

# NOVAS PERSPECTIVAS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS TRIFÁSICAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS

**Moisés de Mattos Dias**

Dr. Eng. Prof. Dpto Eng. Eletrônica – Feevale – ICET

**Lírio Schaeffer**

Dr. Ing. Prof. DEMET - UFRGS

**Arão de Matos Dias**

Dr. Eng. Prof. Dpto Eng. Mecânica – Feevale - ICET

**José Lesina César**

Dr. Eng. Prof. Dpto Eng. Mecânica - ULBRA

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo apresentar novas perspectivas sobre a utilização de materiais magnéticos sinterizados, obtidos pelos processos da metalurgia do pó (M/P), na construção de máquinas elétricas rotativas trifásicas (ou polifásicas). Materiais magnéticos duros (ímãs permanentes), de altas retentividade e coercitividade magnéticas, obtidos a partir da M/P, já são utilizados em substituição aos enrolamentos de campo, necessário nas máquinas elétricas para produzir um fluxo magnético constante e contínuo, fluxo este semelhante ao magnetismo remanente de um ímã permanente. Pesquisas apontam para a utilização de novos materiais magnéticos macio com elevada permeabilidade magnética, baixa coercitividade e alta resistividade elétrica, também obtidos a partir da M/P, em substituição aos núcleos magnéticos do estator e do rotor das máquinas elétricas, usualmente construídos de chapas de aço laminadas. Perspectivas bastante concretas indicam que estes novos materiais reduzirão as perdas, aumentando a performance e o rendimento das máquinas elétricas rotativas.

**Palavras Chaves:** materiais magnéticos sinterizados, metalurgia do pó, máquinas elétricas rotativas.

## ABSTRACT

The aim of this work is present new perspectives about use of sintered magnetic materials from powder metallurgy processes, for building triphase rotative electric machines. Hard magnetic materials with high magnetic retentivity and coercitivity, made by the powder metallurgy process, are already used substituting field winding which are needed in electric machines to produce a constant and continuous magnetic flux, which is similar to magnetic remanence of a permanent magnet. Researches point out the use of new soft magnetic materials with high magnetic permeability, low conductivity and high electric resistivity, obtained by powder metallurgy, substituting magnetic nuclei of stator and rotor of electric machines, usually produced from rolled steel sheets. Quite concrete perspectives indicate that these new materials will reduce losses, increasing performance and energy output of rotative electric machines.

**Key world:** sintered magnetic materials, powder metallurgy, rotative electric machines.

## Introdução

As máquinas elétricas rotativas (ou motores elétricos) são construídas a partir de núcleos ou pacotes compostos de chapas de aço magnético, laminadas e justapostas, circundados por um conjunto de fios de cobre nú esmaltado também conhecidos por enrolamentos. As partes magnéticas ativas das máquinas elétricas, ou seja, o rotor e estator, não são maciças; elas se compõem de chapas de aço magnético laminado de espessura de 0.35 a 0.5 mm, as quais são estampadas e empilhadas formando os núcleos magnético do rotor e do estator. Esta é a solução clássica para diminuir as perdas indesejáveis provocadas por correntes induzidas e efeitos de histerese nas chapas. O processo de fabricação do rotor e do estator são, desta forma, mais caros se comparados com o processo de fundição por exemplo, processo este que resultaria em núcleos maciços. Sob o aspecto da composição das chapas, elas representam um compromisso entre as características elétricas (resistividade) e magnéticas das chapas (permeabilidade).[1],[2]

Via de regra, os motores desenvolvem um torque (giram), a partir da interação entre dois campos magnéticos: os chamados enrolamentos de campo produzem um campo magnético contínuo e estático; os chamados enrolamentos de armadura produzem um campo magnético variável.[1],[2]

Em algumas máquinas elétricas, os enrolamentos de campo são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético, obtidos a partir dos processos da Metalurgia do Pó (M/P), também conhecidos por sinterizados. As mais importantes são: *Motores de corrente contínua (Mcc)*, *Motor de passo* e *a Máquina síncrona com ímã permanente*. [3],[4]

Novas perspectivas indicam que, ligas de materiais magnéticos macio, obtidos a partir de pó de ferro com outros elementos como fósforo, silício e níquel, poderão ser utilizadas em máquinas elétricas trifásicas, ou mesmo polifásicas, na construção dos núcleos do estator e rotor, usualmente obtido a partir de chapas de aço laminadas. Salienta-se que, certos núcleos de motores de pequeno porte (ou micro motores) já possuem certas partes magnéticas construídas a partir de materiais sinterizados.[5],[6],[7]

A M/P é um ramo relativamente novo da Metalurgia de Transformação, onde os pós das ligas constituintes são misturados, compactados em matrizes a partir de prensas e posteriormente as peças resultantes são aquecidas em fornos até temperaturas abaixo da temperatura de fusão da liga, etapa esta conhecida por sinterização. Por este motivo, materiais obtidos a partir dos processos da M/P também são conhecidos por sinterizados.

