

# Projeto e desenvolvimento de um gerador síncrono de fluxo axial a baixo custo para aplicações em turbinas eólicas

1<sup>st</sup> Ruan T. Cruz

Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Universidade Federal Rural do Semi Arido  
Mossoró, Brasil  
ruan.t.c@outlook.com

2<sup>nd</sup> Victor P. B. Aguiar

Departamento de Engenharia e Tecnologia  
Universidade Federal Rural do Semi Arido  
Mossoró, Brasil  
victor@ufersa.edu.br

**Resumo**— Atualmente, a busca por novas fontes geradoras de energia que apresentem o mínimo possível de agressão ao meio ambiente e à sociedade são uma forte tendência mundial. De acordo com uma revisão do potencial eólico em terra, do Brasil, o país pode ter uma capacidade de geração ampliada em seis vezes comparado ao valor estimado até 2018. Pelo Atlas de Energia Elétrica do Brasil publicado pela ANEEL, o potencial eólico brasileiro é da ordem de 143 GW. Este cenário favorável para o desenvolvimento da energia eólica, influencia o desenvolvimento, projeto e fabricação, de novas tecnologias de geradores elétricos. Assim, este trabalho apresenta o projeto e desenvolvimento de um gerador síncrono de fluxo axial com ímãs permanentes sem ranhuras, a partir do seu projeto eletromagnético e detalhes da fabricação do protótipo. São apresentados medidas de campo magnético de acordo com o projeto, apresentando a sua característica de formação de torque de relutância e o levantamento dos custos na fabricação deste gerador. Apesar das medições de campo magnético realizadas não foi possível a confirmação da tensão gerada pela máquina, perfazendo esta a segunda parte do projeto: levantamento da curva de entreferro do gerador.

**Palavras-chave**— Construção, geração distribuída, potencial eólico, fluxo axial, ímãs permanentes, custo.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos com as crises ocorridas no setor elétrico houve a necessidade de realizar a diversificação da matriz energética [1]. A introdução de sistemas elétricos tem evoluído para uma estratégia de controle cada vez mais descentralizada devido a possibilidade de realizar geração de energia em pequenas unidades como em plantas de cogeração (biomassa), e fontes de energia renováveis como eólica e fotovoltaica [1], [2].

Com o avanço da tecnologia, a crescente demanda por fontes de energia renováveis tem gerado discussões sobre o futuro da geração de energia elétrica no Brasil e no mundo [3], [4]. O maior interesse no assunto vem acompanhado de pesquisas que prevêem o futuro esgotamento de fontes energéticas não renováveis, como o petróleo, carvão mineral e gás natural. O Brasil possui um dos maiores programas de energia renovável do mundo, incentivando o crescimento e estruturação deste mercado no país. [3]

Existem pesquisas sendo desenvolvidas desde o levantamento de potenciais de vento mais precisos, até novas tecnologias de geradores elétricos, utilizando ímãs permanentes voltado para o uso residencial ou comercial no âmbito da geração distribuída [2], [3]. Dentre as novas tecnologias há destaque para geradores síncronos de fluxo

axial visto que seu formato permite uma melhor distribuição das hélices, e possuem duas topologias já estudadas, um deles com ranhuras de ferro e outro com a ausência de ranhuras [5]. A diferença entre as duas topologias consiste nas menores perdas no ferro que o gerador síncrono de fluxo axial com ímãs permanentes sem ranhuras tem em relação ao mesmo tipo de gerador com ranhuras [5]. Tudo isto mais que justifica o investimento em pesquisas e de tempo no aprimoramento e aumento no desempenho de geração de energia elétrica por aerogeradores. [6]

Aerogeradores de pequeno porte, de baixo custo, e fácil fabricação estão ao alcance econômico das pequenas empresas, agricultores e proprietários, e podem ser instalados próximos a comércios e residências reduzindo assim a dependência da rede pública [2], [3]. Desta forma, este trabalho tem por objetivo projetar e desenvolver um gerador síncrono de fluxo axial com ímãs permanentes sem ranhuras, com baixo custo, para aplicações em turbinas eólicas no âmbito da geração distribuída no Brasil. O gerador nesta primeira fase do projeto poderá ser testado, não em ensaios de campo, mas em ensaios laboratoriais, isto é, o projeto e confecção será de um protótipo de gerador, e não de um produto final.

## II. PROJETO ELETROMAGNÉTICO

Para a realização do projeto de um gerador com ímãs permanentes de fluxo axial, faz-se necessário a determinação de alguns parâmetros chave, os quais serão apresentados nesta seção [6] e [7].

É necessário iniciar o projeto a partir de um valor de tensão desejado para a geração, de modo que, a partir disso, seja dado início aos estudos necessários para se obter o dimensionamento correto. De acordo com [6] a equação (1) foi tomada como referência para a determinação da tensão nominal da máquina geradora.

$$E_b = \frac{1}{\sqrt{2}} N_b k_{w1} 2\pi f \Phi, \quad (1)$$

onde:

$k_{w1}$  → Fator de enrolamento, como se trata de bobinas concentradas, considerou-se igual a 1.

$E_b$  → Tensão de fase nominal por bobina;

$\Phi$  → Fluxo magnético;

$f$  → Frequência de geração;

$N_b$  → número de espiras por bobina.

A configuração adotada para a máquina não apresentava a necessidade de um núcleo com ranhuras na sua forma construtiva. Diante da equação (1) se tornou evidente a necessidade de se determinar a densidade do fluxo magnético que seria imposto no entreferro da máquina, bem como a frequência em que a mesma iria operar em condições nominais e a quantidade de espiras por fase adotada.

