

## Motores síncronos

### Princípio de funcionamento

São motores com velocidade de rotação fixa – velocidade de sincronismo.

O seu princípio de funcionamento está esquematizado na figura 1.1 – um motor com 2 pólos. Uma corrente (contínua) de campo  $I_f$  produz um campo magnético  $B_R$  no rotor. Um sistema trifásico de tensões é aplicado aos enrolamentos estatóricos produzindo um campo magnético girante  $B_S$ , com o campo  $B_R$  a tender a alinhar-se com o campo  $B_S$ . No entanto, estes dois campos magnéticos nunca ficam perfeitamente alinhados, pois, mesmo sem carga, o rotor possui uma determinada inércia e portanto, haverá sempre um desfaseamento entre os dois campos, embora rodando à mesma velocidade. Este desfaseamento é medido pelo ângulo  $\delta$ , apelidado de ângulo de binário, que é tanto maior, quanto maior for o binário resistente, mas constante enquanto o binário resistente for constante..

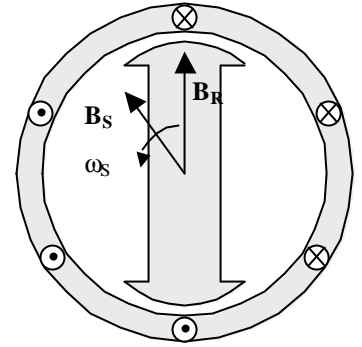


Figura 1.1

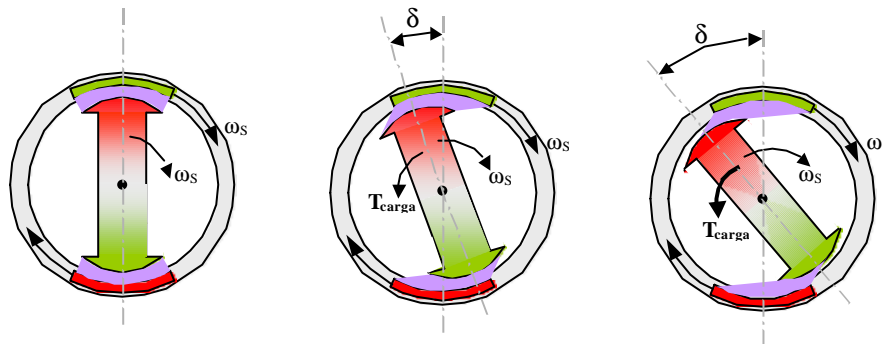


Figura 1.2

Se imaginarmos que o rotor é “puxado” pelo campo girante através de uma cola elástica (a lilás, no desenho), quando se aumenta a carga sobre o veio, e para manter o sincronismo, o que sucede é que a cola se vai deformar (esticando-se), isto é, aumentando o ângulo de binário  $\delta$  e mantendo a velocidade igual à do campo girante.

O binário induzido é:

$$T_i = k B_R \times B_S$$

Na figura 1.3 pode ver-se melhor, como se cria o campo magnético no rotor – uma fonte de tensão contínua alimenta um enrolamento que cria um campo magnético permanente, como se o rotor fosse um ímã permanente. No anexo E1 podem ver-se algumas formas de transmitir tensão contínua para a parte móvel que é o rotor.

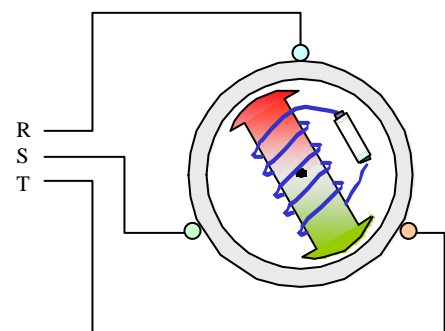


Figura 1.3

**Circuito equivalente**

O circuito eléctrico equivalente, para uma máquina síncrona, está representado na figura 1.4,