Empresas do setor, já fabricam pós de alta permeabilidade magnética, também conhecidos por microencapsulados, para uso em núcleos de estator e rotor de máquinas elétricas. Estes pós são obtidos a partir de ligas ferromagnéticas de alta permeabilidade, onde as partículas são envolvidas por resinas, sendo a mais empregada, as termofixas. A resina tem duas funções: unir e fazer uma isolação elétrica nas partículas de pós.[5] Entretanto, atualmente ainda não se conhecem motores de potências na faixa de 1 cv (ou maiores), construídos em nível industrial.

Pesquisas apontam que, o uso de material sinterizado em máquinas elétricas deverá conferir às mesmas características de desempenho e rendimento melhores, além de simplificar e baratear o seu processo de fabricação. As máquinas desenvolvidas a partir desta tecnologia, poderão ser aplicadas com vantagens em um grande número de acionamentos elétricos a velocidade variável, tais como bombas, ventiladores, compressores, motores para refrigeradores, ar condicionado, máquinas de lavar e automóveis e veículo em geral.[8]

Dadas as características dos materiais sinterizados, será possível obter-se máquinas mais leves e com rendimentos maiores, propiciando uma economia de energia significativa. A faixa de potência dos motores até 1 cv, incluem a grande maioria dos motores monofásicos produzidos no Brasil (cerca de 96%, segundo dados da ABINEE – Associação Brasileira de Industrias Eletro - Eletrônicas) e uma parcela significativa dos motores trifásicos (33%, segundo a ABINEE).[9] Observa-se que o rendimento desta faixa de motores é bastante baixo, da ordem de 40% para os

monofásicos e 70% a 80% para os trifásicos. Usando-se materiais sinterizados e dotando-se o motor de um controle de velocidade por meio de um conversor de frequência, o mesmo deverá apresentar, teoricamente, um rendimento acima de 90%. Motores desenvolvidos por esta tecnologia, poderão substituir motores convencionais fabricados com chapas numa série de aplicações, tais como: eletrodomésticos, automóveis, motores para a indústria, onde até o momento predominam o uso de motores de indução sem controle de velocidade ou motores CC e CA de escovas. Uma aplicação de grande interesse é em automóveis, uma vez que, a partir do acionamento proposto, estes poderão substituir com vantagens os tradicionais motores de corrente contínua.[8]

As perspectivas são mais interessantes ainda, quando se visualiza a hipótese de se construir máquinas elétricas com todas as partes magnéticas obtidas a partir da M/P. Assim, uma máquina elétrica síncrona, poderia ser construída com núcleo do estator, rotor e carcaça sinterizados, e com ímãs permanentes de alto produto energético em substituição aos enrolamentos de campo. Uma vantagem construtiva deste tipo de máquina seria adequar às ligas magnéticas sinterizadas dos núcleos do estator e rotor, à configuração e forma dos ímãs utilizados, além de se construir, estator e carcaça em uma única peça.

Acrescenta-se a isto, a possibilidade da inclusão, na construção dos núcleos das máquinas, de processos alternativos da M/P como o Modelamento de Pós por Injeção[10], o Forjamento no Estado Semisólido[11], a utilização de Pós Microencapsulados ou ainda Pós Impregnados com Resinas[5].

