

## MÁQUINAS ELÉTRICAS DE CORRENTE CONTÍNUA

### REAÇÃO MAGNÉTICA DO INDUZIDO E COMUTAÇÃO

#### 1. Introdução

Na máquina elétrica de corrente contínua (máquina DC) vai manifestar-se a existência de dois campos magnéticos que vão compor-se entre si originando um campo resultante no entre ferro da máquina, cuja amplitude direção e sentido tem fortes consequências no funcionamento da máquina, particularmente no que diz respeito ao fenómeno da comutação da máquina de corrente contínua.

Estes campos magnéticos são devidos à excitação do circuito indutor e do circuito induzido da máquina. A excitação do circuito indutor e o respetivo campo magnético obtido, são uma condição fundamental para o funcionamento desta máquina elétrica. Quando não existe corrente no induzido (ou armadura) da máquina DC, o campo magnético na máquina são devidos apenas à excitação magnética do



circuito indutor principal da máquina, como se apresenta na Figura 1.

Este campo apresenta-se na máquina numa direção longitudinal ao entre ferro da máquina. É denominado campo indutor principal, ou campo longitudinal da máquina DC.

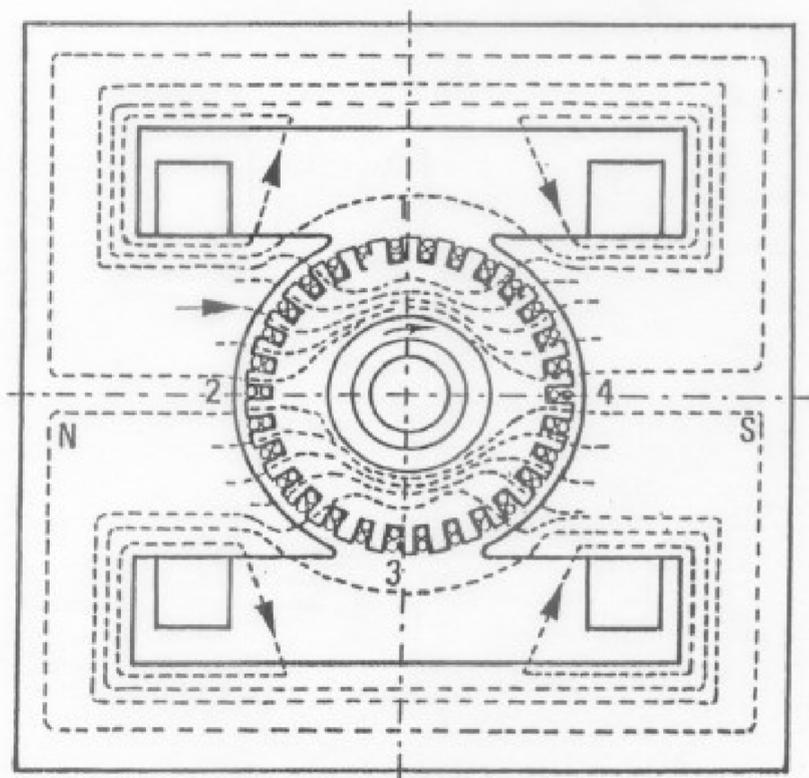


Figura 1. Campo indutor principal da máquina DC. Percurso das linhas de força do campo magnético

Na Figura 2 apresenta-se a variação deste campo ao longo do entre ferro da máquina.

Este campo é responsável pela manifestação da força eletromotriz em vazio da máquina DC.

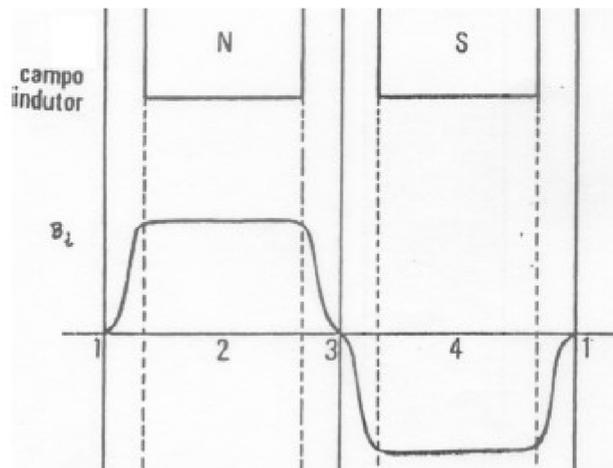


Figura 2. Variação no entre ferro do campo indutor principal da máquina DC

Quando a máquina DC se encontra em carga, flui corrente elétrica no circuito induzido da máquina. Esta corrente originará a excitação magnética do induzido, ou armadura, que se apresentará numa direção perpendicular ao campo indutor principal, que resulta na denominação de reação magnética do induzido ou reação transversal do induzido ou armadura.

A Figura 3 apresenta o campo magnético na máquina DC na hipotética situação de só existir corrente no induzido da máquina.

## 2. Campo de reação do induzido

Para fazer-se o estudo prático deste campo, admite-se que se faz passar através do induzido a corrente que lá passaria em carga sem que no entanto exista qualquer campo indutor. Deste modo o único campo a assinalar na máquina será o campo de reação do induzido, como se apresenta na Figura 3.

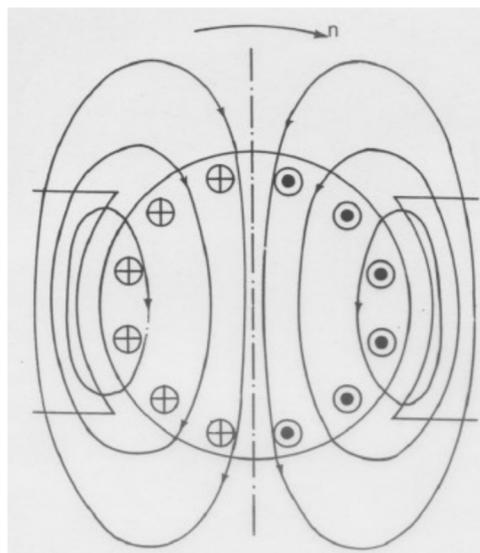


Figura 3. Campo magnético produzido pela reação do induzido na máquina DC

O campo do induzido cujas linhas de força têm o aspeto de feijões, tem, no entre ferro, valor nulo na linha dos pólos, como facilmente se conclui reparando que acima dessa linha o campo tem um dado sinal e abaixo um sinal contrário, como se pode ver na Figura 4. Verifica-se assim, que em metade do pólo o campo de reação do induzido reforça o campo indutor principal e, na outra metade, atenua o campo indutor principal.

