

# Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes

Three-Phase Synchronous Engines with Permanent Magnets

**DIAS, MOISÉS DE MATTOS**

*Dr. Eng. Prof. Depto Eng. Eletrônica – Feevale – ICET  
moisesdias@feevale.br*

**SCHAEFFER, LÍRIO**

*Dr. Ing. Prof. DEMET – UFRGS*

**DIAS, ARÃO DE MATOS**

*Dr. Eng. Prof. Depto Eng. Mecânica – Feevale – ICET*

**CÉZAR, JOSÉ LESINA**

*Dr. Eng. Prof. Eng. Mecânica – PPGEAM/ULBRA*

**VERNEY, JOSÉ CARLOS K.**

*Dr. Eng. Prof. Eng. Mecânica – PPGEAM/ULBRA*

Recebido em: 07/11/05 • Aceito em: 10/11/05

## RESUMO

*Este trabalho tem como objetivo um estudo sobre a aplicação de ímãs permanentes de alto produto energético em motores síncronos trifásicos, também conhecidos como máquinas elétricas síncronas trifásicas. As máquinas trifásicas síncronas tradicionais possuem dois conjuntos de enrolamentos: os enrolamentos do estator, ou enrolamentos de armadura, são alimentados por corrente alternada trifásica, com a função de produzir um campo girante; os enrolamentos do rotor, ou enrolamentos de campo, são alimentados por corrente contínua, com a função de produzir um campo magnético contínuo e estático. Os enrolamentos de campo podem ser substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Assim, este*

trabalho cita as diversas concepções deste tipo de máquina elétrica e a evolução das mesmas, concluindo com a apresentação de um servomotor ca síncrono trifásico, com ímãs permanentes de NdFeB, cortesia da WEG Motores.

**Palavras-chave:** motores elétricos trifásicos, máquina elétricas síncronas, ímãs.

## ABSTRACT

The aim of this work is to study the application of permanent magnets of high energy product in three-phase synchronous motors, also known as three-phase synchronous electric machines. The traditional three-phase synchronous machines possess two windings groups: The estator windings, or armature windings, are fed by three-phase alternate current, with the function to produce the armature field; the rotor windings, or field windings, are fed by continuous current, with the function to produce a continuous and static magnetic field. The field windings can be substituted by permanent magnets of high energy product. Thus, this work describes the several conceptions of this type of electric machine and the evolution of the same ones, ending with the presentation of a three-phase synchronous servomotor ac, with permanent magnets of NdFeB, courtesy of WEG Motors.

**Key words:** three-phase electric motors, synchronous electric machines, magnets.

## 1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica, assim como a maioria das máquinas elétricas rotativas, pode funcionar como *motor* ou *gerador*. Como motor convertem uma potência elétrica, a partir de uma fonte, em uma potência mecânica, que aciona uma carga acoplada ao eixo. Como gerador processa-se o contrário (FITZGERALD, 1973; NASAR, 1984). Por este motivo, os motores elétricos podem ser denominados de máquinas elétricas rotativas ou simplesmente de máquinas elétricas.

As máquinas rotativas trifásicas podem ser síncronas e assíncronas. Nos motores síncronos a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada ao eixo, isto até determinados valores de potência, tendo como limite de uso, a potência nominal da máquina. Nos motores assíncronos, há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga no eixo (FITZGERALD, 1973; NASAR, 1984).

Com relação ao aspecto construtivo, as máquinas trifásicas são constituídas fundamentalmente de duas partes (FITZGERALD, 1973; NASAR, 1984):

- **Estator:** Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de armadura* com alimentação trifásica, defasadas de 120°. Os enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante.

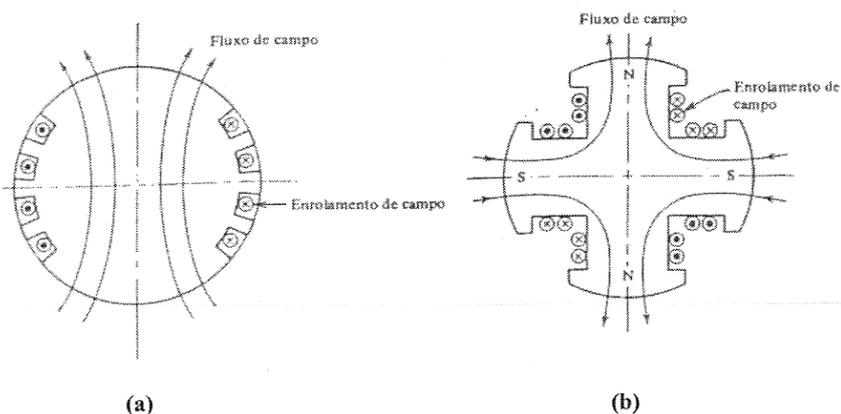
- **Rotor:** Parte girante da máquina também construída de chapas de aço laminadas na qual são colocados os *enrolamentos de campo*.

O estator e o rotor são construídos de chapas de aço laminadas, isoladas eletricamente e justapostas no sentido longitudinal da máquina. Com isto diminuem consideravelmente as perdas por correntes parasitas, aumentando o rendimento da máquina (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984).

## 2 MÁQUINAS ELÉTRICAS TRIFÁSICAS

A diferença fundamental entre as diversas máquinas trifásicas, está na concepção do rotor. A seguir estão relacionadas as principais máquinas trifásicas, e suas peculiaridades de maior interesse:

- **Máquina síncrona convencional com alimentação de campo externa:** Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua levada até eles através de anéis deslizantes e escovas. O inconveniente neste tipo de máquina, é que esta necessita de uma fonte de tensão externa contínua ajustável. Com relação a forma do rotor, estes podem ser pólos lisos (Fig. 01-a) ou pólos salientes (Fig. 01-b) (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984).