## **Histórico e perspectivas das máquinas elétricas**

As máquinas elétricas clássicas (máquina CC, Máquina Síncrona e de Indução) têm sido largamente usadas há quase um século em acionamentos. Neste ponto destacou-se desde o início a máquina de corrente contínua como a mais favorável para acionamentos em que velocidades variáveis são exigidas; o seu uso nestes tipo de acionamentos era indiscutível até o início dos anos 60, apesar do baixo rendimento obtido na maioria das aplicações. A produção em massa e a custos reduzidos de componentes eletrônicos a base de silício mudou sensivelmente este quadro. Usando-se a tecnologia de conversores de frequência estático, tanto a máquina de indução como máquina síncrona passaram a ser igualmente adequadas para acionamentos com velocidade variável, podendo substituir a tradicional máquina CC. A partir de 1960 constata-se um grande número de pesquisas na área de acionamentos de máquinas por meio de conversores estáticos a base de semicondutores. Houve assim nas últimas décadas um formidável avanço na tecnologia de semicondutores e na eletrônica de potência. É de consenso geral que a tecnologia de conversores para o acionamento de máquinas CA já atingiu atualmente o grau necessário de maturidade e confiabilidade; observa-se uma tendência mundial na substituição de sistemas que empregam a máquina de CC por sistemas que empregam máquinas de indução, síncronas ou variantes desta, tais como a máquina síncrona a ímãs permanentes e a máquina síncrona de relutância. Esta tendência se verifica tanto em potências médias como em altas potência. Como casos típicos de substituição de acionamentos CC por CA podem-se citar os trens modernos alemães (ICE), acionados por máquinas de indução, ou ainda o trem rápido francês (TGV), acionados por máquinas síncronas. Paralelamente, houve também neste período um grande avanço nas técnicas de controle de máquinas, destacando-se o uso de microprocessadores e a técnica de controle vetorial.[8]

Um dos principais progressos experimentados nos materiais de fabricação das máquinas elétricas ocorridos nas últimas 3 décadas foram, sem dúvida, o desenvolvimento de ímãs de alta densidade de energia, tais como os ímãs terras raras de samário-cobalto e de neodímio-ferro-boro. O maior inconveniente no uso dos terras raras é seu custo elevado, que representa um sério

impedimento para a sua utilização em larga escala. Apesar de seu maior custo, o seu uso é justificável tanto tecnicamente como economicamente em acionamentos a velocidade variável em potências até 100 kW. Este tipo de máquina elétrica confere características extremamente desejáveis para um grande número de aplicações práticas, tais como alto rendimento, baixa inércia do rotor e boa resposta dinâmica, além da alta relação potência/peso. O mercado atual de máquinas elétricas mostra uma tendência crescente no uso de máquinas a ímãs permanentes trabalhando em velocidade variável. Diferente das máquinas tradicionais, máquinas a ímãs necessitam de um conversor de frequência para a sua operação.[8]

Conforme se pode constatar pela bibliografia, nos últimos 30 anos as pesquisas se concentraram basicamente no desenvolvimento de novas topologias de conversores e novas técnicas de controle. Pode-se constatar, por exemplo, que as máquinas de indução sofreram poucos avanços em relação a sua topologia tradicional, sendo que a maioria dos acionamentos empregam ainda máquinas de fabricação normal. Com relação à máquina síncrona constata-se um desenvolvimento de inúmeras novas variantes para princípios já há muito estabelecidos, tais como máquinas a ímãs, máquinas de relutância, máquinas a relutância chaveada, motores de passo e máquinas híbridas, as quais foram impulsionadas pelo desenvolvimento de novos tipos de ímãs a base de terras raras. O desenvolvimento e otimização destes tipos novos de máquinas também foi em grande parte possível graças ao desenvolvimento de técnicas numéricas avançadas de projeto e análise, entre eles o método dos elementos finitos. Estas novas variantes utilizam, entretanto, em sua grande maioria, materiais convencionais para as partes ferromagnéticas, ou sejam os núcleos do estator e do rotor ainda são formados a partir de chapas de aço laminadas. Existem poucos trabalhos publicados sobre a utilização de materiais fundamentalmente novos nos núcleos magnético de máquinas.[8]

Dentro deste quadro, um dos maiores desafios para a engenharia dos materiais se constitui atualmente no desenvolvimento e a produção de materiais magnéticos mais baratos e com características adequadas para o regime de trabalho imposto pelas máquinas elétricas. Graças a avanços tecnológicos dos últimos anos, a engenharia de materiais tornou possível não apenas a fabricação de ímãs permanentes de alto produto energético, mas também o desenvolvimento e fabricação de materiais magnéticos capazes de substituir os núcleos dos estatores e rotores.[8]