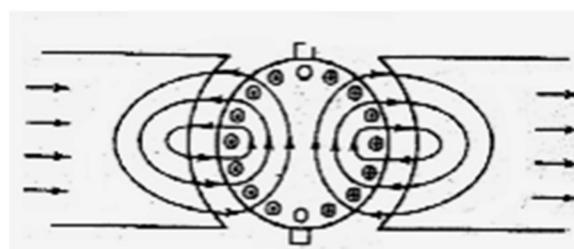


Figura 4. Sentido do campo magnético produzido pela reação do induzido

Partindo do ponto dois da Figura 5, por exemplo, à medida que se aproxima da aresta da expansão polar cada vez será maior a densidade do fluxo, pois que agora cada vez serão em maior número os condutores cujas correntes originarão esse campo.

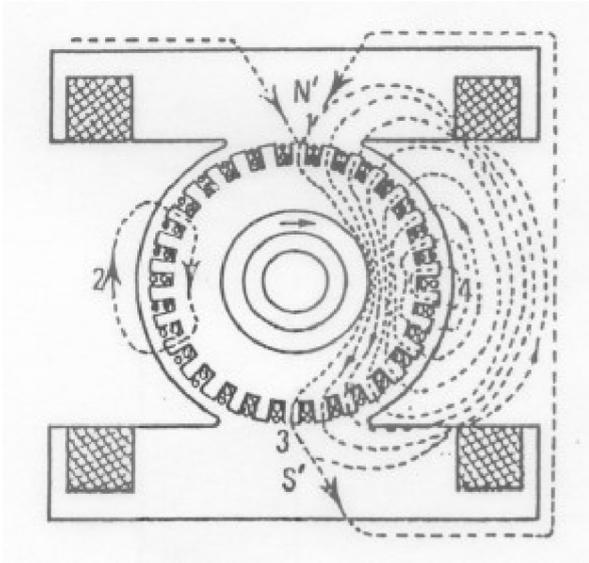


Figura 5. Campo reação do induzido da máquina DC.  
Percurso das linhas de força do campo magnético.

De dois até aresta tem-se então um aumento. A partir desta o campo volta a diminuir, pois que embora haja mais condutores em ação, agora as linhas de força são abrigadas a fechar-se, através de um maior entre ferro aumentando consequentemente a relutância e diminuindo a indução. Na linha neutra em vazio, agora já não se pode considerar um campo nulo, como no caso do campo indutor principal, pois não há inversão do sentido dos campos. A variação do campo de reação do induzido tem no entre ferro o aspeto do diagrama representado na Figura 6.

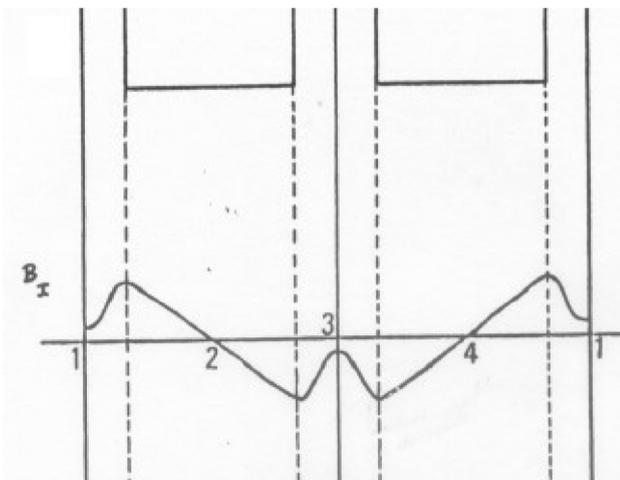


Figura 6. Variação no entre ferro do campo reação do induzido da máquina DC

### 3. Campo resultante

Considerando agora a presença simultânea dos dois campos magnéticos, vai haver uma nova distribuição das linhas de força, constituindo o campo magnético resultante, como se pode ver na Figura 7. Nas zonas entre 1 e 2, e entre 3 e 4 os dois campos têm o mesmo sinal e então o campo resultante aparecerá reforçado, enquanto que nas zonas 2-3 e 4-1, os campos opõem-se resultando um abaixamento do campo nestas regiões.

Com estas alterações a linha neutra (linha fronteira entre o campo que entra e o que sai do induzido) deixa a posição que tinha em vazio. Aparece uma nova linha neutra, a linha neutra em carga, que como se observa pela composição dos campos magnéticos, aparece deslocada da anterior no sentido do movimento do induzido (ver os novos zeros do campo resultante na Figura 8). Ao longo do entre ferro, o campo resultante obter-se-á, somando para cada abcissa o valor das ordenadas dos campos parciais. Na curva resultante, verifica-se o reforço do campo nas arestas de saída dos pólos e o enfraquecimento nas arestas de entrada dos pólos.