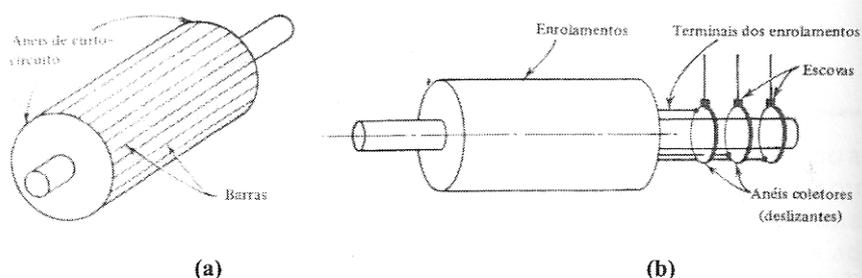


**Figura 01** – Máquina síncrona convencional – (a) rotor pólos lisos – (b) rotor pólos salientes

- **Máquina síncrona convencional com excitatriz interna:** Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno também conhecido por excitatriz, acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina não há escovas reduzindo então as manutenções. O rotor pode ser de pólos lisos ou pólos salientes (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984).
- **Máquina síncrona com ímã permanente:** Não há enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Não possui igualmente escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo com isto manutenções, aumentando o rendimento

e com melhor relação torque/volume. Os ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície dos pólos do rotor, ou embutidos no rotor (NASAR, 1987; FITZGERALD et al., 1990; GRAY, 1989). Alguns possuem uma configuração híbrida.

- **Máquina de indução com rotor tipo gaiola:** Não há enrolamentos de campo, contudo há barras de alumínio colocadas de forma longitudinal nas ranhuras da superfície do rotor e curto-circuitadas através de anéis nas extremidades do rotor (Fig. 02-a). As correntes nas barras são *induzidas* pelo campo girante, sendo também esta a causa do nome da máquina. Não há um acesso externo a estas correntes nas barras. A velocidade de rotação varia levemente com a carga acoplada ao eixo, derivando desta característica a sua classificação como máquina assíncrona (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984).
- **Máquina de indução com rotor bobinado:** Há enrolamentos de campo, e as correntes nestes enrolamentos também são induzidas pelo campo girante. Entretanto, esta máquina possui conexões externas para os enrolamentos de campo (Fig. 02-b). Por este motivo, pode-se colocar em série com estes enrolamentos, resistências elétricas (reostatos), que alteram a impedância destes enrolamentos, alterando também o conjugado eletromagnético desenvolvido pela máquina. Assim, pode-se variar a velocidade desta máquina, variando-se a resistência do reostato (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984).



**Figura 02** – Máquina de indução – (a) rotor tipo gaiola – (b) rotor bobinado

- **Máquina síncrona de relutância:** Neste tipo de máquina, não há enrolamentos de campo. O rotor é construído com saliências (pólos salientes) que, devido ao efeito da mínima relutância, giram em sincronismo com o campo girante do estator. Esta máquina não possui, enrolamentos de campo ou ímãs permanentes, escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo com isto manutenções. Como desvantagem, possui menor relação torque/volume, comparado às outras máquinas trifásicas (KOSOW, 1986)

Uma observação importante quanto aos motores síncronos é que estes não possuem torque de partida e uma das alternativas deve ser realizada (FITZGERALD et al., 1973; GRAY, 1989):

- Construção de uma gaiola envolvendo o rotor, ou seja, a colocação de barras no sentido longitudinal da máquina, curto-circuitadas nas extremidades por anéis. Nesta configuração, na partida, correntes bastantes elevadas são induzidas nestas barras em função da baixa

impedância, aumentando consideravelmente o fluxo magnético, fazendo com que o motor parta. Quando o rotor da máquina está girando em regime permanente, à velocidade síncrona com o campo girante, nenhuma tensão é induzida nestas barras e elas simplesmente não agem.

- Dispositivo de partida externa, ou seja, outro motor acoplado ao eixo, fornece o torque suficiente para a partida do motor síncrono.
- Utilizando um conversor com frequência ajustável, tem-se então um campo girante com velocidade angular variável. Nesta circunstância, inicialmente regula-se o conversor para geração de um campo girante com uma frequência baixa, de tal forma que o rotor comece a girar. A seguir, aumenta-se a frequência do campo girante até a velocidade síncrona.

### 3 ESTATOR DAS MÁQUINAS TRIFÁSICAS

Os enrolamentos de armadura, fixados no estator, são alimentados com corrente alternada trifásica defasadas de 120°. Estes enrolamentos são dispostos espacialmente de tal forma que as correntes de todas as fases contribuem positivamente na geração de uma onda de fluxo magnético girante ou campo girante (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984)

A Fig. 03-a mostra o estator de uma máquina trifásica com 2 pólos, com 4 ranhuras por polo por fase, e dois condutores por ranhura. A Fig. 03-b mostra a força magnetomotriz (**fmm**) constituída por uma série de degraus. Sua componente espacial fundamental é mostrada pela senoide (FITZGERALD et al., 1973).

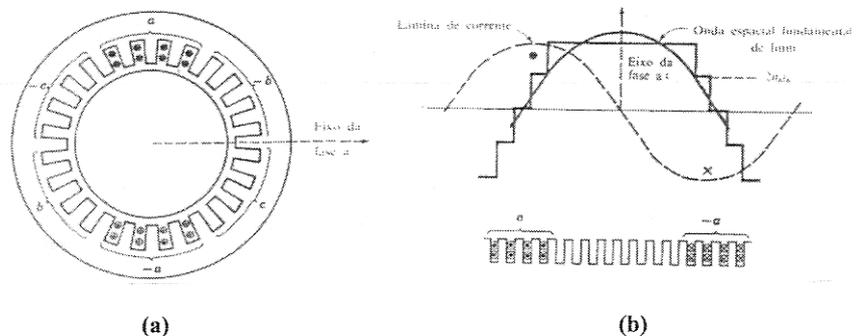


Figura 03 – (a) Máquina c.a. com estator trifásico – (b) força magnetomotriz

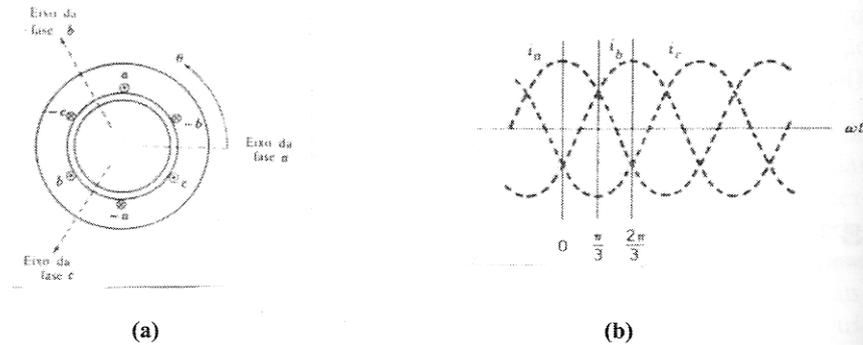
A Fig. 04-a mostra o estator de uma máquina trifásica com 2 pólos, 3 fases e uma espira por fase, alimentadas por corrente alternada trifásica defasadas de 120° (figura 04-b), indicadas pelas equações a seguir.

$$i_a(t) = I_{max} \cos(\omega t) \quad [01]$$

$$i_b(t) = I_{max} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad [02]$$

$$i_c(t) = I_{max} \cos(\omega t - 240^\circ) \quad [03]$$

onde  $I_{max}$  é a amplitude da onda de corrente,  $\omega$  a velocidade angular da onda [rad/s] e  $t$  o tempo [s] (FITZGERALD et al., 1973).