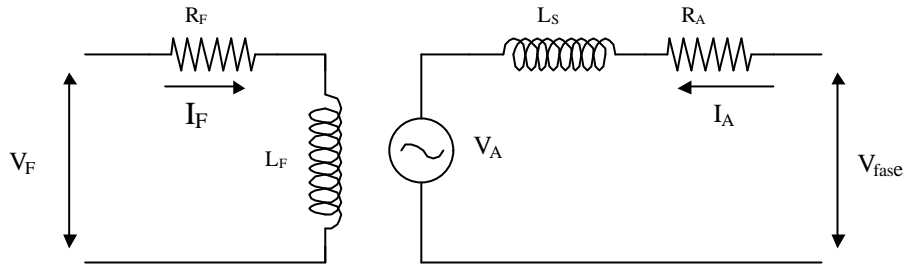


Figura 1.4

apenas para uma (das três) fase estatórica. Aí se vê a alimentação dos enrolamentos rotóricos com tensão contínua  $V_F$ , que cria o campo magnético no rotor – parte esquerda do esquema. Assim, para cada fase do estator, teremos a equação correspondente:

$$V_{fase} = V_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

Vectorialmente, pode ver-se esta equação na figura 1.5

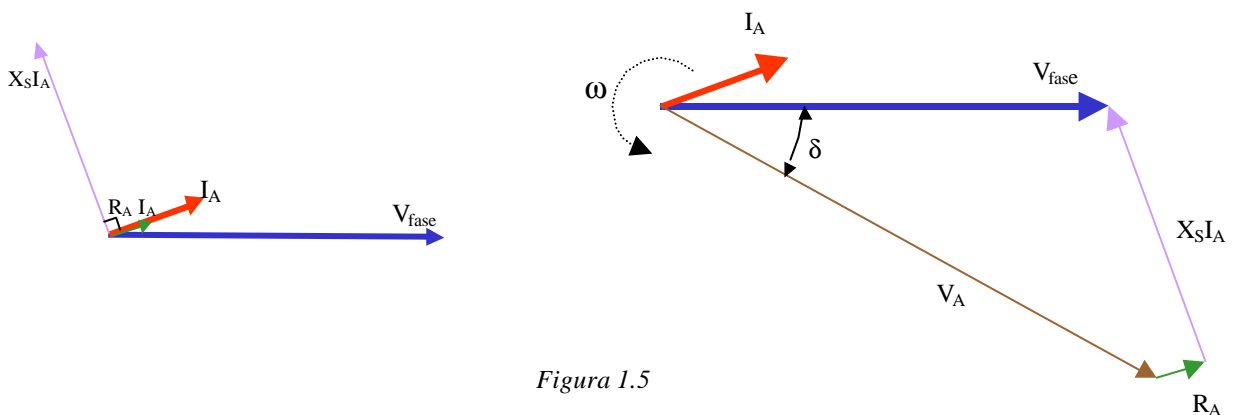


Figura 1.5

O campo magnético rotórico corresponde (produz) a  $V_A$ , o campo total  $B_{total}$  corresponde (produz)  $V_{fase}$  e o campo magnético estatórico  $B_S$  corresponde à queda de tensão no enrolamento  $jX_S I_A$  – figura 1.6.

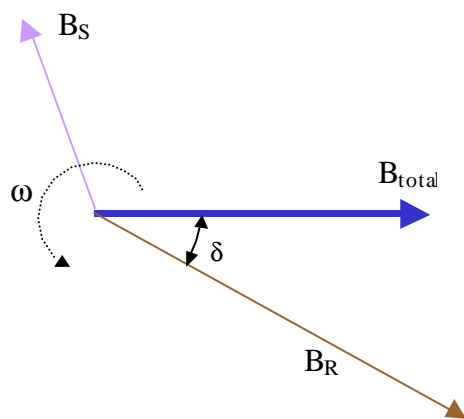


Figura 1.6

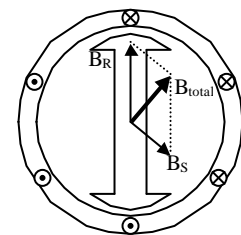


Figura 1.7

O circuito eléctrico equivalente completo, para as três fases de alimentação dos enrolamentos estáticos, está representado na figura 1.8.

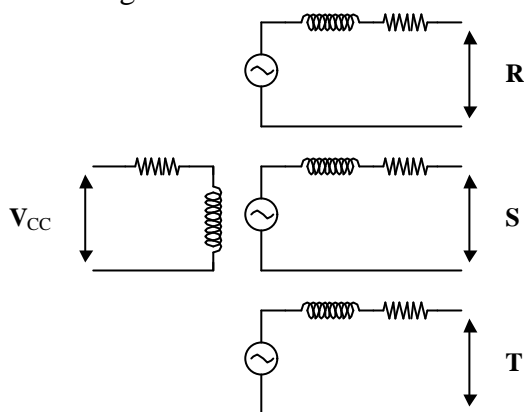


Figura 1.8

### Funcionamento do motor síncrono

Nos pontos seguintes, ignorar-se-á a resistência da armadura ( $R_A$ ), para simplificar.