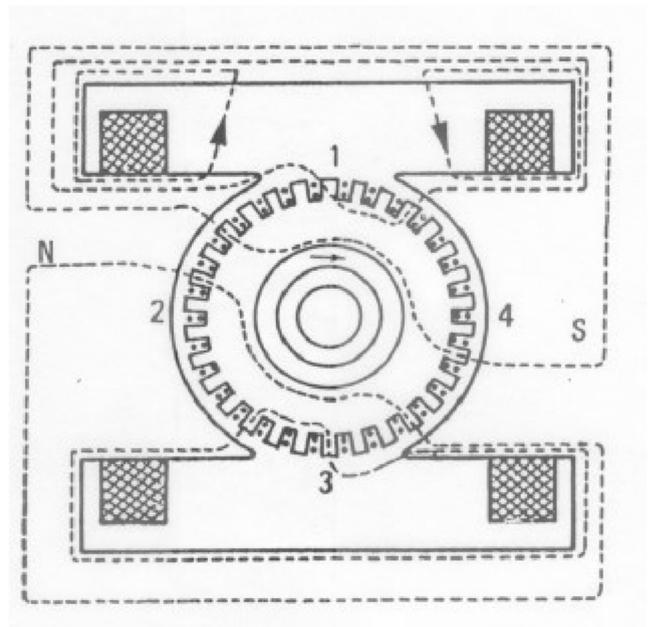


Figura 7. Campo resultante na máquina DC

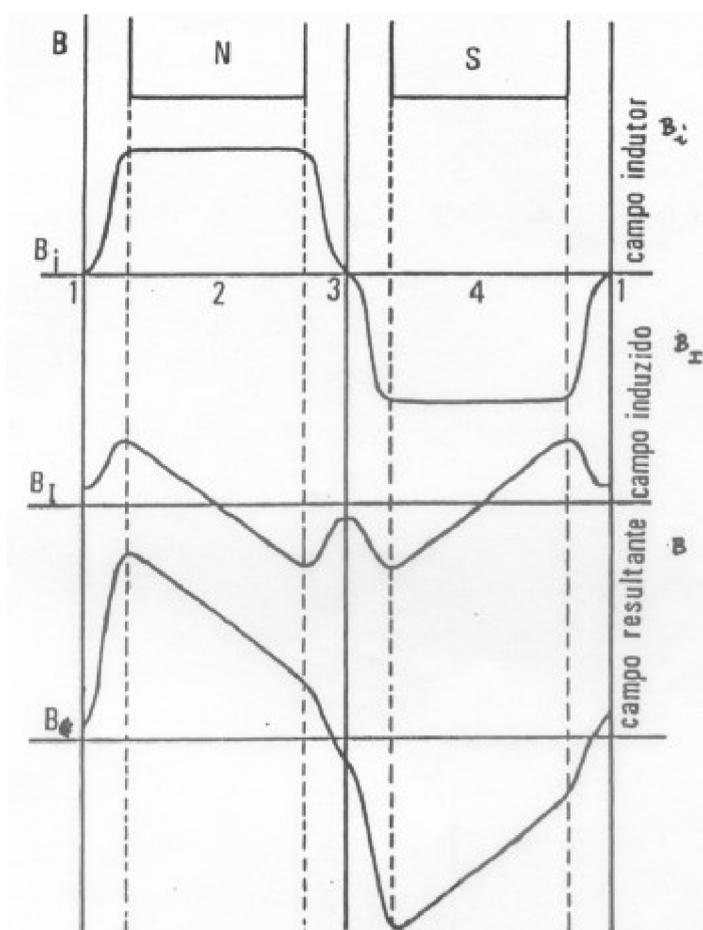


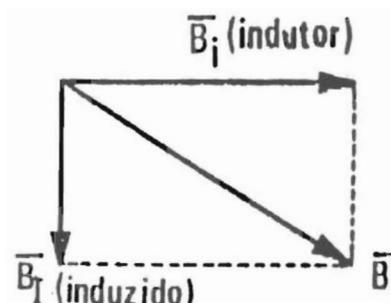
Figura 8. Composição dos campos magnéticos e campo resultante na máquina DC

Se a máquina fosse um motor, como para o mesmo sentido de rotação as correntes no induzido teriam sentido oposto, o reforço dos campos dar-se-á nas arestas de entrada e o enfraquecimento nas arestas de saída.

O reforço dos campos, ao produzir maiores forças eletromotrizes, cria maior diferença de potencial entre secções e, conseqüentemente, entre lâminas do coletor. Isto pode causar o aparecimento de arcos elétricos entre lâminas, se o coletor não estiver em boas condições de funcionamento.

Representando por um vetor o campo indutor e por outro vetor o campo do induzido, verifica-se a perpendicularidade entre os dois. Tudo se passa como se surgissem dois novos pólos fictícios  $N'$  e  $S'$ , que representam a reação do campo do induzido.

Dada a posição perpendicular do campo de reação do induzido, resulta na denominação deste campo, campo de reação magnética do induzido ou reação transversal do induzido ou armadura.



Este campo terá um sentido de acordo com o movimento de rotação do induzido.

O campo resultante será a soma vetorial dos dois, aparecendo as linhas neutras perpendiculares aos respectivos vetores.

#### 4. Influência da saturação magnética

Na curva das induções ao longo do entre ferro soma-se ordenada por ordenada as induções parciais dos campos indutor e induzido. Ora este processo nem sempre é lícito. Quando existem correntes no indutor e no induzido manifesta-se uma excitação indutora e uma excitação induzida e a excitação total será em cada ponto a soma algébrica das duas; porém, para se passar de excitação para indução, há que contar com a permeabilidade do material e esta pode não ser constante quando varia o valor da excitação  $H$ . Supor que o material da expansão polar tem uma curva de magnetização como se apresenta na Figura 9.

Seja a excitação indutora  $H_i$  e a excitação do induzido  $H_I$ , a que correspondem separadamente as induções  $B_i$  e  $B_I$ . Nas zonas em que os campos se somam (arestas de saída dos pólos) as excitações também se somam, sendo a excitação total  $H_t = H_i + H_I$ . Porém, a esta excitação  $H_t$  corresponde uma indução  $B_t$ , bastante inferior ao valor da soma das duas

induções parciais  $B_i + B_I$ . Este facto verifica-se porque a excitação total  $H_t = H_i + H_I$  é superior à de saturação e, como tal, vai apanhar a curva de magnetização ou ciclo histerético já na parte menos ascendente. Evidentemente que se não se atingir a curva da saturação, mantendo-se na zona linear, é perfeitamente lógico que se some os campos parciais para se obter o campo total.

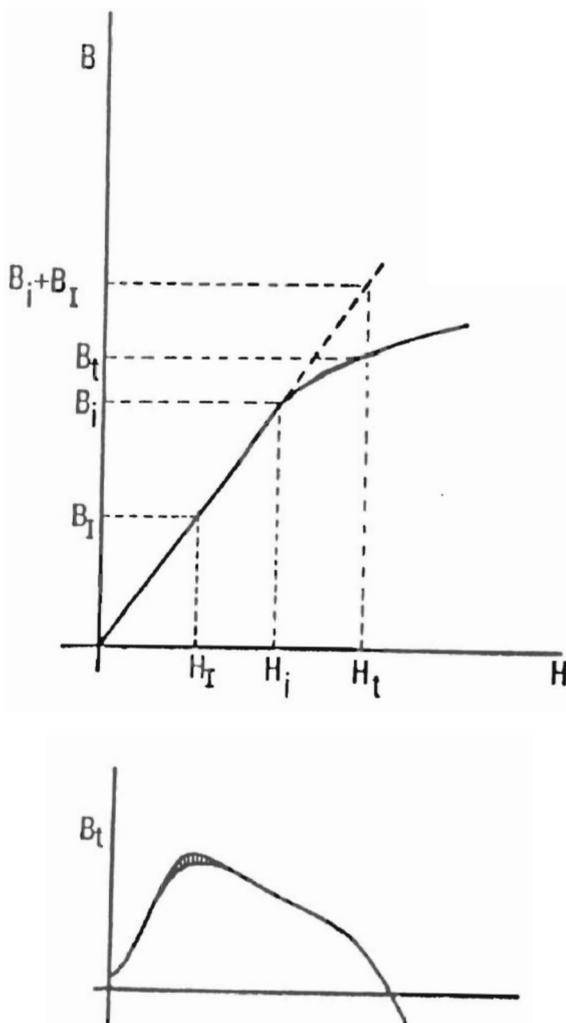


Figura 9. Efeito da saturação devido ao campo de reação do induzido na máquina DC

Pode-se assim constatar que se for atingida a saturação nas zonas das arestas de saída dos pólos em que os campos se somam, aparecerá uma indução inferior à soma das parciais e na curva resultante haverá que registar um abaixamento do valor da indução máxima, com se pode ver na Figura 9.