**Figura 04** – (a) Enrolamento de estator trifásico, 2 pólos, simplificado – (b) correntes trifásicas instantâneas

As correntes por fase indicadas são responsáveis pelo surgimento de 3 fmm  $\mathfrak{F}$  representadas em 3 tempos instantâneos diferentes nas Fig. 05(a-c) e indicadas pelas equações a seguir

$$\mathfrak{F}_a(t) = \mathfrak{F}_{a(max.)} \cos(\omega t) \quad [04]$$

$$\mathfrak{F}_b(t) = \mathfrak{F}_{b(max.)} \cos(\omega t - 120^\circ) \quad [05]$$

$$\mathfrak{F}_c(t) = \mathfrak{F}_{c(max.)} \cos(\omega t - 240^\circ) \quad [06]$$

e a amplitude da onda  $\mathfrak{F}_{max}$  é dada por

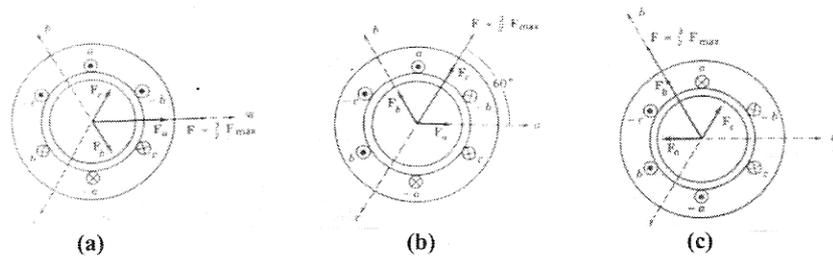
$$\mathfrak{F}_{max} = \frac{4}{\pi} K_w \frac{N_s}{p} I_{max} \quad [07]$$

onde  $K_w$  é o fator de enrolamento,  $N_s$  é o número de espiras por fase e  $p$  o número de pólos (FITZGERALD et al., 1973).

Pode-se observar das Fig. 05(a-c) que, em função da distribuição espacial das três fases na periferia do estator, todas as fmm contribuem positivamente para uma fmm resultante, resultando

$$\mathfrak{F}(\theta, t) = \mathfrak{F}_a + \mathfrak{F}_b + \mathfrak{F}_c = \frac{3}{2} \mathfrak{F}_{max} \cos(\theta - \omega t) \quad [08]$$

onde a fmm resultante apresenta uma amplitude constante 50% maior que a amplitude da fmm de qualquer das fases constituintes (FITZGERALD et al., 1973).



**Figura 05** – Representação do campo girante como resultante da fmm das 3 fases em 3 instantes diferentes (a) (b) (c)<sup>2</sup>

Esta fmm nada mais é do que uma *onda de fluxo magnético que gira* no interior do estator também conhecida como *campo girante*. A velocidade do campo girante, também conhecida como *velocidade síncrona*, é calculada como

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad [09]$$

onde  $n_s$  é a velocidade síncrona dada em [rpm] e  $f$  é a frequência das correntes de alimentação [Hz] (FITZGERALD et al., 1973).

## 4 RENDIMENTO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS

As perdas nas máquinas elétricas podem ser avaliadas a partir dos princípios da conversão eletromecânica de energia, onde energia elétrica é transformada em energia mecânica. As potências envolvidas numa máquina elétrica relacionam-se como (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984):

$$P_i = P_o + P_R + P_{mag} + P_M + P_d \quad [10]$$

onde todos os fatores representados na Eq. 10 são potências dadas em [Watts], e representam (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984):

- $P_i$   $\Rightarrow$  potência elétrica de entrada, fornecida pela fonte de tensão elétrica;
- $P_o$   $\Rightarrow$  potência mecânica de saída, fornecida à carga acoplada ao eixo do motor;

- $P_{Ra}$   $\Rightarrow$  potência dissipada nos enrolamentos de armadura, que representam as perdas nos enrolamentos do estator da máquina (perdas elétricas);
- $P_{mag}$   $\Rightarrow$  potência representando as perdas magnéticas por ciclo de histerese e correntes de Foucault (perdas magnéticas);
- $P_M$   $\Rightarrow$  potência representando as perdas mecânicas para ventilação da máquina e atrito entre o eixo e os mancais (perdas mecânicas);
- $P_d$   $\Rightarrow$  potência representando outras perdas diversas.

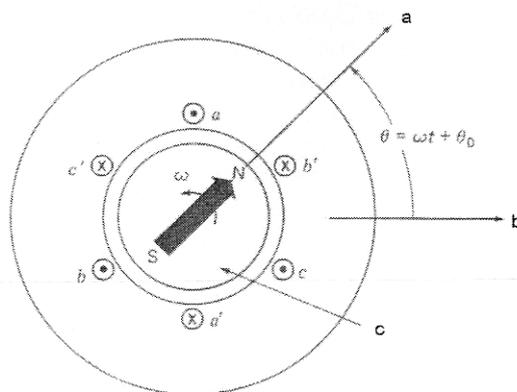
Uma perda não relacionada, é a perda nos enrolamentos de campo (rotor) que se enquadram nas perdas elétricas. Uma vez que, as perdas nos enrolamentos de armadura (estator), são consideravelmente maiores que as perdas nos enrolamentos de campo (rotor), em muitas análises elétricas, as perdas elétricas do rotor são desprezadas. Entretanto, as máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentes, não possuem enrolamentos de campo o que elimina as perdas elétricas no rotor que, mesmo sendo pequenas, contribui para o aumento do rendimento da máquina.

