

***COMUTAÇÃO E EFEITOS DA REAÇÃO DE ARMADURA
NAS MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA***

MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA – ASPECTOS OPERACIONAIS ESPECÍFICOS**COMUTAÇÃO :**

→ **CENTELHAMENTO INERENTE NO SISTEMA ESCOVAS + COMUTADOR NA REVERSÃO DE CORRENTE DAS BOBINAS DE ARMADURA**

→ **PROVOCA EROÇÃO E DESGASTE ACENTUADO DA SUPERFÍCIE DO COMUTADOR**

EFEITO DOS PÓLOS AUXILIARES → POSSIBILITA REDUÇÃO / ELIMINAÇÃO DO CENTELHAMENTO → VIABILIZA A OPERAÇÃO DO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA E PERMITE LONGA VIDA ÚTIL

REAÇÃO DE ARMADURA : (CAMPO MAGNÉTICO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTE NA ARMADURA)

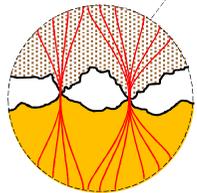
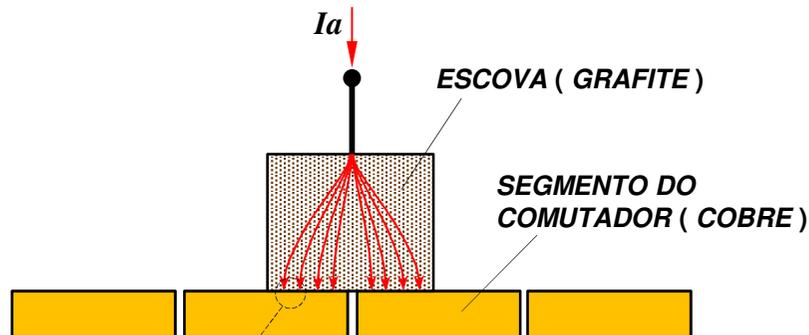
→ **DISTORÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE CAMPO NO ENTREFERRO DA MÁQUINA, QUANDO EM CARGA**

→ **PROVOCA INSTABILIDADE DE ROTAÇÃO (DESMAGNETIZAÇÃO SOB CARGA – E.D.R.A. – EFEITO DESMAGNETIZANTE DE REAÇÃO DE ARMADURA)**

→ **PROVOCA DESEQUILÍBRIO NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES AO LONGO DO COMUTADOR, EM CARGA → PODE LEVAR AO ARCO ELÉTRICO ENTRE ESCOVAS (“FLASH-OVER”)**

EFEITO DO ENROLAMENTO DE COMPENSAÇÃO → INIBE A DISTORÇÃO DE CAMPO → PERMITE OPERAÇÃO COM REGIME DE ELEVADA DINÂMICA E VARIAÇÃO PELO CAMPO EM AMPLA FAIXA

MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA – CARACTERIZAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CORRENTE ENTRE ESCOVAS E COMUTADOR - COMUTAÇÃO



SUPERFÍCIES DO COMUTADOR E DA ESCOVA CONSTITUÍDAS DE POUCOS PONTOS DE CONTATO EFETIVO

→ NO INÍCIO DA OPERAÇÃO DA MÁQUINA, A CORRENTE CIRCULA PELOS PONTOS DE CONTATO, COM ELEVADA DENSIDADE DE CORRENTE PRODUZINDO ALTA TEMPERATURA, VAPORIZANDO O COBRE E O GRAFITE NESSES PONTOS

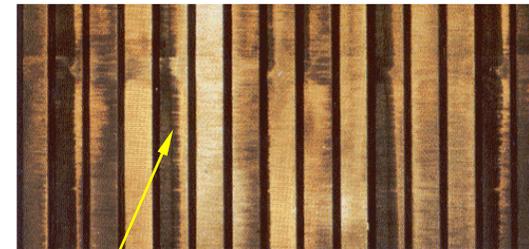
EM CONTATO COM O OXIGÊNIO DO AR, UMIDADE AMBIENTE E COM A ELEVADA TEMPERATURA, AS PARTÍCULAS VAPORIZADAS SE COMBINAM FORMANDO UMA CAMADA DE ÓXIDO QUE SE DEPOSITA NA SUPERFÍCIE DO COMUTADOR.

A CAMADA DEPOSITADA, DENOMINADA “PÁTINA”, FORMA-SE APÓS ALGUMAS HORAS DE OPERAÇÃO SOB CORRENTE NOMINAL E É DE NATUREZA SEMI CONDUTORA. A PARTIR DE SUA FORMAÇÃO, A CIRCULAÇÃO DE CORRENTE ENTRE ESCOVA E COMUTADOR PASSA A SER POR CONDUÇÃO IÔNICA, NÃO EXISTINDO MAIS O CONTATO METÁLICO ENTRE AS PARTES.

A QUEDA DE TENSÃO NO CONTATO ESCOVA COMUTADOR (1,5 A 2 V) TEM VALOR APROXIMADAMENTE CONSTANTE E INDEPENDENTE DA CORRENTE, SENDO A TENSÃO NECESSÁRIA PARA VENCER A RESISTÊNCIA DA CAMADA IONIZADA.

A COMUTAÇÃO DE CORRENTE NA ESCOVA DEVE SER ISENTA DE CENTELHAMENTO, PARA EVITAR A DESTRUIÇÃO DA CAMADA DE PÁTINA E PRESERVAR O COMUTADOR DE EROSIÃO ACELERADA.