Primeiramente, de acordo com [6], temos que o fluxo pode ser dado pela média da densidade de fluxo do ímã em relação a sua própria área:

$$\Phi = B_m A_m, \quad (2)$$

onde:

$B_m \rightarrow$  Densidade de fluxo magnético média do ímã;

$A_m \rightarrow$  Área polar.

De acordo com (2) se faz necessário a determinação dos parâmetros de densidade de fluxo magnético e área polar que estão diretamente relacionados ao ímã adotado para a realização do projeto, bem como da disposição dos mesmos no rotor da máquina durante a concepção do projeto propriamente dito.

A frequência nominal de operação da máquina, segundo [6], é dada pela seguinte equação:

$$f = \frac{n_s}{60} p, \quad (3)$$

onde:

$f \rightarrow$  Frequência de geração mínima;

$n_s \rightarrow$  Rotação do rotor em RPM;

$p \rightarrow$  Pares de pólos.

De acordo com (3), existe a necessidade de se determinar a quantidade de pólos que será adotado para a máquina, o que forneceria em imediato, de acordo com a topologia do projeto, a quantidade de bobinas que seria necessária para a realização do mesmo. A definição desses parâmetros para o dimensionamento do aerogerador fornecerá informações importantes quanto as dimensões finais da máquina em estudo, proporcionando uma visão mais ampla do projeto em si, e também norteando algumas tomadas de decisões importantes como a quantidade de fases que será adotada para o gerador, como o intuito de maximizar o seu aproveitamento e eficiência, implicando nos custos finais do projeto.

Como mencionado anteriormente, a decisão do número de fases da qual a máquina seria composta resultaria em uma outra determinação tão importante quanto para o projeto da máquina, que seria o número de bobinas necessárias para compor o estator do gerador, onde, de acordo com [6], segue que:

$$n_{bob} = 2pm_1, \quad (4)$$

onde:

$n_{bob} \rightarrow$  Número de bobinas no estator da máquina;

$m_1 \rightarrow$  Número de fases da máquina.

Com esta informação em mãos, torna-se possível determinar também o nível desejado de tensão em cada bobina, de acordo com a quantidade de bobinas por fase adotada para o dimensionamento em questão.

Analisando novamente a equação (1), é possível adaptar a mesma para explicitar a tensão gerada em uma fase:

$$E_f = \sum E_b, \quad (5)$$

Com uma análise mais detalhada, pode-se chegar ao valor da densidade de fluxo magnético, segundo [6], a partir da equação constituinte (6) a seguir:

$$B = \mu H, \quad (6)$$

onde:

$B \rightarrow$  Densidade de fluxo magnético;

$\mu \rightarrow$  Permeabilidade magnética;

$H \rightarrow$  Intensidade de campo magnético.

Pode-se determinar também o fluxo magnético a partir da seguinte equação:

$$\Phi = \mu_r A_m (H_m - H_c), \quad (7)$$

onde:

$H_c \rightarrow$  Coercitividade aparente;

$\mu_r \rightarrow$  Permeabilidade de recuo do ímã, igual a  $1,6\mu_0$ ;

$\mu_0 \rightarrow$  Permeabilidade relativa do ar.

Dessa forma, pode-se determinar a coercitividade aparente através da seguinte relação:

$$H_c = B_r / \mu_r \quad (8)$$

Com a determinação da coercitividade aparente, faz-se necessário determinar a intensidade de campo magnético, para que seja possível determinar o fluxo magnético no entreferro da máquina, juntamente com todos os parâmetros mencionados anteriormente. Dessa forma, pode-se determinar a intensidade de campo magnético a partir da seguinte equação:

$$H_m = (B_m - B_r) / \mu_r \quad (9)$$

Por meio da análise da equação (9), fica claro que as características apresentadas pelo ímã adotado, bem como do seu arranjo no rotor da máquina, são importantes para a determinação da densidade de fluxo magnético no entreferro, que passará por cada bobina individualmente, gerando tensão. Desta forma, o próximo capítulo abordará o dimensionamento do ímã a ser empregado na construção do aerogerador, bem como a sua configuração para tornar possível o dimensionamento de todos os parâmetros necessários.

Para a definição da área da seção reta do condutor a ser utilizado nos enrolamentos concentrados em disposição ao fluxo gerado, será utilizado um valor máximo de densidade de corrente equivalente a  $8A/mm^2$ [8]. Essa densidade

máxima de corrente é escolhida devido ao alto número de polos necessários para o projeto, e devido a sua aplicação que será em uma turbina eólica, costumeiramente bem ventilado [8]. A definição do diâmetro do fio é dada por:

$$d = \sqrt{\frac{4I_{1n}}{\pi J}} \quad (10)$$

onde:

$d \rightarrow$  Diâmetro do fio;  
 $I_{1n} \rightarrow$  Corrente nominal;  
 $J \rightarrow$  Densidade de corrente.

### III. METODOLOGIA

A escolha do ímã a ser empregado no projeto implica em determinações importantes com relação ao dimensionamento da máquina. Diante disso, fez-se necessário uma pesquisa de mercado para que se chegasse ao modelo de ímã mais adequado, tanto em termos de alta densidade de fluxo, quanto em custo e dimensões físicas. Determinação dos parâmetros magnéticos

#### A. Determinação dos parâmetros magnéticos

O ímã selecionado para compor a construção do gerador foi um ímã tipo N50 que possui em seu catálogo densidade de fluxo próxima a 0,5T. Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) são ímãs feitos a partir de uma combinação de  $Nd_2Fe_{14}B$ . Esses ímãs possuem bons campos magnéticos comparando-o à outros ímãs, como o de ferrite, ou Samário-Cobalto (SmCo). Devido ao custo-benefício, eles têm substituído os ímãs de SmCo na maioria das aplicações. O ímã adotado apresenta dimensões para a confecção do gerador iguais a 25x10x10mm o que proporciona uma redução na dimensão da máquina e, conseqüentemente, dos custos de fabricação envolvidos. O conjunto de ímãs utilizados é mostrado na Fig.1.