Assim, sem saturação, o fluxo de reação do induzido que se soma ao do indutor em metade do pólo vai subtrair-se na outra metade e o fluxo resultante será igual ao fluxo em vazio (apenas devido ao campo indutor). Se houver saturação isto já não é verdade e o que se subtrai é mais do que o que se soma, diminuindo o fluxo resultante.

A diminuição do fluxo provoca a diminuição da força eletromotriz gerada pela máquina, consequência importante de haver saturação no ferro das expansões polares ou dos dentes da armadura.

Em resumo, as principais consequências da reação magnética do induzido ou armadura, são:

- Distorção do campo magnético na máquina;
- Deslocamento da linha neutra da máquina;
- Abaixamento do valor da força eletromotriz, se houver saturação;
- Maior diferença de potencial entre lâminas do coletor, na zona de reforço dos campos magnéticos.

##### 5. Modificação da posição das escovas

Até agora tem-se considerado as escovas a curto-circuitar as secções que estão a passar na linha neutra em vazio. Ao variar-se a posição das escovas, altera-se a distribuição das correntes no induzido e consequentemente o campo de reação do induzido.

Como exemplo, vai-se supor o induzido de um dínamo com as escovas na linha neutra em vazio, como se apresenta na Figura 10. Nela suprimem-se as ranhuras, considerando-se apenas um condutor a representar todos os condutores alojados na ranhura e colocam-se as escovas diretamente sobre os condutores a que realmente estão ligadas através do coletor.

Desloque-se as escovas de um certo ângulo no sentido do movimento. Houve uma alteração na distribuição das correntes segundo o novo esquema apresentado na Figura 10.

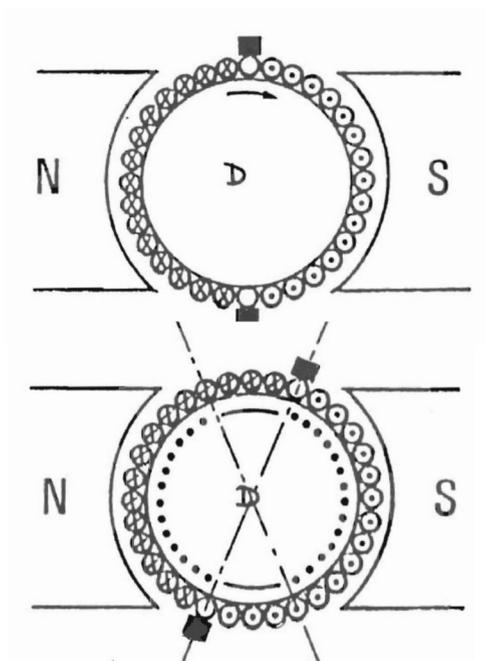


Figura 10. Modificação da posição das escovas na máquina DC

A direção do campo de reação do induzido, agora já não aparecerá segundo a perpendicular ao indutor, mas segundo uma linha, que é a nova linha das escovas. Querendo, podemos decompor este campo em dois. Um perpendicular ao indutor, a que se chama campo de reação transversal do induzido, e outro colinear com o indutor, que se chama campo de reação longitudinal do induzido. Será responsável pelo primeiro destes campos, os condutores marcados no setor a pontuado, e pelo segundo o dos setores a cheio. O diagrama vetorial será o da figura 11.

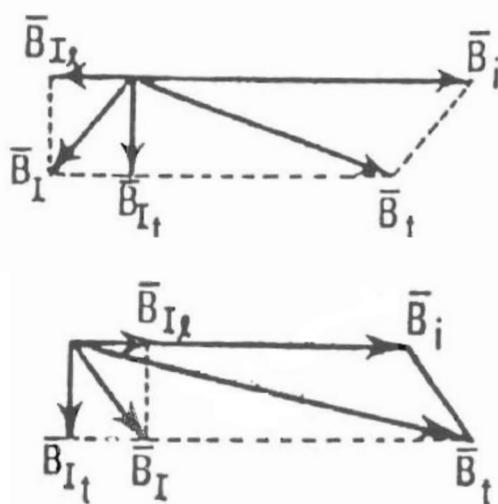


Figura 11. Diagrama fasorial

Se o deslocamento das escovas em vez de ser feito no sentido do movimento fosse no sentido contrário ao do movimento, os condutores dos setores a cheio apareciam percorridos por correntes de sentidos contrários aos do caso anterior e então o sentido do campo de reação longitudinal, em vez de ser de oposição ao do indutor, como se viu antes, aparecia a reforçá-lo tal como mostra a figura acima apresentada.

Ao verificar-se que a deslocação das escovas no sentido contrário ao do movimento vai aumentar o valor do campo resultante pode pensar-se que essa é uma boa solução, porém, não é assim pois prejudicaria muito a comutação, ponto esse essencial ao bom funcionamento da máquina.

Se a máquina funcionar como motor, as correntes têm o sentido inverso para o mesmo sentido de rotação, logo as conclusões quanto à deslocação das escovas são inversas quanto à situação do funcionamento como dínamo.

Uma das formas de eliminar, ou pelo menos atenuar o efeito da reação magnética do induzido, é utilizar enrolamentos de compensação nas superfícies das massas polares. Este enrolamento é o prolongamento da bobinagem do induzido e, portanto, percorrido pela corrente que circula no induzido e que origina a respetiva reação magnética do mesmo. Este facto, permite que o enrolamento de compensação crie um campo de igual amplitude e com polaridade que permite anular o de reação magnética do induzido, como se pode ver na figura 12.

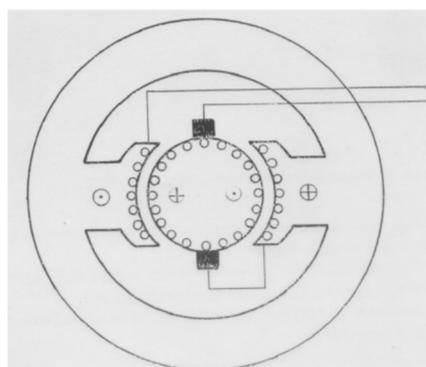


Figura 12. Utilização de enrolamentos de compensação nas superfícies das massas polares

## 6. Comutação

O fenómeno da comutação verifica-se quando uma secção passa duma via para a via seguinte e em que, portanto, o sinal da intensidade de corrente que a percorre se inverte. O estudo da comutação é dos mais complexos nas máquinas de corrente contínua e o cálculo duma máquina que apresente boa comutação é uma das preocupações dos construtores.

