

# SIMULAÇÃO DE UM GERADOR EÓLICO COM IMÃS PERMANENTES E NÚCLEO OBTIDO POR METALURGIA DO PÓ

Braga, E. C. <sup>1</sup>  
Bittencourt, S. D. <sup>2</sup>  
Pauletti, P. <sup>3</sup>  
Cerva, L. L. <sup>4</sup>  
Schaeffer, L. <sup>5</sup>  
Dias, M. M. <sup>6</sup>

- <sup>1</sup> Graduando em Engenharia Eletrônica e Bolsista de Iniciação Científica PROBITI/Fapergs, Grupo de Pesquisa em Materiais Metálicos, Universidade Feevale RS-239, 2755. CEP: 93525-000, Novo Hamburgo, RS, Brasil. [ecbprojeto@gmail.com](mailto:ecbprojeto@gmail.com)
- <sup>2</sup> Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970. Porto Alegre, RS, Brasil. [sergio.bittencourt@ufrgs.br](mailto:sergio.bittencourt@ufrgs.br)
- <sup>3</sup> Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. [philippe.pauletti@ufrgs.br](mailto:philippe.pauletti@ufrgs.br)
- <sup>4</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. [luciano.cerva@ufrgs.br](mailto:luciano.cerva@ufrgs.br)
- <sup>5</sup> Prof. Dr. – Eng. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. [schaefer@ufrgs.br](mailto:schaefer@ufrgs.br)
- <sup>6</sup> Prof. Dr – Eng. Coordenador do Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas da FEEVALE e Consultor do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970. Porto Alegre, RS, Brasil. [moisesdias@feevale.br](mailto:moisesdias@feevale.br)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

## Resumo

Este trabalho teve por objetivo a simulação de uma máquina elétrica síncrona trifásica, a ser utilizada como gerador de até 10 kW, com imãs permanentes de alta performance. Foram construídos corpos de prova através dos processos da Metalurgia do Pó para a obtenção das propriedades magnéticas dos materiais em estudo. O núcleo do rotor, usualmente de chapas de aço laminadas, foi simulado na forma de um bloco maciço com diferentes ligas ferro-magnéticas em um software de elementos finitos (FEM). Os usuais núcleos obtidos por estampagem de chapas apresentaram uma indução de saturação de 2,02 T e torque de 34,49 N.m, contra 2,61 T e 33,6124 N.m do material sinterizado. Os resultados obtidos na simulação do rotor sinterizado demonstram possibilidade para sua utilização em sistemas convencionais ou ainda em conjunto com fontes de tensão variável, para compensar sua menor indução máxima. A proposta de produzir núcleos por metalurgia do pó tem o potencial de ser viável tecnicamente, devido à facilidade de produção e montagem, devendo ser observada a necessidade de alteração de parâmetros de entrada, como a tensão.

**Palavras-chave:** Metalurgia do pó; Materiais Magnéticos; Máquinas Elétricas Síncronas; Simulação por Elementos Finitos.

## SIMULATION OF A WIND GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS AND CORE OBTAINED BY POWDER METALLURGY

### Abstract

This paper has the purpose to simulate a three-phase synchronous electric machine for using as a generator to 10 kW, with high-performance permanent magnets. Specimens were constructed through the processes of powder metallurgy to obtain the magnetic properties of the materials under study. The rotor core, usually of steel sheet rolled, was simulated in the form of a massive block, with different ferro-magnetic alloys in a finite element software (FEM). Cores obtained by the usual stamping plates showed a saturation induction of 2.02 T and torque of 34.49 Nm, compared with 2.61 T and 33.6124 Nm of the sintered material. The results in the simulations of the sinterized rotor show a possibility for using in conventional systems or in conjunction with variable voltage sources to compensate their lower maximal induction. The proposal to produce cores by powder metallurgy has the potential to be technically feasible due to the easiness of production and assembly, as such must be observed the need of input parameters modification, such as voltage.