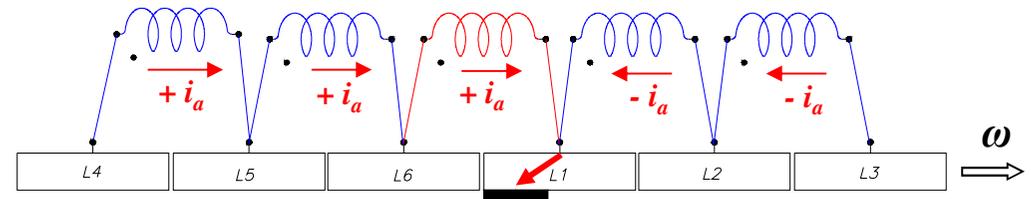
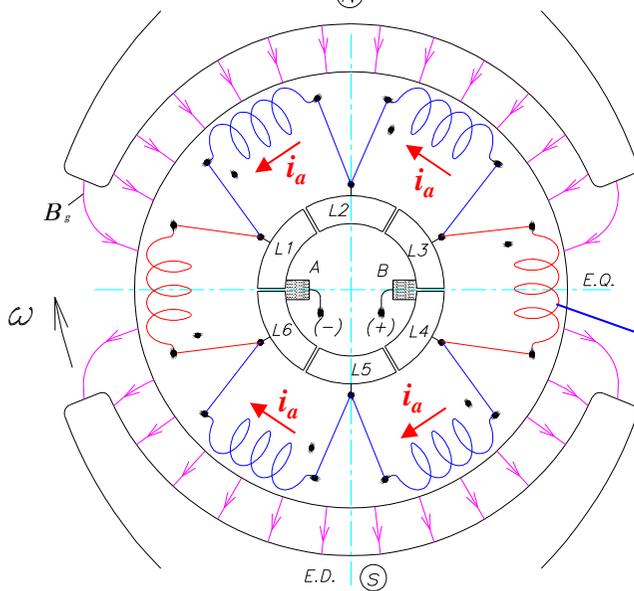
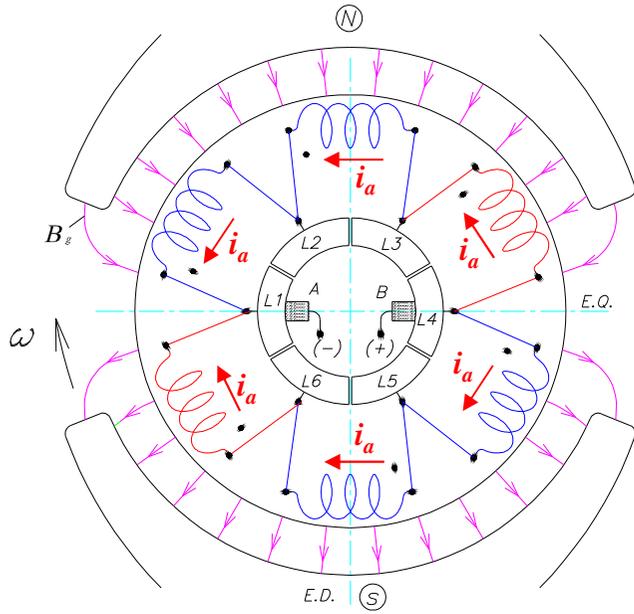
EXEMPLO DE COMUTADOR COM SUPERFÍCIE DANIFICADA, INDICANDO COMUTAÇÃO DEFICIENTE



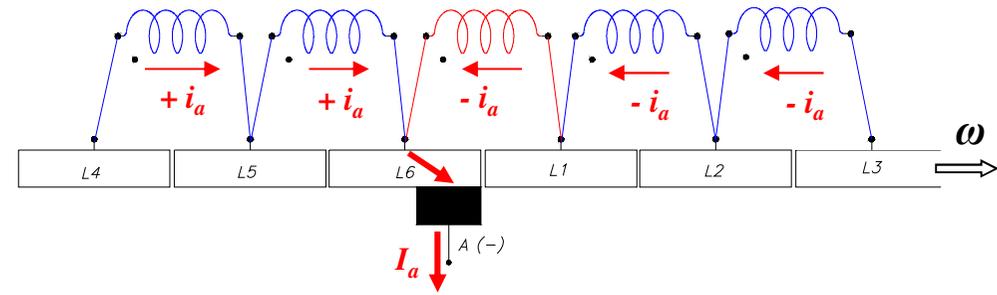
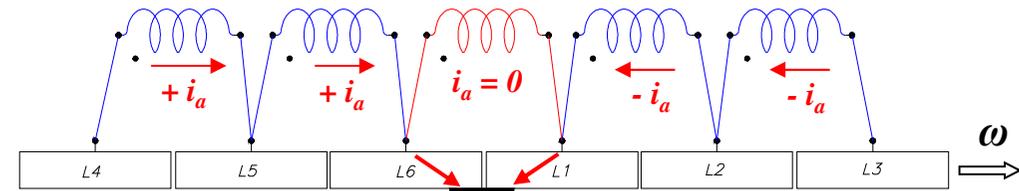
QUEIMADURA E EROSIÃO DAS LÂMINAS DO COMUTADOR, ORIGINADA POR CENTELHAMENTO



MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA - PRINCÍPIOS BÁSICOS DA COMUTAÇÃO



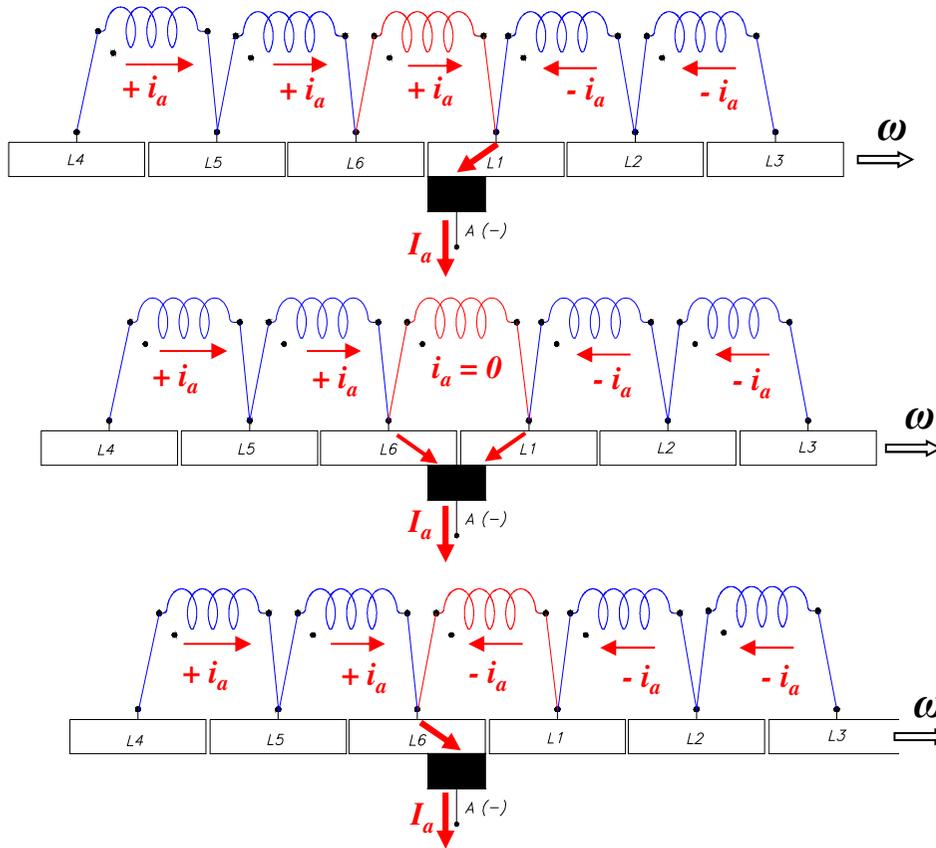
CORRENTE POR DERIVAÇÃO: $i_a = I_a / 2a$



