

## Comparação entre Geradores Síncronos com Arranjo Halbach Utilizando Um ou Dois Estatores

Comparison between synchronous generators with Halbach arrangement using one or two stators

William Gigo

Faculdade de Talentos Humanos - FACTHUS

João Paulo Sinnecker

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rua Dr. Xavier Sigaud, 150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ - Brasil

Romeu Abrahão Pereira

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rua Dr. Xavier Sigaud,  
150 – Urca – Rio de Janeiro – RJ - Brasil

Submetido: 31/08/2018 Aceito: 28/02/2019

**Resumo:** O interesse na produção de energias alternativas a partir de fontes renováveis é um tema muito atual. O Brasil ocupa o oitavo lugar em consumo de energia eólica, com a utilização de geradores de indução trifásicos. Neste trabalho foi realizada uma análise comparativa entre dois geradores elétricos trifásicos, um com uma bobina estatora e o outro com duas bobinas estadoras, ambos construídos com dois rotores de ímãs permanentes de NdFeB montados em configuração Halbach. Foram realizadas medidas de geração de energia em cargas puramente resistivas usando sistemas em estrela (Y) e em triângulo ( $\Delta$ ) foram determinadas suas potências trifásicas, em função da rotação. Foram determinados os resultados de eficiência, apontando o melhor rendimento. Observou-se que, no sistema com um único estator, as potências trifásicas obtidas atingiram valores mais elevados em relação ao gerador com dois estatores. Por outro lado, os geradores com dois estatores apresentaram maiores rendimentos, já levando em consideração as potências trifásicas, perdas por efeito Joule e correntes parasitas. A tendência atual é desenvolver tecnologias visando elevar o grau de eficiência dos geradores com indução trifásica, com a redução da dispersão magnética que ocasiona a perda de tensão e a diminuição dos custos.

**Palavras-chave:** Gerador, energia, Halbach, rotores, estatora.

**Abstract:** The interest in the production of alternative energies from renewable sources is a very current theme. Brazil occupies the eighth place in the consumption of wind energy, with the use of three-phase induction generators. In this work a comparative analysis was performed between two three-phase electric generators, one with a stator coil and the other with two stator coils, both built with two permanent NdFeB magnet rotors mounted in Halbach configuration. Measures were taken to generate energy in purely resistive loads using star (Y) and triangle ( $\Delta$ ) systems. Its three-phase powers were determined as a function of rotation. The efficiency results were determined, indicating the best yield. It was observed that in the system with a single stator, the three-phase powers obtained reached higher values when compared to the generator with two stators. On the other hand, the generators with two stators presented higher yields, taking into account the three-phase powers, losses by Joule effect and parasitic currents. The current trend is to develop technologies aimed at raising the efficiency of three-phase induction generators, reducing the magnetic dispersion that causes the loss of voltage and reducing costs. Keywords: Generator, energy, Halbach, rotors, stator.

**Keywords:** Generator, energy, Halbach, rotors, stator.

### 1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna apresenta um crescente consumo de energia e consequentemente uma pressão sobre recursos não renováveis e ecossistemas, elevando o interesse na produção de energias alternativas de fontes renováveis. Consequentemente os sistemas de geração de energia concentrados em grandes unidades passam a ser substituídos por micro geração, como a eólica e solar, segundo [ANEEL2011].

A energia eólica é uma forma de energia renovável que se destaca em crescimento no mundo. Nas últimas décadas a capacidade global dessa forma de energia cresceu expressivamente. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica

[ABEE2018], O Brasil ocupa o oitavo lugar em capacidade instalada de energia eólica no ano de 2017, com potência instalada de 12,39 GW. Possuindo 500 parques eólicos consegue abastecer 11% do país, chegando a 60% do Nordeste. As perspectivas são de atingir até pouco mais de 18,6 GW em 2020, com construção em torno de 250 novos parques.

Atualmente utilizam-se geradores de indução trifásicos com gaiola de esquilo, de indução a rotor bobinado e relutância variável e síncronos [Suni2009] para gerar energia nesta para gerar energia neste tipo de geração.

Os geradores síncronos com ímã permanente têm a vantagem de serem mais compactos, principalmente quando envolvem elevado número de pares de polos, e.g. em sistemas

para baixas velocidades. Entretanto oferecem desvantagem devido ao custo elevado dos ímãs, temperaturas limitadas de operação e possibilidade de sofrerem desmagnetização devido aos campos produzidos por altas correntes ou curtos-circuitos durante a operação, comprometendo sua operação.

Em geral, o campo magnético de um dipolo é não uniforme e anisotrópico. Porém, há maneiras eficientes de se conseguir uma densidade de fluxo homogênea a partir de arranjos de dipolos, cada um deles disposto em direções diferentes de forma a que a soma de cada contribuição individual leve a um campo uniforme em um volume de espaço. Isso pode ser obtido com ímãs permanentes arranjados geometricamente de forma planejada, como no arranjo Halbach [HALBACH1980, COEY2009]. Nesse arranjo, ímãs permanentes são dispostos em configurações planejadas para a aumentar o enlace do fluxo que alcança o enrolamento da armadura, cuja dificuldade está em fixar os ímãs no rotor [ZHU2001].

O arranjo Halbach já foi empregado na elaboração de outras máquinas, em 2002, Zhu Z.Q., utilizou modelos analíticos, através de elementos finitos, para prever a distribuição do campo magnético em máquinas de ímã permanente de superfície, sem escovas. De acordo com Liu C., 2018, pode-se ter um gerador linear de ímã permanente tubular com a finalidade de extrair tensões equilibradas, a partir de ondas do mar. Segundo Liu K., 2018, máquinas sem escovas de ímã permanente foram comparadas com o arranjo radial magnético encontrado em máquinas convencionais. Em todos os estudos citados, os ímãs utilizados apresentavam formatos trapezoidais

Geradores síncronos que utilizam disposição de ímãs permanentes em uma configuração Halbach possuem melhor robustez e versatilidade, sendo adequados para o uso em geradores de alto rendimento. Estruturas formadas por rotores com ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (Nd-FeB) geram campos de indução magnética estáveis e de elevada energia permitindo a geração de altas tensões estáveis induzidas nos estatores.

Esses geradores, sem núcleo ferromagnético (chamados de *coreless*), possuem enrolamentos de estator localizados em material não magnético e não condutor, geralmente náilon, que acaba suportando toda a estrutura. Este material isolante inibe a circulação de correntes parasitas, evitando a histerese de origem eletromagnética. A parte referente à reação da armadura se torna desprezível em função do entreferro efetivo permitindo elevados valores de eficiência [WANG2005].

Em máquinas elétricas de alto rendimento há necessidade de que os ímãs permanentes apresentem um elevado campo coercitivo ou coercividade ( $H_c$ ) e elevada indução remanente ( $B_r$ ). Enquanto um valor elevado de coercividade impede que o ímã seja facilmente desmagnetizado, um alto valor da remanência  $B_r$  resulta em fluxo magnético elevado. Isto resulta na aplicação ampla dos ímãs de NdFeB nas máquinas elétricas modernas de ímãs permanentes [DE OLIVEIRA2012].

A indução magnética se baseia na Lei de Faraday, que relaciona a voltagem induzida gerada em uma bobina (f.e.m.) ( $\mathcal{E}$ ) à variação de fluxo magnético ( $\Phi$ ) na mesma. Onde a fem induzida se opõe à essa variação do fluxo, como mostra

a equação 1 abaixo [HALLIDAY2010].