#### Curva de binário

Os motores síncronos manobram cargas, basicamente com velocidade constante. Estão normalmente ligadas a sistemas de alimentação de potência muito superior à dos motores – rede com potência infinita – o que significa que a tensão e a frequência serão constantes qualquer que seja a potência absorvida pelo motor. A curva de binário resultante está apresentada na figura 1.9, onde se pode observar que a velocidade, do motor, é constante desde a situação de vazio até à situação de carga máxima –  $T_{max}$

O binário é dado por:

$$T_i = k B_R B_{total} \sin d$$

ou seja:

$$T_i = \frac{3V_{fase} V_A \sin d}{\omega X_S}$$

isto é, o binário máximo ocorre quando  $\delta = 90^\circ$ . No entanto, normalmente, o binário máximo corresponde a cerca de 3 vezes o binário máximo da máquina a ligar ao motor.

Excedendo-se o valor do binário máximo, o rotor já não consegue permanecer ligado ao campo girante, começa a ter escorregamento, com um binário oscilante e fazendo vibrar severamente o motor síncrono – perda de sincronismo.

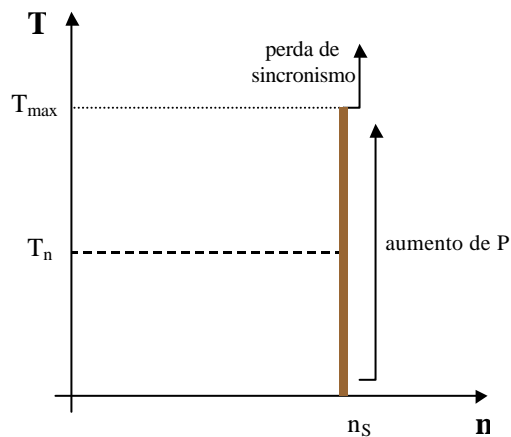


Figura 1.9

Da expressão anterior, do binário induzido, também se pode verificar que quanto maior o valor da corrente de campo (e, conseqüentemente, de  $V_A$ ), tanto maior o binário máximo do motor síncrono

### Efeito da variação de carga

Existindo uma carga ligada ao veio do motor, este desenvolverá o binário suficiente para manter a carga a rodar à velocidade síncrona. A figura 1.10 mostra o que sucede quando a carga, sobre o motor, varia. Partindo duma situação correspondente a  $I_{A1}$  e  $V_{A1}$ , se o binário resistente aumentar, o

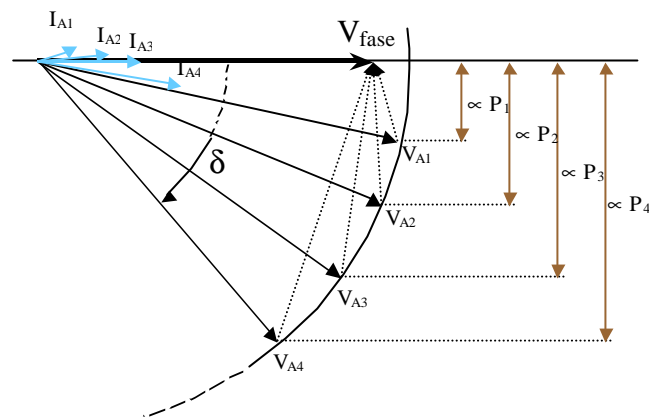


Figura 1.10

rotor começa por abrandar. Com esta diminuição de velocidade o ângulo de binário  $\delta$  aumenta e o binário induzido pelo motor aumenta também. Com este aumento de binário do motor, o rotor acelera até atingir novamente a velocidade de sincronismo, embora com um ângulo de binário maior. Recorde-se que  $V_A = k\phi\omega$  - isto é,  $V_A$  depende apenas da corrente de campo e da velocidade. Como a velocidade é constante (enquanto não se alterar a frequência da rede de alimentação) e como não se alterou a corrente de campo, então o módulo da tensão induzida  $|V_A|$ , deverá permanecer constante, mesmo existindo alterações de carga. No entanto a projecção de  $V_A$ , bem como os valores de  $\sin\delta$  e de  $I_A \cos\phi^1$ , aumentam, isto é, o vector  $V_A$  desloca-se para baixo, sobre uma circunferência, o que implica que a quantidade  $jX_S I_A$  tem que aumentar para conseguir atingir  $V_{fase}$ , o que, por seu turno, implica que  $I_A$  aumente, ou seja que a potência absorvida pelo motor se torne maior. Refira-se que o ângulo  $\phi$  também se altera, tornando-se cada vez menos capacitivo ( $I_{A1}$  e  $I_{A2}$ ), resistivo ( $I_{A3}$ ) e depois cada vez mais indutivo ( $I_{A4}$ , ...).