BOBINA EM COMUTAÇÃO
CURTO-CIRCUITO PELA ESCOVA

CORRENTE NAS BOBINAS É INVERTIDA NA PASSAGEM PELO E.Q.
→ VARIÇÃO DA CORRENTE NO TEMPO DURANTE O PROCESSO DE COMUTAÇÃO → INDUZ F.E.M. VARIACIONAL

VARIAÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA DE ARMADURA DURANTE A COMUTAÇÃO

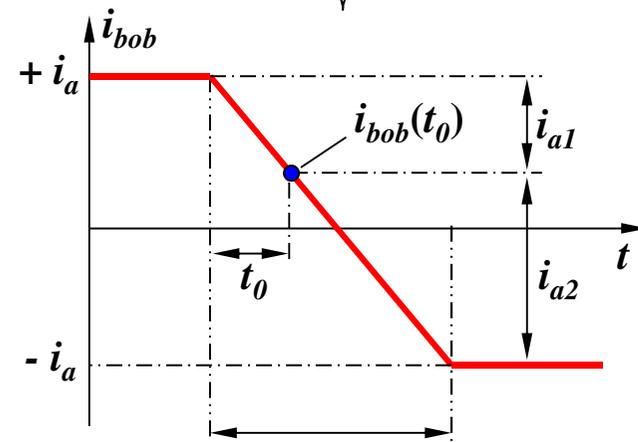
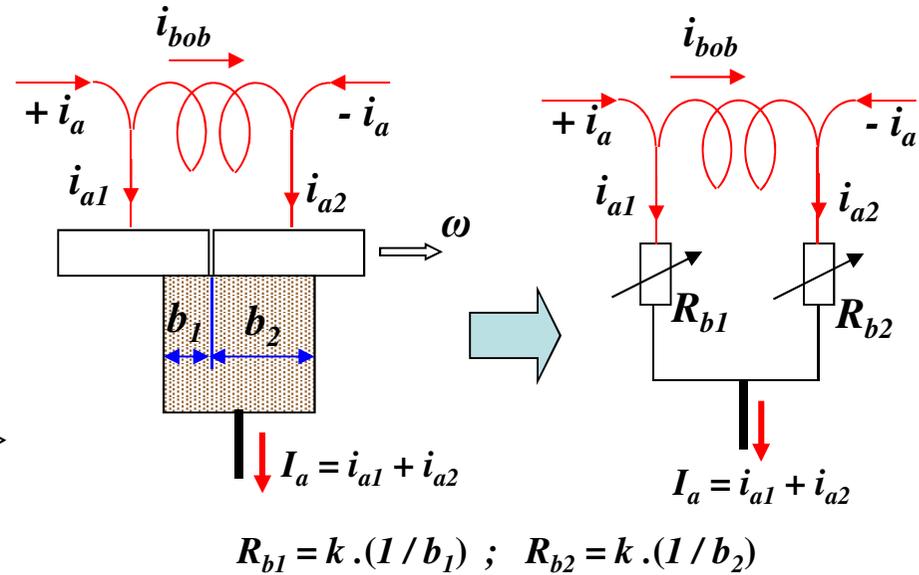


COMUTAÇÃO RESISTIVA OU LINEAR

→ VARIAÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA DETERMINADA PELA RESISTÊNCIA ELÉTRICA EQUIVALENTE DO CONTATO: ESCOVA + LÂMINA DO COMUTADOR

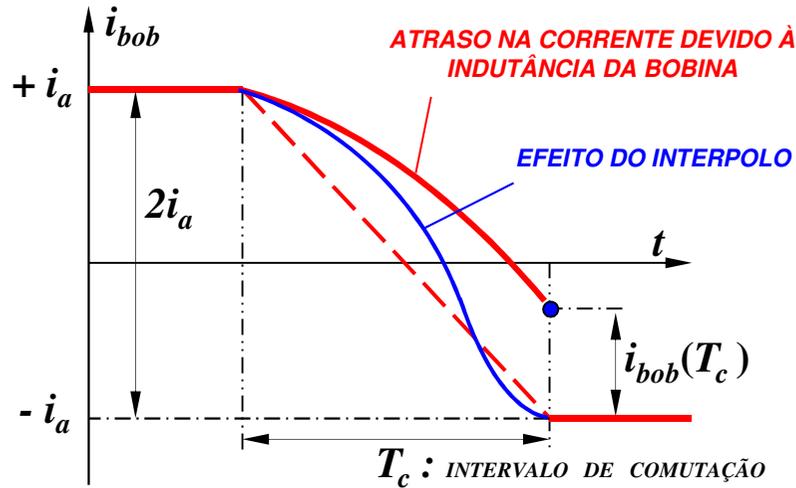
DESCONSIDERADA A INDUTÂNCIA DA BOBINA DE ARMADURA :

→ VARIAÇÃO DA CORRENTE NA BOBINA É DETERMINADA PELO RECOBRIMENTO DA ESCOVA SOBRE A LÂMINA DO COMUTADOR



T_c : INTERVALO DE COMUTAÇÃO

COMUTAÇÃO NÃO LINEAR → AÇÃO DOS PÓLOS DE COMUTAÇÃO (PÓLOS AUXILIARES OU INTERPOLOS)



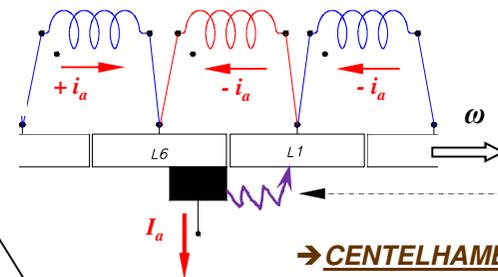
INDUTÂNCIA DA BOBINA NÃO NULA :