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

A f.e.m. induzida numa bobina, por indução eletromagnética, varia proporcionalmente à quantidade de linhas de fluxo magnético do ímã cortadas pela bobina num dado período de tempo e ao número de espiras da bobina ( $N$ ), como se observa na equação 2 [HALLIDAY2010].

$$\mathcal{E} = -N\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2)$$

O fracionamento de bobinas em dois ou mais estatores ligadas em série, mesmo submetidos a rotores independentes, podem apresentar valores de rendimento diferentes.

Se, ainda, os núcleos das bobinas não forem preenchidas com núcleos ferromagnéticos (*coreless*), podem ocorrer dispersão no campo de indução magnética e diminuição das tensões induzidas[SITAPATI2001].

Logo, a utilização de uma única bobina sem núcleo de ferro no estator pode gerar tensões maiores que bobinas fracionadas em 2 estatores, devido à dispersão do campo de indução magnética gerada pelos ímãs através do ar.

No desenvolvimento de tecnologias mais eficientes são necessárias pesquisas e investimentos com o intuito de diminuir o problema de dispersão magnética e elevar o grau de eficiência de geradores síncronos.

Este artigo compara dois geradores, em estudos experimentais de dois rotores, na configuração Halbach, gerando um fluxo magnético através de uma estrutura com um estator e outra com dois, não interligados.

O emprego de ímãs trapezoidais torna o custo do gerador inviável, sendo assim optou-se pelo uso de ímãs cúbicos de NdFeB, que têm alta energia com propriedades físicas e magnéticas adequadas para aplicações em máquinas elétricas [RAHMAN1985].

O objetivo é verificar o rendimento das tensões geradas nos dois modos de elaboração dos protótipos, apresentar uma análise comparativa e determinar os resultados de eficiência de cada medida, apontando o melhor rendimento. Concluindo que o gerador com 2 estatores, não interligados irão apresentar o melhor rendimento, devido as perdas por efeito joule.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A construção da máquina elétrica síncrona trifásica é relativamente mais cara que a máquina de indução trifásica. Embora seu rendimento seja uma vantagem importante quando se trata de potências elevadas, como é o caso de geradores usados em usinas de geração de energia elétrica de alta potência [SUNI2009].

Klaus Halbach em 1980 [HALBACH1980], apresentou uma nova configuração de ímãs permanentes em máquinas de indução trifásica, a qual se tornou conhecida como arranjo Halbach.

A montagem dos rotores baseado no modelo Halbach utiliza ímãs trapezoidais. O arranjo especial de ímãs perma-

nentes aumenta o campo magnético em um lado da matriz e cancela o campo para perto de zero no outro lado [MERRITT1994].

Assim a geração de energia utilizando o modelo Halbach pode apresentar um alto rendimento utilizando dois ou mais rotores. Nesta configuração em geral se utiliza ímãs de formato trapezoidal, que possuem custo mais elevado do que ímãs cúbicos similares. Para diminuir o custo do sistema, optou-se pela construção de um rotor com ímãs cúbicos de neodímio na geração de campo magnético e indução de tensões no estator.

Para a geração das tensões induzidas são possíveis duas disposições dos ímãs: a primeira os ímãs dispostos lado a lado com os campos alternados Norte-Sul e a segunda como arranjo Halbach (Figura 1).



Figure 1: Ímãs permanentes do rotor em configuração Halbach. Estão indicados os pólos norte (N), sul (S) ou planar (setas) de cada um dos ímãs.

Fonte: Arquivo do autor

Comparando a disposição com os ímãs em orientação Norte – Sul com o arranjo Halbach foram realizadas simulações por meio de método de elementos finitos utilizando o software COMSOL Multiphysics. As simulações consideram os rotores em tamanho real. A disposição dos 16 ímãs na configuração Halbach são repetidas em grupos de 4 de acordo com a figura 1, onde foram identificados através das setas o sentido do campo magnético. Nesta simulação, consideramos a remanência de cada ímã no valor fornecido pelo fabricante. Cada ímã é um magneto de NdFeB, grau 35 (N35) com remanência  $B_r = 0,4316$  T e formato cúbico com dimensões 20x20x20mm.

A figura 2 representa o resultado da simulação do modelo Halbach onde podemos visualizar o sentido dos campos magnéticos de cada ímã no rotor do gerador.

A menor distância obtida de vazio entre o rotor e o estator foi de aproximadamente 6,5 mm, como pode ser indicado na figura 3 para dois estatores e a figura 4 para um estator.

A tensão induzida é proporcional à variação de campo magnético, como mostrado na equação 1. Utilizando o COMSOL foi possível determinar as intensidades de densidade de fluxo magnético produzidos nas configurações em arranjo Norte-Sul e Halbach, utilizando dois rotores e um estator. A Figura 5 mostra a intensidade da densidade de fluxo magnético ao longo de uma linha circular posicionada

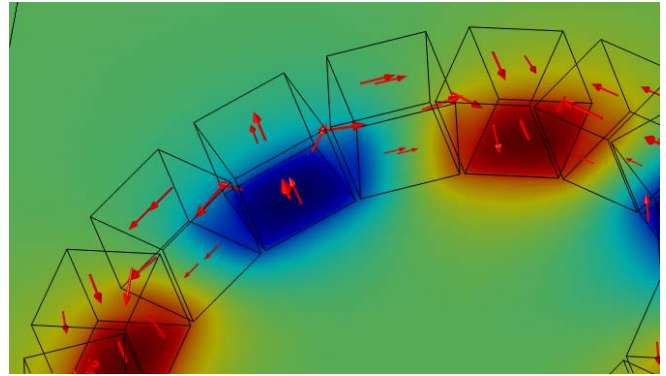


Figure 2: Resultado de simulação do arranjo Halbach realizada com método de elementos finitos no software COMSOL.

Fonte: Arquivo do autor

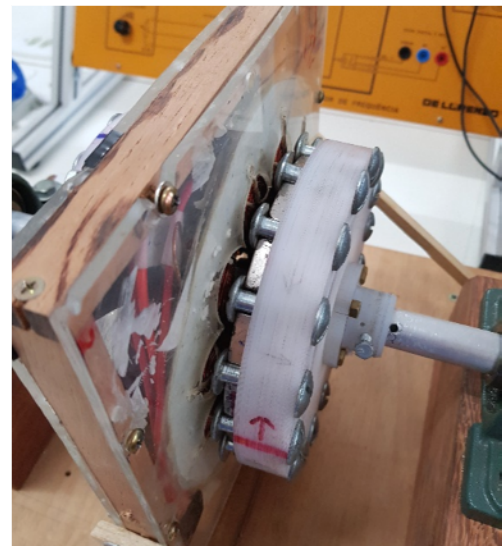


Figure 3: Posicionamento do Rotor na montagem com um Estator.

Fonte: Arquivo do autor

no centro do estator.

A curva com maior intensidade representa o arranjo Halbach, linhas em vermelho, sendo assim sua disposição apresenta maior fluxo magnético que atravessa as bobinas do estator, podendo atingir mais de 400 G no centro das bobinas do estator.

Enquanto que o arranjo norte-sul dos ímãs, linhas em azul, com um fluxo menor, podendo atingir 400G, o que implica em tensões induzidas menores e baixo rendimento do gerador.

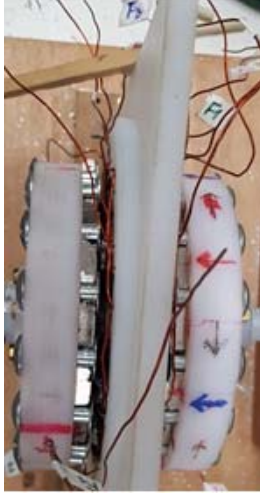


Figure 4: Posicionamento do Rotor na montagem com dois Estatores.

