

## Projeto de uma máquina síncrona de polos salientes e sua comparação com uma máquina síncrona de ímãs permanentes

### Design of a salient pole synchronous machine and its comparison with a permanent magnet synchronous machine

#### RESUMO

**Joel Ferrari Carvalho**  
[joell@hotmail.com.br](mailto:joell@hotmail.com.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

**José Fábio Kolzer**  
[josefakolzer@gmail.com](mailto:josefakolzer@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

A demanda da energia elétrica aumenta com o aumento da população, e as fontes renováveis apresentam alternativas atrativas para um investimento no setor de geração de energia elétrica. A energia eólica destaca-se neste aspecto e por isso deve ser estudada. A máquina síncrona de polos salientes de rotor bobinado tornou-se uma alternativa viável às máquinas síncronas de ímãs permanentes na geração eólica, dada que esta última sofre com o monopólio chinês dos materiais terras-raras. Dessa forma, propôs-se projetar uma máquina síncrona de polos salientes para compará-la com uma máquina de ímãs permanentes. Utilizaram-se programas como o Matlab e Mathcad para cálculos e o EFCAD para simulação dessa nova máquina. Após atingir um resultado satisfatório, a comparação foi feita e mostrou que se por um lado a máquina de polos salientes utiliza menos ferro, por outro se emprega mais cobre, diminuindo seu rendimento, o que o torna o seu desempenho inferior ao da máquina de ímãs permanentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Projeto de gerador eólico. Energia eólica. Método dos elementos finitos.

**Recebido:** 19 ago. 2019.

**Aprovado:** 01 out. 2019.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



#### ABSTRACT

Wind power is a highlight between the renewable energies and therefore should be studied. Salient pole synchronous machines are a viable alternative to the permanent magnet synchronous machines used in eolic generators, given that these suffer with the Chinese monopoly of rare-earth materials. Hereby, it is designed a salient pole synchronous machine to compare it with a permanent magnet one. Softwares such as Matlab and Mathcad were used for simple math, while EFCAD was used to simulate this new machine. When satisfactory results were obtained, such comparison was made and it was shown that while the salient pole synchronous machine requires less iron, it uses more copper, lowering its efficiency, which in turn makes it worse than the permanent magnet machine.

**KEYWORDS:** Eolic generator design. Eolic energy. Finite elements method.

## INTRODUÇÃO

É fácil perceber a importância da energia elétrica para a sociedade. Sejam os eletrodomésticos em residências, ou motores em indústrias, em ambas as situações busca-se energia barata. Com o aumento da população, há o aumento da demanda pela energia elétrica, e, nos últimos anos, dadas as circunstâncias ambientais, a procura pelas fontes renováveis de energia vem sendo a solução para essa conjuntura, como aponta o Plano Decenal de Expansão de Energia 2027 (Ministério de Minas e Energia, 2018).

Dentre as fontes renováveis, uma que se destaca é a energia eólica, alternativa às tradicionais hidroelétricas, devido a um regime abundante de ventos no Brasil. É por este motivo que o estudo dos equipamentos utilizados na produção de energia eólica torna-se amplamente necessário.

Atualmente, o uso de máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIP) na produção dessa energia vem sendo questionado devido ao aumento do preço dos ímãs terras-raras usados nessa tecnologia. Esse aumento ocorre por causa do domínio chinês sobre tais ímãs, produtores de 97% (Gündogdu, 2012) dos elementos terras-raras. Embora o custo dos ímãs de NdFeB tem atingido valores competitivos nos últimos anos, a instabilidade do seu preço ainda está presente.

Dessa forma, o objeto de estudo deste trabalho é um projeto de uma máquina síncrona de polos salientes de rotor bobinado (MSPS) funcionando como gerador, alternativa às MSIPs, e a subsequente comparação dela com uma MSIP com ímãs de ferrite já projetada. A MSPS apresenta a vantagem da regulação da corrente de campo, o que permite o gerador trabalhar com fator de potência regulável.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para o projeto da MSPS, sabe-se que seu corpo é composto de uma armadura estática onde seus enrolamentos terão tensões induzidas pelo campo girante, e um rotor girante, cujo enrolamento é excitado por corrente contínua. Esta máquina será projetada com os seguintes parâmetros iniciais, mostrados na Tabela 1, iguais aos da MSIP já projetada:

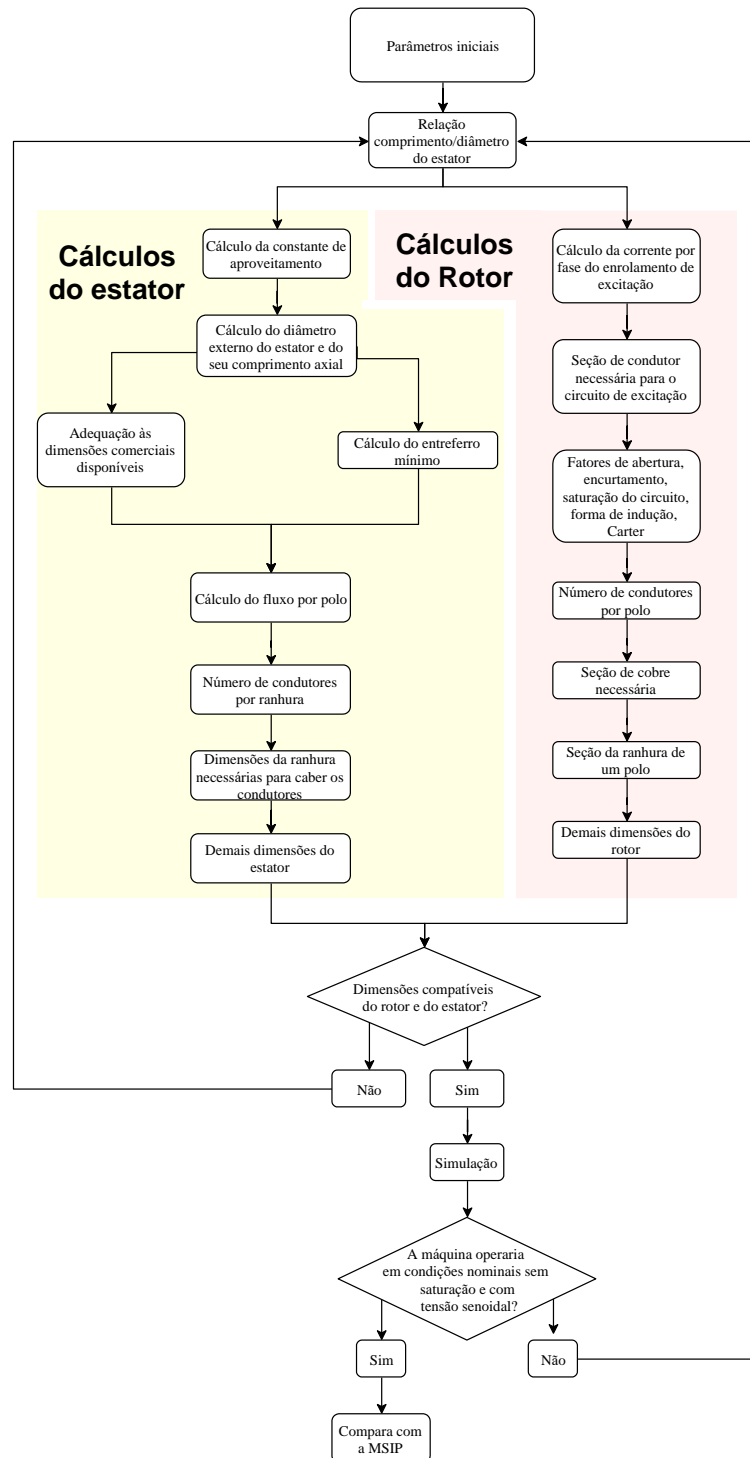
Tabela 1 – Parâmetros iniciais

Parâmetro	Valor
Fator de potência (f)	1
Frequência elétrica ( $f_e$ )	60 Hz
Número de fases (m)	3
Número de polos (P)	20
Número de ranhuras por polo e fase (q)	1
Potência aparente nominal (S)	3 kW
Tensão nominal (V)	220 V
Velocidade nominal de rotação (n)	360 rpm

Fonte: Autoria própria

Assim, torna-se necessário projetar a armadura e o rotor de forma que satisfaçam esses critérios e que ainda seja possível obter-se uma tensão senoidal nos terminais para ser adequada às exigências da rede. Para isso seguiu-se as diretrizes fornecidas por Pyrhönen (2008) e por Runcos (2018) e montou-se, baseado neles, o fluxograma simplificado da Figura 1. Uma bifurcação indica que devem ser feitos processos paralelos de cálculo para atingir o próximo passo.

Figura 1 – Fluxograma para projeto da MSPS



Fonte: Autoria própria

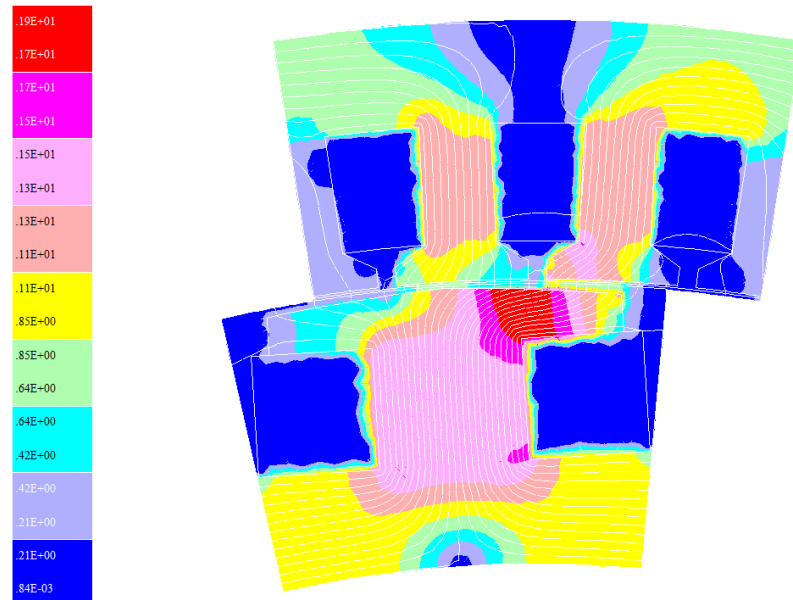
O projeto desta máquina é um exercício iterativo. Todo o processo de cálculo é realizado no Mathcad Prime 4.0 e no Matlab R2018a, para então obter-se uma pré-visualização da máquina obtida por meio do Gmsh 3.0.6. Essa visualização da máquina permite saber se as dimensões do estator e do rotor são realistas e compatíveis. Após esse processo, faz-se a adequação do desenho da máquina para ser possível sua simulação por intermédio de um *software* de elementos finitos (EFCAD), esta parte leva em conta somente o menor setor da máquina que permite representar seus efeitos eletromagnéticos por meio da simetria.

