



# ANALISES DE DESEMPENHO POR ELEMENTOS FINITOS DE UM MICRO-MOTOR DE PASSO COM QUATRO ROTORES DE MORFOLOGIAS DIFERENTES

MAIQUEL E. PFINGSTAG<sup>1</sup>  
ANDRÉ CARVALHO TAVARES<sup>2</sup>  
MOISÉS DE MATTOS DIAS<sup>3</sup>  
Raul<sup>4</sup>  
Lírio Schaeffer<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGEM). Laboratório de Transformação Mecânica. (LdTM), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. [maiquel.pfingstag@ufrgs.br](mailto:maiquel.pfingstag@ufrgs.br)

<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, Porto Alegre, RS, Brasil. [andre\\_c\\_t@hotmail.com](mailto:andre_c_t@hotmail.com)

<sup>3</sup> Prof. Dr. Eng. Dpto Eng. Eletrônica – Feevale de Engenharia de Energias, RS 239, 2755 Novo Hamburgo, RS, Brasil. [moisesdias@feevale.br](mailto:moisesdias@feevale.br)

<sup>4</sup> Acadêmica do curso de Engenharia de Energias, vinculado ao Departamento de Metalurgia da UFRGS/LdTM. Porto Alegre, RS, Brasil [sara.wirti@ufrgs.br](mailto:sara.wirti@ufrgs.br)

<sup>5</sup> Prof. Dr. -Ing. Coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGEM, UFRGS. Av: Bento Gonçalves, 9500. CEP: 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. [schaeffer@ufrgs.br](mailto:schaeffer@ufrgs.br)

## Resumo / Abstract

Neste trabalho analisamos por elementos finitos (FEMM 4.2) o rendimento de máquinas elétricas em função do uso de diferentes morfologias do rotor. As propriedades magnéticas de interesse foram analisadas (propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas), para serem introduzidas na base de dados do software. A topologia do rotor usado foi um micro motor trifásico, projeto do laboratório de transformação mecânica.

**Palavras-chave:** FEMM 4.2; propriedades magnéticas elétricas e mecânicas; topologia do rotor.

## PERFORMANCE ANALYSIS OF FINITE ELEMENT OF A MICRO-MOTOR ROTOR OF STEP WITH FOUR DIFFERENT MORPHOLOGIES

### Abstract

In this work we analyze finite element (FEMM 4.2) yield electrical machines due to the use of different morphologies of the rotor. The magnetic properties of interest were analyzed (magnetic properties, electrical and mechanical) to be introduced into

the database software. The topology of the rotor used was a micro three-phase motor design lab processing machine.

**Key words:** FEMM 4.2; magnetic properties of electrical and mechanical; topology rotor..

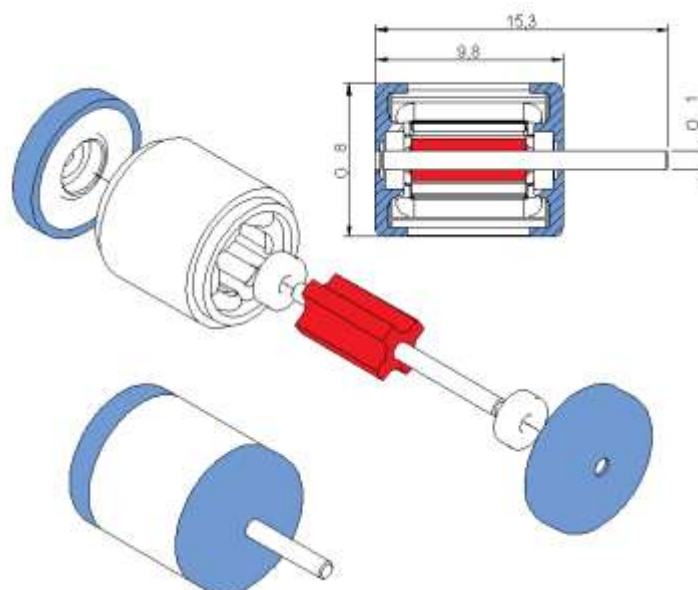
## 1 INTRODUÇÃO/ INTRODUCTION

Com os grandes avanços ocorridos na disponibilização de computadores, existe uma tendência contínua para a utilização de técnicas computacionais e matemáticas auxiliando no projeto de equipamentos de engenharia. Cada vez mais estão se obtendo resultados bastante próximos às condições reais, incluindo a simulação de motores.