Atualmente já são disponíveis processos de obtenção de materiais que apresentam alta permeabilidade magnética aliada à baixa condutividade elétrica. Um destes processos é a Metalurgia do Pó, por meio da qual pode-se obter peças maciças, sem a necessidade de laminação. O uso destes processos na fabricação de máquinas elétricas poderá tornar o processo de fabricação das mesmas significativamente mais barato e rápido, uma vez que o tradicional pacote de chapas das máquinas pode ser inteiramente substituído por peças sinterizadas maciças, tornando a máquina mais barata, mais eficiente (perdas menores) e com menor peso.[8]

O Brasil será, de acordo com previsões, no decorrer do sec. 21, o quarto maior produtor de veículos do mundo. Estes fatos fazem com que uma série de empresas invistam em tecnologia e produtos que possam ser oferecidas ao setor automotivo. Isto inclui a substituição de motores CC por motores CA. Existe, portanto, um interesse muito grande em se desenvolver novos tipos de máquinas e materiais que possam ser usados em acionamentos de corrente alternada, visando desenvolver uma alternativa viável de acionamento CA, que aproveite não só a tecnologia disponível de fabricação de materiais, mas também os novos conceitos e conhecimentos disponíveis para a fabricação e projeto da máquina e do conversor. A utilização do material magnético sinterizado em máquinas síncronas, deverá resultar nas seguintes vantagens em relação à utilização de chapas como: menor inércia, maior robustez, manutenção reduzida, menores perdas, levando a um melhor rendimento e economia de energia, menor tempo de fabricação, menores custos de produção (quando produzido em larga escala) e menores custo de operação, torque mais elevado para um mesmo volume de material ativo.[8]

Nas aplicações citadas tem sido usado tradicionalmente ou o motor de indução ou o motor de corrente contínua, nos quais a variação de velocidade se dá ou por métodos clássicos ou por meio de redutores mecânicos. Os métodos clássicos de controle de velocidade são, em geral, pouco eficientes, apresentados perdas consideráveis e assim baixo rendimento. O uso de máquina acionadas por conversores permite não só um controle suave, mas também mantém o rendimento do motor dentro de níveis mais altos. Além disso, são dispensados redutores mecânicos.[8]

Uma vez que, as aplicações de maior interesse são máquinas com velocidade variável, são necessários conversores estáticos que se destinam a fornecer tensão e freqüência variável para a alimentação das máquinas, possibilitando a variação de velocidade. Assim, a aplicação de novos materiais magnéticos, exigirá a construção de conversores adequados para cada máquina desenvolvida. Os conversores a base de transistores que utilizam a técnica PWM (Pulse Width Modulation) para a variação de tensão, tem se destacado nos últimos anos no acionamento de máquinas, devido às vantagens que apresenta.[8]

### **Fatores de desempenho e ligas sinterizadas**

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídas com chapas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda são construídas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos, consiste basicamente em laminação, estampagem (corte), um tratamento para isolação elétrica entre as chapas, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolação consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes.[12],[13] É importante salientar que as perdas relativas totais num pacote de chapas são consideravelmente menores que as perdas relativas numa bloco único maciço de mesmas dimensões.

Em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade ou resistência elétrica;
- Alta indução de saturação.

As ligas que podem ser utilizadas na obtenção dos núcleos das máquinas elétricas maciços a partir da M/P, tem como elemento básico o ferro, com algum outro elemento como silício ou fósforo por exemplo. Via de regra, estas ligas estão sendo estudadas e, aquelas de melhor desempenho, gradativamente estão sendo utilizadas em substituição aos pacotes de chapas laminadas. A Tab. 01 relaciona algumas ligas que podem ser utilizadas na construção de núcleos magnéticos e suas propriedades físicas de interesse.[6]