**Key words:** Powder Metallurgy; Magnetic Materials; Synchronous Electrical Machines; Finite Elements Simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Na construção do núcleo (rotor e estator) de máquinas elétricas, normalmente são utilizadas chapas de aço laminadas e isoladas eletricamente. Uma forma de construção alternativa às tradicionais chapas laminadas são os núcleos produzidos por metalurgia do pó. Algumas das vantagens deste modo construtivo são os menores tempos de produção, custos, desperdício de material e um menor impacto das correntes parasitas nos núcleos sinterizados. [1]

Materiais magnéticos de maiores aplicações são os magnéticos duros a partir de pós de Nd-Fe-B e magnéticos macios a partir de pós de ferro. O método mais apropriado de introdução de novos materiais é considerar suas propriedades no estágio de projeto de máquinas elétricas. [2]

As possibilidades de concepção de uma nova geração de máquinas elétricas, com parâmetros operacionais semelhantes ou superiores e custos reduzidos estão relacionadas com o desenvolvimento de novas características de materiais para circuitos magnéticos. Os estudos atuais estão direcionados a verificar se a aplicação de “*powder magnetic circuits*” em motores elétricos é praticável e intencionada. [3], [4]

A necessidade de estudos mais aprofundados neste tema é de grande relevância para a consolidação destes materiais para a aplicação em larga escala. Dessa forma, este artigo abordará a análise das propriedades através da simulação por elementos finitos (FEM) e a verificação do desempenho (torque) e da intensidade do fluxo magnético, comparando os resultados obtidos à tecnologia convencional.

## 2 GERADOR SÍNCRONO SIMULADO

### 2.1 Projeto do gerador síncrono com ímãs permanentes

A máquina síncrona com ímãs permanentes simulada neste trabalho foi projetada baseando-se em um motor de indução trifásico de alto rendimento, com quatro pólos e 10 CV. O núcleo do rotor, construído de chapas de aço laminadas foi substituído por um bloco, composto por cinco partes de material sinterizado a partir da liga de ferro com 1% estearato de zinco. A figura 1(a) apresenta o motor utilizado como base para o trabalho.

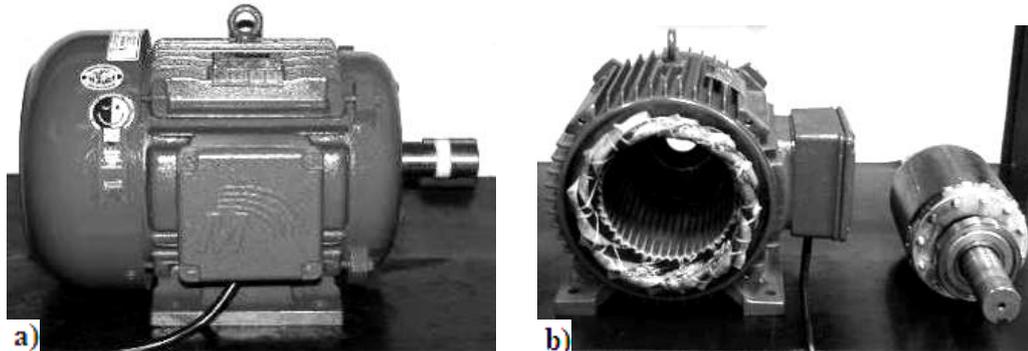


Figura 1 – a) Motor de indução trifásico de 10CV; b) Motor parcialmente desmontado.

A topologia e as dimensões do núcleo do rotor foram baseadas no projeto clássico das máquinas de relutância convencionais a partir das características e dimensões do rotor original de um motor de indução de 10 CV. A Figura 1(b) mostra o motor de 10 CV parcialmente desmontado, podendo assim proceder na obtenção das cotas do rotor. A partir do modelo e dimensões do núcleo pode-se então dimensionar o rotor a ser simulado. [5], [6]

A figura 2 mostra a topologia do rotor no plano horizontal.

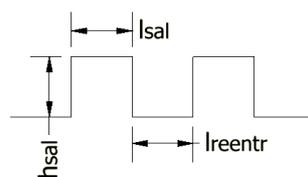


Figura 2 – Topologia do rotor no plano horizontal.