Fig. 1. Ímã Neodímio N50



Fonte: Autoria própria, 2019

Segundo [7] é possível assumir que a magnetização remanescente,  $B_r$ , corresponde à densidade de fluxo que permaneceria atuando em uma seção de um determinado material se a força magnetomotriz (FMM) aplicada fosse reduzida a zero. O significado da magnetização remanescente é que ela pode produzir fluxo magnético em um circuito magnético na ausência de uma excitação externa tal como as correntes nos enrolamentos de campo. A determinação da densidade de fluxo remanescente foi facilitada pela utilização

de um gaussímetro, dispositivo que detém uma aplicação voltada para a determinação específica deste parâmetro, conforme procedimento observado na Fig. 2.

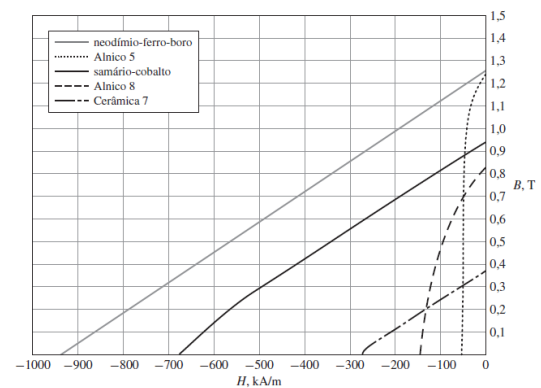
Fig. 2. Medição do campo remanescente com o gaussímetro.



Fonte: Autoria própria, 2019

O valor ao qual foi possível medir foi de 0,497T. Muitos materiais, como o SmCo e NdFeB, apresentam valores de coercitividade elevados e tendem a apresentar valores muito baixos de permeabilidade de recuo. Um exemplo pode ser visto na Fig. 3, que mostra a curva de magnetização CC do NdFeB e na qual é possível observar que esse material, em específico, tem uma remanescência de 1,25 T e uma coercitividade de -940 kA/m [7].

Fig. 3. Curvas de magnetização para ímãs permanentes comuns

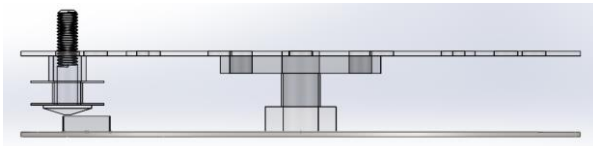


Fonte:Umans, 2014

A inclinação da reta de recuo é igual ao valor da permeabilidade de recuo, que para o NdFeB é igual a 1,06<sup>u.u.</sup>. Dessa forma, se esses materiais operarem nessa região de baixa permeabilidade incremental de suas curvas B-H, não haverá necessidade de estabilização desde que não sejam excessivamente desmagnetizados. É conveniente supor que a curva de magnetização CC desses materiais é linear, dentro do seu intervalo útil de operação [7].

Conforme a seção II, é apresentado na Fig.4, alguns aspectos construtivos importantes para algumas definições.

Fig. 4. Aspectos construtivos de estator e rotor, sem levar em conta o entreferro



.Autoria própria, 2019

O valor de  $B_r$  utilizado nos cálculos foi igual ao valor medido com o Gaussímetro, sendo o valor obtido igual a 0,497T. De acordo com a Fig. 4, o valor de  $g$  será dado pelo afastamento das superfícies de fixação do ímã e da cabeça do parafuso de fixação das bobinas, sendo adotado um valor inicial igual a 20mm. O valor de  $A_m$  foi considerado igual a área de superfície do ímã, sendo igual a  $250 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , e o valor de  $A_g$  foi considerado igual a área da superfície parabólica da cabeça do parafuso de sustentação das bobinas, que é de  $490 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . Com esses parâmetros já definidos, por meio da aplicação da equação (9) foi possível determinar o valor de  $H_m$  que é igual a  $-0,779 \text{ A/m}$ . Foi possível determinar também o valor de  $H_c$  por meio da equação (8), sendo igual a  $-373,13 \text{ kA/m}$ . Com os valores da intensidade de campo magnético e coercitividade aparente definidos, foi possível determinar o valor de  $\phi$  por meio da equação (7), sendo igual a  $0,12425 \text{ mWb}$ . Com a determinação do gap de entreferro utilizado no projeto, bem como da área de superfície da cabeça do parafuso de fixação das bobinas, foi calculado uma intensidade de campo que magnetiza as bobinas da grandeza de 0,25357T.

### B. Dimensionamento dos parâmetros elétricos

Baseado na topologia adotada para o gerador, bem como dos ímãs escolhidos para a composição do projeto, buscando atingir as premissas adotadas. Deseja-se construir um gerador de fluxo axial para aplicação em turbinas eólicas, constituído por ímãs permanentes NdFeB, apresentando facilidade de fabricação bem como baixo custo financeiro.

O gerador é projetado para fornecer 250W de potência em uma tensão nominal de 110V, monofásico, para uma rotação mecânica de 400RPM. Assim, conforme equação (3), para uma frequência de 60Hz da tensão elétrica o rotor deve possuir 18 polos, consequentemente o rotor deverá ter 18 ímãs distribuídos uniformemente na periferia do rotor em uma configuração bastante comum do tipo NS-NS.