Fonte: Arquivo do autor

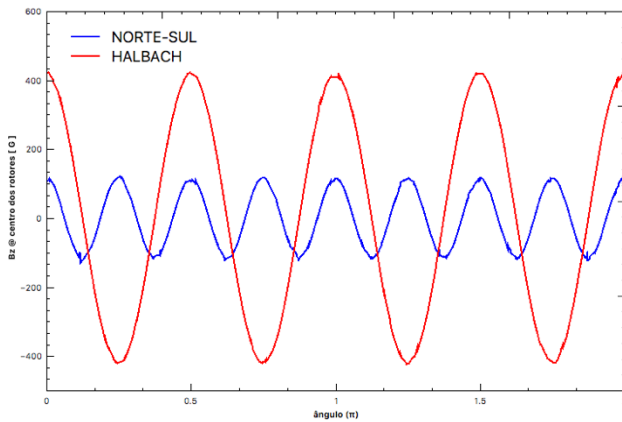


Figure 5: Comparação da densidade de fluxo magnético ao longo da direção z para os rotores em arranjo HALBACH e NORTE – SUL com dois estatores, obtida por simulação no software COMSOL  
Fonte: Arquivo do autor

Os dois rotores com arranjo Halbach foram construídos, cada um deles com 16 ímãs de NdFeB, grau 35 (N35) com densidade de fluxo magnético  $B_r = 0,4316$  T, formato cúbico com dimensões  $20 \times 20 \times 20$  mm.

O rotor com arranjo Halbach foi construído com estrutura mostrada na figura 1, com 16 ímãs assentados em discos de alumínio ou material não ferromagnético. Os vazios de ar entre os ímãs que apresentam um formato de cunha, foram utilizados para a fixação com parafusos, como mostrado na figura 6.

No dimensionamento do rotor foram realizados os cálculos a seguir.

Os ímãs irão ocupar uma circunferência interna de comprimento  $l_i$  de:

$$l_i = l_{imã} \cdot 16 = 0,32 \text{ metros} \quad (3)$$

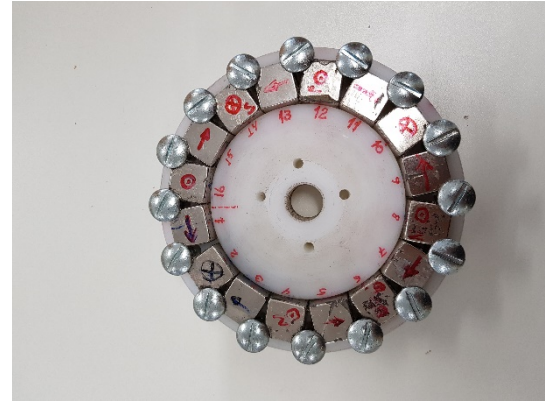


Figure 6: Disposição dos ímãs de cada rotor fixado por parafusos na disposição do arranjo HALBACH

Fonte: Arquivo do autor

sendo:  $l_{imã}$  o comprimento do ímã, e o raio interno  $r_i$  é:

$$r_i = \frac{0,32}{2\pi} = 0,051 \text{ metros} \quad (4)$$

Sendo o raio externo  $R_e$  é a soma do raio interno  $r_i$  com o comprimento do ímã  $l_{imã}$  mais 1 milímetro em que é:

$$r_e = r_i + l_{imã} + 0,001 = 0,072 \text{ metros} \quad (5)$$

No rotor,  $r_i$  e  $r_e$  são raios internos e externos, respectivamente e é mostrado na figura 7.

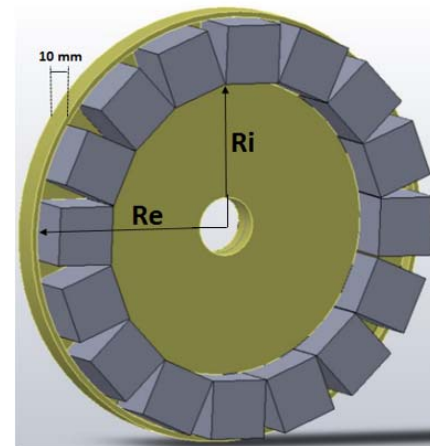


Figure 7: Raio interno e externo do rotor com arranjo Halbach  
Fonte: Arquivo do autor

O comprimento da circunferência externa  $l_e$  do rotor com arranjo Halbach é:

$$l_e = 2\pi \cdot r_e = 0,452 \text{ metros} \quad (6)$$

e o comprimento do vazio de ar  $l_{vazio}$  de formato de cunha entre os ímãs é:

$$l_{vazio} = l_e - l_i = 0,132 \text{ metros} \quad (7)$$

e o comprimento de ar vazio por cunha  $l_{cunha}$  é:

$$l_{cunha} = \frac{l_{vazio}}{16} = 8,24 \cdot 10^3 \text{ metros} \quad (8)$$

O comprimento da circunferência  $l_i$  e  $l_e$  são mostradas na figura 8.

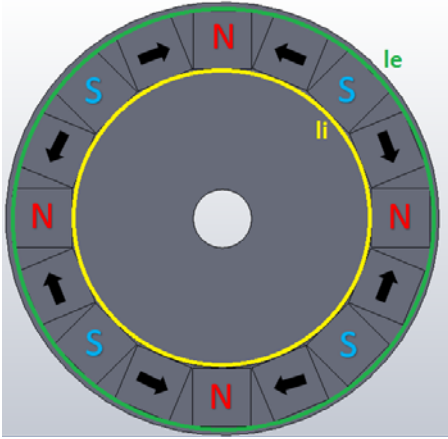


Figure 8: Circunferência interna e externa do rotor com arranjo Halbach

Fonte: Arquivo do autor

Conhecendo os valores de  $r_i$  e  $r_e$  é possível calcular  $K_r$ , que é a razão entre os raios interno e externo e deve situar-se de 0,57 a 0,63 [MILLER1989], para obter uma eficiência da máquina de aproximadamente 0,95. Porém devido as características físicas do imã a ser utilizado no projeto o valor de  $K_r$  é:

$$K_r = \frac{r_i}{r_e} = 0,71 \quad (9)$$

As bobinas de armadura circular são fixadas no estator, ficando posicionadas entre os rotores, expostas a campo magnético variável, devido ao giro dos rotores.

Os procedimentos analíticos de cálculos para o projeto são os descritos em [BUMBY2005], com a hipótese de que, no centro axial do estator, a distribuição de densidade de fluxo magnético induzido  $B_m(x)$  na direção axial  $x$ , tem forma senoidal, com raio igual à metade do passo de polo do rotor, resultando:

$$B_m(x) = \left[ \frac{J_n \cdot \mu_0 \cdot \sinh \cdot un \cdot tn}{un \cdot \sinh \cdot un \cdot \frac{g}{2}} \right] = \cos an = \hat{B} \cos un \cdot x \quad (10)$$

Sendo  $\mu_0$  a permeabilidade magnética do vácuo,  $g$  o vazio efetivo de ar e  $J_n$  a densidade magnética de corrente equivalente definida por:

$$J_n = \frac{4}{T} T * \frac{B_{rem}}{\mu_0 \mu_{rec}} \text{ sen } \frac{ux}{2} * dm, (A/m^2) \quad (11)$$

Sendo:

$B_{rem}$  = Remanência magnética  
 $dm$  = diâmetro do imã

$T$  = Passo polar, onde:

$$T = \frac{\pi D_0}{2p} = \frac{\pi}{8} * 0,050 = 0,01963$$

$$eu = \frac{2p}{2D_0} = \frac{8}{0,10} = 80$$

é uma constante.