A relação utilizada para o cálculo das geometrias do rotor define a altura da saliência  $h_{sal}$  [mm] em aproximadamente 50% do raio do núcleo. [5], [6]

O raio do núcleo do rotor  $r_{nr}$  [mm], é:

$$r_{nr} = \frac{\phi_{cm}}{2} \frac{\phi_{eix}}{2} \quad r_{nr} = \frac{124,1}{2} \frac{49,8}{2} = 37,15 \quad (\text{Equação 1})$$

Sabendo que  $\phi_{cm}$  é o diâmetro do rotor e  $\phi_{eix}$  é o diâmetro do eixo, então:

$$h_{sal} = \frac{37,15}{2} = 18,575$$

A largura da saliência  $l_{sal}$  [mm] e a largura da reentrância  $l_{reent}$  [mm] são definidas a partir da relação:<sup>5,6</sup>

$$\alpha = \frac{l_{sal}}{l_{sal} + l_{reent}} \quad \text{(Equação 2)}$$

A constante  $\alpha$  relaciona estas larguras. Nas máquinas trifásicas síncronas de relutância,  $\alpha$  varia de 0,6 a 0,7. O perímetro do rotor foi calculado como: [5]

$$4(l_{sal} + l_{reent}) = \pi \cdot \varphi_{cm} \quad \text{(Equação 3)}$$

então:

$$l_{sal} + l_{reent} = \frac{\pi \cdot 124,1}{4} = 97,41$$

Admitindo  $\alpha = 0,65$ :

$$l_{sal} = 97,41 \cdot 0,65 = 63,32 \quad l_{reent} = 97,41 - 63,32 = 34,07$$

Em graus  $\theta_{sal} = 58,5^\circ$  e  $\theta_{reent} = 31,5^\circ$ . Entretanto, para facilitar a usinagem ficou definido  $\theta_{sal} = 55^\circ$  e  $\theta_{reent} = 35^\circ$ .

A figura 3 mostra as cotas do rotor em corte transversal. O projeto do rotor sinterizado foi realizado levando em conta as características do processamento de ligas por metalurgia do pó, cujo formato adequado é o menos complexo possível, para a possibilidade de produção em larga escala e também para evitar falhas, reentrâncias e trincas no material.

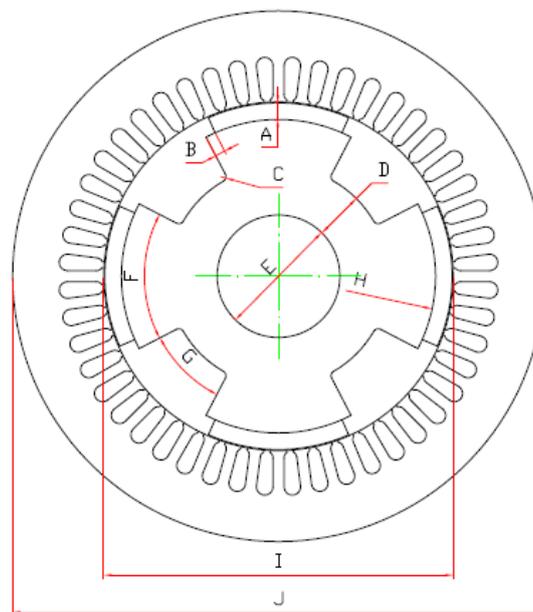


Figura 3 - Cotas do rotor em corte transversal – A = 6,55; B = 4; C = 2; D = 18,575; E = 49,8; F = 55°; G = 35°; H = 62,05; I = 138; J = 210.

## 2.2 Dimensionamento dos ímãs

Os ímãs utilizados são compostos de NdFeB (Neodímio-ferro-boro) com revestimento de Níquel, pois apresentam ótimas características magnéticas. [7]

A espessura dos ímãs em [mm] foi definida pela equação: [5], [6]

$$e_{\text{ímãs}} = \frac{\varphi_{rmi}}{2} = \frac{\varphi_{cm}}{2} = \frac{137,2}{2} = \frac{124,1}{2} = 6,55 \quad (\text{Equação 4})$$

O raio de curvatura dos ímãs é igual metade do diâmetro da cavidade da matriz, ou seja, 62,05 mm, e o comprimento igual à 191 mm. A figura 4 mostra as cotas dos ímãs:

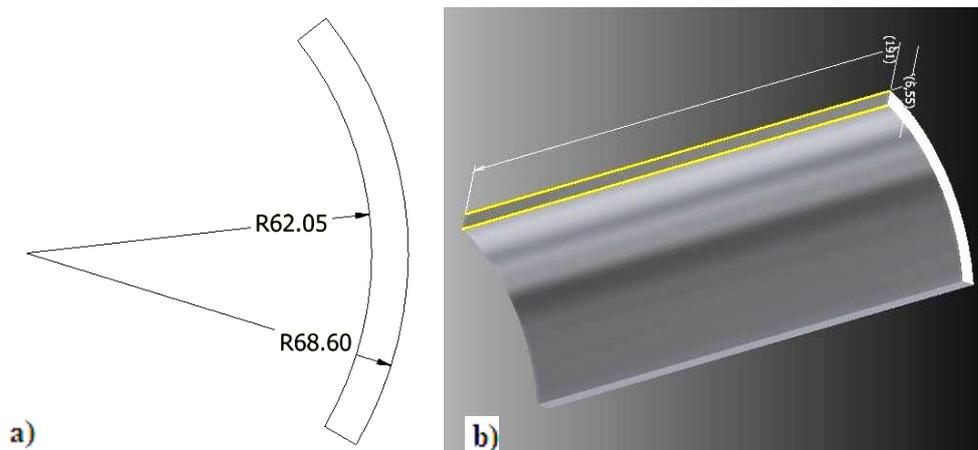


Figura 4 – a) Seção transversal do ímã (2D); b) Esboço 3D do mesmo com cotas.

### 2.3 Características da máquina síncrona

A figura 5(a) representa os rolamentos, o eixo e as cinco peças usinadas para concepção do rotor conforme o projeto da máquina.<sup>6</sup> Na seqüência, as peças foram introduzidas no eixo do gerador sob pressão, utilizando-se uma prensa. Posteriormente os ímãs foram colocados (colados) para formar quatro pólos. A figura 5(b) mostra o rotor da máquina síncrona montado.

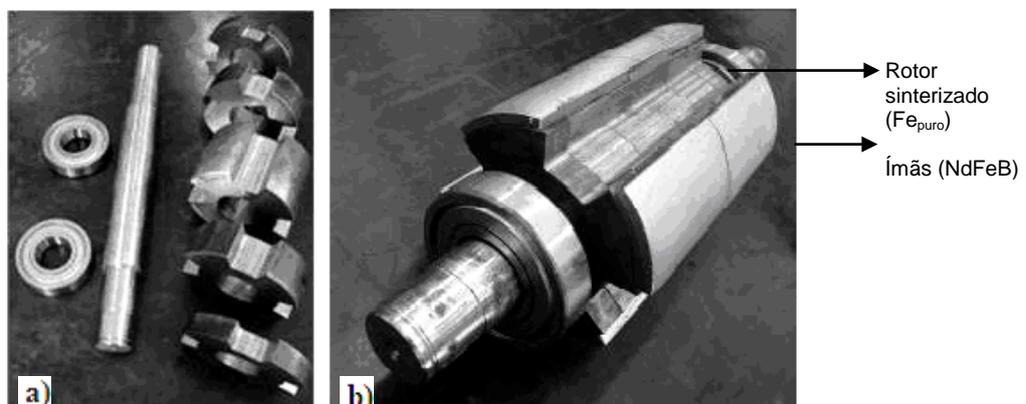
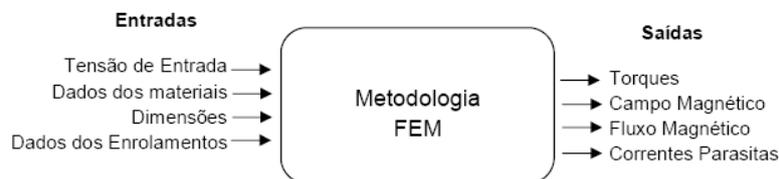


Figura 5 – (a) Peças do núcleo do rotor desenvolvido – (b) Rotor desenvolvido com os ímãs fixados.