Existem diversas definições para a simulação, dentre elas podemos citar a de Pegden (Banks 2003) que diz “a simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”. Desta maneira, podemos entender a simulação como um processo amplo que engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental que se segue, buscando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas;
- Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

Para estabelecermos uma comparação entre os resultados das simulações, vamos experimentar os resultados das mesmas a partir da simulação dos modelos com geometrias de rotores diferentes (parte em vermelho na Figura 1). O desenho do projeto global a ser usado é o que segue abaixo:



**Figura 1.** Topologia do rotor e estator usados nas simulações por FEMM.

Para prever resultados de desempenho das máquinas se fizeram simulações através de software de elementos finitos FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics). Análises por elementos finitos produzem resultados puramente numéricos. O resultado é tipicamente composto de milhares de pontos do modelo analisado (Hanselman 1994).

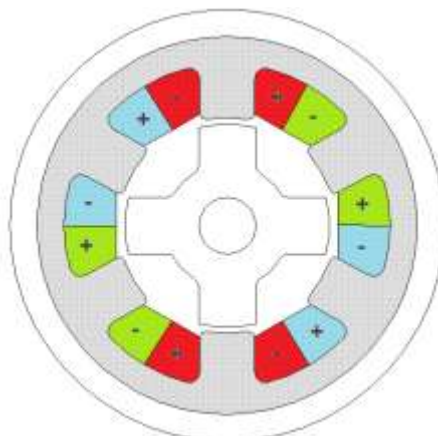
Na entrada de dados para a máquina simulada o material utilizado na construção dos núcleos do estator e do rotor, devem apresentar propriedades como elevada permeabilidade magnética relativa, baixa coercitividade magnética, elevada resistividade elétrica e elevada indução de saturação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS/ MATERIAL AND METHODS

Através do FEMM 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque instantâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência do motor e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

Há duas fontes comuns de campos magnéticos, uma delas é a corrente fluindo por um fio e o outro um PM. Na simulação se usam os dois, mas agora considere uma bobina de fio enrolado sobre um pedaço de material altamente permeável, chamado de núcleo (no nosso caso aplicado no estator). A corrente que flui através da bobina produz um campo magnético que pode ser encontrada através da lei de Ampère. (Hanselman 1994).

No estator da máquina elétrica simulada a corrente aplicada no circuito vermelho ( $H$ ) é de 0,04 A, no verde ( $I$ ) -0,04 e de 0 A no circuito azul ( $J$ ). A Figura 2 mostra o detalhe.



**Figura 2.** Configuração da Bobina usada no estator.

No FEM, o domínio da solução é subdividido ou “discretizado” em pequenas regiões chamadas de “elementos finitos”. Por exemplo, em aplicações 2D, o domínio pode ser discretizado em grupos de áreas finitas formados por triângulos. Os pontos que definem os triângulos são os “nós” ou “graus de liberdade”, enquanto o triângulo é o próprio “elemento” (Bastos e Sadowski 2003). O conjunto de elementos é chamado de “Malha”. No modelo testado foram criadas 100743 nós e 201173 Elementos para a geração da “malha”, Figura 3.