Liga	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$B_m$ [T]	$B_m$ [kG]	$B_r$ [T]	$B_r$ [kG]	$H_c$ [A/m]	$H_c$ [Oe]	$\mu_r$ [Ad.]	$\rho_e$ [ $\mu\Omega\cdot m$ ]
Fe	6,8	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900	0,14
	7,2	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,60	3.700	0,12
	7,4	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,50	4.700	0,11
Fe-0,45%P	7,0	1,23	12,3	0,99	9,9	96	1,20	4.800	0,23
	7,2	1,34	13,4	1,12	11,2	80	1,00		0,21
	7,4	1,46	14,6	1,26	12,6	60	0,75		0,20
Fe-0,8%P	7,0	1,27	12,7	1,08	10,8	118	1,48	-	0,32
	7,2	1,32	13,2	1,13	11,3	119	1,49		0,30
	7,4	1,42	14,2	1,15	11,5	69	0,87		0,28
Fe-1,0%P	7,0	1,35	13,5	1,13	11,3	67	0,84	-	0,40
	7,2	1,38	13,8	1,15	11,5	64	0,80		0,38
	7,4	1,47	14,7	1,25	12,5	62	0,78		0,35
Fe-3%Si	6,8	1,17	11,7	0,94	9,4	104	1,30	4.900	0,59
	7,0	1,31	13,1	1,09	10,9	92	1,15		0,55
	7,2	1,39	13,9	1,18	11,8	80	1,00		0,52
Fe-50%Ni	6,8	0,93	9,3	0,71	7,1	21	0,26	21.000	0,78
	7,1	1,09	10,9	0,80	8,0	20	0,25		0,69
	7,5	1,27	12,7	0,94	9,4	19	0,24		0,60
Fe-81%Ni- 2%Mo	7,8	0,72	7,2	0,48	4,8	6	0,07	77.000	0,60
Fe-50%Co-2%V	7,2	1,24	12,4	0,73	7,3	175	2,2	-	-

Tab. 01 - Quadro comparativo das propriedades físicas das diversas ligas sinterizadas magneticamente macias

### Protótipos de máquinas trifásicas a partir de materiais sinterizados

A UFRGS desenvolveu três máquinas trifásicas em parceria com outras universidades (PUCRS e FEEVALE), com a colaboração de fábrica de motores (Eberle e a WEG).

A Fig. 1 mostra a fotografia do núcleo do rotor do motor de relutância, desenvolvido a partir de uma liga Fe-Ni50%.

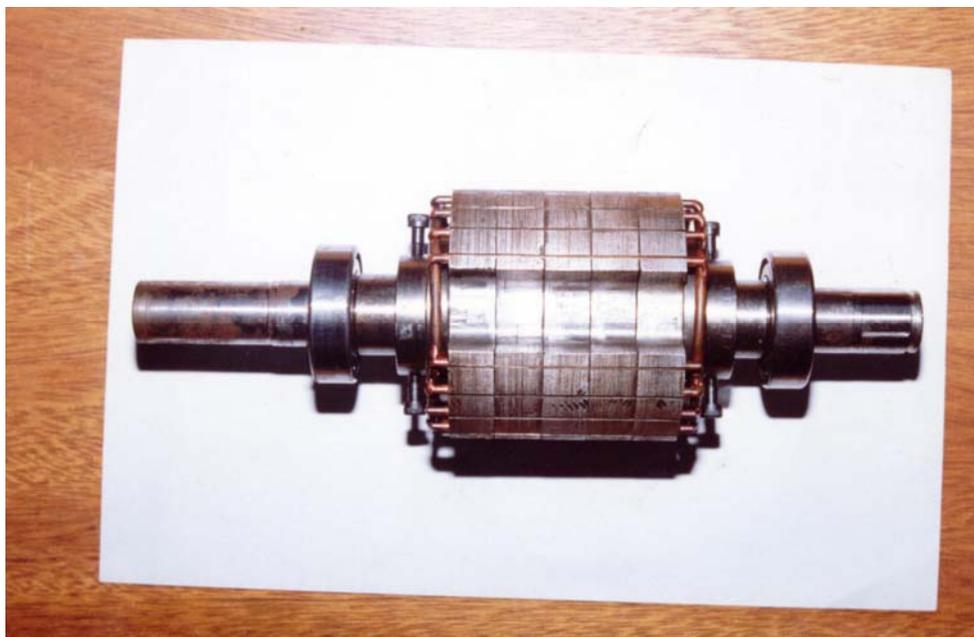


Fig. 1 - Núcleo do rotor sinterizado liga Fe-Ni50% de um motor de relutância

O rotor foi montado numa carcaça de um motor de indução de 2 cv (Motor Eberle), conforme mostra a fotografia da Fig. 2.