→ TENSÃO INDUZIDA VARIACIONAL: $e_L = L \cdot di / dt \approx L \cdot 2i_a / T_c$

→ ATRASO NA VARIACÃO DA CORRENTE

→ AO FINAL DO TEMPO DE COMUTAÇÃO: $i_{bob} \neq -i_a$

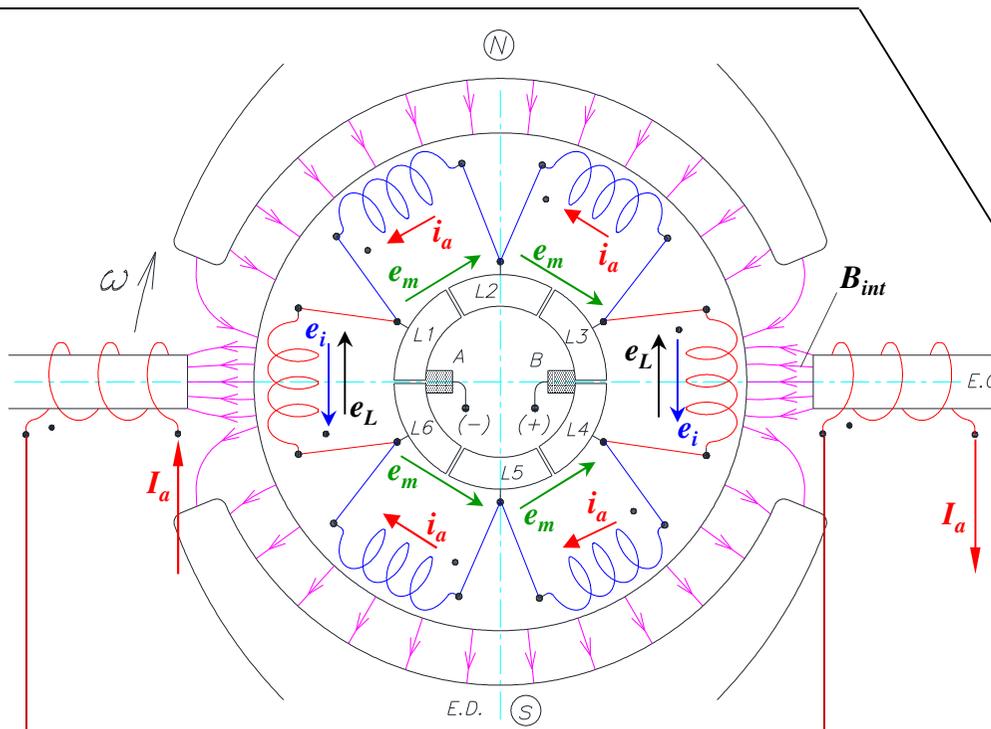
→ CIRCUITO DA BOBINA ABERTO MECANICAMENTE PELA ESCOVA



CORRENTE VARIA ABRUPTAMENTE PARA O VALOR $-i_a$ NA FORMA DE CENTELHA PELO AR

→ CENTELHAMENTO : PROVOCADO PELA TENSÃO INDUZIDA NA ABERTURA ABRUPTA DO CIRCUITO

→ PROVOCA FORTE EROSÃO ELÉTRICA DO COMUTADOR E DAS ESCOVAS



EFEITO DO INTERPOLO (AÇÃO LOCALIZADA NO E.Q.):

→ TENSÃO INDUZIDA MOCIONAL: $e_i = B_{int} \cdot L \cdot v$

→ B_{int} : CAMPO PRODUZIDO PELO INTERPOLO

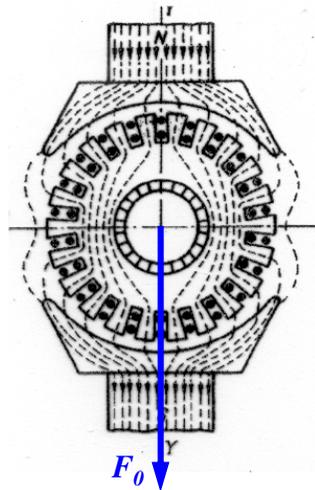
→ TENSÃO INDUZIDA: $e_i = -e_L$

→ ACELERAÇÃO NA VARIACÃO DA CORRENTE

→ INTERPOLO EM SÉRIE COM A ARMADURA

→ EFEITO OCORRE EM QUALQUER CONDIÇÃO DE CARGA

MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA - EFEITOS DA REAÇÃO DE ARMADURA



ARMADURA SEM CORRENTE

APENAS O CAMPO EXCITADO

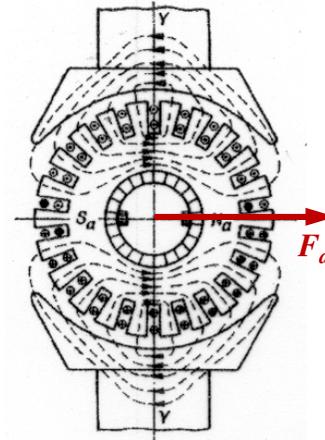
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE F_0 :

RETANGULAR (ENTREFERRO CONSTANTE)

F.M.M. NO ENTREFERRO:

$$F_0 = N \cdot i_0$$

N : N° DE ESPIRAS DA BOBINA DE CAMPO



CAMPO SEM CORRENTE

APENAS A ARMADURA EXCITADA

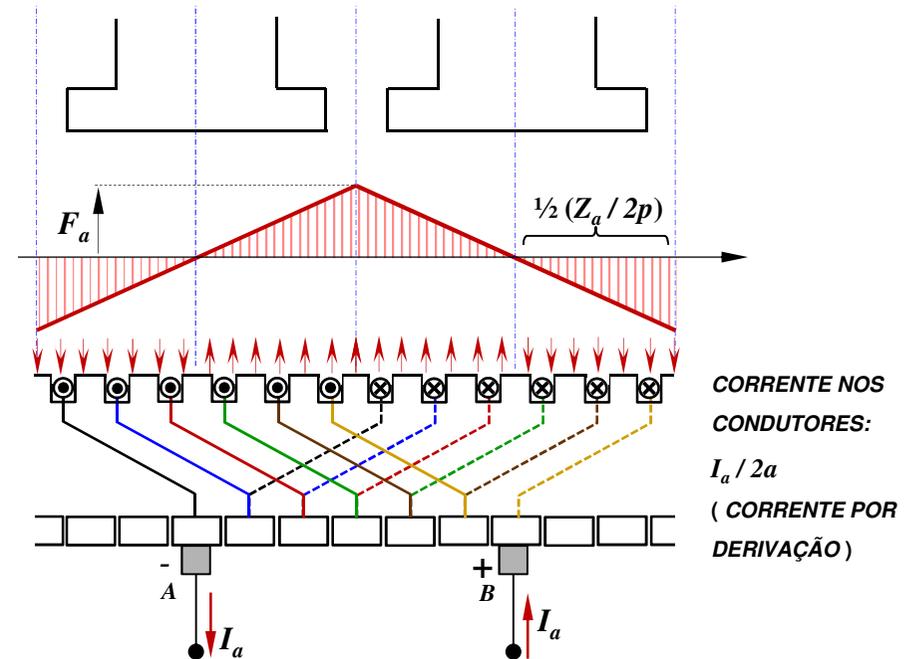
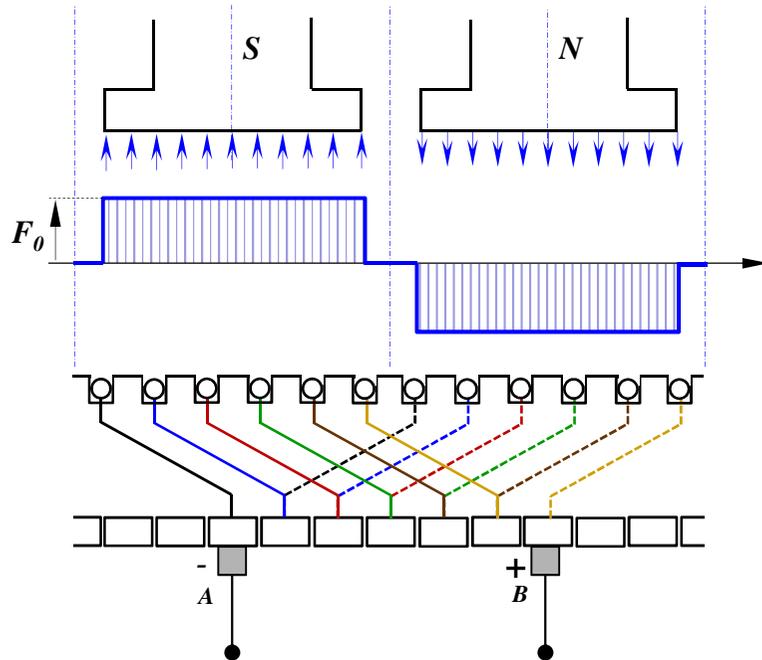
DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE F_a :

TRIANGULAR (ESCALONADA NA REALIDADE)

F.M.M. NO ENTREFERRO:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z_a}{2p} \cdot \frac{I_a}{2a} = \frac{Z_a \cdot I_a}{8 \cdot a \cdot p}$$

Z_a : N° DE CONDUTORES TOTAIS DA ARMADURA



CORRENTE NOS CONDUTORES:
 $I_a / 2a$
(CORRENTE POR DERIVAÇÃO)

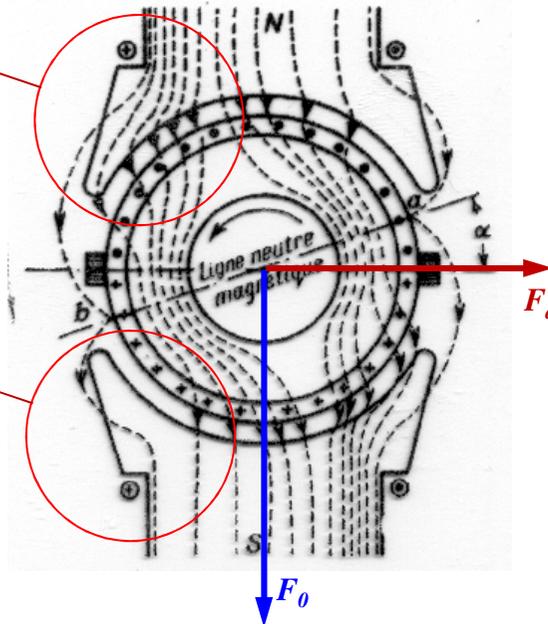
REAÇÃO DE ARMADURA → CAMPO MAGNÉTICO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO ENROLAMENTO DO ROTOR

COMPOSIÇÃO DA REAÇÃO DE ARMADURA COM O CAMPO PRINCIPAL

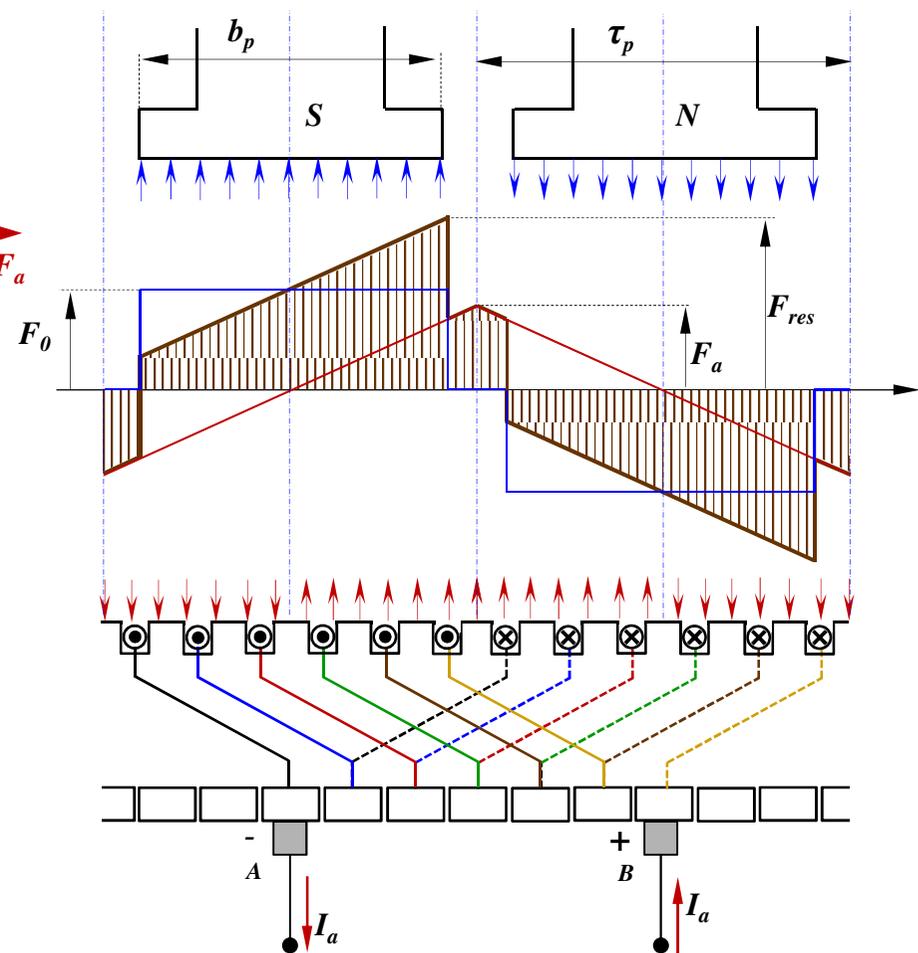
→ DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO RESULTANTE NO ENTREFERRO