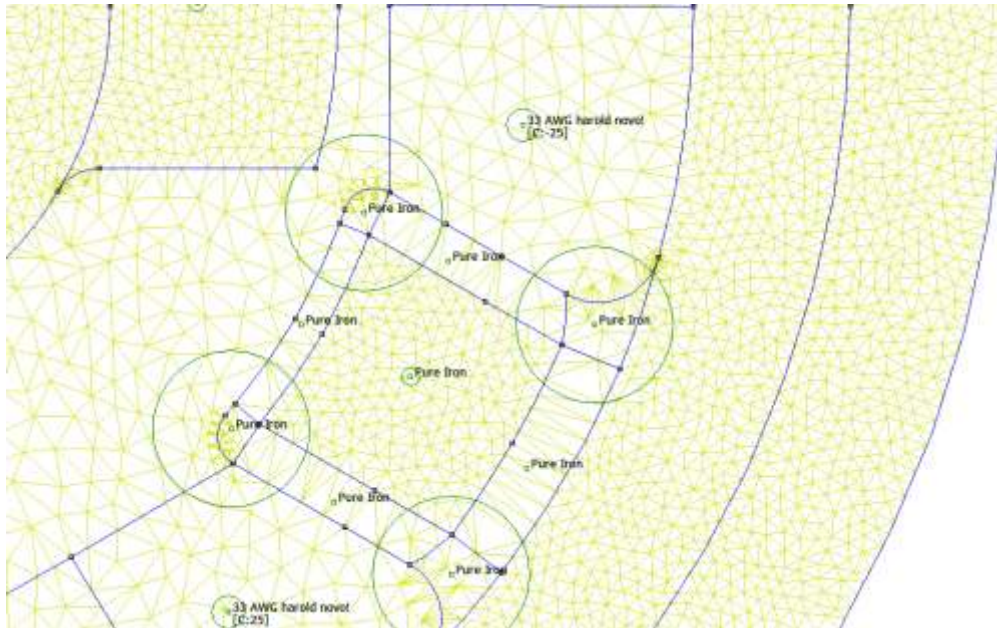


Figura 3. Malha gerada no pre-processamento.

### 3 RESULTADOS/ RESULTS

O torque produzido por um campo magnético é baseado desde um ponto de vista macroscópico, o princípio usado é o conceito de conservação de energia. Este método requer que todas as perdas elétricas, magnéticas e mecânicas no motor devam ser modeladas como um fator externo ao motor. O que resta é um sistema conservador, onde nenhuma energia é perdida. (Hanselman 1994).

$$dW_e = dW + dW_m \quad (2)$$

onde  $dW_e$ ,  $dW$ , and  $dW_m$  são quantidades diferenciais de energias, elétrica, campo magnético e mecânicas, respectivamente.

O tensor de tensão de Maxwell prescreve a força por unidade de área produzida pelo campo magnético sobre uma superfície. A força diferencial produzida é:

$$dF = \frac{1}{2} (H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - (H \cdot B)n) \quad (3)$$

onde  $n$  denota a direção normal da superfície ao ponto de interesse. (Meeker 2008).



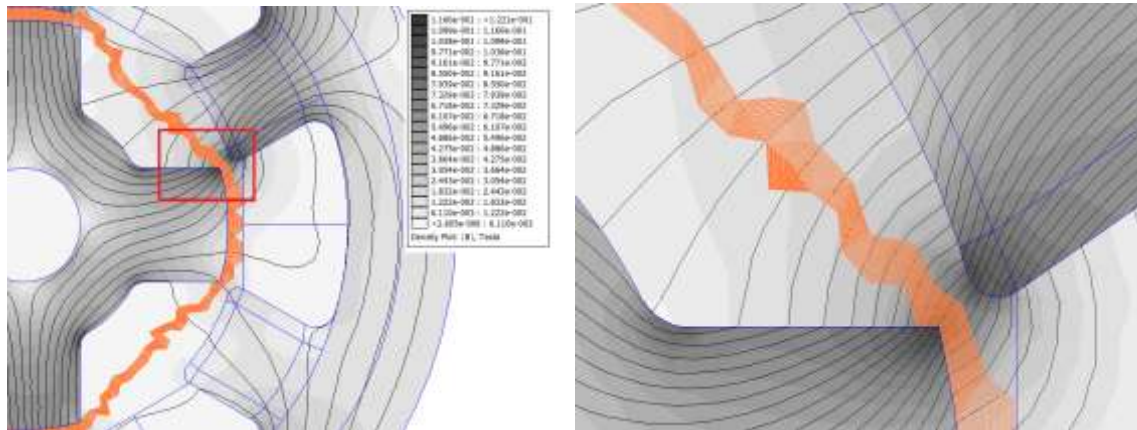


Figura 4. Obtendo torque desde o tensor de tensão, na direita o detalhe do tensor simulado.