As simulações são feitas com a máquina a vazio e com carga resistiva. Por fim, após várias iterações, obteve-se um resultado razoavelmente satisfatório para comparar esta máquina com a MSIP (massa ativa de material, dimensões e perdas na máquina).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 representa o mapa de campo de uma seção da máquina quando simulada com carga resistiva nominal. Percebe-se que há uma pequena saturação no ferro (a densidade de campo magnético está acima de 1.6 T) causada pela reação de armadura apenas no corpo do polo, enquanto nas demais partes da máquina há uma redução da densidade de campo, quando comparado à condição de vazio.

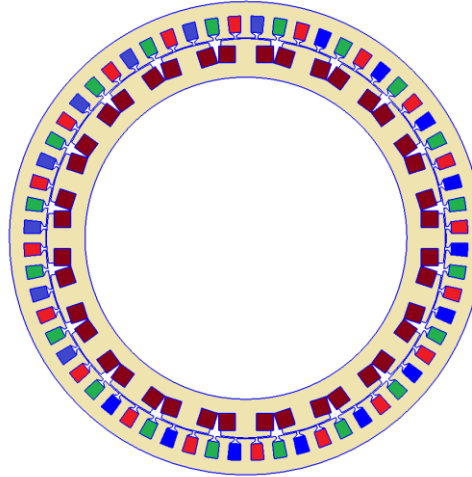
Figura 2 – Mapa de campo magnético com a máquina com carga resistiva (nominal)



Fonte: Autoria própria

A máquina obtida em sua versão final pode ser observada na Figura 3. Nela observa-se 60 ranhuras distribuídas em 3 fases no estator, cada uma representada por uma cor.

Figura 3 – Máquina síncrona de polos salientes (20 polos)



Fonte: Autoria própria

Algumas de suas dimensões, a massa, as perdas e o rendimento para comparação com a MSIP podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões e massas

Parâmetro	MSIP de ferrite	MSPS
Diâmetro externo do estator	300 mm	360 mm
Comprimento axial	234 mm	64 mm
Espessura do entreferro	0,5 mm	0,7 mm
Massa de ferro	36,4 Kg	24,17 Kg
Massa de cobre	5,83 Kg	9,02 Kg
Perdas	614,46 W	995,91 W
Rendimento	83 %	75 %

Fonte: Autoria própria

Observa-se que a MSIP apresenta uma quantidade maior de ferro devido a seu comprimento axial maior, fazendo com que haja maiores perdas no ferro por histerese e correntes parasitas. Contudo pela quantidade maior de cobre, as perdas ôhmicas na MSPS fazem com que esta apresente maiores perdas e consequentemente um menor rendimento.

## CONCLUSÃO

Neste estudo, foi apresentado o projeto de uma máquina síncrona de polos salientes com rotor bobinado para servir de alternativa a outra máquina de ímãs permanentes. Seu projeto envolveu o uso do método dos elementos finitos e obedeceu às regras de projeto propostas por autores consagrados.

Foram necessárias várias iterações para alcançar-se o objetivo de uma máquina razoavelmente satisfatória e percebeu-se que apesar de utilizar menos material ativo, o rendimento obtido na MSPS esteve muito abaixo do observado na MSIP.

É importante lembrar que na Tabela 2 foi comparado o projeto não ótimo de uma máquina síncrona com enrolamento de campo com o projeto ótimo de uma máquina síncrona com ímãs permanente de ferrite.

Para trabalhos futuros sugere-se a realização de projeto ótimo da máquina com enrolamento de campo, que demandaria a utilização de um software envolvendo algum tipo de algoritmo de otimização.

### REFERÊNCIAS

PYRHÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V. *Design of Rotating Electrical Machines*, John Wiley&Sons Ltd., Chichester, West Sussex, Reino Unido, 2008.

Gündogdu, T.; Kömürgöz, G. **Technological and economical analysis of salient pole and permanent magnet synchronous machines designed for wind turbines**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 324, n. 17, p. 2679-2686, agosto 2012

RÜNCOS, F. **Projeto e análise da máquina elétrica trifásica**: aspectos construtivos da máquina elétrica, Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2018

Ministério de Minas e Energia, **Plano decenal de expansão de energia 2027**, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética, Brasília: MME/EPE, 2018