A quantidade de bobinas utilizadas foi definida em cima da quantidade de ímãs empregados no projeto. A geração da tensão em uma única bobina é dada pelo cálculo exposto na equação (1). Como a configuração dos ímãs adotada é NS-NS, é necessário um número de bobinas igual ao número de polos [8]. Desta forma, a tensão nominal deve ser alcançada com o arranjo de todas as bobinas em série, por tanto, o número de espiras por bobina é calculado para que uma única bobina possua tensão nominal igual a 6,2V, desta forma, o número de espiras por bobina é de 229 espiras.

O projeto elétrico adotado mostra que é necessário ainda determinar o fio a ser utilizado na confecção das bobinas. Para uma corrente nominal de 2,3A e a densidade de corrente exposta às bobinas de  $7,6 \text{ A/mm}^2$  nos leva ao dimensionamento do fio AWG22 utilizado na confecção das

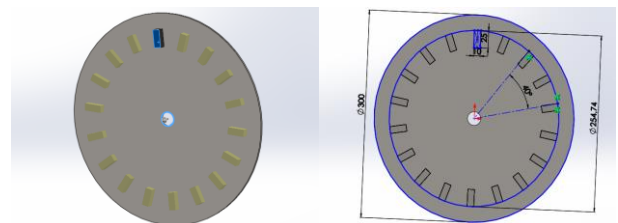
bobinas. Este diâmetro de fio permitiu a confecção de bobinas constituídas de 15 camadas de espiras, contendo 15 espiras por camada. A densidade de corrente foi adotada devido ao alto número de polos e à ventilação recebida pelo equipamento na sua devida aplicação (turbinas eólicas) [8]. O próximo tópico apresentará todas as etapas realizadas para a fabricação do protótipo.

### C. Modelagem do protótipo

Com a definição de todos os parâmetros elétricos e magnéticos para a fabricação do gerador, faz-se necessário realizar uma modelagem do protótipo com todas as características construtivas do projeto, materiais necessários e dimensões desejáveis.

O processo de modelagem se desenvolveu por meio do software SolidWorks®, onde inicialmente foi realizado um esboço de distribuição dos ímãs na placa do rotor, para que se chegasse em uma configuração organizada e com dimensões satisfatórias para o projeto, conforme Fig. 5.

Fig. 5. Esboço da distribuição dos ímãs.



Fonte: Autoria própria, 2019

A placa do rotor foi fabricada com um diâmetro de 30cm, e a superfície superior dos ímãs foram distribuídas uniformemente em uma circunferência de diâmetro 25,47cm, e o diâmetro de abertura para o eixo central é de 2cm. Posteriormente foi elaborado uma modelagem da bobina que iria ser contida pelo carretel, como pode ser observado na Fig. 6.

Fig. 6. Modelagem da bobina geradora.



Fonte: Autoria própria, 2019

Paralelamente o parafuso que irá fixar as bobinas no estator da máquina também foi modelado com base em um produto já disponível no mercado, de fácil localização e preço acessível. Tal parafuso é do tipo francês com porca e polido, e será utilizado no projeto para a fixação das bobinas, e definirá o entreferro para as mesmas conforme Fig. 7.

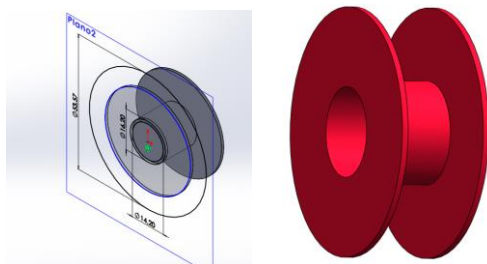
Com a bobina e o parafuso modelados foi possível dimensionar o carretel com todas as suas dimensões. O carretel modelado pode ser observado na Fig. 8.

Fig. 7. Modelagem do parafuso de fixação das bobinas.



Fonte: Autoria própria, 2019.

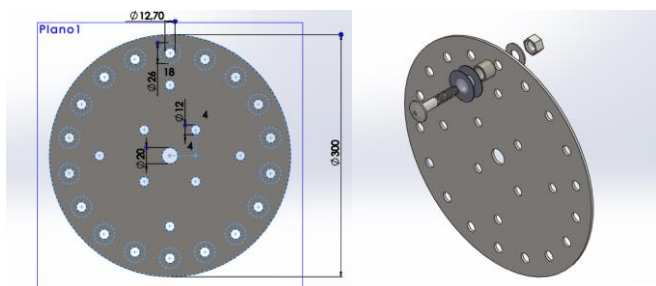
Fig. 8. Modelagem do carretel das bobinas.



Fonte: Autoria própria, 2019

Com esses detalhes definidos, foi possível elaborar o arranjo de montagem das placas (estator e rotor), utilizando espaçadores, e assim tornando possível ajustar o entreferro entre os ímãs e as cabeças dos parafusos de fixação das bobinas. O entreferro alcançado com este ajuste foi de 2cm. Os arranjos são mostrados nas Fig. 9 e Fig. 10, respectivamente.

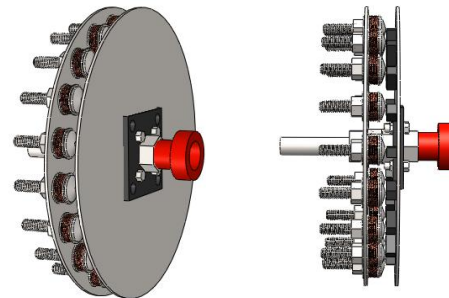
Fig. 9. Distribuição e montagem dos elementos do estator.