Fig. 2 - Vista frontal do conjunto rotor, carcaça do motor de relutância

Os testes de desempenho foram realizados de acordo com as normas de testes de motores elétricos convencionais e apresentou as seguintes características:

- Rotação = 1800 RPM
- Melhor desempenho = ligação Y

- Tensão nominal (por fase) = 185 V
- Potência nominal = 736 W - 1 cv
- Corrente nominal (por fase) = 4,60 A
- Torque nominal = 3,92 N.m
- Potência aparente = 2,589,42 VA
- Potência ativa = 1180 W
- Rendimento = 0,63
- Fator de potência = 0,46
- Torque de partida = 14,13 N.m
- Potência de partida = 3610 W - 4,9 cv
- Corrente de partida = 11 A
- Torque máximo = 5,00 N.m
- Resistência dos enrolamentos de armadura por fase = 3,84  $\Omega$
- Temperatura da carcaça = 67 °C
- Temperatura junto aos enrolamentos = 106 °C

A partir de uma análise dos resultados obtidos, constata-se que o desempenho do protótipo construído nesta pesquisa, apresentou parâmetros muito semelhantes aos motores de relutância trifásico com gaiola conforme dados bibliográficos. Parâmetros como potência nominal, torque de partida, rendimento e fator de potência, estão bem próximos dos parâmetros indicados pela literatura.

A Fig. 3 mostra a fotografia o núcleo do estator de um motor de indutância, desenvolvido a partir de uma liga Fe-P.



Fig. 3 - Núcleo do estator sinterizado liga FeP de um motor de indução

O núcleo do estator foi montado numa carcaça de um motor de indução de ¼ de cv (Motor WEG), conforme mostra a fotografia da Fig. 4.

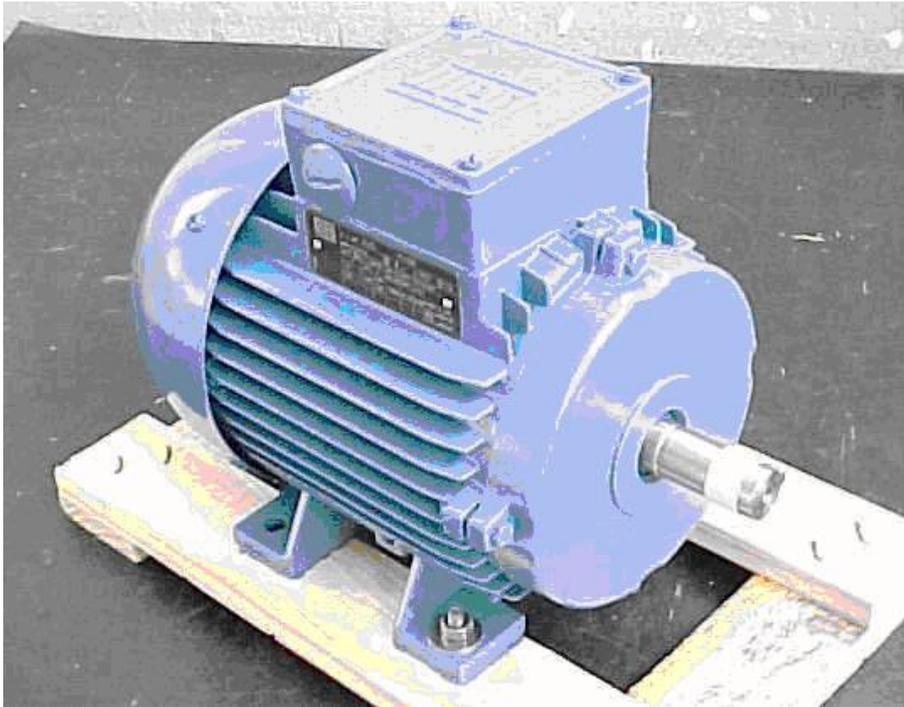


Fig. 4 - Fotografia do motor de indução

Os testes de desempenho foram realizados de acordo com as normas de testes de motores elétricos convencionais e apresentou as características mostradas fotografia da placa de identificação do motor da Fig. 5.