O desempenho de uma máquina pode ser medido a partir de seu rendimento  $\eta$ , que considera as perdas na máquina relacionando a potência de entrada e a potência de saída, ou seja (FITZGERALD et al., 1973; NASAR, 1984)

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \quad [11]$$

## 5 MÁQUINAS SÍNCRONOS COM ÍMÃS PERMANENTES

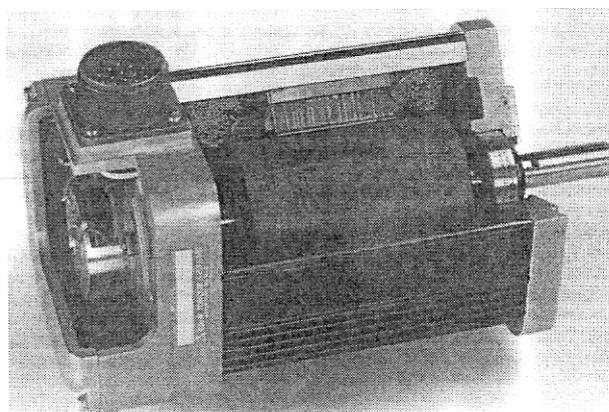
Motores **ca** (corrente alternada) com ímãs permanentes são máquinas elétricas síncronas polifásicas com ímãs permanentes no rotor, muito semelhantes às máquinas síncronas convencionais, onde os enrolamentos de campos são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. A Fig. 06 mostra um diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. Uma análise desta figura permite observar as semelhanças entre a máquina trifásica com ímã permanente e a máquina síncrona convencional. Por este motivo, as máquinas trifásicas com ímã permanente podem ser analisadas a partir de cálculos muito semelhantes àqueles utilizados para análise das máquinas síncronas convencionais, simplesmente considerando que a máquina é excitada por uma corrente de campo de valor constante, fazendo-se as devidas correções (FITZGERALD et al., 1990).



- a – eixo magnético do rotor
- b – eixo magnético da fase 2
- c – rotor de ímãs permanente

**Figura 06** – Diagrama esquemático de uma máquina trifásica com ímã permanente. As setas indicam a direção da magnetização do rotor

A Fig. 07 mostra uma vista em corte de um típico motor síncrono trifásico com ímã permanente. Esta configuração de motor possui um sensor de velocidade e de posição montado no eixo do rotor. Várias técnicas podem ser usadas para sensoriar a posição do eixo, incluindo dispositivos de efeito Hall, LEDs e fototransistores (encoder ótico), e variação de indutância (FITZGERALD et al., 1990).



**Figura 07** – Vista em corte de um motor síncrono trifásico com ímã permanente com o sensor de velocidade e posição para controle do motor

A partir das informações do sensor de posição do eixo, os enrolamentos por fase do motor são seqüencialmente excitados de tal modo a produzir o torque e velocidade desejadas. A velocidade do motor é determinada pela frequência da rede de alimentação. A posição angular entre o eixo magnético do rotor e uma determinada fase, determina o torque desenvolvido pelo motor (FITZGERALD et al., 1990).

Em função da capacidade para medição de velocidade e posição do

rotor a partir de sensores, bem como a possibilidade de aplicação de frequência e amplitude de excitação de corrente variável, a partir de conversores, determina que motores síncronos trifásicos com ímã permanente, como este mostrado na Fig. 07, são bastante controláveis. Como resultado, estes motores são atualmente encontrados em muitas aplicações que anteriormente eram quase que exclusivamente do domínio de motores **cc** (corrente contínua). Motores síncronos trifásicos com ímã permanente são freqüentemente chamados de motores *brushless* (sem escovas) ou motores **cc** sem escovas (FITZGERALD et al., 1990).

Atualmente, o uso de ímã permanentes com alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas, tem aumentado consideravelmente. Esta tendência é devido à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis produzidos a partir de ímãs de ferrita que, dependendo da aplicação, são adequados. Entretanto, um desenvolvimento mais importante, se deu a partir da utilização de novos materiais magnéticos, como os ímãs permanentes de terras raras (super ímãs), que possuem um produto energético muito superior às ferritas. Estes super ímãs utilizados são conhecidos por sua composição, ou seja, o neodímio-ferro-boro ou NdFeB e o samário-cobalto ou SmCo. A utilização dos super ímãs em novas configurações, resultou em um alto rendimento destas máquinas elétricas bem como em outras características que são difíceis de comparar com máquinas sem ímãs permanentes (máquinas convencionais). A utilização dos super ímãs diminui sensivelmente os riscos de desmagnetização dos ímãs uma vez que estes ímãs possuem elevada coercitividade (campo desmagnetizante), além de possibilitar o desenvolvimento de máquinas com uma elevada relação torque/volume. Atualmente, os ímãs permanentes são disponíveis em uma larga faixa de características magnéticas e permitem uma considerável gama de possibilidades na escolha do ímã mais adequado (NASAR, 1987).

A relação torque/volume mais elevada é obtida em máquinas síncronas com ímãs permanentes. Estas máquinas têm melhor rendimento que máquinas com enrolamento de campo porque elas não têm nenhuma perda de excitação de campo, uma vez que não possuem enrolamentos no motor, exceção feita às máquinas que, além dos ímãs, possuem uma gaiola (NASAR, 1987).

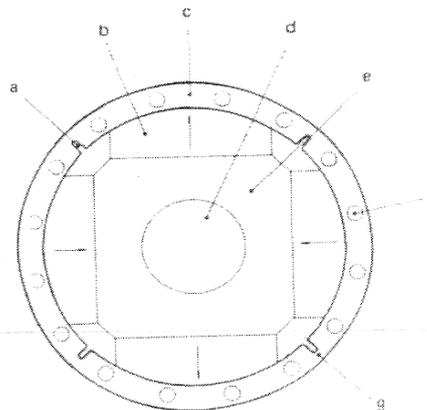
Os ímãs ocupam menos espaço que campo com enrolamentos, e para tamanhos de armadura pequenos esta vantagem é significativa, e o custo reduzido, particularmente quando ímãs cerâmicos (ferritas) são usados, tende a fazer estes motores com custo bastante competitivo (NASAR, 1987).