Considere-se um troço de enrolamento de um dínamo que inclua uma secção em comutação, como se apresenta na Figura 13.

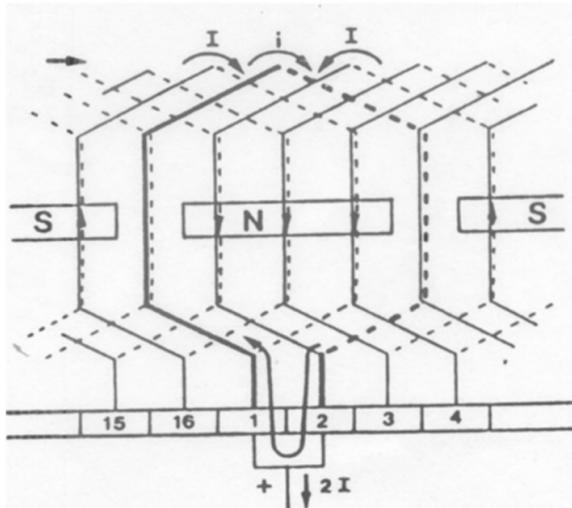


Figura 13. Secção em comutação na máquina DC

Supõe-se que as várias secções figuradas, representam as sucessivas posições tomadas pela secção no seu movimento de rotação. Verifica-se que antes da comutação a secção é percorrida por uma corrente com um determinado sentido e após a comutação quando entra na outra via será percorrida por uma outra corrente igual e de sentido contrário. Enquanto se encontra curto-circuitada pela escova, na secção circula uma corrente  $i$ , variável entre o valor da corrente numa via e o valor da corrente na via seguinte, isto é, se fixarmos o primeiro dos sentidos como positivo será entre  $+I$  e  $-I$ .

Relativamente à corrente  $2I$  colhida na escova a corrente  $i$  não influirá, pois que se vai somar dum lado e subtrair do outro. O estudo do modo como varia a corrente de circulação  $i$ , na secção em comutação, é fundamental para o estudo deste fenómeno da comutação.

## 7. Comutação ideal

Na comutação ideal (ou linear) a que corresponde o diagrama da Figura 14 admite-se uma variação uniforme da intensidade de corrente que percorre a secção desde  $+I$  a  $-I$ . Então, as ordenadas dessa reta indica-nos o valor da corrente  $i$  na secção em comutação.

Para cada instante  $t$  pode-se saber os valores das correntes convergentes para a escova, respetivamente  $I+i$  e  $I-i$ . Admitindo o induzido a girar com uma velocidade constante, as abcissas de cada ponto considerado serão proporcionais às superfícies de contacto escova-lâminas da secção em comutação.

Assim no instante  $t$ ,  $\sigma_1$  indicará a área de contacto da escova com a lâmina 1 e  $\sigma_2$  a referida área de contacto com a lâmina 2. Como se vê pelo diagrama, quando a lâmina 2 larga a escova (instante  $T$ ) já na secção em comutação a corrente atingiu o valor  $-I$  que vai ter quando pertencer à nova via. Tudo se passaria, assim, sem variações bruscas nem quaisquer outros problemas.

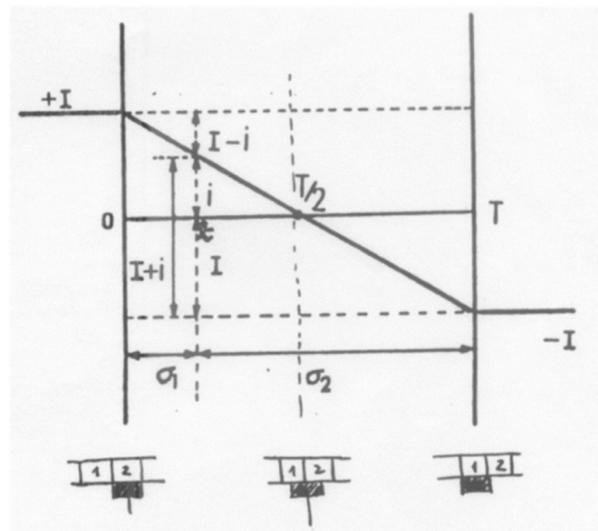


Figura 14. Comutação ideal na máquina DC

## 8. Comutação real

A comutação não se processa de forma linear e a prática mostra que o diagrama referente à variação da corrente  $i$  pode ter o aspeto do da Figura 15.

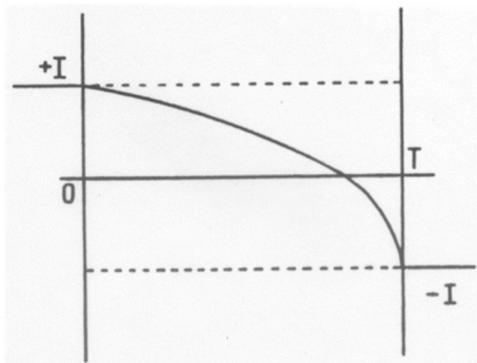


Figura 15. Comutação real na máquina DC

Na parte inicial a curva decresce mais lentamente, devido aos efeitos indutivos gerados na própria secção, para junto do final da comutação, abaixar rapidamente para o valor final  $-I$ . Muitas vezes este valor não é atingido no tempo  $T$ , isto é, até no instante em que a lâmina deixa a escova e então salta uma faísca entre ambos.

De facto se, quando a lâmina deixa a escova, a corrente na secção que estava em comutação ainda não atingiu o valor  $-I$  (corrente na nova via onde a secção entrou) vai haver um restabelecimento brusco. Como nessa altura a lâmina deixou de estar em contacto com a escova essa igualização só pode ser feita através do ar e saltará uma faísca. No diagrama, essa variação será representada como mostra o esquema da Figura 16. O aparecimento de faíscas no coletor é indicativo de má comutação. Provoca a deterioração do mesmo, devido à formação dos arcos elétricos.

De qualquer forma, o atraso que provoca o encurvamento final significa que a corrente que passa no contacto entre a escova e a lâmina que vai largar a escova (na figura a lâmina 2) é ainda muito intensa embora o contacto superficial já seja pequeno. Logo, grandes densidades de corrente e aquecimento elevado, que pode vir a danificar o coletor.