Fonte: Autoria própria, 2019

Desta forma na Fig. 10 podemos observar a modelagem do gerador finalizada em uma vista isométrica e de perfil.

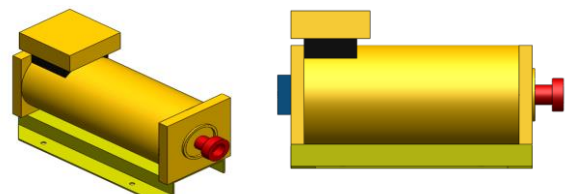
Fig. 10. Modelagem do gerador finalizado.



Fonte: Autoria própria, 2019

Com a modelagem da máquina geradora finalizada, fez-se necessário pensar em uma estrutura capaz de acomodar tanto o gerador quanto o motor cc, para emular uma turbina eólica. Dessa forma, foi elaborado um esboço das dimensões do motor cc disponível no laboratório da universidade, e em seguida um modelo do mesmo no software SolidWorks®, como mostrado nas Fig. 11.

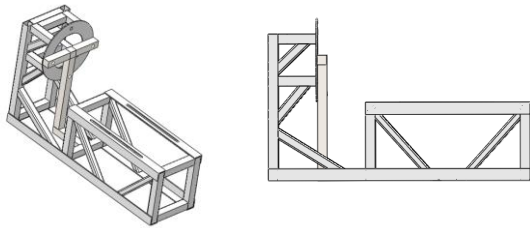
Fig. 11. Modelagem do motor cc com o software SolidWorks.



Fonte: Autoria própria, 2019

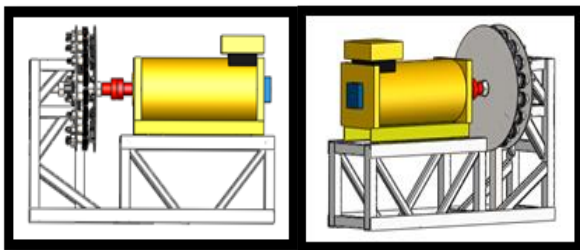
Com ambos os componentes do processo modelados, motor cc e gerador, foi possível então modelar a base para acoplamento dos mesmos, levando em conta todas as dimensão determinante de cada componente, otimizando as dimensões. As Fig. 12 e Fig. 13 a seguir ilustram o modelo elaborado da base de acoplamento, bem como a junção dos elementos sobre a mesma.

Fig. 12. Modelagem da base de acoplamento.



Fonte: Autoria própria, 2019

Fig. 13. Modelagem final da estrutura de geração.



Fonte: Autoria própria, 2019

Aqui se encontra finalizada a etapa de planejamento e modelagem do protótipo do gerador e do sistema de emulação da turbina eólica. Todos os elementos e componentes necessários para a confecção do protótipo foram levantados e modelados de modo a se elaborar um esboço de visualização, o qual servirá como gabarito para auxílio à fabricação do protótipo, como será apresentado no tópico a seguir.

#### D. Confecção do protótipo

Como mencionado nos tópicos anteriores foram elaborados desenhos via software a fim de que tivesse direcionamento com relação aos materiais necessários para o projeto bem como das suas dimensões. O processo de fabricação iniciou com a confecção das duas placas, estator e rotor da máquina, por meio do corte e perfuração de chapas de aço carbono, cujas espessuras são de 3,14mm cada, como visualizado na Fig. 14.

Fig. 14. Placas do estator e rotor do gerador



Fonte: Autoria própria, 2019

A etapa seguinte do processo se caracteriza pela fabricação dos carretéis das bobinas, impressos em uma impressora 3D, utilizando material PLA como segue na Fig. 15.

Fig. 15. Impressão dos carretéis das bobinas do gerador.



Fonte: Autoria própria, 2019

Um detalhe importante envolvido no processo de fabricação foi a escolha do eixo de rolagem, cujo o mesmo teve o seu diâmetro determinado pela escolha do mancal de rolamento, bem como os furos de acoplamento das placas do rotor e estator da máquina. O eixo foi confeccionado através da utilização de um fuso de rosca infinita, devido a necessidade de se utilizar porcas para a regulagem de espaçamento entre as placas do gerador, o que poderia também ter sido alcançado por meio da usinagem de um eixo com ranhuras em batentes, desempenhando esta função, entretanto, encareceria consideravelmente o processo para alcançar o mesmo resultado. O fuso após a sua confecção passou por um processo de fresagem, na qual foi aberto um rasgo de chaveta na sua extremidade de acoplamento, estimulada pela necessidade de se utilizar chaveta para o acoplamento das luvas de união, tanto do motor cc, quanto do próprio gerador. O eixo finalizado é visualizado na Fig. 16.

Fig. 16. Eixo de acoplamento do gerador



Fonte: Autoria própria, 2019

Com essas peças já prontas para a montagem, se fazia possível o bobinamento dos carretéis para que se pudesse finalizar os componentes do estator da máquina. Posteriormente, tendo em vista que os demais itens seriam comprados, como os mancais de rolamento, parafusos de fixação das bobinas, porcas e arruelas, seria o último passo para a montagem mecânica do gerador. Foi utilizada uma bobinadeira manual com um “contavoltas”, o que agilizou consideravelmente o processo de fabricação das bobinas. O respectivo processo é ilustrado na Fig. 17.

Fig. 17. Uso da bobinadeira.