O bloco do tensor de tensão ponderado ou tensor ponderado simplesmente (Figura 4) é uma versão integral de volume do tensor de tensão de Maxwell que escolhe automaticamente um conjunto de caminhos para a integração o que gera resultados de rendimento. Esta abordagem é semelhante à abordagem tensor de tensão (WST) descrito em Henrotte (Henrotte, Deliège e Hameyer 2002). O torque sobre (0,0) é calculado utilizando a abordagem da mesma função de ponderação (Meeker 2008).

A integração ponderada do tensor de tensão do nosso modelo é mostrada na figura 6, por padrão, como linhas de fluxo em laranja.

A aplicação das *condições de contorno* no modelo permite observar as linhas de fluxo geradas pela bobina do estator (Figura 5), o campo instantâneo mostrado acontece aplicando uma corrente de 0,04 A no circuito H.

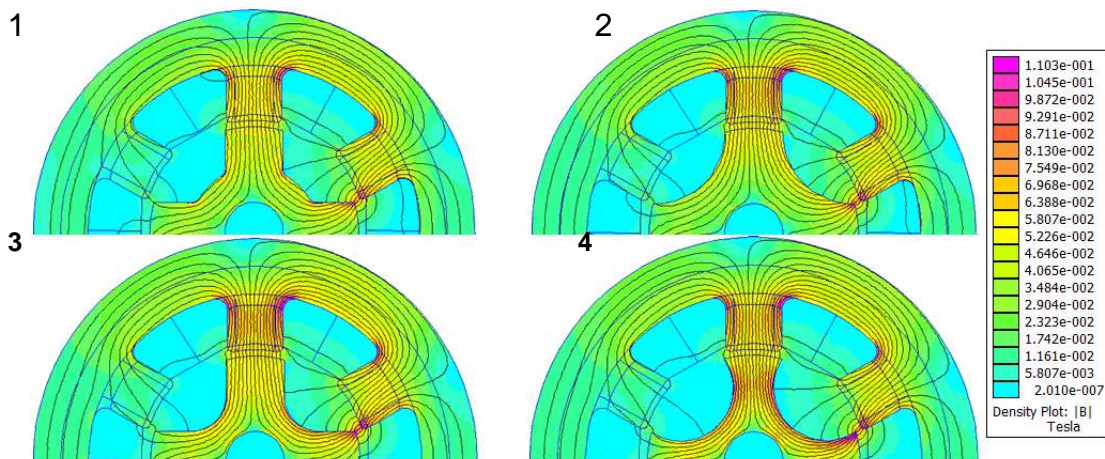


Figura 4. Linhas de fluxo do motor com diferentes rotores.

Com o análises dos dados obtemos o torque de tensor de tensão e o torque de tensor ponderado, o estudo comparativo das maquinas eletricas será em função deste ultimo valor que melhor representa o rendimento.

O material do nucleo do microrotor é M45 – liga de aço silicio, que faz parte do banco de dados do FEMM 4.2.

A gradiente de potencial magnético (função A) não possui nenhum significado físico (pois, ao contrário da eletrostática, não existem cargas magnéticas isoladas). A sua definição provém de uma lei do cálculo vetorial, que afirma que o divergente

do rotacional de qualquer função vetorial é nulo. A função  $A$  é conhecida como o vetor potencial magnético e sua dimensão é  $Wb/m$  no Sistema Internacional de Unidades (de Alcantara e de Aquino 2005).

O grupo de amostras 1,2,3 e 4 apresentaram comportamento bidimensional de campo quase idêntico, como pode ser observado na Figura 5. Estes valores estão relacionados com a permeabilidade magnética.