O pico de densidade de fluxo no eixo médio do estator tem valor:

$$B_{pico} = \frac{4Br}{\mu_r \pi} \text{ sen } \frac{Prm}{2ri} * \frac{\sinh \left( \frac{plm}{2ri} \right)}{\frac{\sinh[P(2lm+g)]}{4ri}} = 0,4366 T$$

Sendo  $Br$  e  $\mu_r$  a densidade de fluxo magnético residual e a permeabilidade relativa, respectivamente. Os demais parâmetros são os descritos no Anexo.

A estrutura do estator foi elaborada de duas maneiras: uma com duas associações de bobinas no estator e outra com uma associação. Porém para um melhor aproveitamento de tensões induzidas foram elaboradas 12 bobinas, sendo 4 por fase, nas duas montagens.

Na figura 9 identifica-se a estrutura com dois estatores e a figura 10 com apenas um estator. Na associação com dois estatores tomou-se o cuidado de diminuir os espaços entre os estatores para evitar as perdas do campo magnético.

O núcleo das bobinas dos estatores não foram preenchidas por material ferromagnético em nenhuma das associações.



Figure 9: Estrutura de bobinas para o conjunto com dois Estatores

Fonte: Arquivo do autor

A topologia final do gerador pode ser observada no esquema da figura 11.

Onde: 1) disco rotor; 2) imãs; 3) armadura das bobinas; 4) disco estator; 5) eixo gerador ligado ao motor

No acionamento do eixo do gerador foi utilizado um motor trifásico da marca WEG. Para o controle de rotação do rotor foi utilizado bancada didática DE Lorenzo com inversor de frequência WEG.

As montagens dos geradores foram realizadas associações de bobinas em série de 4 em 4, formando uma fase.

As associações de fases permitiram a montagem de sistemas em estrela (Y) e em triângulo ( $\Delta$ ), nos dois geradores,



Figure 10: Estrutura de bobinas para o conjunto com um Estator  
Fonte: Arquivo do autor

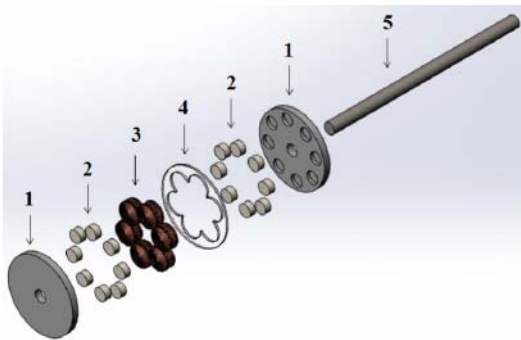


Figure 11: Esquema expandido da estrutura geral do Gerador  
Fonte: Arquivo do autor

que foram ligadas a 3 cargas puramente resistivas.

Nas associações em Y, como mostrado na figura 12, foram medidas correntes de linha e tensões fase – neutro sobre as resistências, em função da rotação.

O gerador que apresenta dois estatores foram feitas as associações com cada estator individualmente, pois a interligação dos dois em série ocasionou correntes elevadas em altas rotações, o que pode ocasionar a queima da fiação.

Assim estabeleceu Estator 1 e 2 para o gerador com dois estatores.

Em anexo valores das tabelas 1 e 2 para o gerador com dois estatores, respectivamente.

A tabela 3, também em anexo, mostra os valores de tensões e correntes para o gerador com apenas um estator.

As leituras das tensões foram realizadas com um multímetro de bancada da marca Minipa, modelo MDM – 8045C. Para as leituras das correntes utilizou-se amperímetros da marca Instrutemp, modelo MD-390.

Para as cargas associadas em triângulo ( $\Delta$ ), conforme a figura 13, foram realizadas leituras de correntes de linha e tensões fase – fase, sobre a carga.

Utilizando o gerador com dois Estatores foram obtidas

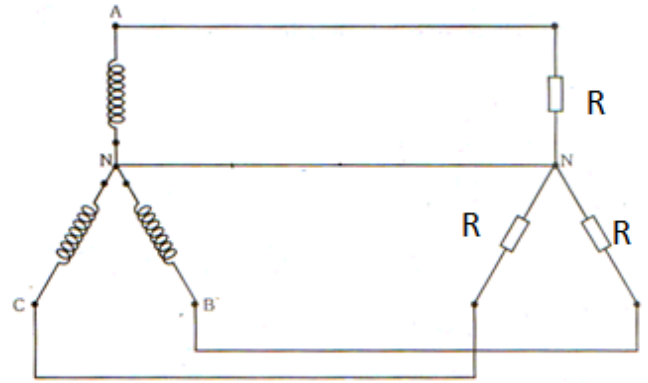


Figure 12: Montagem do sistema em Estrela (Y)  
Fonte: Arquivo do autor

tensões e correntes, em Anexo, sendo a tabela 4 para o Estator 1 e tabela 5 para o Estator 2. A tabela 6, também em anexo, mostra os valores para o Gerador com apenas um Estator.

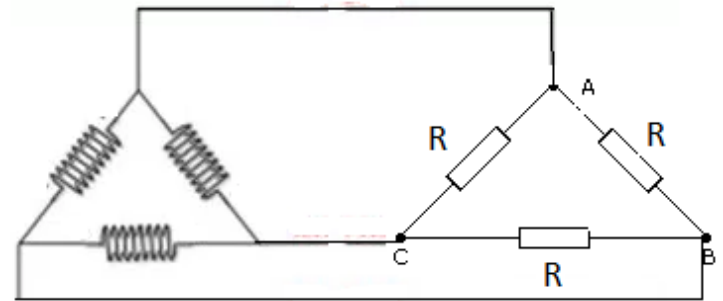


Figure 13: Esquema elétrico da montagem do sistema em configuração Triângulo ( $\Delta$ )  
Fonte: Arquivo do autor

Na determinação das potências trifásicas e as perdas por efeito Joule e correntes parasitas utilizou-se o circuito equivalente, segundo a figura 14.

Para os cálculos das Perdas por Efeito Joule foram determinados pela equação 12.

$$P_{cu} = 2 * I_{fase}^2 * R_b (w) \quad (12)$$

A perda devido às contracorrentes ou correntes parasitas induzidas na bobina (correntes eddy) é: (BOLDEA), (KRAUS; CARVER, 1973), segundo a equação 13.

$$P_{eddy\ bobina} = \frac{1}{16} (\omega B D_{cu})^2 * \frac{1}{\rho_{cu}} (2n) \cdot E \cdot \left( \frac{\pi D_{cu}}{4} \right) \quad (13)$$

A potência perdida devido às contracorrentes é muito pequena em geradores axiais de baixa rotação e podem ser desprezadas, quando comparadas com as perdas por efeito Joule [CARTER1967].

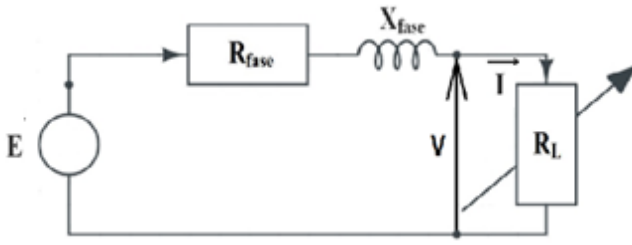


Figure 14: Circuito equivalente considerado para determinação das potências trifásicas e perdas por efeito Joule e por correntes parasitas

Fonte: Arquivo do autor

A perda Total  $P_{TP}$  de potência é:

$$P_{Total\ Perda} = P_{Joule} + P_{eddy} \quad (14)$$

Foram calculadas as potências trifásicas em função das rotações do gerador. As medidas oscilam entre 100 e 1200 rotações por minuto, em intervalos de 100 rotações.