Fonte: Autoria própria, 2019

Após a finalização de todas as 18 bobinas, as mesmas foram submetidas a um processo de banho isolante, com a utilização de verniz para motores. O objetivo foi de preencher os espaços entre as espiras, contribuindo para uma melhor isolamento e menor risco de curto entre as espiras. Juntamente às impressões dos carretéis, foram também impressos os espaçadores dimensionados para garantir a centralização das bobinas. Com estas peças prontas, surgia a possibilidade de iniciar a montagem do gerador, entretanto, fazia-se necessário primeiramente a fabricação da base do conjunto gerador-motor cc permitindo uma melhor organização e acomodação do protótipo.

A Fig. 18 apresenta a ase de acoplamento do conjunto gerador-motor cc finalizada.

Fig. 18. Base de acoplamento finalizada.



Fonte: Autoria própria, 2019

Para os próximos passos na montagem, inicialmente foram fixadas as bobinas na placa do estator por meio dos parafusos como mostrado na Fig. 19.

Fig. 19. Fixação das bobinas geradoras.



Fonte: Autoria própria, 2019

Para complementar a montagem do estator, foram adquiridos os demais componentes, como mostrado na Fig. 20. Tais componentes são os mancais de rolamentos, eixo usinado “fuso”, e os parafusos e porcas de fixação dos mancais.

Fig. 20. Materiais complementares da placa do estator.



Fonte: Autoria própria, 2019

Desta forma, o estator foi fixado à base do conjunto gerador-motor cc como pode ser visualizado na Fig. 21.

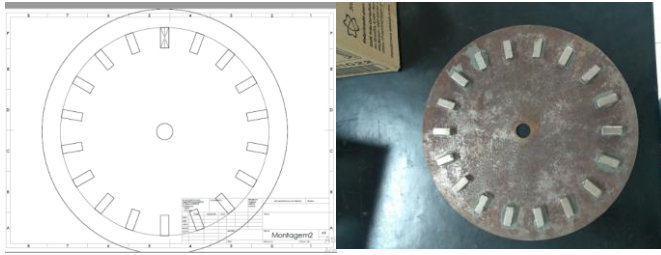
Fig. 21. Fixação do estator na base do conjunto gerador-motor cc.



Fonte: Autoria própria, 2019

Para a conclusão da montagem do gerador, resta apenas a montagem da placa do rotor, o que foi feito com a utilização de gabarito para garantir o posicionamento correto dos ímãs durante o processo de colagem, como pode ser observado na Fig. 22.

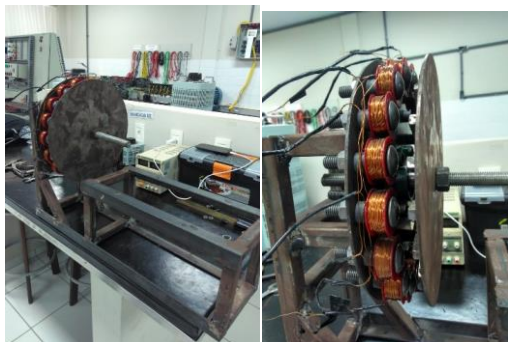
Fig. 22. Colagem dos ímãs na placa do rotor.



Fonte: Autoria própria, 2019

Por fim a fixação da placa do rotor juntamente com o eixo é concluída como mostrado na Fig. 23.

Fig. 23. Acoplamento do aero gerador a base.



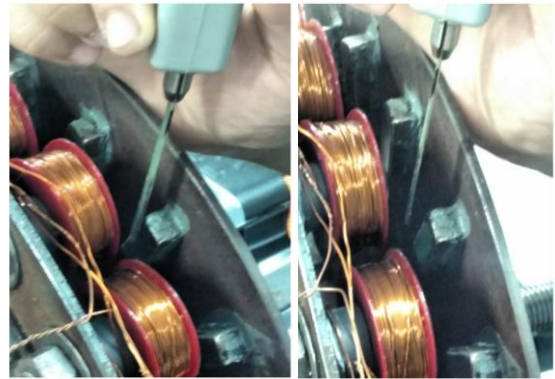
Fonte: Autoria própria, 2019

Vale ressaltar que não foi acoplado o motor cc ao gerador na finalização deste projeto. Os testes dinâmicos para a obtenção da tensão gerada serão realizados em projeto futuro devido a impossibilidade técnica e financeira atual do projeto. Entretanto, na próxima sessão serão apresentadas medições de campo magnético realizadas no gerador sem movimento para apresentar concordância dessas medições com os valores calculados nas sessões anteriores.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a finalidade de se testar o comportamento do campo magnético remanescente do ímã após a conclusão da montagem do gerador, foram executadas uma série de medições a partir de posições diferentes do sensor do gaussímetro com relação as bobinas e os ímãs. Primeiramente foram realizadas medições no entreferro do gerador com a configuração alinhada (bobina e ímã), onde foram medidos valores de campo magnético com o sensor na superfície do ímã, no espaço médio entre o ímã e o parafuso de fixação da bobina, e sobre a superfície do parafuso. Foram também realizadas medições com as bobinas desalinhadas em relação aos ímãs. As três medições na configuração desalinhada foram: 1) sobre a superfície do parafuso e na chapa do rotor; 2) na superfície do parafuso e na superfície do ímã adjacente à direita; 3) na superfície do parafuso e na superfície do ímã adjacente à esquerda. A Fig. 24 a seguir ilustra o procedimento descrito anteriormente.