### 3. SIMULAÇÃO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA COM IMÃS PERMANENTES

Os resultados das interações eletromagnéticas foram obtidos através de simulações em software de elementos finitos FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A idéia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples (ex. triângulo). [8]

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida torna-se o problema mais fácil de resolver. Através do processo de discretização é formado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis. O que seria impossível de resolver sem o auxílio de processadores com algoritmos. A figura 10 mostra um diagrama esquemático sobre a metodologia FEM. [8]



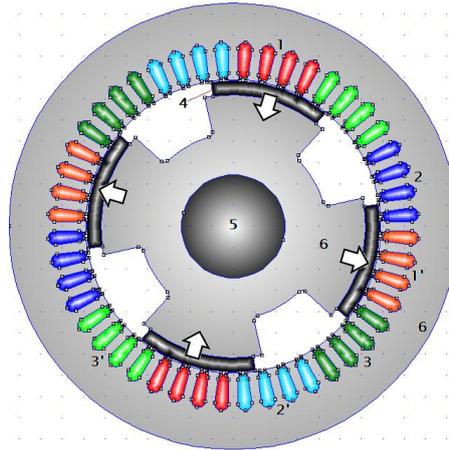
**Figura 6 – Metodologia FEM**

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um software de simulação por elementos finitos é difícil e por muitas vezes impreciso. Através do FEMM 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica e o fluxo concatenado em cada bobina. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina elétrica rotativa e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho. [8]

#### 3.1 Procedimento para simulação

A simulação foi efetuada partindo do projeto dimensional do motor, conforme as medidas apresentadas na figura 3. Foi utilizado a metodologia de bobinamento em série para um motor de 4 pólos, sendo 12 espiras com fio 12AWG por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada, conforme dados do motor, foi de 14,2A, para uma tensão de 380V - Y. Cabe lembrar que trata-se de um motor para utilização em frequência padrão de 60Hz.

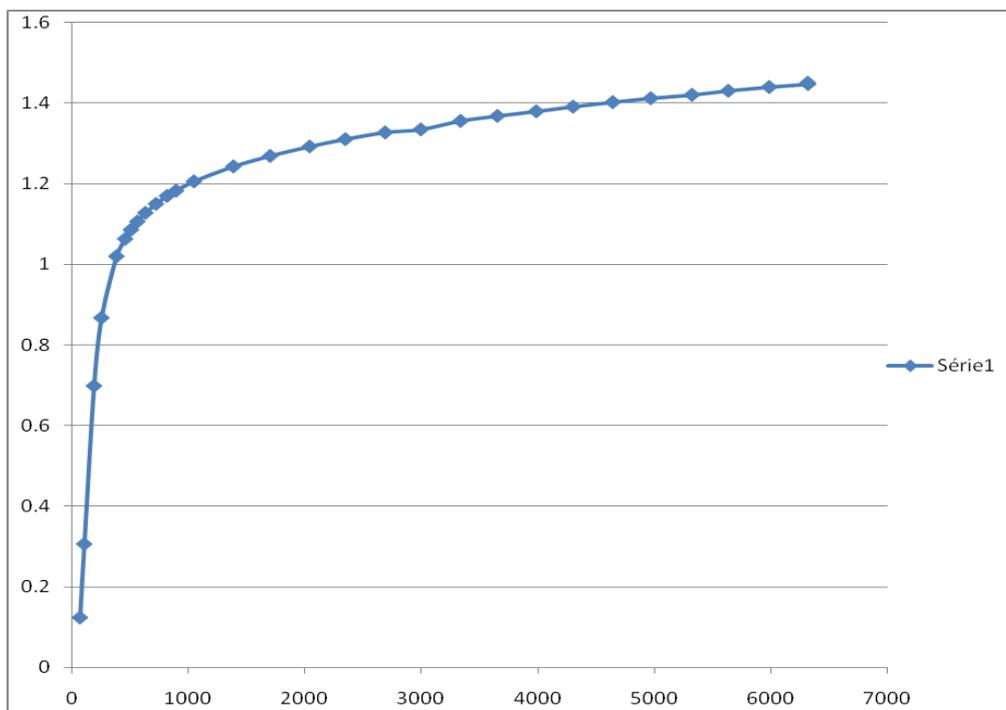
São formados no rotor quatro pólos, pelos ímãs. Suas polaridades devem ser invertidas a cada sequência, para que se observe fluxo magnético no rotor. A figura 7 ilustra a montagem final do motor para a simulação no software de elementos finitos – FEMM 4.2.