Com o sistema de associação em estrela foram determinadas as potências trifásicas para o Estator 1, em função da rotação, como observado na Figura 15 e para o Estator 2 pelo Figura 16, ambos para o Gerador com 2 Estatores.

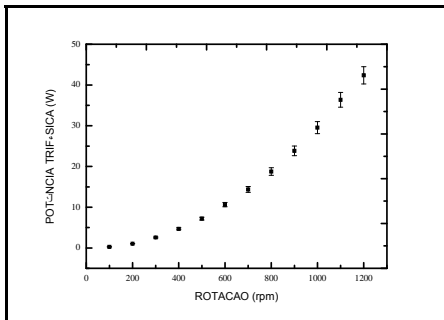


Figure 15: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Estator 1 – Gerador com 2 Estatores – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

A potência máxima atingida pelo Estator 1 foi de  $42,4 \pm 0,5$  W, no entanto para o Estator 2 a potência trifásica chegou a  $91,1 \pm 0,5$  W. É importante destacar que o rotor estava mais próximo do Estator 2 do que do 1, o que implica em um maior fluxo magnético atravessando as bobinas e uma maior potência fornecida pelo Gerador.

No sistema ligado em Triângulo pode ser observado o comportamento da potência através do Figura 17, que apresenta as potências trifásicas do Estator 1, em função da rotação, para o Gerador com 2 Estatores.

A potência trifásica máxima atingida para 1200 rotações foi de  $11,4 \pm 0,5$  W, no entanto, para o Estator 2 o valor máximo obtido foi de  $16,5 \pm 0,5$  W, reforçando que o rotor se encontrava mais próximo das bobinas deste Estator.

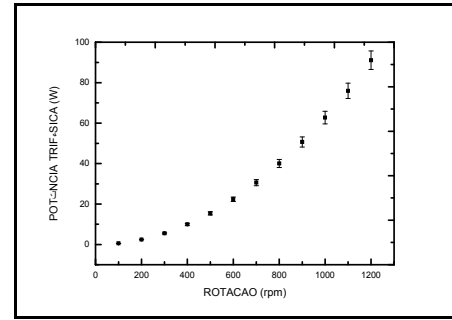


Figure 16: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Estator 2 – Gerador com 2 Estatores – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

Sua variação em função da rotação é mostrada no Figura 18.

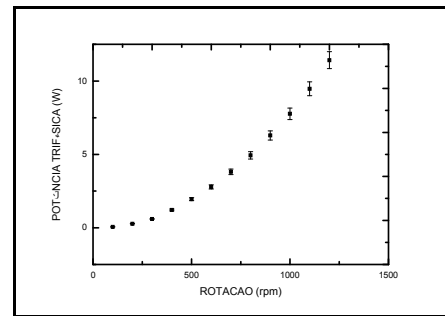


Figure 17: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Estator 1 – Gerador com 2 Estatores – Associação em  $\Delta$   
Fonte: Arquivo do autor

Utilizando o Gerador com um Estator, também se associou as cargas em estrela e em triângulo e obteve-se os Figuras 19 e 20 das potências trifásicas em função da rotação.

Com apenas um Estator as potências trifásicas obtidas nas duas associações atingiram valores elevados em relação ao Gerador com dois Estatores.

Na associação em Y os valores chegaram a  $(1815 \pm 0,5)$  W e em triângulo o máximo obtido, com 1200 rotações, foi de  $(586,8 \pm 0,5)$  W.

Apesar das potências serem elevadas observar-se que as temperaturas das bobinas subiram muito à partir de 800 rotações.

No sistema em estrela chegaram a  $(125 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ , em 1200 rotações, o que poderia ter levado à fusão do isolamento da fiação e conseqüente curto – circuito no Estator.

Assim para o Gerador com dois Estatores não foram realizadas a interligação das bobinas nos dois Estatores para evitar uma sobreaquecimento e conseqüente curto-circuito.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram determinados o rendimento de cada estator para o Gerador com dois Estatores e para o Gerador com apenas um

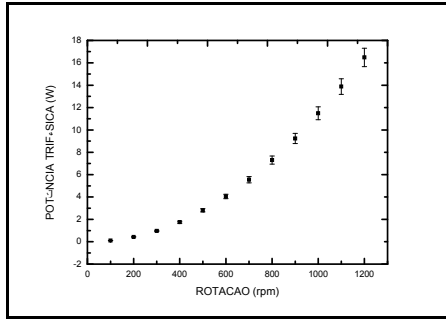


Figure 18: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Estator 2 – Gerador com 2 Estatores – Associação em  $\Delta$   
Fonte: Arquivo do autor

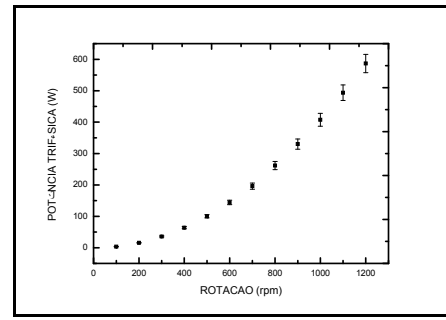


Figure 20: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Gerador com 1 Estator – Associação em  $\Delta$   
Fonte: Arquivo do autor

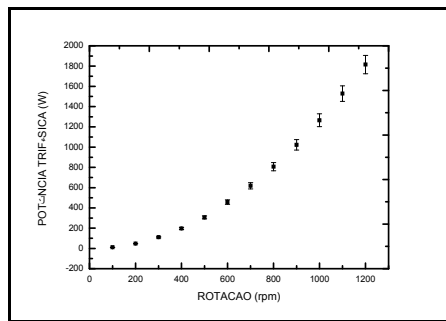


Figure 19: Potência trifásica em função da velocidade de Rotação – Gerador com 1 Estator – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

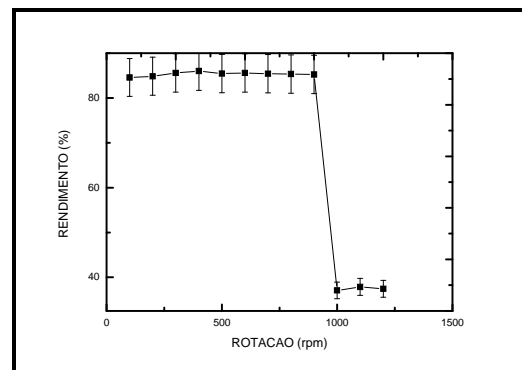


Figure 21: Rendimento em função da velocidade de Rotação – Gerador com 2 Estatores – Estator 1 – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

em cada uma das associações.

A determinação da eficiência elétrica ou rendimento é dado pela equação 14:

$$\eta = \frac{P_{total}}{P_{total} + P_{total\ perdida}} \quad (15)$$

Nas associações em Estrela (Y) foi observado para o Gerador com 2 Estatores, nos Figuras 21 e 22, um rendimento elevado de  $85 \pm 1\%$  para o Estator 1 até 900 rotações, chegando a  $92 \pm 1\%$  para o Estator 2, na mesma rotação. Após o rendimento caiu verticalmente até aproximadamente  $37 \pm 1\%$  e  $56 \pm 1\%$ , para cada Estator respectivamente.