Alguns projetos apresentam geometrias relativamente precárias que desperdiçam o material de ímã, que no caso de ímãs de terra raras é caro. O uso de ímãs de entreferro em máquinas síncronas é um exemplo disto; a densidade da forma do *gap* é inevitavelmente menor que no ímã, grosseiramente na razão do arco do pólo para a inclinação do pólo. Esta limitação é bastante desnecessária para muitas aplicações (NASAR, 1987).

## 6 EVOLUÇÃO DOS MOTORES SÍNCRONOS COM ÍMÃS PERMANENTES

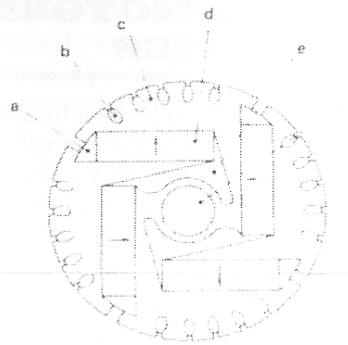
Um trabalho recente e interessante em máquinas ca com ímãs permanentes foi feito por Merrill, quando desenvolveu um motor chamado Permasyn. Foram encontrados dois problemas com este projeto (Fig.08); a perda de fluxo de um pólo para outro, e a presença da ação da relutância muito pequena. Foram utilizados ímãs de AlNiCo (provavelmente fundido, uma vez que a citação simplesmente descreve como metálico e as ligas de AlNiCo são metálicas, sendo diferenciados em dois grupos, a saber, os fundidos e os sinterizados), e o motor era muito sensível a aumentos na tensão de alimentação durante a partida, com um risco de desmagnetização parcial dos ímãs. Além disto, a construção mecânica era complicada (NASAR, 1987).

Um projeto da Siemens utilizou ímãs de ferrita posicionado internamento no núcleo (Fig. 09), sendo que, esta configuração de rotor, foi considerada a primeira topologia de núcleo do rotor com ímã embutidos, fabricado. Havia pequeno ou nenhum material magnético entre o ímã e o eixo do rotor, com o objetivo de minimizar a perda de fluxo do ímã; além disto, possui um circuito magnético separado para o fluxo de cada ímã (NASAR, 1987).



- direção da magnetização inicial
- a – ranhura introduzida para reduzir a perda
- b – ímãs
- c – chapa laminada
- d – eixo magnético
- e – núcleo magnético
- f – barras da gaiola
- g – ponte de ferro

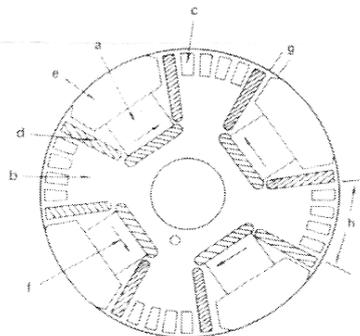
**Figura 08** – Uma configuração de um rotor de quatro pólos do projeto Permasyn



- direção da magnetização inicial
- a – espaço não magnético
- b – barras da gaiola
- c – segmentos laminados
- d – ímãs
- e – espaço não magnético
- f – eixo não magnético

**Figura 09** – Configuração do motor com ímã permanente da Siemens

Para uma configuração de motores de relutância com ímãs permanentes (híbridos) utilizam-se ímãs de ferrita ou terra raras. O rotor pode ser de chapas laminadas ou uma peça única, e estes são projetados para possibilitar uma ação combinada, ou seja, o caminho para o fluxo do ímã permanente é essencialmente em paralelo com o caminho do fluxo da ação de relutância. Adicionalmente, o caminho de fluxo na partida é de baixa relutância e é compartilhado com aquela das ações de relutância em velocidade síncrona. O propósito dos ímãs permanentes é melhorar a polaridade nos cantos dos pólos do rotor, que melhora bastante a sincronização e também serve para fornecer fluxo útil adicional. A Fig. 10 mostra a forma preferida para construção deste tipo de máquina (NASAR, 1987).

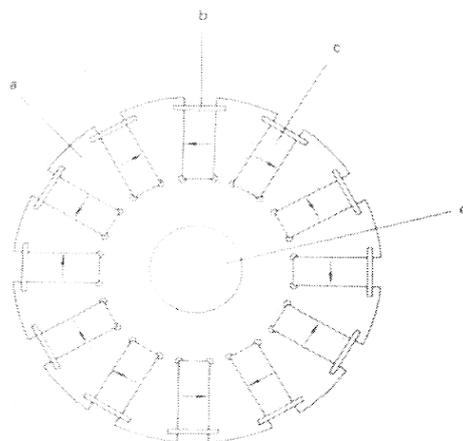


- a – ímãs
- b – rotor de aço magnético
- c – barras da gaiola
- d – barreira de fluxo
- e – canal (preenchido com cobre-alumínio)
- f – sapata-polar – largura 0,25 cm
- h – arco de pólo – 46,74°

**Figura 10** – Diagrama esquemático da geometria de um motor híbrido típico

A ação de relutância claramente depende do grau de saliência dos pólos e a largura das barreiras de fluxo. A influência do arco do polo no torque é crítica, mas também determina o espaço disponível para o imã permanente e seu circuito de ferro. Para um determinado espaço, deve-se tentar maximizar o fluxo do imã que alcança o entreferro (NASAR, 1987).

Um projeto muito diferente é mostrado na Fig. 11. Esta máquina não incorpora uma gaiola e assim não tem partida própria com alimentação de frequência constante. A máquina é apropriada para um número de pólos bastante grande, como por exemplo doze pólos. Projetos para números de pólos menor que seis são não prático, mas não há virtualmente nenhum limite superior claro. Pode-se deduzir que se as aberturas são suficientemente profundas, a densidade de fluxo de entreferro pode ser consideravelmente maior que aquela no imã. Esta configuração do rotor é bem interessante para aplicações na qual é desejável velocidade de giro lento e estável. A máquina também pode servir como um gerador eficiente, principalmente para frequências bem acima de 50 Hz. A principal desvantagem deste projeto é a força mecânica do rotor (NASAR, 1987).