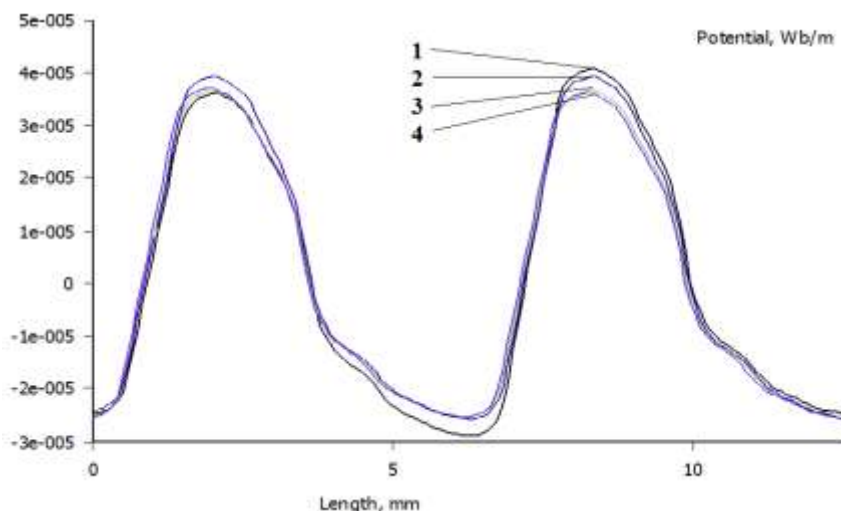


Figura 5. Potencial medido no entreferro

A integral de  $B.n$  retorna o fluxo total normal de passagem no contorno do entreferro. Esta integral é útil para determinar o fluxo total na área do entreferro (Meeker 2008). Na Figura 6 se observa um comportamento similar em função das diferenças entre os materiais.

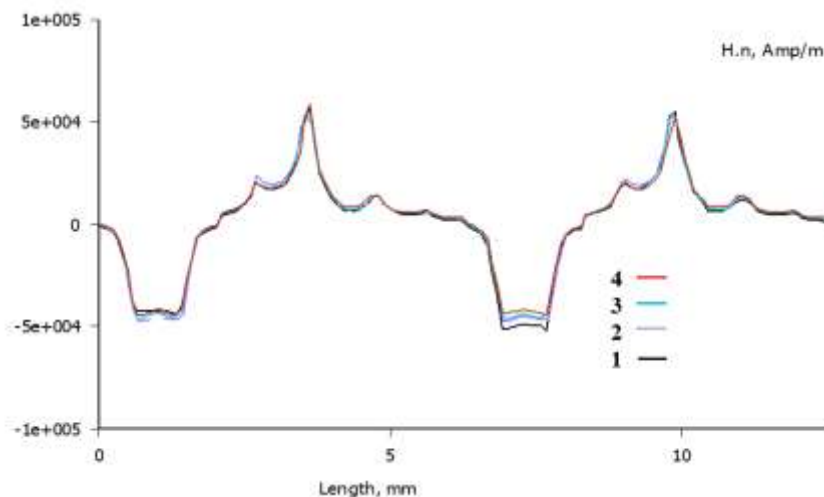
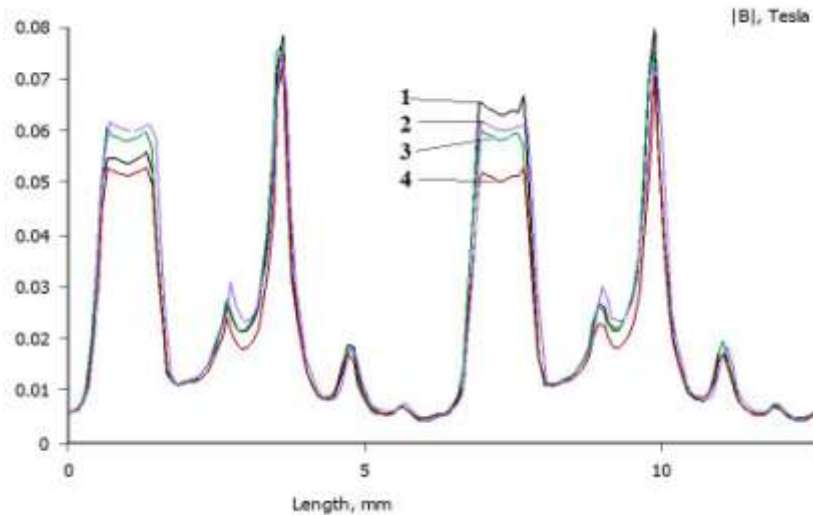


Figura 6. A integral de  $B.n$

Na próxima Figura 7 temos a densidade de fluxo, que apresentou diferenças só na parte onde esta sendo aplicada a corrente.