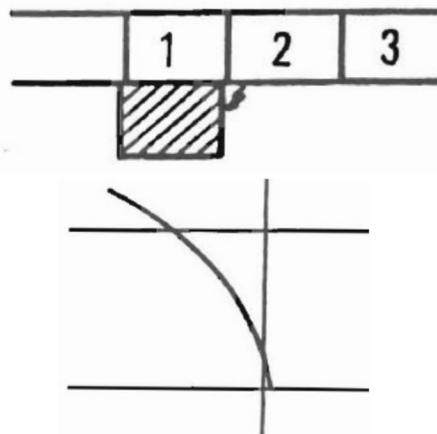


Figura 16. Comutação deficiente na máquina DC

## 9. Equação geral de Comutação

Para analisar convenientemente o fenómeno da comutação torna-se necessário encontrar uma equação matemática que traduza a variação da corrente  $i$  na secção em comutação. Para isso vai-se aplicar a 2ª lei de Kirchhoff à dita secção em comutação. Procura-se primeiro determinar com que forças eletromotrizes (f.e.m.) vai-se ter que contar. Como estas são originadas por campos magnéticos, vai-se considerar os existentes na máquina que são o campo indutor principal e o campo de reação do induzido. O campo de reação do induzido pode-se decompor em: Campo da própria secção em comutação, campo das outras secções em comutação e campo das secções não em comutação.

Analise-se agora quais destes campos originarão f.e.m. na secção em comutação que se está a estudar. Como se sabe, para que existam forças eletromotrizes (f.e.m.) é necessário que haja uma variação do campo no espaço ou no tempo. Relativamente ao campo indutor há na realidade um deslocamento da secção durante o tempo de comutação e se o campo não for nulo, na zona em que se encontram as escovas aparecerá uma f.e.m.. O campo da própria secção em comutação e criado pela corrente  $i$  que lá passa que, sendo variável, criará uma f.e.m. de auto-indução dada pela conhecida expressão:

$$-L \frac{di}{dt}$$

O campo das secções não em comutação é afinal, aquele que foi considerado no estudo da reacção do induzido e que na zona de comutação terá um certo valor, embora pequeno.

Como a corrente nas secções não em comutação é constante, a distância entre secções também é constante, só haverá f.e.m. por variar o meio devido à expansão polar. Porém, pelo que se disse, incluindo a pequena amplitude do campo, esta f.e.m. é de desprezar.

As outras secções em comutação sendo percorridas por correntes variáveis influenciarão a secção em estudo dum modo distinto, conforme se encontrem mais ou menos perto da secção em estudo que se encontra na comutação.

No caso do enrolamento ser diametral haverá nas mesmas ranhuras onde se encontram os lados da secção em estudo, lados de outras secções em comutação.

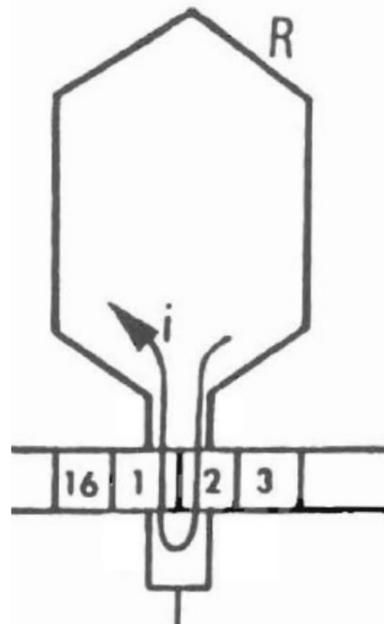
Consequentemente haverá uma forte influência mútua pelo facto dos referidos condutores se encontrarem muito próximos, podendo-se assim simplificar admitindo que o coeficiente de indução mútua é igual ao próprio coeficiente de autoindução,  $M=L$ .

Esta simplificação equivale a supor os lados coincidentes e então a f.e.m. de autoindução será:

$$-L \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} \cong -2L \frac{di}{dt}$$

Para se determinar a equação de *Kirchhoff* é necessário saber quais as quedas de tensão pois já se conhecem as f.e.m..

Considere-se, então, uma secção em comutação, apresentada na Figura 17 em que:



- R resistência da secção em comutação;
- $r_c$  resistência de cada uma das pontas da secção às lâminas do coletor
- $u_{11}$  tensão de contacto entre a lâmina 1 e a escova;
- $u_{12}$  tensão de contacto entre a lâmina 2 e a escova.

Figura 17. Secção em comutação na máquina DC

Assim, representando-se por  $\varepsilon$  o valor da f.e.m. criada pelo campo indutor principal e pelo campo das outras secções não em comutação (à soma dos dois chama-se campo de comutação), aparecerá a equação geral da comutação:

$$\varepsilon - L \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} = Ri + 2r_c i + u_{11} - u_{12}$$

A integração desta equação diferencial é muito difícil porque se desconhece como variam as quedas de tensão  $u_{11}$  e  $u_{12}$  em função da corrente.

A sua integração tem sido feita admitindo hipóteses simplificativas.

<sup>2</sup> No diagrama está implícito que  $|E_s| = |-E_r|$

## 10. Tensão de reactância

A Tensão de Reactância é um valor relacionado com as f.e.m.s. de autoindução e de indução mútua geradas na secção em comutação e que permite avaliar a qualidade da comutação, pois como se viu são as f.e.m. mais perturbadoras da comutação.

Admitindo, que as escovas se encontram na linha neutra em carga o campo de comutação praticamente não terá influência, isto é,  $\mathcal{E} = 0$ . Ficará apenas a f. e.m.:

$$-2L \frac{di}{dt}$$

Então, admitindo que  $\mathcal{E}$  é nulo, que  $R_t$  é a resistência total da secção em comutação, que as densidades de corrente nas lâminas 1 e 2 são iguais  $i_{u11} = i_{u12}$  e que  $L = M$ , a equação geral de comutação é equivalente a:

$$-2L \frac{di}{dt} = R_t i \rightarrow 2L \frac{di}{dt} + R_t i = 0$$

Atendendo ao valor da corrente na secção no início da comutação ( $i(0)=I$ ), a solução da equação é a seguinte:

$$i(t) = I e^{-(R_t/2L)t}$$

sendo  $T$  a duração da comutação, tem-se:

$$i(T) = I e^{-(R_t/2L)T}$$

A existência da f.e.m. de autoindução e de indução mútua na secção em comutação tem como consequência um valor de corrente na secção diferente de  $-I$  quando a secção abandona o contacto com a escova. Quanto maior for esta diferença, mais intensas são as consequências nefastas sobre as lâminas do coletor (arcos elétricos mais intensos), logo maior o desgaste provocado no coletor.