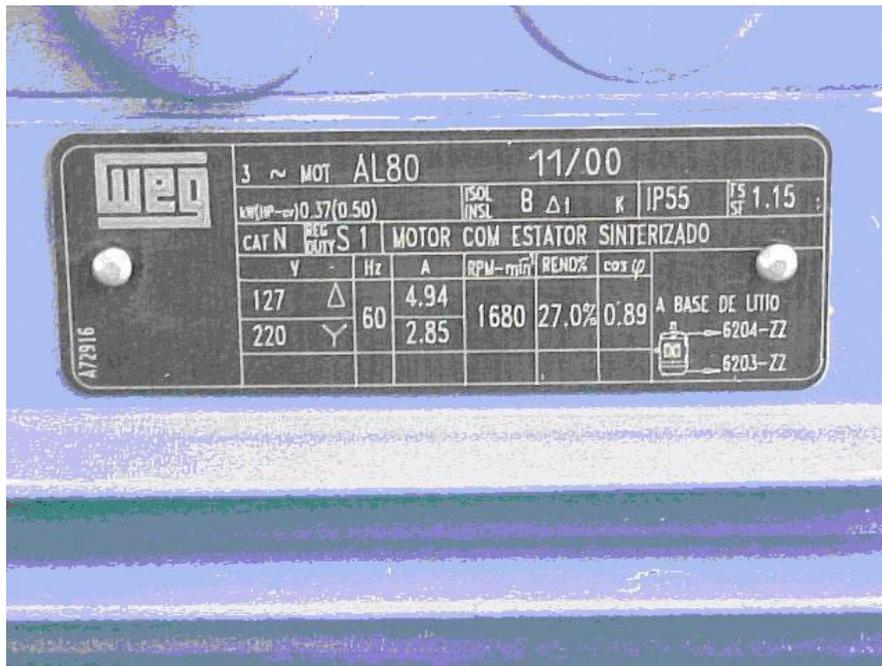


Fig. 5 - Fotografia da placa de identificação do motor de indução

## Conclusão

A topologia dos núcleos magnéticos ativos das máquinas elétricas rotativas bem como o acionamento a partir de conversores estáticos, encontram-se do limite de seu aprimoramento. A partir desta constatação, é consenso entre projetistas de motores elétricos que somente o desenvolvimento e aplicação de novos materiais poderá aumentar o rendimento das máquinas. Assim, o desenvolvimento de novos materiais através dos processos da metalurgia do pó em substituição aos materiais convencionais utilizados em máquinas elétricas deverão melhorar sua performance em, pelo menos, três aspectos: diminuição das perdas com a utilização de materiais magnéticos macios de alta resistividade elétrica e alta permeabilidade magnética, na construção dos núcleos de estatores e rotores; redução no custo e etapas na produção da máquina com a manufatura de blocos únicos de estatores e rotores, dispensando assim a laminação e empacotamento das chapas; menor manutenção quando comparado às máquinas elétricas com escovas e anéis deslizantes (ou comutadores), necessários para captação de corrente para alimentação dos enrolamentos do rotor, como é o caso das máquinas síncronas trifásicas com alimentação de campo externo e as máquinas de corrente contínua.

## Referências bibliográficas

- FITZGERALD, A.E. KINGSLEY Jr., & KUSKO, A. Máquinas Elétricas. S.Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1973. 621p.
- NASAR, S.A. Máquinas Elétricas. S.Paulo, McGraw Hill do Brasil, 1984. 216p.
- NASAR, S.A. Handbook of Electric Machines. New York, McGraw-Hill, 1987.
- FITZGERALD, A.E, KINGSLEY, Jr. C, UMANS, S.D. Electric Machinery. New York, McGraw-Hill Inc, 1990. 599p.
- JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
- KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.
- ITOH, Y., TAKEDA, Y., KUROISHI, N. AC Magnetic Properties of New Fe--Si Sintered Alloy. Modern Developments in Powder Metallurgy. v. 17. Special Materials, Toronto, Canada, 17-22 June 1984. Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540, USA, 1985.p.641-655.
- PEREIRA, L. A.. Aplicação de Materiais Sinterizados em Máquinas Elétricas. Trabalho de Publicação Interna. Depto Eng. Elétrica. PUCRS. 2000
- Catálogo da ABINE – Motores Elétricos – 1998
- GERMAN, R.M. Powder Injection Molding. New Jersey, Metal Powder Industries Federation, 1990, 521p.
- KENNEY, M.P.; COURTOIS, J.A.; EVANS,R.D.; FARRIOR, G.M.; KYONKA,C.P. and KOCH, A.A.-Semisolid Metal Casting and Forging-ALUMAX Eng., Metals Handbook, V15,1989, p.331-334.

REBORA, G. La Construcción de Máquinas Eléctricas. Barcelona, Hoepli - Editorial Científico-Médica, 1969. 999p.

RICHARDSON, D.V. Rotating Electric Machinery and Transformer Technology. Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982. 636p.