**Figura 7.** Densidade de fluxo dos em função dos diferentes núcleos

A co-energia permite obter a força diretamente como uma função de corrente, a escolha da co-energia como função de estado é uma questão puramente de conveniência. A co-energia é numericamente a mesma energia (Fitzgerald 2006). Para problemas não-lineares, coenergy é definido como:

$$W_c = \int \left( \int_0^H B(H') dH' \right) dV \quad (4)$$

A co-energia, mostrado na Figura 8, pode ser utilizado para o cálculo da força e torque. Para calcular a força via co-energia, as correntes são mantidas constantes, e a posição do objeto sobre o qual a força é desejada é um tanto perturbada. A força pode então ser estimada por:

$$F = \frac{W_c(p + \delta) - W_c(p)}{\delta} \quad (5)$$

onde  $p$  denota a posição inicial,  $p + \delta$  indica a posição do perturbado, e  $\delta$  é a magnitude da perturbação. A componente da força age na direção da perturbação.

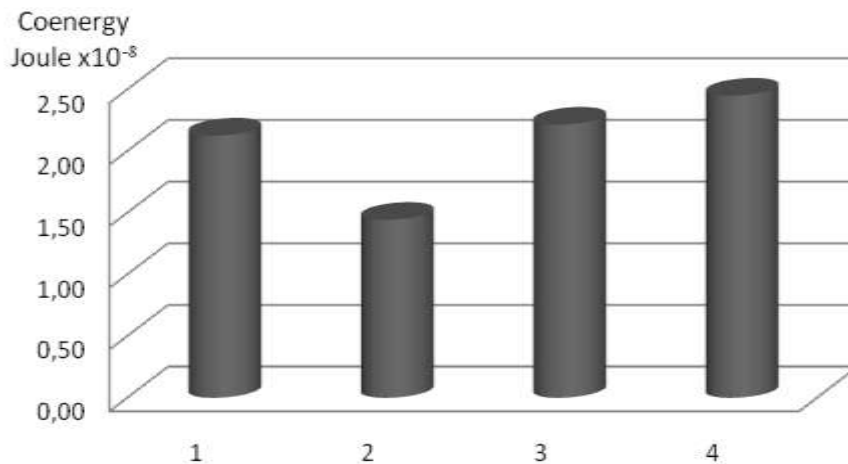


Figura 8. Co-energia dos rotores testados.

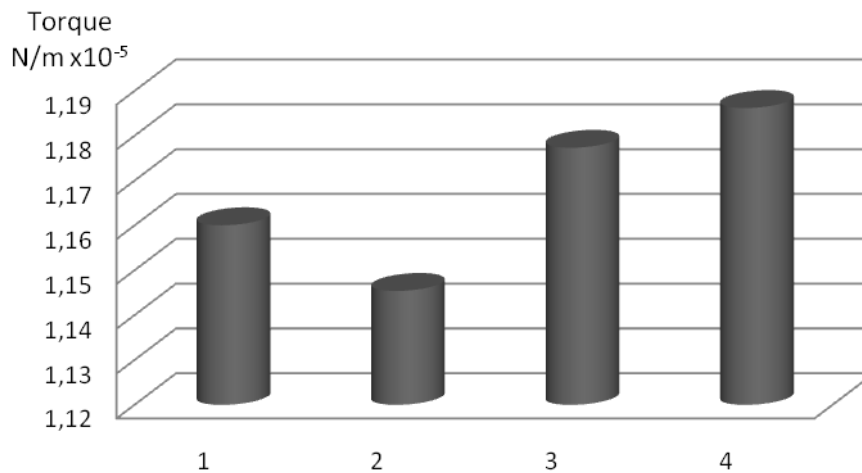


Figura 9. Análises do torque tensor de tensão das amostras 1, 2, 3 e 4.