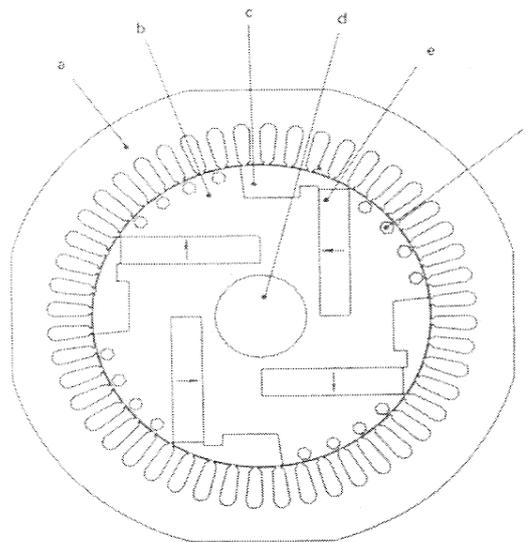


- direção da magnetização inicial
- a – espaço não magnético
- b – barras da gaiola
- c – segmentos laminados
- d – ímãs
- e – espaço não magnético
- f – eixo não magnético

**Figura 11** – Um rotor com doze pólos com ímãs magnetizados tangencialmente entre seus segmentos de pólos

Recentemente, uma nova configuração de motor com imã permanente com partida própria foi proposta e largamente desenvolvida para um faixa de aplicações. Nesta configuração, utiliza-se ímãs de ferrita de bário ou estrôncio (custo menor) ou ímãs terras raras (maior custo). Uma configuração típica de quatro pólos é mostrada na Fig. 12. Os ímãs são dispostos em uma formação de T para qualquer par de pólos adjacentes com uma seção retangular simples. Através de um projeto meticoloso, é

possível eliminar quase completamente a perda de fluxo magnético. A densidade de fluxo do *gap*, normalmente excede a densidade no ímã. Esta configuração se assemelha superficialmente com a da Fig. 09, mas há diferenças importantes no modo de produção de fluxo a partir dos ímãs. Na máquina da Siemens, o rotor tem um espaço não magnético entre o ímã e o eixo para formar efetivamente uma barreira de fluxo, e isto também serve para fornecer fluxo de um ímã adjacente para atravessar outro ímã. O rotor da Fig. 12, por outro lado, tem uma ponte de ferro entre o ímã e o eixo não magnético. Parte do fluxo originado de um determinado pólo, passa através de um ímã somente, enquanto o restante atravessa dois ímãs. O fluxo total por pólo portanto excede o fluxo total do ímã. Isto é mostrado na Fig. 13, onde pode-se observar que pode ser alcançada uma densidade de fluxo de entreferro alta (NASAR, 1987).



→ direção de magnetização

a – estator com chapas de aço laminadas

b – rotor com chapas de aço laminadas

c – materiais não magnético

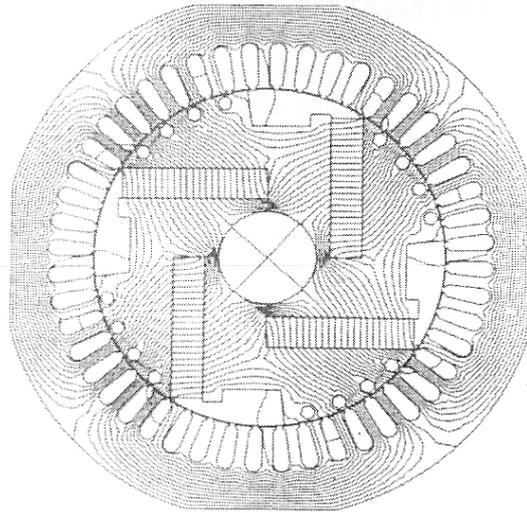
d – eixo de aço não magnético

e – ímãs

f – barras da gaiola do rotor (circular)

**Figura 12** – A configuração de um projeto inicial de motor síncrono com ímãs permanentes de 45 kW

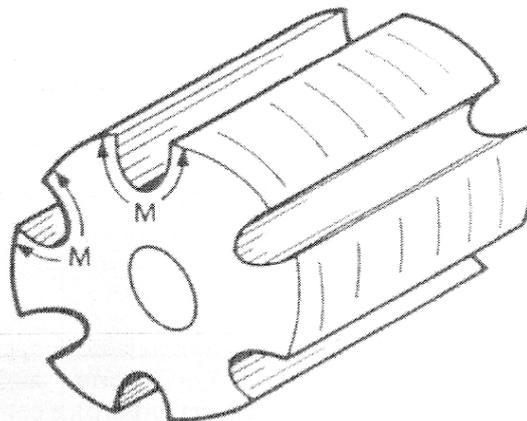
Outra diferença importante é a presença de um polo saliente neste projeto, com um razão de arco-de-polo não muito maior que 60 por cento; em contraste, o rotor da Siemens tem um valor muito alto (perto de 90 por cento) (NASAR, 1987).



tensão nos terminais = 476 V  
 corrente do estator = 50 A  
 potência de saída = 39,7 kW  
 frequência = 60 Hz  
 materiais magnéticos = H-90 B (terra rara de cobalto)  
 entreferro radial = 0.838 mm  
 espessura do ímã = 19.8 mm  
 largura do ímã = 92 mm

**Figura 13** – Distribuição de fluxo de um projeto inicial de motor com um ímã espesso na carga direção preferida de rotação

A Fig. 14 mostra um gerador com ímãs permanentes de AlNiCo isotrópicos integralmente fundidos. Os pólos são dispostos na superfície do rotor a partir de uma peça única como mostrado na Fig. 14 (NASAR, 1987).



**Figura 14** – Ímã inteiramente fundido para pequenos motores

## 7 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS DOS ÍMÃS

As propriedades magnéticas de retentividade, coercitividade e permeabilidade relativa, são analisadas a partir da curva de histerese. Esta curva relaciona campo magnético  $H$  aplicado a um material com indução magnética  $B$  resultante. Para os materiais magnéticos de interesse deste trabalho, a relação  $B \times H$  tem as características mostradas na Fig.15 (CULLITY, 1967; JILES, 1991; KRAUS et al., 1978).