REGIÃO COM ADENSAMENTO DE FLUXO → SATURAÇÃO LOCALIZADA DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO

REGIÃO COM ATENUAÇÃO DE FLUXO → ALIVIA O ESTADO DE SATURAÇÃO DO MATERIAL FERROMAGNÉTICO



CAMPO E ARMADURA SIMULTANEAMENTE EXCITADOS



1º EFEITO DA DISTORÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO :

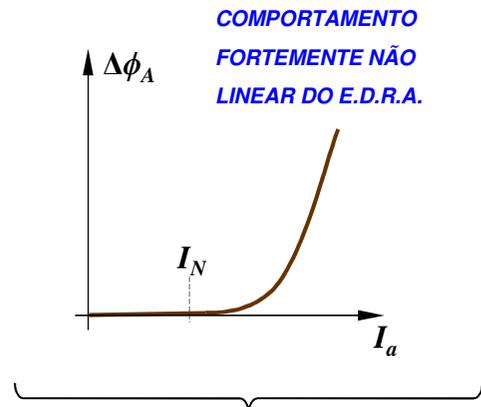
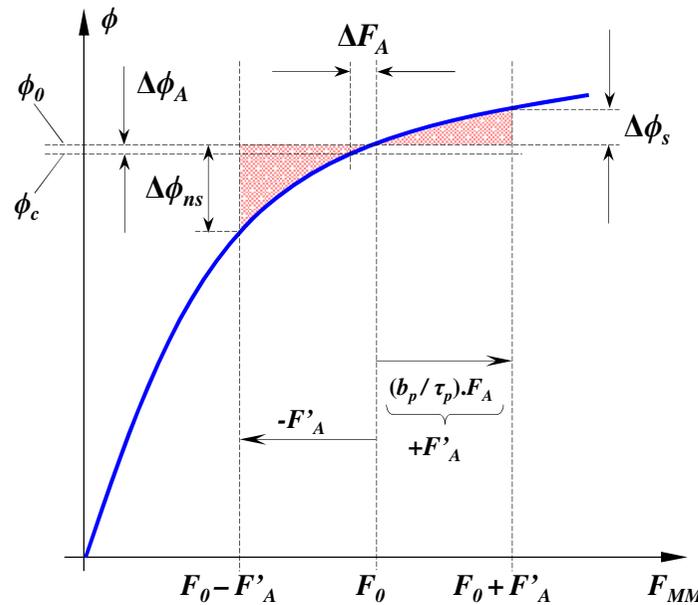
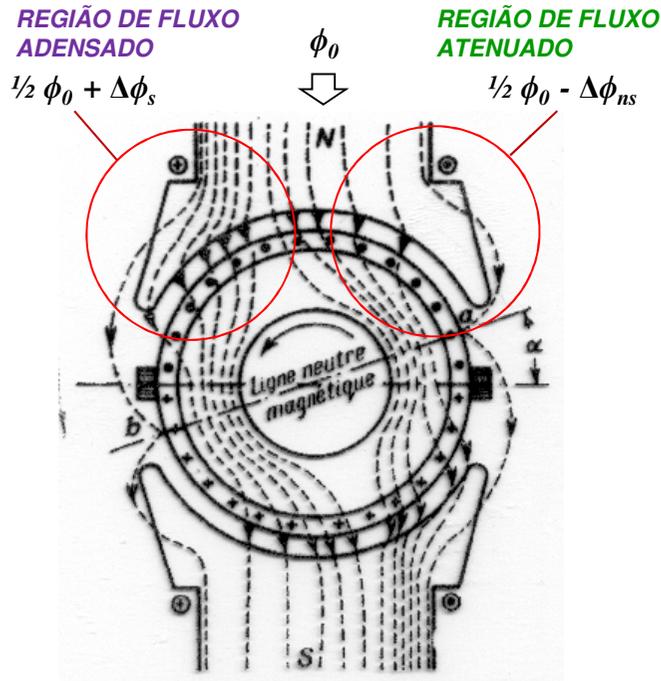
DEVIDO À SATURAÇÃO LOCALIZADA NO MATERIAL FERROMAGNÉTICO, O INCREMENTO DE FLUXO NA REGIÃO ADENSADA É MENOR QUE O DECREMENTO NA REGIÃO ALIVIADA → REDUÇÃO LÍQUIDA DO FLUXO NO CIRCUITO MAGNÉTICO → DESMAGNETIZAÇÃO SOB CARGA

EFEITO DA REAÇÃO DE ARMADURA → DESMAGNETIZAÇÃO SOB CARGA

SATURAÇÃO NO MATERIAL FERROMAGNÉTICO → $\Delta\phi_s < \Delta\phi_{ns}$

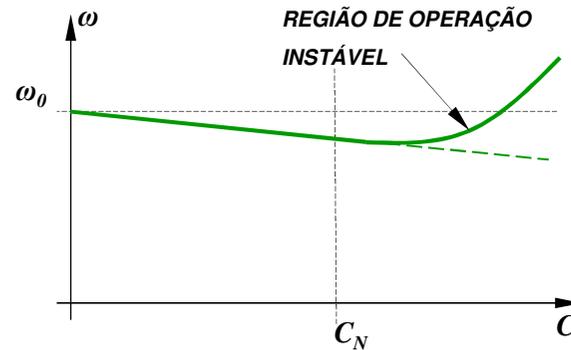
FLUXO EM CARGA < FLUXO EM VAZIO :