No entanto para o Gerador com apenas 1 Estator, o rendimento não foi muito elevado, devido as perdas por efeito Joule, como observado no Figura 23, atingindo valores de apenas  $19 \pm 1\%$  em 1200 rotações por minuto.

Em associações em triângulo ( $\Delta$ ) o rendimento foi ainda maior para o Gerador com 2 Estatores, apresentando valores em torno de  $96\%$  em qualquer rotação no Estator 1 e  $97 \pm 1\%$  para o Estator 2, como observado nos Figuras 24 e 25.

No entanto com o Gerador com apenas 1 Estator, em ligação em  $\Delta$ , o rendimento também foi baixo atingindo valores no máximo de  $2,9 \pm 0,1\%$  em até 1200 rotações, como observado pelo gráfico 12.

No entanto com o Gerador com apenas 1 Estator, em

ligação em  $\Delta$ , o rendimento também foi baixo atingindo valores no máximo de  $2,9 \pm 0,1\%$  em até 1200 rotações, como observado pelo Figura 26. Observa-se também que o grau de variação em todos os gráficos de rendimento seja de apenas  $0,5 \pm 0,1\%$ , indicando que as variações nos valores são muito pequenas em relação à possíveis erros de leitura dos equipamentos de medida.

No entanto com o Gerador com apenas 1 Estator, em ligação em  $\Delta$ , o rendimento também foi baixo atingindo valores no máximo de  $2,9 \pm 0,1\%$  em até 1200 rotações, como observado pelo Figura 26. Observa-se também que o grau de variação em todos os gráficos de rendimento seja de apenas  $0,5 \pm 0,1\%$ , indicando que as variações nos valores são muito pequenas em relação à possíveis erros de leitura dos equipamentos de medida.



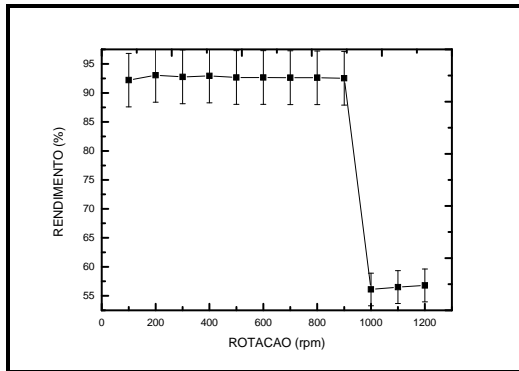


Figure 22: Rendimento em função da velocidade de Rotação – Gerador com 2 Estatores – Estator 2 – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

indução trifásica. Entretanto o custo da montagem desses rotores, que utilizam ímãs trapezoidais, torna o sistema de valor elevado o que inviabiliza em muitos casos a sua elaboração. No presente trabalho, afim de diminuir os cus-

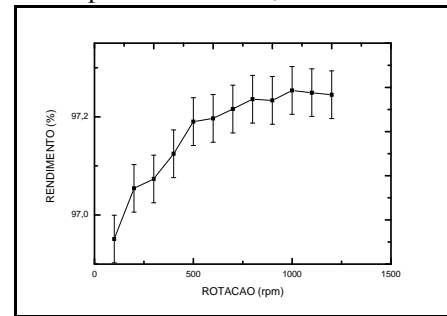


Figure 25: Rendimento em função da velocidade de Rotação – Gerador com 2 Estatores – Estator 2 – Associação em Δ  
Fonte: Arquivo do autor

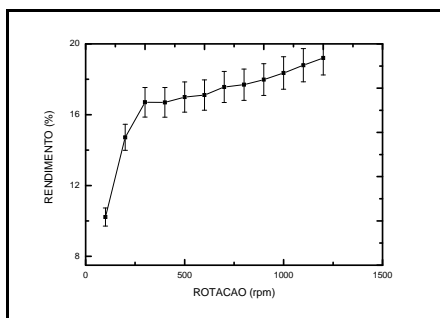


Figure 23: Rendimento em função da velocidade de Rotação – Gerador com 1 Estator – Associação em Y  
Fonte: Arquivo do autor

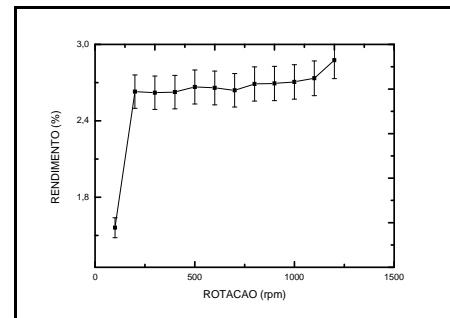


Figure 26: Rendimento em função da velocidade de Rotação – Gerador com 1 Estator – Associação em Δ  
Fonte: Arquivo do autor

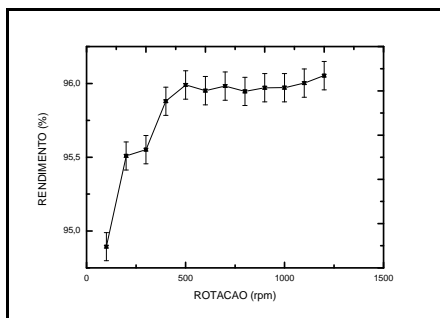


Figure 24: Rendimento em função da velocidade de Rotação o – Gerador com 2 Estatores – Estator 1 – Associação em Δ  
Fonte: Arquivo do autor

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos dados experimentais, identificou-se características desejáveis de um sistema de Halbach, pelo seu alto rendimento utilizando dois ou mais rotores em máquinas de

tos deste sistema, utilizou-se um rotor com ímãs cúbicos de neodímio na geração de campo magnético e indução de tensões no estator.

A metodologia proposta, com base nos dois geradores construídos, trouxe como conclusão que os geradores após serem associados a dois sistemas: em triângulo e em estrela, foram determinadas suas potências trifásicas, em função da rotação. Assim com apenas um único estator as potências trifásicas obtidas nas duas associações atingiram valores muito elevados em relação ao gerador com dois estatores. Foram determinados os rendimentos dos geradores levando em consideração as potências trifásicas e as perdas por efeito Joule e correntes parasitas, concluindo que o gerador com dois estatores apresentaram maiores rendimentos que o gerador com apenas um estator. A tendência atual é desenvolver tecnologias visando elevar o grau de eficiência dos geradores com indução trifásica, com a redução da dispersão magnética que ocasiona a perda de tensão e a diminuição dos custos.

## ANEXO

## Dimensões do Gerador

Dimensões do imã:

Rm: raio= 11mm

Tm= espessura= 10mm

Comprimento axial do estator = 10mm

Espessura do disco do rotor = 10mm

Comprimento axial do rotor = 20mm

Diâmetro do vazio-ar médio da máquina =  $r_1 + r_0$

$D_g = 50+70 = 120\text{mm}$

Efetivo vazio-ar :  $g_e = 2+10 + 2*1,5 + 10 = 33\text{mm}$ ; sendo  $g = 1,5\text{mm}$  o vazio ar entre os discos rotor-estator.