A solução para este problema passa pelo desenvolvimento na secção em comutação de uma f.e.m. de origem exterior ( $\mathcal{E}$ ), que permita uma comutação aproximadamente linear como se apresenta na Figura 18.

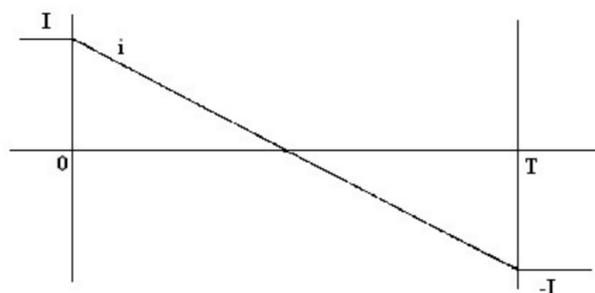


Figura 18. Comutação linear na máquina DC

A equação geral associada à secção em comutação será agora traduzida por:

$$\mathcal{E} - 2L \frac{di}{dt} = R_t i$$

Da Figura 18 pode-se obter a equação da respetiva função linear afim, e a respetiva derivada.

$$i(t) = -\frac{2I}{T}t + I \quad \frac{di}{dt} = -\frac{2I}{T}$$

Substituindo estes valores na equação geral associada à secção em comutação obtém-se:

$$\mathcal{E} - 4L \frac{I}{T} = R_t \left(-\frac{2I}{T}t + I\right)$$

Chama-se Tensão de Reactância ao valor médio da f.e.m. induzida na secção em comutação por efeito da reação do induzido, e será igual:

$$E_r \Rightarrow \mathcal{E} = 4L \frac{I}{T}$$

Foram determinados valores práticos que permitem, pelo conhecimento da tensão de reactância, saber se uma certa comutação é boa ou má. Quando a máquina não apresenta modificações especiais com vista a melhorar a comutação diz-se que tem uma Comutação Natural. Se a máquina possui dispositivos especiais para melhorar a comutação diz-se então que tem uma Comutação Artificial. Os valores práticos referidos dão as seguintes indicações:

- $E_r < 0,5 \text{ V}$  → Comutação Natural: máquinas sem dispositivos especiais para criação de f.e.m. exterior;
- $0,5 < E_r < 1 \text{ V}$  → Comutação natural razoável, necessário algum cuidado com a escolha das escovas;
- $E_r > 1 \text{ V}$  → Comutação Artificial.

#### 11. Processos para melhorar a comutação natural

- **Emprego de escovas apropriadas**

Já se referiu, a tensão de contacto escova-coletor era, como não podia deixar de ser, ponto fundamental no fenómeno da comutação. Verifica-se na prática que a substituição dum as escovas por outras de maior resistividade consegue, em muitos casos, melhorar suficientemente a comutação. Tal acção poderá explicar-se, sucintamente, pelo aumento da influência da resistência (fundamentalmente ter elevada resistência transversal), relativamente à influência da autoindução, no circuito da secção em comutação, isto é, o circuito fica menos indutivo. De qualquer forma, no caso de se detetar uma má comutação é sempre aconselhável verificar se as escovas em uso são as aconselhadas pelo fabricante da máquina, pois a má comutação pode ser o resultado de a máquina não estar a funcionar com as escovas apropriadas.

- **Diminuição do valor da autoindução da secção em comutação**

Este processo, só possível na fase de projeto das máquinas, consiste em procurar diminuir o valor da autoindução  $L$ .

Da expressão:

$$L = \frac{N^2}{R}$$

se conclui que dois caminhos se podem seguir: ou aumentar a relutância do circuito magnético da secção, ou diminuir o número de espiras. O aumento da relutância é um processo viável dentro de certos limites pois não pode ser feito de modo a aumentar a relutância do circuito magnético do fluxo indutor o que iria diminuir o valor do fluxo e, portanto, da f.e.m. Adiante, ver-se-á a importância que a forma das ranhuras adquire, relativamente a esta questão. A diminuição do número de espiras, é muito mais eficiente, pois  $N$  aparece ao quadrado. Se pretender-se do dínamo uma determinada tensão tem-se que manter um certo número de condutores ativos e, conseqüentemente, a diminuição do número de espiras por secção levará à necessidade de aumentar o número de secções. Este facto, irá tornar a máquina mais dispendiosa, por ter de se construir um maior número de secções e de lâminas no coletor.

- **Utilização de enrolamentos em corda diminui a tensão de reactância:  $L+M < 2L$**

Com o enrolamento em corda, isto é, encurtado ou alongado, os lados das secções em comutação não ficarão na mesma ranhura, e o coeficiente de indução mútua será nitidamente inferior ao de autoindução, isto é,  $L+M < 2L$  o que vai fazer diminuir a Tensão de Reactância.

#### 12. Comutação artificial

- **Calagem das escovas**

Um dos processos de realizar uma melhoria na comutação consiste em deslocar as escovas de um certo ângulo (ângulo de calagem) no sentido do próprio movimento para que a f.e.m. desenvolvida na secção em comutação e devida ao campo de comutação ( $\epsilon$ ) se vá opor ao de autoindução com um valor suficiente para que sejam anuladas os seus efeitos (ver equação geral da comutação).

Como se pode ver raciocinando com o sentido dos fluxos esse deslocamento nos dínamos deverá ser feito no sentido do próprio movimento do induzido pois tem-se de procurar a posição em que os campos indutor e reação do induzido se oponham. Uma dificuldade surge pelo facto do campo indutor variar bruscamente, quando se aproxima a aresta de entrada dos pólos. Daí a enorme dificuldade em regular a posição das escovas, pois se avançar mais que o devido o efeito seria contraproducente. Por outro lado, cada vez que variar a carga da máquina varia o valor do campo de reação do induzido e, portanto, devia modificar-se a calagem das escovas.

Quando anteriormente se apresentou a reação do induzido devido ao deslocamento das escovas referiu-se que aparecia uma reação transversal e outra longitudinal, e que no caso do deslocamento se fazer no sentido contrário ao do movimento, o efeito da reação longitudinal é reforçar o campo indutor. Disse-se também que este efeito à primeira vista benéfico, não se podia aproveitar por prejudicar a comutação. Verifica-se agora que de facto assim é, pois o deslocamento das escovas no sentido contrário ao do movimento, vai criar uma f.e.m. na secção em comutação que se irá somar à de autoindução em vez de a ir compensar como se desejaria. Claro está que, para motores, as deslocações das escovas terão sentidos inversos aos considerados para os dínamos.