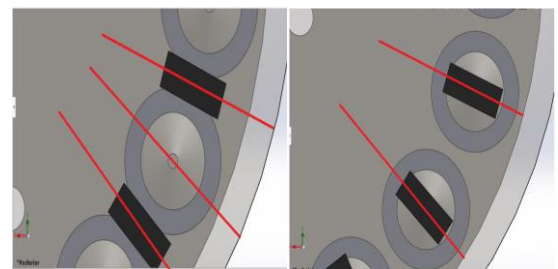
Fig. 24. Medição da densidade de campo remanescente no entreferro na configuração desalinhada.



Fonte: Autoria própria, 2019

A Fig. 25 a seguir mostra em destaque a região para o posicionamento da ponteira do gaussímetro em ambas as configurações com as bobinas e os ímãs alinhados e desalinhados, respectivamente.

Fig. 25. Posicionamento do sensor para as medições.

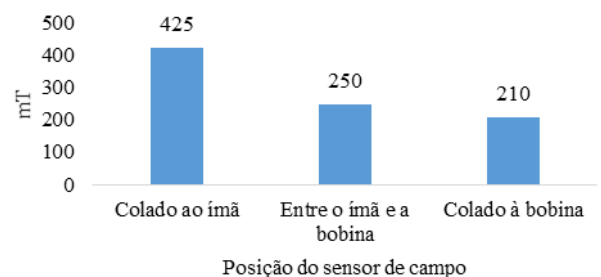


Fonte: Autoria própria, 2019

Foram medidos valores variados para a densidade de campo remanescente, de modo que, a partir dos valores médios encontrados após uma série de amostras colhidas em cada posição, foi possível gerar o comparativo entre a remanescência em cada posição aplicada.

Primeiramente será analisada a configuração com os ímãs alinhados com as bobinas, como é mostrado na Fig. 26.

Fig. 26. Densidade de Campo Remanescente – Bobinas e Ímãs Alinhados

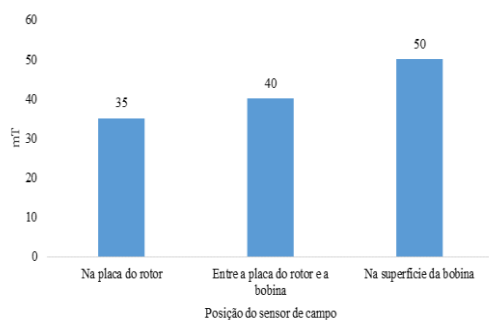


Fonte: Autoria própria, 2019

A partir da análise gráfica se percebe nitidamente a queda no valor do campo magnético à medida que o sensor se afasta dos ímãs. O erro entre o valor medido e o nominal da densidade de campo na superfície do ímã é de 14,5%, isto é, um valor medido de 0,425T é um pouco menor que o valor nominal de 0,497T. Observando o campo sobre a bobina vê-se que o valor medido de 0,21T está abaixo do valor nominal de 0,254T gerando um erro de 17,3%. Estes erros podem ser explicados pela forma de medição manual, além de não ser possível garantir a calibração do gaussímetro que apresenta em seu display um erro próprio de 25mT.

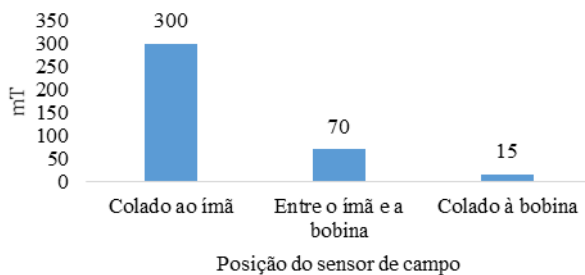
As análises mostradas nas Fig. 27 a 29 apresentam os valores medidos para a configuração de ímãs e bobinas desalinhados, levando em consideração o posicionamento do sensor de campo sobre a bobina, e também sobre os ímãs adjacentes à bobina.

Fig. 27. Densidade de Campo Reminiscente – Bobinas e Ímãs Desalinhados – Sobre a Bobina



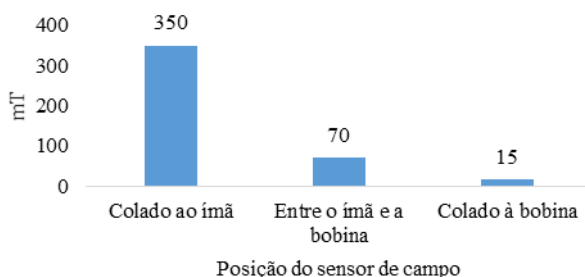
Fonte: Autoria própria, 2019

Fig. 28. Densidade de Campo Reminiscente – Bobinas e Ímãs Desalinhados – Ímã Adjacente à Direita



Fonte: Autoria própria, 2019

Fig. 29. Densidade de Campo Reminiscente – Bobinas e Ímãs Desalinhados – Ímã Adjacente à Esquerda



Fonte: Autoria própria, 2019

Analizando as Fig. 27 a 29 relacionadas à configuração de ímãs e bobinas desalinhados é possível notar uma acentuada dispersão do campo reminiscende entre o ímã adjacente e a bobina. Quando a medição é realizada na superfície da bobina o campo magnético medido é praticamente zero, mostrando que na configuração desalinhada os ímãs adjacentes à bobina não a magnetizam. Se comparados os valores medidos com o sensor de campo posicionado sobre os ímãs, nota-se pouca variação entre os valores obtidos para os ímãs na configuração de desalinhamento, entretanto, este campo é bem menor que a reminiscência do ímã na configuração alinhada conforme Fig. 26.

Este gerador apresenta uma característica muito importante: ele possui uma grande variação na densidade de fluxo no entreferro (0,25T na configuração alinhada e 0,04T na configuração desalinhada) mostrando que há geração de torque de relutância, isto é, o simples movimento do rotor, independente da velocidade, garante uma tensão gerada.