Comprimento axial da máquina:

$L_{maq} = 2 * L_{rotor} + L_{estator} + 3 = 56\text{mm}$

Número de bobinas no estator:

$n = 34 p = 34 \cdot 8 = 6 \text{ bobinas}$

Passo polar:  $\tau = 2\pi 2D0 = 0,0393$

Número de espiras por bobinas = 210

Dimensões da armadura das bobinas:

E= espessura = 15mm

Rib= Raio interno= 0,5mm

Reb= raio externo = 20 mm

Fio da armadura: Cobre, Dcu = 1mm

ESTATOR 1						
RESISTOR	$R_1=(2,21\pm 0,01) \Omega$		$R_2=(2,25\pm 0,01) \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01) \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	$\Phi_1$ (V)		$\Phi_2$ (V)		$\Phi_3$ (V)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100±1	0,066±0,001	0,030±0,001	0,090±0,001	0,040±0,001	0,068±0,001	0,033±0,001
200±1	0,130±0,001	0,061±0,001	0,180±0,001	0,079±0,001	0,145±0,001	0,066±0,001
303±1	0,199±0,001	0,094±0,001	0,274±0,001	0,121±0,001	0,219±0,001	0,102±0,001
401±1	0,265±0,001	0,126±0,001	0,365±0,001	0,160±0,001	0,289±0,001	0,135±0,001
500±1	0,334±0,001	0,159±0,001	0,464±0,001	0,207±0,001	0,360±0,001	0,167±0,001
603±1	0,405±0,001	0,193±0,001	0,560±0,001	0,250±0,001	0,431±0,001	0,201±0,001
700±1	0,474±0,001	0,227±0,001	0,655±0,001	0,293±0,001	0,498±0,001	0,23±0,001
802±1	0,544±0,001	0,261±0,001	0,751±0,001	0,337±0,001	0,572±0,001	0,27±0,001
900±1	0,617±0,001	0,296±0,001	0,847±0,001	0,381±0,001	0,646±0,001	0,302±0,001
1000±1	0,669±0,001	0,321±0,001	4,140±0,001	1,980±0,001	0,665±0,001	0,305±0,001
1100±1	0,726±0,001	0,348±0,001	4,510±0,001	2,160±0,001	0,719±0,001	0,336±0,001
1210±1	0,805±0,001	0,388±0,001	4,940±0,001	2,350±0,001	0,789±0,001	0,369±0,001

Gerador com dois Estatores – Carga somente com o Estator 1 – Associação em Estrela (Y)

ESTATOR 2						
RESISTOR	$R_1=(2,21\pm 0,01) \Omega$		$R_2=(2,25\pm 0,01) \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01) \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	$\Phi_1$ (V)		$\Phi_2$ (V)		$\Phi_3$ (V)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
103±1	0,100±0,001	0,050±0,001	0,120±0,001	0,055±0,001	0,110±0,001	0,053±0,001
201±1	0,210±0,001	0,099±0,001	0,238±0,001	0,106±0,001	0,220±0,001	0,104±0,001
304±1	0,326±0,001	0,155±0,001	0,350±0,001	0,156±0,001	0,335±0,001	0,158±0,001
400±1	0,442±0,001	0,211±0,001	0,463±0,001	0,203±0,001	0,440±0,001	0,208±0,001
502±1	0,561±0,001	0,268±0,001	0,589±0,001	0,258±0,001	0,553±0,001	0,262±0,001
600±1	0,674±0,001	0,323±0,001	0,713±0,001	0,317±0,001	0,661±0,001	0,313±0,001
703±1	0,796±0,001	0,381±0,001	0,826±0,001	0,369±0,001	0,773±0,001	0,370±0,001
804±1	3,400±0,001	1,700±0,001	3,380±0,001	1,620±0,001	3,210±0,001	1,580±0,001
900±1	3,800±0,001	1,900±0,001	3,790±0,001	1,800±0,001	3,570±0,001	1,750±0,001
1005±1	4,220±0,001	2,090±0,001	4,200±0,001	2,000±0,001	3,950±0,001	1,940±0,001
1103±1	4,600±0,001	2,280±0,001	4,590±0,001	2,180±0,001	4,320±0,001	2,120±0,001
1205±1	5,000±0,001	2,48±0,001	4,990±0,001	2,370±0,001	4,600±0,001	2,300±0,001

Gerador com dois Estatores – Carga somente com o Estator 2 – Associação em Estrela (Y)

ESTATOR						
RESISTOR	$R_1=(2,27\pm 0,01) \Omega$		$R_2=(2,23\pm 0,01) \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01) \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	$\Phi_1$ (V)		$\Phi_2$ (V)		$\Phi_3$ (V)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100±1	1,080±0,001	0,710±0,001	1,040±0,001	0,680±0,001	1,030±0,001	0,730±0,001
200±1	2,360±0,001	1,240±0,001	2,300±0,001	1,170±0,001	2,250±0,001	1,230±0,001
300±1	3,550±0,001	1,780±0,001	3,340±0,001	1,630±0,001	3,380±0,001	1,730±0,001
400±1	4,750±0,001	2,380±0,001	4,400±0,001	2,130±0,001	4,550±0,001	2,360±0,001
500±1	5,930±0,001	2,940±0,001	5,600±0,001	2,670±0,001	5,660±0,001	2,890±0,001
600±1	7,100±0,001	3,500±0,001	6,700±0,001	3,060±0,001	6,800±0,001	3,420±0,001
700±1	8,270±0,001	4,070±0,001	8,000±0,001	3,800±0,001	7,900±0,001	3,980±0,001
800±1	9,370±0,001	4,620±0,001	9,100±0,001	4,300±0,001	8,970±0,001	4,550±0,001
900±1	10,440±0,001	5,140±0,001	10,070±0,001	4,800±0,001	10,100±0,001	5,070±0,001
1000±1	11,460±0,001	5,620±0,001	11,100±0,001	5,270±0,001	11,080±0,001	5,600±0,001
1100±1	12,400±0,001	6,080±0,001	11,960±0,001	5,710±0,001	12,150±0,001	6,070±0,001
1200±1	13,270±0,001	6,570±0,001	13,000±0,001	6,140±0,001	12,880±0,001	6,500±0,001

Tabela 3 – Gerador com Um Estator – Associação em Estrela (Y)

ESTATOR 1						
RESISTOR	$R_1=(2,21\pm 0,01) \Omega$		$R_2=(2,25\pm 0,01) \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01) \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	$\Phi_1$ (V)		$\Phi_2$ (V)		$\Phi_3$ (V)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
100±1	0,033±0,001	0,014±0,001	0,028±0,001	0,008±0,001	0,054±0,001	0,002±0,001
202±1	0,068±0,001	0,030±0,001	0,047±0,001	0,018±0,001	0,102±0,001	0,047±0,001
301±1	0,096±0,001	0,043±0,001	0,066±0,001	0,026±0,001	0,152±0,001	0,071±0,001
401±1	0,130±0,001	0,059±0,001	0,085±0,001	0,036±0,001	0,202±0,001	0,095±0,001
500±1	0,160±0,001	0,074±0,001	0,107±0,001	0,044±0,001	0,252±0,001	0,119±0,001
603±1	0,192±0,001	0,089±0,001	0,126±0,001	0,054±0,001	0,303±0,001	0,143±0,001
701±1	0,222±0,001	0,104±0,001	0,147±0,001	0,062±0,001	0,354±0,001	0,166±0,001
802±1	0,256±0,001	0,119±0,001	0,164±0,001	0,071±0,001	0,405±0,001	0,190±0,001
901±1	0,289±0,001	0,135±0,001	0,183±0,001	0,080±0,001	0,455±0,001	0,213±0,001
1003±1	0,321±0,001	0,150±0,001	0,203±0,001	0,089±0,001	0,504±0,001	0,237±0,001
1102±1	0,355±0,001	0,166±0,001	0,223±0,001	0,097±0,001	0,553±0,001	0,259±0,001
1202±1	0,387±0,001	0,182±0,001	0,243±0,001	0,106±0,001	0,603±0,001	0,283±0,001

Tabela 3 – Gerador com dois Estatores – Carga somente com o Estator 1 – Associação em Triângulo ( $\Delta$ )