**Figura 7 – Corte transversal do motor analisado no software de simulação: 1, 2 e 3 – Pólos para correntes “U”, “V” e “W”, respectivamente; 1’, 2’ e 3’ – Pólos para correntes “-U”, “-V” e “-W”, respectivamente; 4 – Ímãs de NdFeB com suas respectivas orientações; 5 – Eixo do motor; 6 – Núcleo do rotor e do estator de Ferro.**

Foram efetuadas simulações para núcleo do rotor com material laminado, aço elétrico comum, em seguida para os núcleos com material sinterizado, utilizando Fe puro e as ligas Fe1%P, Fe1%Si, Fe2%P, Fe3%P, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50Ni. O teor das adições de silício, fósforo e níquel nas ligas foram baseadas em dados da literatura e em resultados obtidos com corpos de prova testados no LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica). Foram analisadas propriedades mecânicas (densidade, dureza e tenacidade) e perdas magnéticas (perdas por ciclo de histerese e perdas correntes de foucault). [2], [3], [4]

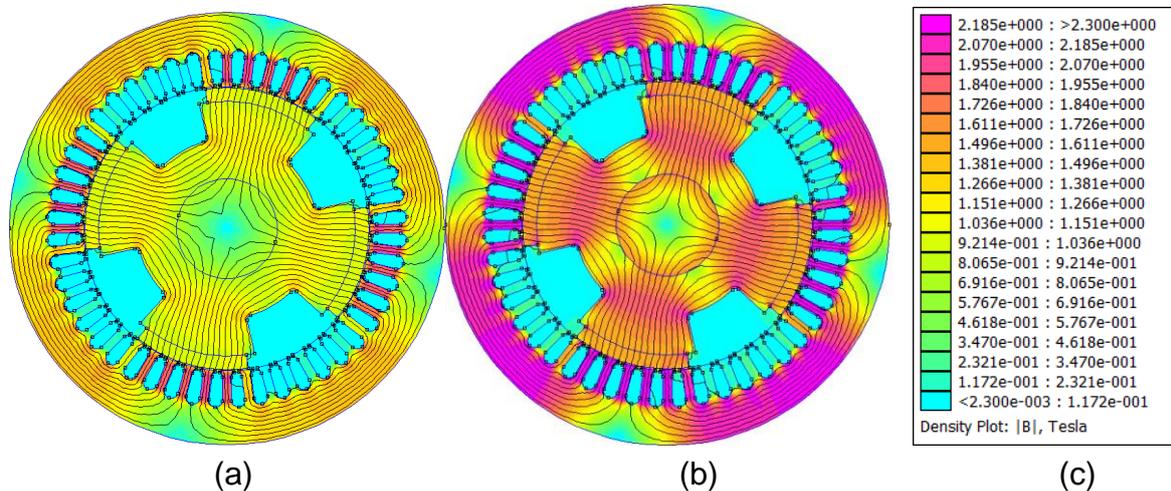
Após obtenção das curvas de magnetização dos materiais sinterizados, gerando as curvas de magnetização como a da liga Fe2%P demonstrada na figura 8, estes dados foram introduzidos no software FEMM 4.2.