$\Delta\phi_A = \phi_0 - \phi_c \rightarrow$ REDUÇÃO LÍQUIDA NO FLUXO DA MÁQUINA



**EFEITO DESMAGNETIZANTE
INDIRETO DE REAÇÃO DE
ARMADURA – E.D.R.A.**

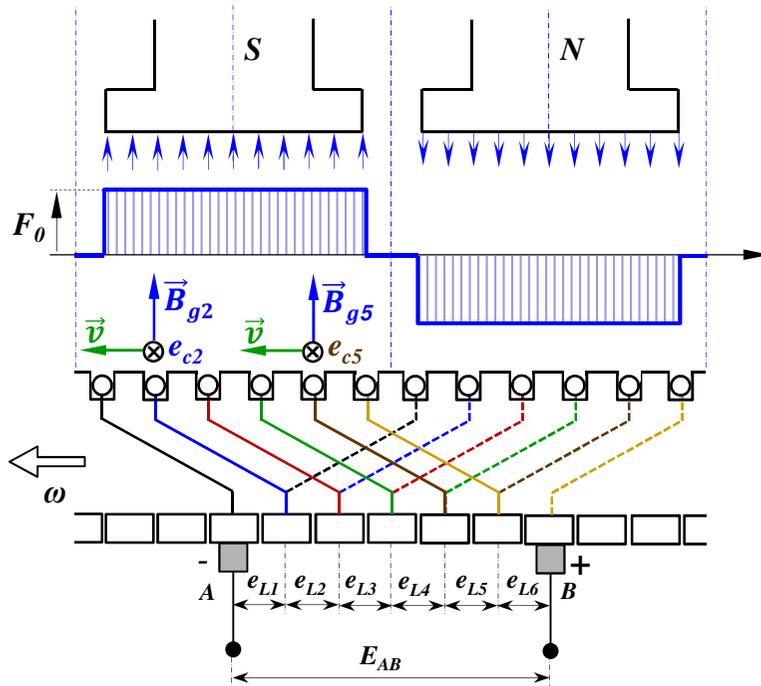
$$\left\{ \begin{aligned} \omega &= \frac{V_a}{k \cdot \phi} - \frac{r_a}{(k \cdot \phi)^2} \cdot C \\ \omega &= \frac{V_a}{k \cdot (\phi - \Delta\phi_A)} - \frac{r_a}{[k \cdot (\phi - \Delta\phi_A)]^2} \cdot C \\ C &= k \cdot \phi \cdot I_a \end{aligned} \right.$$



**EFEITO SOBRE A CURVA
CARACTERÍSTICA DO
MOTOR C.C. - LIGAÇÃO
DE CAMPO INDEPENDENTE**

**INSTABILIDADE PODE
CONDUZIR AO DISPARO
DA MÁQUINA C.C.**

OPERAÇÃO EM VAZIO



$$e_c = B_g \cdot L \cdot v$$

$$E_b = 2 \cdot N_b \cdot e_c$$

$$e_L = E_b$$

e_c : TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR
 E_b : TENSÃO NA BOBINA
 N_b : Nº ESPIRAS DA BOBINA
 e_L : TENSÃO ENTRE LÂMINAS DO COMUTADOR
 → e_L : (40 a 60 V) Máximo

DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO UNIFORME NO ENTREFERRO:

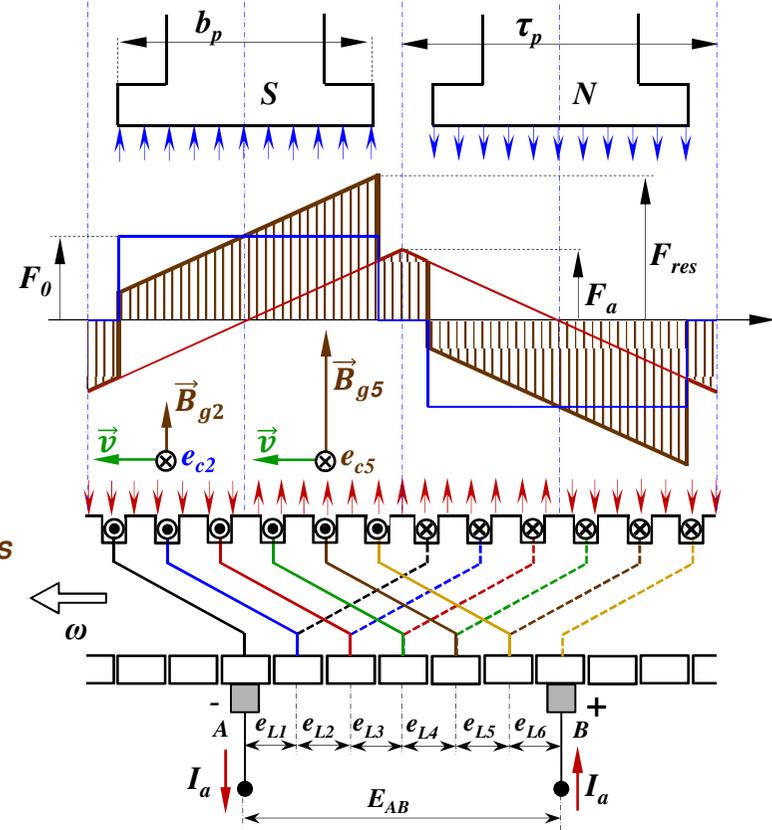
- $B_{g1} = B_{g2} = B_{g3} = B_{g4} = B_{g5} = B_{g6}$
- $e_{L1} = e_{L2} = e_{L3} = e_{L4} = e_{L5} = e_{L6}$
- $E_{AB-Vazio} = e_{L1} + e_{L2} + e_{L3} + e_{L4} + e_{L5} + e_{L6}$

2º EFEITO DA DISTORÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO :

DISTORÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO CONDUZ A DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DE TENSÕES ENTRE LÂMINAS NO COMUTADOR