### Efeito da variação da corrente de campo

Observe-se a figura 1.11, em que se parte da situação em que o motor opera com um factor de potência capacitivo ( $I_{A1}$ ,  $V_{A1}$ ). Aumentando-se o valor da corrente de campo, aumenta-se o valor de  $V_A$ , mas não se afecta o valor da potência activa. Este apenas se altera quando a carga varia. Como a variação da corrente de campo  $I_F$  não afecta a velocidade de rotação e dado que não se alterou a carga, então a potência absorvida pelo motor permanece constante. Também a tensão de fase  $V_{fase}$  se mantém constante, dado que a tensão da rede não se alterou. Desta forma, as distâncias  $V_A$ ,  $\sin\delta$  e  $I_A \cos\phi$ , proporcionais à potência, terão que permanecer constantes. Como se aumentou  $I_F$ , aumentou-se  $V_A$ , o que apenas pode acontecer se aquelas quantidades se movimentarem ao longo de uma linha de potência constante.

De notar que, à medida que o valor de  $V_A$  aumenta, o valor da corrente  $I_A$  começa por diminuir e depois aumenta. Para baixos valores de  $V_A$ , a corrente  $I_A$  surge atrasada e o motor comporta-se como

<sup>1</sup> Em que  $\phi$  é o ângulo entre a corrente ( $I_A$ ) e a tensão de fase ( $V_{fase}$ ), isto é, a sua projecção ( $\cos\phi$ ) é o factor de potência.

uma carga indutiva, consumindo potência reactiva  $Q$ . Aumentando  $I_F$ , a corrente  $I_A$  vai diminuindo, tornando-se cada vez menos indutiva, passa por uma situação em que está em fase com  $V_{fase}$  – o motor comporta-se como uma carga resistiva – e seguidamente começa a aumentar, adiantando-se a  $V_{fase}$ , isto é, o motor passa a comportar-se como uma carga capacitiva, fornecendo potência reactiva à rede.

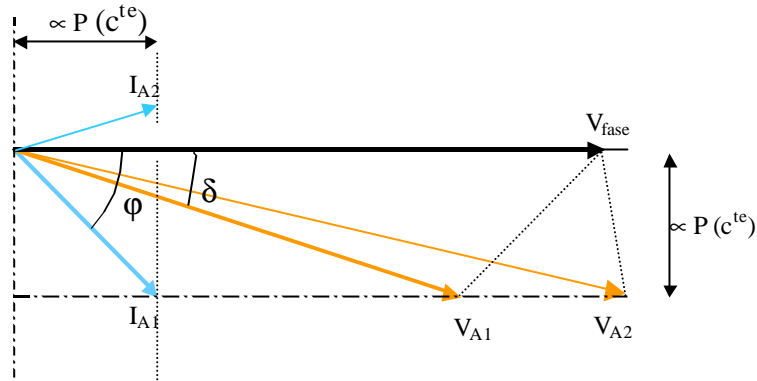


Figura 1.11

Na figura 1.12 está desenhado o comportamento genérico do motor síncrono, em função das correntes  $I_F$  e  $I_A$ . Cada uma das possíveis curvas, corresponde a um valor diferente de potência. Para cada curva, a corrente  $I_A$  mínima ocorre para um factor de potência unitário. Para qualquer outro ponto da curva, existe alguma energia reactiva fornecida ou consumida.