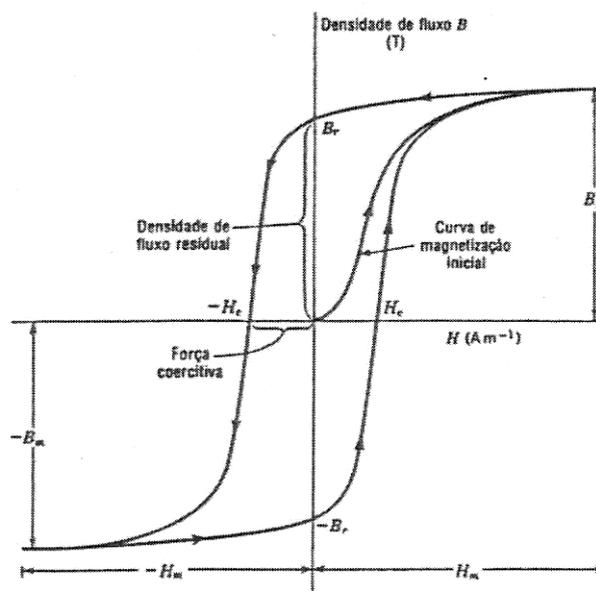
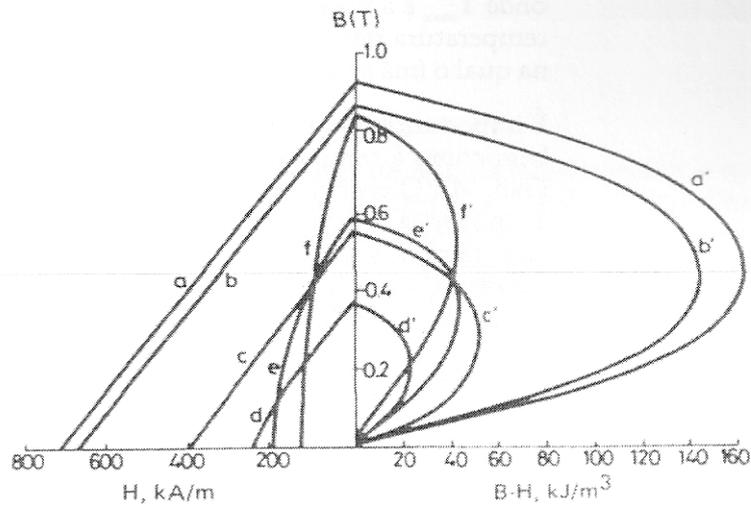


Figura 15 – Ciclo de histerese para um material ferromagnético

O ponto em que a curva corta o eixo de  $B$ , no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanente* ou *retentividade*  $B_r$  e representa a indução magnética residual que permanece no espécime mesmo após a retirada da bobina, ou seja, sem campo magnético aplicado ( $H = 0$ ). No sistema CGS de unidades (mais utilizados para caracterização de materiais magnéticos),  $B$  é dado em Gauss [G]. O ponto em que a curva corta o eixo de  $H$  no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* ou *coercitividade*  $H_c$  e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ). No sistema CGS  $H$  tem como unidade o Oersted [Oe]. Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético  $BH_{max}$ , cuja unidade no sistema CGS é Mega Gauss Oersted [MG.Oe] e está associado com a densidade de energia armazenada num ímã permanente (CULLITY, 1967; JILES, 1991; KRAUS et al., 1978).

Os principais ímãs comercializados atualmente são os cerâmicos (ferritas), as ligas de AlNiCo, e os terras raras como SmCo (samário-cobalto) e NdFe-B (neodímio-ferro-boro), e compósitos como MnAlC (manganês-alumínio-carbono). A Fig. 16 mostra as características de alguns ímãs, e a Tab. 01 mostra as propriedades físicas de interesse (NASAR, 1987).



- a = H22-A (terra rara)
- b = H18-B (terra rara)
- c = HERA (ímãs aglomerado de terra rara)
- d = Cerâmico 8 (ferrita anisotrópica)
- e = MnAlC
- f = AlNiCo VIII

**Figura 16** – Características e Curvas B-H de alguns ímãs permanentes

As propriedades magnéticas mais importantes são a coercividade  $H_c$  e a retentividade  $B_r$ . O ímã operará ao longo de uma característica entre estes pontos que dependem da relutância do circuito magnético e o nível de qualquer campo aplicado, como o campo de reação de armadura nas máquinas elétricas. Se este gráfico é linear sobre a região de funcionamento, não há perda de energia armazenada com as mudanças de relutância do circuito magnético. Quando o gráfico não é linear, como no caso dos ímãs de AlNiCo, a energia armazenada é perdida com os movimentos do ponto de operação das características para cima e para baixo; o ímã já não trabalha no maior laço característico, operando assim em um laço menor (NASAR, 1987).

**Tabela 01** – Propriedades físicas de alguns Ímãs disponíveis comercialmente

Ímãs	$B_r$ [T]	$H_c$ [kA/m]	$BH_{max}$ [kJ/m³]	$\rho$ [g/cm³]	$T_{max}$ [°C]	$T_{Rev}$ [%/°C]	$T_{Cu}$ [°C]
AlNiCo V	1,28	50	41	7,3	550	-0,016	870
AlNiCo VIII	0,90	127	48	7,3	550	-0,005	870
Cerâmico 7 (ferrita)	0,36	255	23	4,9	350	-0,200	450
Cerâmico 8 (ferrita)	0,40	247	29	4,9	350	-0,200	450
Ímã aglomerado (terra rara Co-B2)	0,55	360	48	5,1	120	-0,040	-
Terra rara Co H-90A	0,82	597	122	8,2	250	-0,047	710
Terra rara Co H-90B	0,87	653	142	8,3	250	-0,042	710
Terra rara Co H-99A	0,97	477	176	8,3	250	-0,035	870
MnAlC	0,58	190	45	5,0	300	-0,140	350

onde  $T_{max}$  é a máxima temperatura de operação,  $T_{Rev}$  é o coeficiente de temperatura reversível e  $T_{Cu}$  é a temperatura de Curie ou temperatura na qual o ímã se desmagnetiza.

É importante observar a máxima temperatura de operação permitida, bem como a temperatura sobre a qual mudanças reversíveis ocorrem (Tab. 01). O coeficiente de temperatura reversível fornece uma medida da mudança na força (intensidade) de um ímã com a temperatura sobre os parâmetros para os quais as propriedades do ímã revertem para os valores iniciais quando a temperatura do ímã cai a um nível de funcionamento normal (NASAR, 1987).