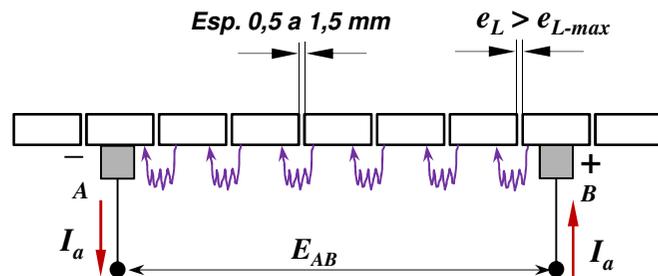
- RISCO DE DISRUPÇÃO PELO AR E FORMAÇÃO DE ARCO ENTRE LÂMINAS, SE ULTRAPASSADO UM DETERMINADO LIMIAR DE TENSÃO
- PODE DESENCADEAR ARCO ELÉTRICO COMPLETO ENTRE ESCOVAS ("FLASH - OVER" → CURTO CIRCUITO ENTRE ESCOVAS)

OPERAÇÃO EM CARGA



DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO DISTORCIDA NO ENTREFERRO:

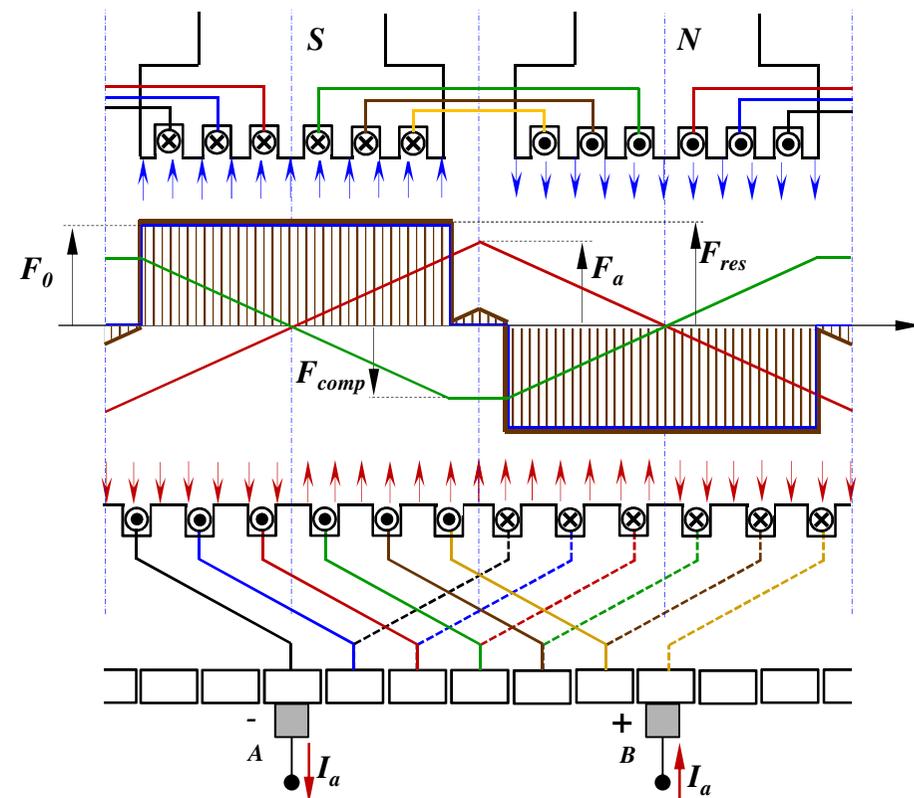
- $B_{g1} < B_{g2} < B_{g3} < B_{g4} < B_{g5} < B_{g6}$
- $e_{L1} < e_{L2} < e_{L3} < e_{L4} < e_{L5} < e_{L6}$
- $E_{AB-Carga} = e_{L1} + e_{L2} + e_{L3} + e_{L4} + e_{L5} + e_{L6} = E_{AB-Vazio}$



PROCESSO DE EVOLUÇÃO DO ARCO ELÉTRICO SOBRE O COMUTADOR - "FLASH - OVER"

- **DISTRIBUIÇÃO DISTORCIDA DE CAMPO NO ENTREFERRO PRODUZ DISTRIBUIÇÃO NÃO UNIFORME DE TENSÕES ENTRE LÂMINAS**
- **ESPESSURA DO ISOLANTE ENTRE LÂMINAS É PEQUENA E O AMBIENTE NO ENTORNO DAS LÂMINAS É IONIZADO E CONTAMINADO POR PÓ CONDUTIVO DAS ESCOVAS**
- **SE A TENSÃO ENTRE LÂMINAS SUPERA O VALOR LIMITE OCORRE DISRUPÇÃO ELÉTRICA ENTRE LÂMINAS, FORMANDO UM ARCO ENTRE AS MESMAS**
- **APÓS A DISRUPÇÃO NO PRIMEIRO PAR DE LÂMINAS, A TENSÃO TOTAL ENTRE ESCOVAS SE REDISTRIBUI SOBRE MENOS LÂMINAS, PRODUZINDO DISRUPÇÃO NO PAR DE LÂMINAS SEGUINTE**
- **PROCESSO EVOLUI DE LÂMINA EM LÂMINA ATÉ ESTABELECEER ARCO ELÉTRICO TOTAL ENTRE ESCOVAS, AO LONGO DO COMUTADOR**
- **PROCESSO É EXTREMAMENTE RÁPIDO, E EM GERAL PROVOCA DANOS SEVEROS AO COMUTADOR E ÀS ESCOVAS**

ENROLAMENTO DE COMPENSAÇÃO



- **ENROLAMENTO ALOJADO EM RANHURAS EXECUTADAS NA SUPERFÍCIE DAS SAPATAS POLARES**
- **CONECTADO EM SÉRIE COM A ARMADURA, DE MODO A PRODUZIR UMA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ANTAGÔNICA À DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO DE REAÇÃO DE ARMADURA**
- **EFEITO DO ENROLAMENTO DE COMPENSAÇÃO EVITA A DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO NO ENTREFERRO - DISTRIBUIÇÃO EM CARGA FICA PRESERVADA IGUAL À DISTRIBUIÇÃO UNIFORME EM VAZIO**
- **MITIGA OS PROBLEMAS ASSOCIADOS À DISTORÇÃO DE CAMPO, COMO A DESMAGNETIZAÇÃO EM CARGA, BEM COMO MINIMIZA DA PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO "FLASH - OVER"**