**Figura 8 – Curva de magnetização do Fe2%P sinterizado o qual foi utilizado na simulação.**

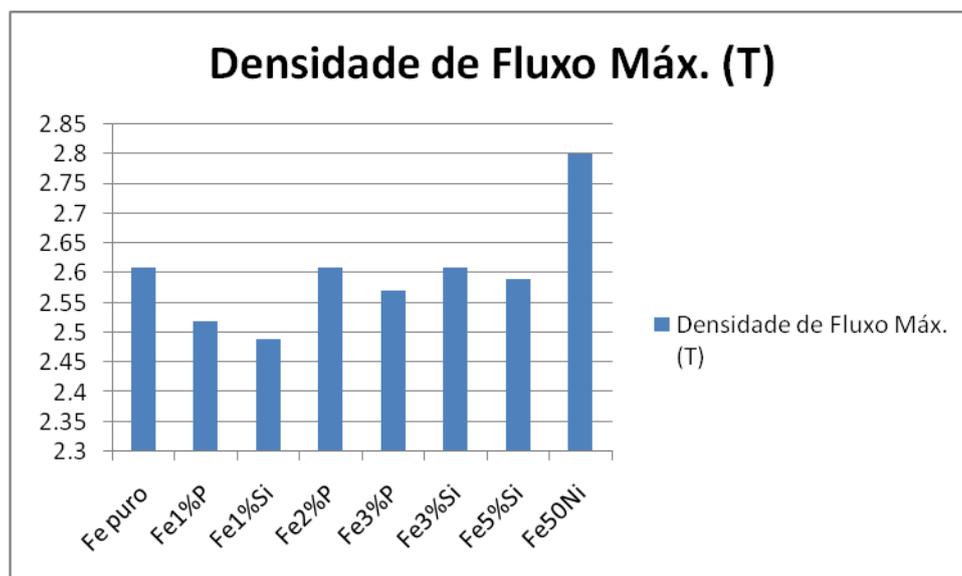
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas com o software FEMM 4.2 mostraram as linhas de campo [9] expostas na figura 9(a) para o rotor de chapas, 9(b) para o rotor Fe2%P sinterizado. A figura 9(c) apresenta a legenda com os respectivos valores dos componentes de densidade de campo B [T].

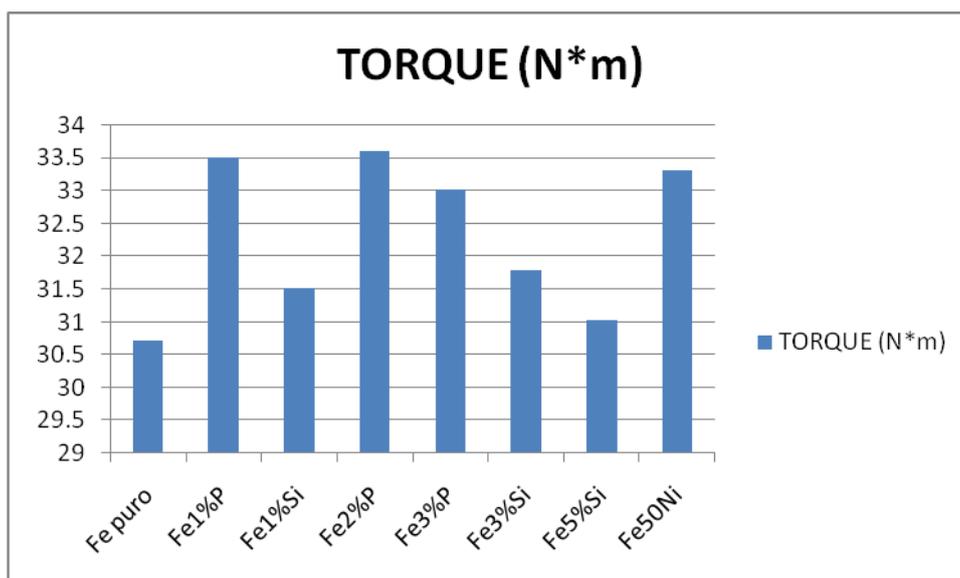


**Figura 9 – (a) Fluxo magnético no motor com material laminado, aço elétrico; (b) Fluxo magnético no motor com a liga Fe2%P sinterizado; (c) Legenda da intensidade de campo em “a” e “b”.**

A partir dos resultados de fluxo magnético no motor, foi possível fazer uma análise da liga que possui maior densidade de fluxo magnético, conforme apresenta o gráfico da figura 10. E na figura 11 compara-se o desempenho em relação ao torque das ligas sinterizadas.



**Figura 10 – Densidade de fluxo magnético no rotor, comparando ligas sinterizadas.**



**Figura 11 – Torque simulado das diferentes ligas de material sinterizado.**

Geralmente nas análises de fluxos é possível prever que, quanto maior a intensidade destes, maior será a tendência de ser observado um acréscimo no valor de torque. A tabela 1, com os dados de torque e densidade de fluxo máximo, obtidos através do software, demonstra que não há uma relação direta entre a densidade de fluxo máximo do material sinterizado e o torque do motor, pois, a maior densidade de fluxo não corresponde ao maior torque. Porém isso se deve em grande parte a remanência das ligas sinterizadas.