## V. CONCLUSÕES

Com base nas premissas de projeto, um dos objetivos deste trabalho foi desenvolver um gerador de fluxo axial de ímãs permanentes sem ranhuras para uso em turbinas eólicas de baixo custo. Dessa forma, foi feito um levantamento de todos os gastos com a construção do protótipo, listados a seguir.

- Discos do estator e do rotor: R\$ 24,00;
- Parafusos das bobinas: R\$ 30,00;
- Eixo de acoplamento: R\$ 15,00;
- Impressão das bobinas: R\$ 30,00;
- Impressão dos espaçadores: R\$ 25,00;
- Ímãs de NdFeB, N50: R\$ 150,00;
- Cola epóxi: R\$ 50,00;
- Fio 22 AWG: R\$ 46,00;
- Verniz isolante: R\$ 33,00;
- Mancais com rolamentos: R\$ 63,00;
- Tubos de aço metalon: R\$ 67,00;
- Processos utilizando a fresa mecânica: R\$ 100,00;
- Soldagem: R\$ 70,00;
- **Total: R\$ 703,00**

Baseando-se na relação acima, nota-se um baixo custo de fabricação, e por cima apresenta uma montagem bastante simples, proporcionando que este projeto possa ser acessível a todos que desenvolvem um projeto para o uso próprio.

De acordo com o proposto no início deste trabalho, os desenvolvimentos da sua construção bem como a etapa de modelagem e dimensionamento ocorreram de forma sucinta. A montagem do protótipo foi concluída com sucesso, como cumprimento do objetivo inicial, entretanto a execução dos testes para a medição da tensão gerada não foram possíveis. Entretanto a bancada permite o acoplamento do motor cc para emulação da carga e verificação da tensão gerada. Esta será a próxima etapa deste projeto.

Como sugestão para trabalhos futuros, fica a necessidade de se realizar o levantamento da curva característica a vazio entre tensão e velocidade e os testes de capacidade de

geração do referido gerador. Simulações por elementos finitos podem ser realizadas para ratificar ou aprimorar o projeto eletromagnético servindo como ferramenta de comparação com outros tipos de geradores axiais síncronos com ímãs permanentes, tais quais o gerador com ranhuras e os geradores com a configuração Tórus.

## REFERENCIAS

- [1] ABEEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: . Acesso em: <http://abeeolica.org.br/site/zpublisher/secoes/home.asp> 11 Jan. 2019.
- [2] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Geração Distribuída. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. 22 Mar 2019.
- [3] CRESESB. Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito. Disponível em: . Acesso em: <http://www.cresesb.cepel.br/> 07 Jan. 2019.
- [4] G. W. GWEC. Global Wind Energy Council. Disponível em: Acesso em: <https://gwec.net/> 10 Jan. 2019.
- [5] A. A. ARKADAN, T. M. HIJAZI and B. MASCRI, "Design Evaluation of Conventional and Toothless Stator Wind Power Axial-Flux PM Generator," in IEEE Transaction Magnetics, vol.53, no. 6, pp. 1-4, June 2017, Art no. 8104404. doi: 10.1109/TMAG.2017.2663979.
- [6] T. Wei. Mechanical Design of Electric Motors. USA: Crc Press, 2014.
- [7] U. Stephen D.. **Maquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2014.K.
- [8] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcová. Design of Rotating Electric Machines. UK: John Wiley & Sons, 2008.

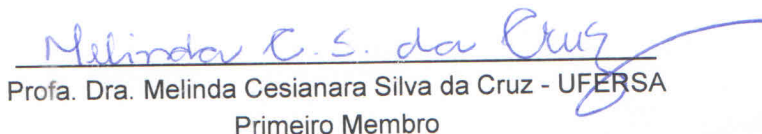
### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às dezesseis horas do dia vinte de Março de dois mil e dezenove, na cidade de Mossoró, estado do Rio Grande do Norte, Brasil, no auditório do Centro de Engenharias, campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, reuniu-se a banca examinadora do trabalho de conclusão de curso de **Ruan Tavares Cruz**, aluno do curso de Engenharia Elétrica desta instituição, número e matrícula 2017000921, com o título: "**Projeto e desenvolvimento de um gerador síncrono de fluxo axial a baixo custo para aplicações em turbinas eólicas**". A banca examinadora foi constituída pelo orientador e presidente da banca, Prof. Dr. **Victor de Paula Brandão Aguiar**, pelo Prof. Dr. **Kleymilson do Nascimento Souza**, e pela Profa. Dra. **Melinda Cesianara Silva da Cruz**. Foram registradas as seguintes ocorrências: O trabalho foi apresentado pelo discente e, em seguida, houve arguição por parte dos membros da banca examinadora. A defesa do trabalho foi pública. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, que apontaram as respectivas notas: 7,0, 7,5, e 8,0; Estando, portanto, o aluno com média geral 7,5, cumprindo as exigências para a integralização do componente curricular AMB1435 - PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA. Para constar, eu, Victor de Paula Brandão Aguiar, lavrei a presente ata, que após lida e considerada conforme, será assinada por todos os membros da banca.

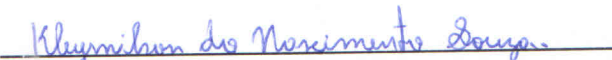
Mossoró/RN, 20 de Março de 2018.



Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar - UFERSA  
Presidente da Banca



Profa. Dra. Melinda Cesianara Silva da Cruz - UFERSA  
Primeiro Membro



Prof. Dr. Kleymilson do Nascimento Souza - UFOB  
Segundo Membro