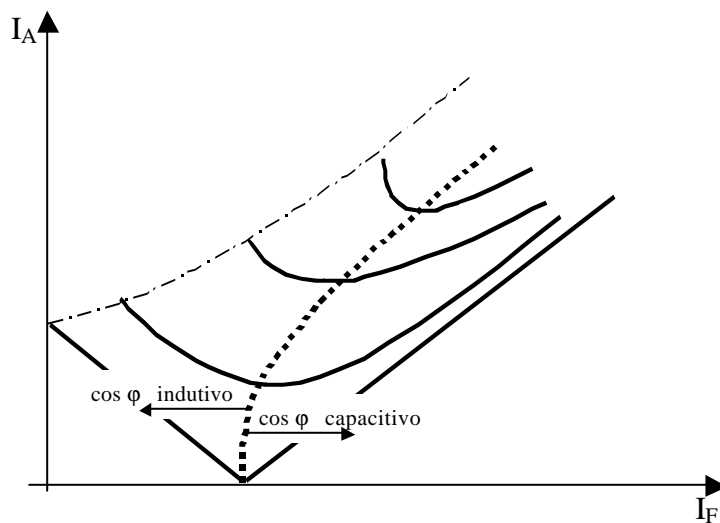


Figura 1.12

Em resumo, controlando a corrente de campo, controla-se o consumo ou produção de energia reactiva, isto é, tem-se uma forma controlada de variar o factor de potência, com uma máquina síncrona.

Os vários tipos de operação possíveis, da máquina síncrona, estão resumidos no quadro seguinte.

	Fornece Q ( $V_A \cos\delta > V_{fase}$ )	Consome Q ( $V_A \cos\delta < V_{fase}$ )
Fornece P  <b>GERADOR</b>  $V_A$ em avanço face a $V_{fase}$		
Consome P  <b>MOTOR</b>  $V_A$ em atraso face a $V_{fase}$		

Arranque de máquinas síncronas

Como “faz” o rotor para rodar à velocidade síncrona ? Na figura vê-se um esquema do motor síncrono no momento em que a tensão é aplicada aos enrolamentos estatóricos. Como o rotor está, inicialmente, parado, também o seu campo magnético é estacionário e portanto “vê” o campo magnético estatórico (campo girante) passar por ele 50 vezes por minuto. A expressão do binário induzido é:

$$T_i = k B_R \times B_S$$

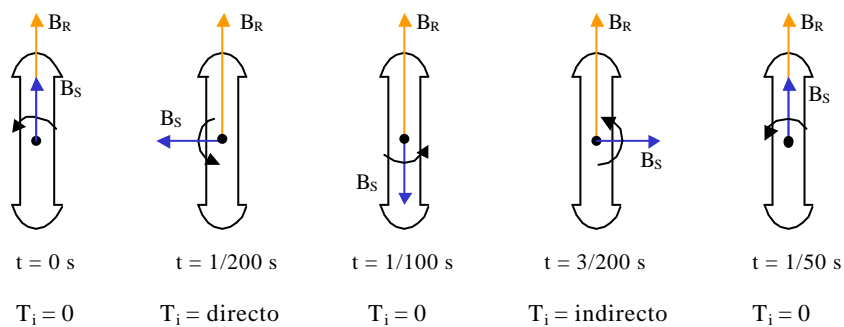


Figura 1.13

Assim, durante um ciclo eléctrico, o binário induzido teve um sentido directo e depois um sentido indirecto, sendo o binário médio induzido nulo, ao longo de um ciclo. O efeito prático é que a máquina vibra – tenta rodar para um lado, depois para o lado contrário, sucessivamente – fortemente, não arranca e finalmente sobre-aquece.

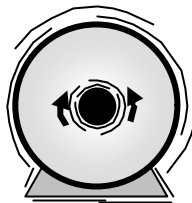


Figura 1.14

### Soluções, para o arranque:

- Motor auxiliar

Acoplado um motor auxiliar, faz-se rodar o rotor até à velocidade de sincronismo. Seguidamente ligam-se os enrolamentos estatóricos à tensão da rede e desacopla-se o motor auxiliar. Esta forma de arranque é particularmente adequada nos casos em que a máquina síncrona serve como gerador – necessitando, por isso, de algo que lhe forneça a energia mecânica rotacional – desempenhando o motor que fornece a energia mecânica, o papel de colocar a máquina síncrona a rodar à velocidade de sincronismo, na fase de arranque.

- Redução de frequência

Reduzir a frequência e, conseqüentemente, a velocidade de rotação do campo girante, de forma a que o rotor possa acelerar e acoplar-se magnéticamente com ele, no intervalo de meio ciclo da rotação do campo girante. Seguidamente aumenta-se a frequência da tensão de alimentação até aos seus 50 Hz habituais. Esta forma de arranque é, hoje, facilmente conseguida com recurso à electrónica de potência, através dos variadores de frequência.