- **Pólos auxiliares de comutação**

No caso anterior fazia-se a calagem das escovas para procurar um fluxo que gerasse na secção em comutação uma f.e.m. de oposição à de autoindução. Com os pólos auxiliares de comutação não é necessário deslocar as escovas pois que esses pólos são colocados na própria zona de comutação e fornecerão o fluxo necessário para a desejada compensação.

Estes pólos auxiliares, de menor volume, são colocados entre os pólos principais e, como é óbvio, a sua polaridade será tal que o campo por eles criado, se oponha ao campo de reação do induzido na zona de comutação.

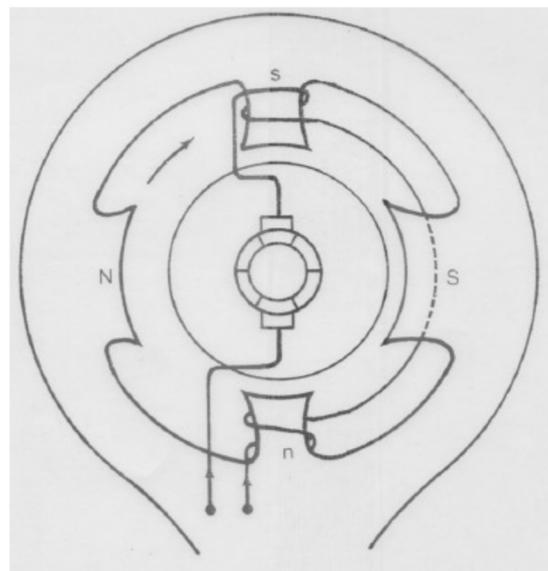


Figura 19. Pólos auxiliares de comutação na máquina DC

O fluxo destes pólos é criado por uma corrente que é função da própria corrente de carga da máquina o que permite manter a compensação mesmo com variações de carga. Por outro lado, o sistema além de ser independente do sentido de rotação, também permite que a máquina funcione quer como dínamo quer como motor sem qualquer modificação, pois nos motores, como se sabe, para um mesmo sentido de rotação a corrente no induzido tem o sentido contrário da que aparece nos dínamos. Como o fluxo dos pólos de comutação é criado por essa mesma corrente, havendo inversão na reação do induzido também haverá neste fluxo, como se pode ver na Figura 18.

- **Influência da largura das escovas**

Tem-se até agora raciocinado supondo as escovas com uma largura mínima. Analise-se agora as consequências na comutação se aumentar a largura das escovas. Se assim acontecer, entram em comutação várias secções ao mesmo tempo, aumenta a autoindução e a indução mútua, e pode parecer que aumenta a tensão de reactância. Acontece, porém, que pelo facto da escova ser mais larga também será maior o tempo de comutação, que começa quando a lâmina entra em contacto com a escova e só acaba quando termina esse contacto.

Como aumenta o numerador e o denominador a tensão de reactância  $E_r$  permanecerá sensivelmente constante. Por outro lado o aumento da largura das escovas, trás o benefício da diminuição da densidade de corrente no contacto escova-coletor pelo aumento da superfície de contacto.

O aumento da largura das escovas, terá, porém, um limite pois que não se pode conceber que estejam em comutação condutores diretamente influenciados e destinados à criação de f.e.m., isto é, a largura das escovas é limitada pelo espaço entre as expansões polares, isto é, pela zona neutra, ou quase neutra.

#### Referências bibliográficas

- Belezinha Carvalho, J. A., Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua. Apontamentos da disciplina de Máquinas Eléctricas I. ISEP, Porto, março de 2014.
- Sen, P.C., Principles of Electric Machines and Power Electronics. Editor: John Wiley & Sons.
- Fitzgerald, A.E., Charles Kingsley. Electric Machinery. Editor: McGraw Hill.
- Carlos Ferreira, Máquinas Eléctricas de Corrente Contínua. Apontamentos das disciplinas de Máquinas Eléctricas. Edição: ISEP.
- M. Kostenko e L. Piotrovski, Máquinas Eléctricas volumes I e II. Editor: Lopes da Silva Editora

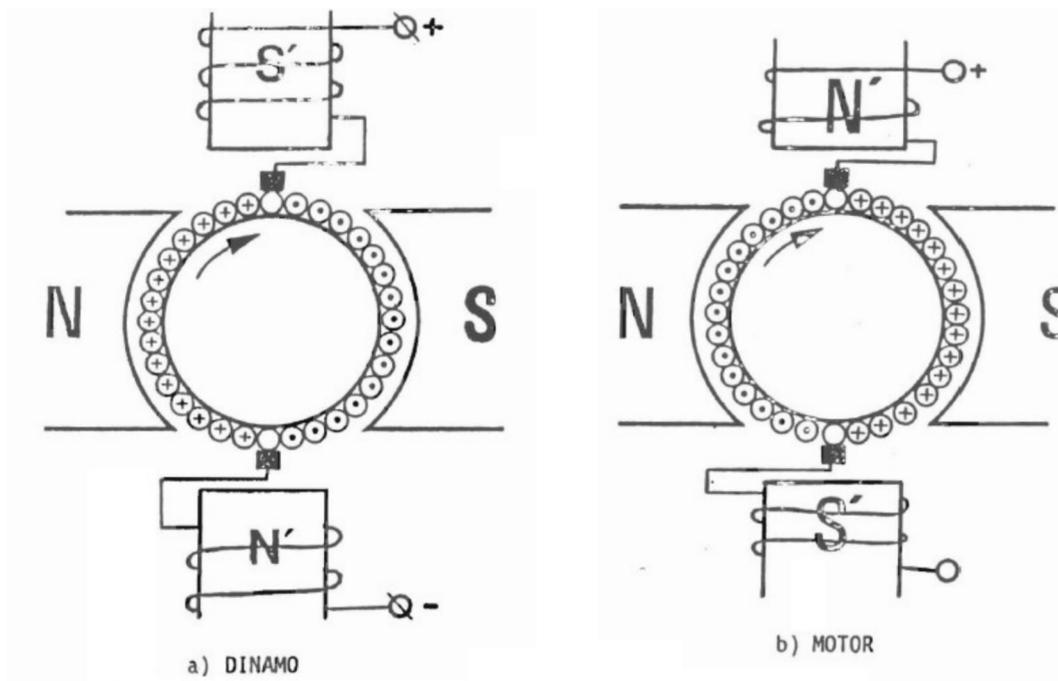


Figura 20. Comutação artificial através de pólos auxiliares na máquina DC