**Tabela 1 – Comparativo entre densidade de fluxo máximo e torque.**

Núcleo	Torque (N.m)	Densidade de Fluxo Máximo (T)
Chapas	34,49	2,02
Fe (puro)	30,724	2,61
Fe1%P	33,5141	2,52
Fe1%Si	31,5262	2,49
Fe2%P	33,6124	2,61
Fe3%P	33,0186	2,57
Fe3%Si	31,7996	2,61
Fe5%Si	31,0283	2,59
Fe50Ni	33,3133	2,80

Deste modo conforme se observa na tabela 1, o Fe2%P obteve maior torque se comparado as demais ligas sinterizadas e possuindo menor desempenho se comparado somente às chapas de aço silício. O Fe-Si das ligas sinterizadas obteve um menor desempenho devido a não apresentar fase líquida a 1150°C, e assim não se difundindo homogêaneamente no ferro puro durante a sinterização, acarretando em propriedades magnéticas inferiores ao Fe-P que por sua vez possui temperaturas de sinterização menores devido à formação de fase líquida transiente. [10]

## 5 CONCLUSÃO

Os testes e simulações realizados com material sinterizado apresentaram resultados que podem ser considerados satisfatórios, se comparados com motores

construídos a partir do método convencional de chapas laminadas. O fluxo magnético no núcleo em relação às diferentes ligas simuladas não apresentou uma relação direta com o aumento do torque, devido às características da histerese de cada material. A liga Fe2%P se mostrou eficiente em relação às demais, devido à formação de fase líquida transiente em temperaturas de sinterização menores, além de que a adição de fósforo aumenta a resistividade, e diminui a coercividade do ferro. Mesmo possuindo um menor torque em relação às chapas de aço silício a liga sinterizada de Fe2%P se torna uma alternativa viável se levado em conta as vantagens dos processos de produção por M/P, com a possibilidade de se obter um maior torque em aplicações que tenham potência de entrada com possibilidade de variação da tensão aplicada. A proximidade alcançada com o material sinterizado em relação a dados comerciais possibilita que o estudo da produção via M/P seja prosperada para a concepção de motores utilizados como geradores.

### Agradecimentos

Os autores agradecem aos financiadores FINEP, FAPERGS, CNPq.

### REFERÊNCIAS

- 1 Rodrigues, D. Materiais Magnéticos Produzidos por Metalurgia do Pó. São Paulo – Divisão de Metalurgia – IPT, 2008. 4p.
- 2 Slusarek, B.; Dlugiewicz, L. Powder magnetic materials – area of application. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium. Maio, 2006.
- 3 Barbara Slusarek, Piotr Gawrys, Marek Przybylski, New PM magnetic developments, Metal Powder Report. Volume 64, Numero 6 (2009) 18.
- 4 B. Slusarek, L. Dlugiewicz, P. Gawrys, M. Przybylski. Magnetolectric DC Motors with powder magnetic circuits. Proceedings of Electrotechnical Institute, Issue 240, 2009.
- 5 Fitzgerald, A.E, Kingsley, Jr.C., Umans, S.D., Electric Machinery. New York, McGraw-Hill Inc, 1990.
- 6 Siemens. Motores Trifásicos de Baixa Tensão. Catálogo.2010.20p.
- 7 Departamento de P&D do Produto – Motores – WEG Equipamentos Elétricos S.A., Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Freqüência WEG, Artigos Técnicos WEG, Jun. 2008.
- 8 J. A. Lewis Esswein Jr; M. de Mattos D.; L. L. Cerva; J. S. Barboza; L. Schaeffer, Estudo Comparativo de Ligas Magnéticas Através de Simulação por Elementos Finitos, 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Nov. 2008.
- 9 Meeker, D., Finite Element Method Magnetics. User's Manual, v.4.2, 2010.
- 10 Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels; Neerav Verma; Dr. A. Upadhyaya; Department of Materials and Metallurgical Engg. INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY, KANPUR.