- Enrolamentos amortecedores

É o meio mais popular. Os enrolamentos amortecedores são barras especiais, encastradas nas faces do rotor e curto circuitadas nas extremidades por anéis – figura 1.15.

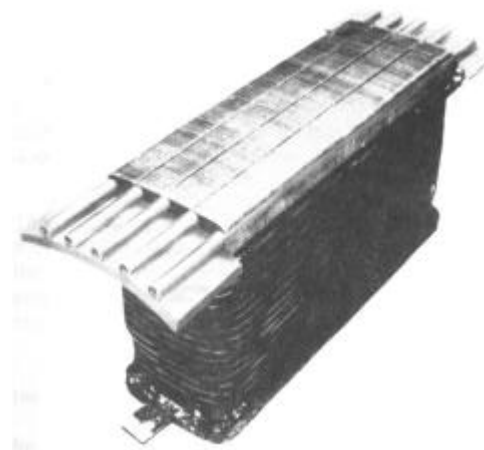
A forma de funcionamento está representada na figura 1.16 – quando se aplica a tensão aos enrolamentos estatóricos, com os enrolamentos rotóricos desligados, gera-se um campo magnético girante que induz uma tensão nas barras do enrolamento amortecedor, expressa por:

$$fem_i = (v \times B) \cdot l$$

$v$  – velocidade da barra, relativamente ao campo magnético

$B$  – densidade de fluxo

$l$  – comprimento da barra



As barras, do topo do rotor, movem-se para a direita, relativamente ao campo magnético (que se movimenta para a esquerda), sendo o sentido da tensão induzida perpendicular à página e apontando para nós. Analogamente, a tensão induzida nas barras da parte inferior do rotor é perpendicular à página e aponta para trás da página. Estas tensões induzidas produzem uma

corrente que flui na nossa direcção a partir das barras superiores e entra para as barras inferiores – figura 1.17 – resultando num campo magnético induzido  $B_w$ , que aponta para a direita. A expressão do binário induzido vem:

$$T_i = k B_w \times B_s$$

resultando um binário nas barras e, por consequência no rotor, no sentido directo.

Notar que o binário é por vezes directo outras vezes é nulo, mas sempre unidireccional, isto é, um binário líquido numa só direcção, implicando uma aceleração do rotor.

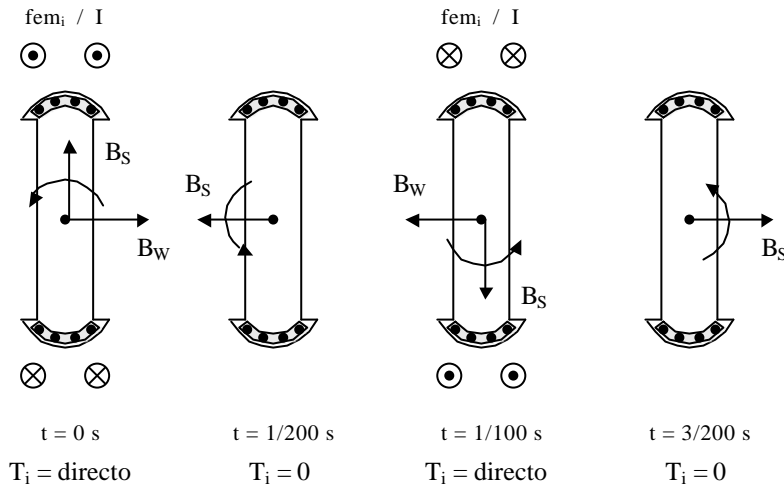


Figura 1.16

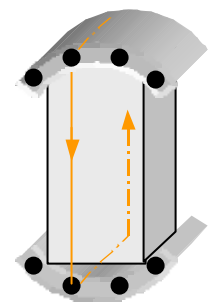


Figura 1.17

Refira-se, por fim, que o rotor acelera, mas não até à velocidade de sincronismo, o que é fácil de entender pelo princípio da indução de  $fem^2$ , que obriga a que haja movimento relativo entre o campo girante e o rotor. No entanto a velocidade de rotação que atinge, é próxima da de sincronismo, o que permite que a alimentação CC normal dos enrolamentos do rotor possa ser ligada e conseguindo o campo magnético do rotor “prender-se” ao campo girante, acelerando o rotor para a velocidade de sincronismo.

<sup>2</sup> Ver princípio de funcionamento das máquinas assíncronas.



Anexo E1