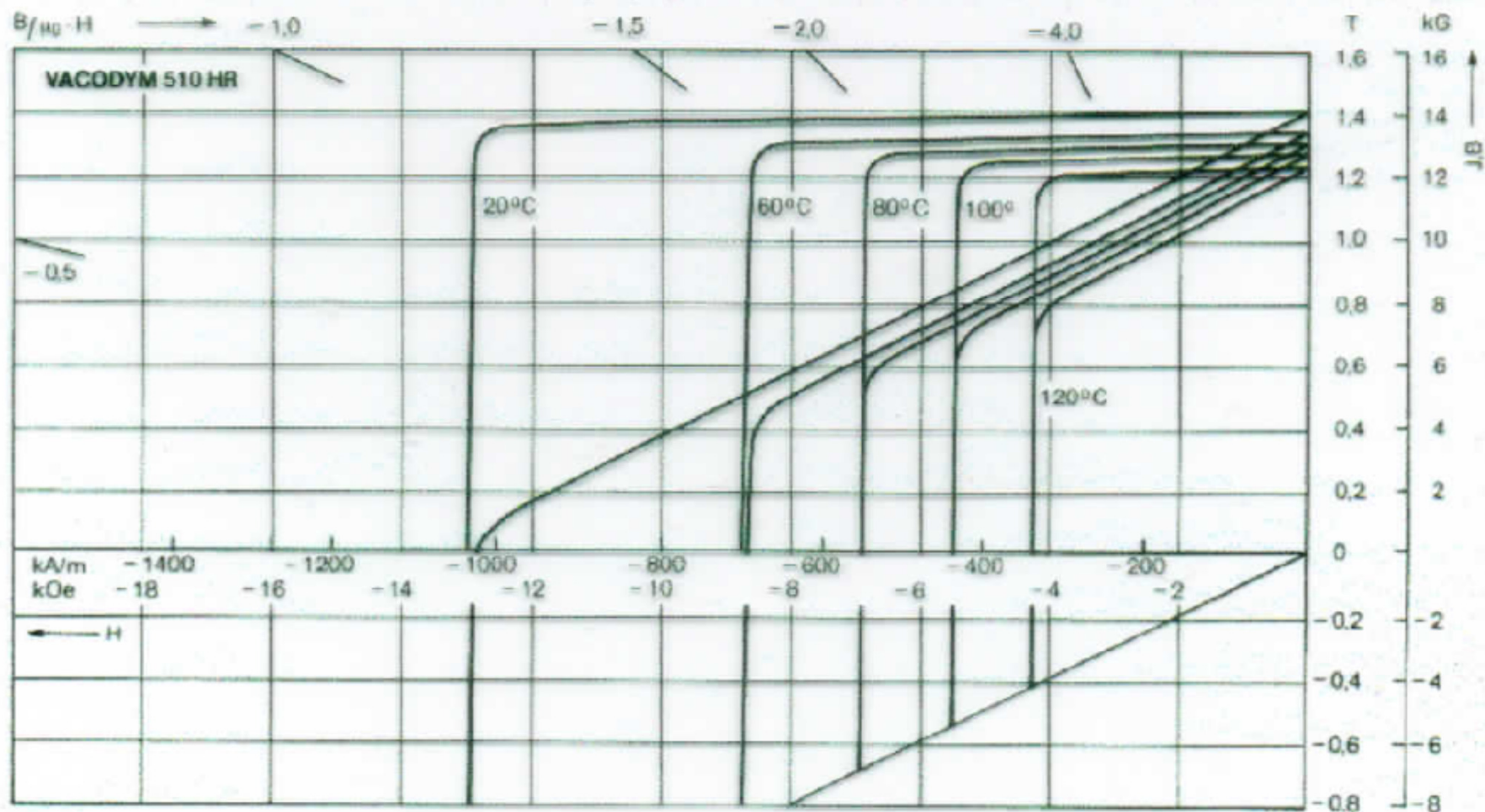


Características comparativas entre materiais para ímãs permanentes:

**NdFeB - Sm<sub>2</sub>Co<sub>5</sub> - Alnico - Ferrite**

## PEA – 5728 - Parte 7: MOTORES “BRUSHLESS”

### ÍMÃS PERMANENTES UTILIZADOS EM MOTORES C.C. BRUSHLESS



Efeito da temperatura sobre as características do NeFeB