O torque para os diferentes rotores, comparados na Figura 9, foram obtidos pela função ponderada do tensor de Maxwell, explicado anteriormente na figura 6. O rotor que ofereceu maior torque foi o nº4 seguido e o de menos o nº2.

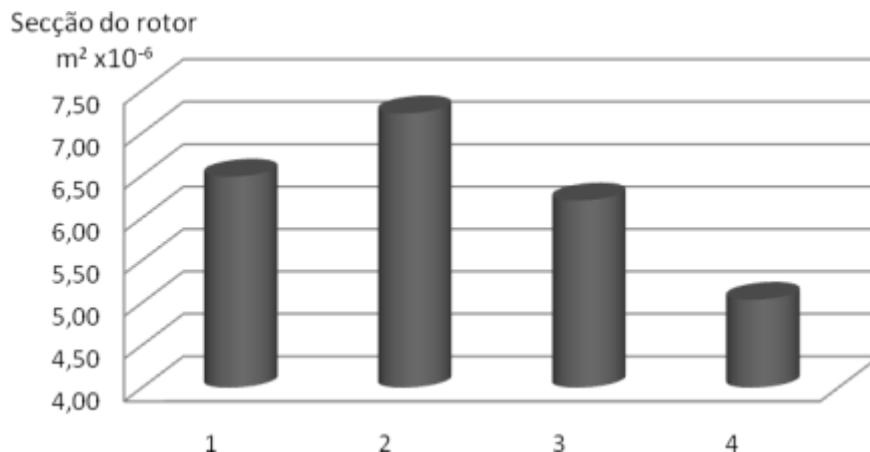


Figura 10. Secção do rotor.

O FEMM possui uma ferramenta pela qual podemos determinar o volume da morfologia testada, este resultado é mostrado na Figura 10 onde claramente o modelo 4 é a que menor consumo de material apresenta.

#### 4 CONCLUSÃO/ CONCLUSION

De acordo com os resultados das simulações, o rotor que apresentou o melhor desempenho em função do torque é o rotor “4”, que devido à sua morfologia é também quem apresentou um menor consumo de material o que é relacionado diretamente com o peso final do rotor, sendo esta uma qualidade importante se





tratando de micro-motores. No entanto a distribuição das linhas de fluxo neste rotor é mais densa, isto pode gerar possíveis perdas no rendimento em um modelo dinâmico, assunto que será revisado num próximo trabalho.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq por financiar este trabalho.

## REFERÊNCIAS/ REFERENCES

- 1 Banks, J., Hagan, J., Lendermann, P., McLean, C. R., Page, E. H., Pegden, C.D., Ülgen, O.M., Wilson, J.R. The future of the simulation industry, p 2033-2043, 2003.
- 2 Bastos, J.P.A., Sadowski, N., Electromagnetic modeling by finite element methods. U.S.A.: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- 3 Fitzgerald, A.E., Jr. C. Kingsley, and S.D. Umans. "Electric Machinery." McGraw-Hill (inc.), 599, 1990
- 4 Hanselman, D. C., Brushless Permanent-Magnet Motor Design. U.S.A.: McGraw-Hill, 1994.
- 5 Henrotte, F., G. Deliege, and K. Hameyer., The eggshell method for the computation of electromagnetic forces on rigid bodies in 2D and 3D, CEFC, Perugia, Italy, p 16-18, 2002.
- 6 Henrotte, François, Geoffrey Deliége, and Kay Kay Hameyer, The eggshell method for the computation of electromagnetic forces on rigid bodies in 2D and 3D, CEFC, Perugia, Italy, p 16-18, 2002.
- 7 Meeker, D., Finite Element Method Magnetics - User's Manual, V.4.2, 2008.
- 8 Fitzgerald A.E.d, Kingsley Jr. C., Stephen D.U., "Maquinas Elétricas" 6 Edição, Bookman, São Paulo, 2006.