As novas ligas de neodímio-ferro-boro podem ter produto energético acima de 300 kJ / m<sup>3</sup>. Contudo, existem problemas ainda não resolvidos relativos a máxima temperatura de operação que, atualmente, estão abaixo da temperatura considerada normal da maioria das máquinas elétricas convencionais. Pesquisadores estão investindo considerável esforço na tentativa de desenvolver um material que combine energia alta e um alcance razoável de temperatura de funcionamento (NASAR, 1987).

## **8 MOTOR COM ÍMÃS PERMANENTES DA WEG MOTORES ELÉTRICOS**

Os Servoacionamentos WEG são utilizados nas mais diversas aplicações industriais, onde, elevada dinâmica, controle de torque, precisão de velocidade e posicionamento são fatores decisivos para o aumento da qualidade e produtividade. Possuem todas estas características aliadas a um baixo custo, elevada performance e robustez.

Um Servoacionamento é composto de um motor e de um conversor de frequência para controle acionamento do motor. Um tipo de servoacionamento fornecido pela WEG Motores é:

- **Servoconversor SCA05**

- **Servomotor SWA**

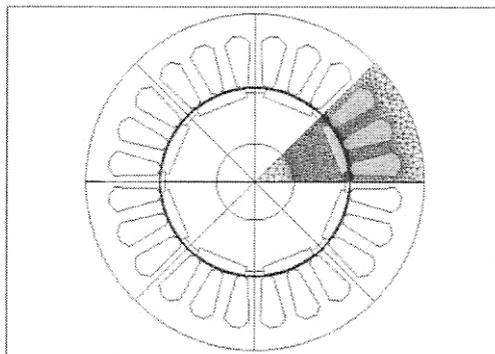
e possuem as seguintes aplicações:

- Empacotadeiras (dosadoras)
- Bobinadeiras
- Máquinas-ferramenta
- Máquinas de corte e solda (plásticos)
- Máquinas gráficas
- Sistemas de posicionamentos
- Retrofitting
- Mesas giratórias
- Esteiras com paradas programadas

- Máquinas de embalagens
- Alimentados de prensas
- Máquinas têxteis

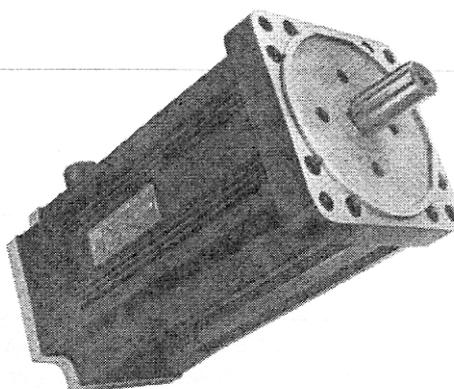
A Fig. 17 mostra uma vista em corte dos núcleos do estator e rotor do motor síncrono com ímãs permanentes (Servomotor SWA – Brushless AC), da WEG Motores, onde se pode observar o número de pólos, e a forma na qual os ímãs são dispostos na superfície do rotor. A Fig. 18 mostra a fotografia deste Servomotor.

**MOTOR SÍNCRONO DE ÍMÃS PERMANENTES  
(SERVOMOTOR BRUSHLESS AC)**



NTA-1

**Figura 17** – Vista em corte do motor síncrono com ímã permanente da WEG Motores.



**Figura 18** – Vista em corte do motor síncrono com ímã permanente da WEG Motores.

As características técnicas do servomotor são:

- Força contra-eletromotriz senoidal
- Rotação suave e uniforme em todas as velocidades

- Baixo nível de ruído e vibração
- Ampla faixa de rotação com torque constante
- Baixa manutenção (servomotores sem escovas)
- Elevada capacidade de sobrecarga
- Baixa inércia
- Resposta dinâmica rápida

As especificações técnicas são:

- Grau de proteção IP 55<sup>1</sup>
- Isolamento Classe F
- Realimentação por resolver
- Formas construtivas B5 (sem pés, fixado pela flange), V1 (sem pés, fixado pela flange para baixo) e V3 (sem pés, fixado pela flange para cima)
- Protetor térmico (PTC)
- Ponta de eixo com chaveta NBR 6375
- Ímãs terras raras NdFeB
- Rolamento com lubrificação permanente
- Retentor para velocidade do eixo
- Temperatura máxima de operação em regime permanente:  $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

## 9 CONCLUSÕES

As máquinas elétricas síncronas trifásicas possuem dois conjuntos de enrolamentos. Os enrolamentos do estator, também conhecidos como enrolamentos de armadura, são alimentados por corrente alternada trifásica, e produzem uma onda de fluxo magnético ou campo magnético girante, com frequência definida pela tensão de alimentação. Os enrolamentos do rotor, também conhecidos por enrolamentos de campo, alimentados por corrente contínua, produzem um campo magnético contínuo e estático ou simplesmente campo. Em projetos de máquinas de maior desempenho, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético, sendo o de maior desempenho os ímãs terras raras NdFeB e SmCo. Em algumas aplicações de menor desempenho e menos dispendiosas são utilizados ímãs cerâmicos (ferritas). A substituição dos enrolamentos de campo por ímãs permanentes, permite observar duas conseqüências imediatas: menor volume do rotor, uma vez que, os ímãs ocupam uma área menor comparado aos enrolamentos de cobre além do que, se não existem enrolamentos no rotor, também não será necessária corrente para alimentá-los. Estes dois fatores, aumentam a performance da máquina, aumentando o rendimento e a relação torque/volume.

## REFERÊNCIAS

---

- CULLITY, B. D. *Introduction to Magnetic Materials*. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
- FITZGERALD, A. E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S. D. *Electric Machinery*. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- FITZGERALD, A. E. KINGSLEY Jr., & KUSKO, A. *Máquinas Elétricas*. S. Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1973. 621p.
- GRAY, C. B. *Electric Machines and Drive Systems*. Longman Scientific & Technical. New York. 1989. 446 p.
- JILES, D. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*. London, Chapman and Hall, 1991.440p.
- KOSOW, I. L. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. R. Janeiro, Editora Globo, 1986. 667p.
- KRAUS, J. D. & CARVER, K. R. *Eletromagnetismo*. R. Janeiro, Guanabara, 1978. 780p.
- NASAR, S. A. *Handbook of Electric Machines*. New York, McGraw-Hill, 1987.
- NASAR, S. A. *Máquinas Elétricas*. S.Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1984. 216p.