ESTATOR 2						
RESISTOR	$R_1=(2,21\pm 0,01) \Omega$		$R_2=(2,25\pm 0,01) \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01) \Omega$	
ROTAÇÕES (rpm)	$\Phi_1$ (V)		$\Phi_2$ (V)		$\Phi_3$ (V)	
	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE	TENSÃO	CORRENTE
	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
103±1	0,060±0,001	0,028±0,001	0,051±0,001	0,020±0,001	0,034±0,001	0,012±0,001
201±1	0,120±0,001	0,055±0,001	0,108±0,001	0,042±0,001	0,048±0,001	0,023±0,001
300±1	0,179±0,001	0,083±0,001	0,160±0,001	0,072±0,001	0,080±0,001	0,035±0,001
400±1	0,239±0,001	0,112±0,001	0,228±0,001	0,097±0,001	0,103±0,001	0,047±0,001
503±1	0,301±0,001	0,142±0,001	0,291±0,001	0,128±0,001	0,126±0,001	0,059±0,001
603±1	0,359±0,001	0,169±0,001	0,367±0,001	0,162±0,001	0,148±0,001	0,070±0,001
703±1	0,417±0,001	0,197±0,001	0,429±0,001	0,190±0,001	0,172±0,001	0,082±0,001
804±1	0,479±0,001	0,227±0,001	0,502±0,001	0,215±0,001	0,194±0,001	0,094±0,001
900±1	0,539±0,001	0,256±0,001	0,564±0,001	0,251±0,001	0,218±0,001	0,106±0,001
1005±1	0,602±0,001	0,287±0,001	0,626±0,001	0,279±0,001	0,242±0,001	0,118±0,001
1103±1	0,660±0,001	0,315±0,001	0,688±0,001	0,306±0,001	0,265±0,001	0,129±0,001
1205±1	0,722±0,001	0,345±0,001	0,749±0,001	0,329±0,001	0,287±0,001	0,139±0,001

Tabela 4 – Gerador com dois Estatores – Carga somente com o Estator 2 – Associação em Triângulo ( $\Delta$ )

RESISTOR	ESTATOR					
	$R_1=(2,21\pm 0,01)\ \Omega$		$R_2=(2,25\pm 0,01)\ \Omega$		$R_3=(2,23\pm 0,01)\ \Omega$	
	$\Phi_1\ (V)$		$\Phi_2\ (V)$		$\Phi_3\ (V)$	
	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)	TENSÃO (V)	CORRENTE (A)
100±1	0,920±0,001	0,980±0,001	0,930±0,001	1,050±0,001	0,870±0,001	1,100±0,001
200±1	1,930±0,001	1,750±0,001	2,000±0,001	1,760±0,001	1,830±0,001	1,790±0,001
300±1	3,030±0,001	2,630±0,001	3,080±0,001	2,560±0,001	2,940±0,001	2,600±0,001
400±1	4,150±0,001	3,580±0,001	4,140±0,001	3,510±0,001	4,020±0,001	3,620±0,001
500±1	5,250±0,001	4,410±0,001	5,130±0,001	4,340±0,001	5,100±0,001	4,540±0,001
600±1	6,230±0,001	5,350±0,001	6,000±0,001	5,200±0,001	6,150±0,001	5,430±0,001
700±1	7,400±0,001	6,250±0,001	7,240±0,001	6,050±0,001	7,230±0,001	6,400±0,001
800±1	8,450±0,001	7,140±0,001	8,300±0,001	6,920±0,001	8,290±0,001	7,330±0,001
900±1	9,450±0,001	8,040±0,001	9,270±0,001	7,740±0,001	9,320±0,001	8,230±0,001
1000±1	10,400±0,001	8,900±0,001	10,200±0,001	8,580±0,001	10,340±0,001	9,130±0,001
1100±1	11,320±0,001	9,710±0,001	11,090±0,001	9,360±0,001	10,540±0,001	10,060±0,001
1200±1	11,920±0,001	10,280±0,001	11,670±0,001	9,890±0,001	11,820±0,001	10,770±0,001

Tabela 5 – Gerador com Um Estator – Associação em Triângulo ( $\Delta$ )

### Bibliography

- [1] [ABEE2018] Associação Brasileira de Energia Eólica. 15 de Fevereiro de 2018. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/noticias/brasil-sobe-mais-uma-posicao-no-ranking-mundial-de-capacidade-instalada-de-energia-eolica/>>
- [2] [ANEEL2011] Aneel - agência nacional de energia elétrica - banco de informações de geração. Banco de Informações de Geração, Agosto/2011, 2011. URL <http://www.aneel.gov.br>.
- [3] [BUMBY2005] Bumby JR and MARTIN, R. **Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines**. Proc. Inst. Electr.Eng. Electr. Power Appl., 2005. 15- pp 1065-1075
- [4] [COEY2009] J.M.Coe, **Magnetism and Magnetic Materials**, Cambridge University Press, 2009, pg. 473-477.
- [5] [DE OLIVEIRA2012] Sebastião EM; SEBASTIÃO, FQ de A. **Ensaio e Extração de Parâmetros Utilizados em Modelagem de Máquina Síncrona de Ímas Permanentes**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia, Go. 15 a 18 de Maio de 2012.
- [6] [FILHO2014] A. S. CARDOSO J. G..**Energia eólica: tipos de geradores e conversores usados atualmente**. O Setor Elétrico / Maio de 2014.
- [7] [HALBACH1980] Klaus. **Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material**. Nuclear instruments and methods, v. 169, n. 1, p. 1-10, 1980.
- [8] [HALLIDAY2010] David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física**, Vol.III . Capítulo 30. LTC, 2010.
- [9] [LIU2018] L., Chunyuan et al. **Spatial harmonic analysis on a permanent magnet linear generator with Halbach array for direct-driver wave energy conversion**. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields, v. 31, n. 5, p. e2316, 2018.
- [10] [LIU2018] L., Kai et al. **Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators**. IEEE Transactions on Magnetics, 2018.
- [11] [MERRITT1994] Bernard T. et al. **Halbach array motor/generators: A novel generalized electric machine**. Lawrence Livermore National Lab., CA (United States), 1994.
- [12] [MILLER1989] Timothy John Eastman. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Oxford Science Publications-Clarendon Press, 1989.
- [13] [MOREIRA2005] M. A. C.. **Projeto de motores lineares com auxílio do método dos elementos finitos**. Rio de Janeiro, RJ. Brasil. Março/2005.
- [14] [RAHMAN1985] R., M.; SLEMON, G. **Promising applications of neodymium boron iron magnets in electrical machines**. IEEE transactions on Magnetics, v. 21, n. 5, p. 1712-1716, 1985.
- [15] [SITAPATI2001] R Krishnan. **Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines**. IEEE Transactions on Industry Applications, 37(??):1219–1226, 2001.
- [16] [SUNI2009] J.C.P. **Determinação de Parâmetros de Geradores Síncronos para Estudos de Comportamento Dinâmico de Sistemas Elétricos – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – UNICAMP – 31 DE JUL. 2009**
- [17] [WANG2005] Xiaoyuan, Zhao Fang, Du Jingjuan, and Tang Renyuan. **The magnetic field simulation of multi-disc coreless magnet synchronous motor based on halbach array**. Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on 3, Vol. 3:2083 – 2086, 2005.
- [18] [ZHU2001] Z. Q.; HOWE, D. **Halbach permanent magnet machines and applications: a review**. IEE Proceedings-Electric Power Applications, v. 148, n. 4, p. 299-308, 2001.