

# DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE UM FREIO DE CORRENTES PARASITAS PARA AEROGERADORES

**João Vitor da Silveira Nunes** (UFC) - jvitornune@gmail.com

**Felipe Cavalcante Capibaribe** (UFC) - felipecapibaribe@hotmail.com

**Andre Valente Bueno** (UFC) - bueno@ufc.br

## **Resumo:**

*O setor de energia eólica vem crescendo bastante nos últimos anos, com destaque para o potencial eólico da região nordeste. Esse setor se utiliza de uma alta tecnologia, dentre elas o subsistema de freio. Atualmente a maioria dos sistemas de baixa potência utiliza freios mecânicos ou resistores elétricos de dissipação, os quais possuem várias desvantagens. Este trabalho busca apresentar o desenvolvimento e projeto de um freio de correntes parasitas para aerogeradores. O projeto utilizou um freio de correntes parasitas do tipo tambor, com uma corrente de alimentação de 2A, produzindo um torque de 80N.m, com uma potência de frenagem de 10 kW. Foram produzidas as curvas de desempenho para o freio para diferentes correntes de alimentação, e foi realizada a validação da sua estrutura do freio. Desse modo, o projeto apresentou características semelhantes aos freios mecânicos utilizados atualmente, além de apresentar várias vantagens em relação a estes, como menor manutenção e maior controlabilidade.*

**Palavras-chave:** *Energia Eólica, Aerogeradores, Freios*

**Área temática:** *Outras fontes renováveis de energia*

**Subárea temática:** *Simulação, análise, equipamentos e sistemas de conversão eólica para eletricidade*

# DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE UM FREIO DE CORRENTES PARASITAS PARA AEROGERADORES

João Vitor da Silveira Nunes – jvitornune@gmail.com

Felipe Capibaribe – felipecapibaribe@hotmail.com

André Valente Bueno – bueno@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** O setor de energia eólica vem crescendo bastante nos últimos anos, com destaque para o potencial eólico da região nordeste. Esse setor se utiliza de uma alta tecnologia, dentre elas o subsistema de freio. Atualmente a maioria dos sistemas de baixa potência utiliza freios mecânicos ou resistores elétricos de dissipação, os quais possuem várias desvantagens. Este trabalho busca apresentar o desenvolvimento e projeto de um freio de correntes parasitas para aerogeradores. O projeto utilizou um freio de correntes parasitas do tipo tambor, com uma corrente de alimentação de 2A, produzindo um torque de 80N.m, com uma potência de frenagem de 10 kW. Foram produzidas as curvas de desempenho do freio para diferentes correntes de alimentação, e foi realizada a validação da sua estrutura. Desse modo, o projeto apresentou características semelhantes aos freios mecânicos utilizados atualmente, além de apresentar várias vantagens em relação a estes, como menor manutenção e maior facilidade de controle.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Aerogeradores, Freios

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o Balanço Energético Nacional (2019), sobre ano 2018, o setor eólico representou cerca de 1,5% da matriz energética brasileira. O total de energia produzido em comparação com 2017 teve um aumento de 14%. O maior destaque vai para a região Nordeste, que representa 87,5% da geração eólica, com destaque para os estados do Rio Grande do Norte e Bahia. Além disso há estados com potencial ainda pouco explorado como Ceará, Pernambuco e Piauí.

Aliado a essa produção, há o desenvolvimento de tecnologias voltadas para o setor eólico. Nos últimos 30 anos a indústria de turbinas eólicas se transformou em uma indústria de alta tecnologia. Além das pás, geradores e sistemas de transmissão, também tem se desenvolvido uma forte indústria voltada para a fabricação de rolamentos, freios, controladores de medição, sistemas de sensores e de telecomunicações específicos para esta aplicação (Milton, 2014).

Um dos subsistemas mais importantes são os freios. A energia útil produzida pela turbina eólica é proporcional a área de suas pás. Há uma tendência do aumento dessa área para aumentar a produção de energia, resultando no aumento das cargas e das tensões atuantes sobre os componentes mecânicos da turbina, principalmente o sistema de frenagem (Mathew, 2006).

Os freios têm uma função de segurança e precisam atuar rapidamente e de maneira precisa numa situação de emergência. Em momentos de ventos fortes, por exemplo, a turbina deve parar completamente para sua segurança, pois a elevada aceleração poderia danificar os componentes de transmissão e as pás da turbina. Também há as paradas quando as turbinas não estão em operação ou em manutenção (Mathew, 2006).

Há dois sistemas de frenagem nas turbinas. O primário normalmente usa freios aerodinâmicos, que se utilizam da resistência do ar nas pás e é o mais usado. Já o secundário atua no caso de uma pane no primário, normalmente são freios mecânicos a disco (Mathew, 2006).

Esses freios mecânicos são dispositivos de fricção e utilizam do atrito para dissipar a energia mecânica transformando-a em calor, geralmente sendo acionados por mecanismos hidráulicos devido à elevada força de acionamento necessária. Nesses tipos de freios o desgaste é um mecanismo de falha inevitável e o calor gerado é de difícil controle, além de produzirem maior ruído e vibrações.

Diante do exposto e das problemáticas apresentadas, os freios eletromagnéticos podem representar uma evolução tecnológica para o sistema de frenagem em aerogeradores e possuem várias vantagens em relação ao sistema convencional como: desgaste praticamente inexistente uma vez que não há contato entre seus componentes para a realização da frenagem; é um sistema robusto, confiável e com uma ampla faixa de torque de frenagem. Gushiken e Kobayashi (2006) também citam que os sistemas de correntes parasitas podem obter dados com boa qualidade, necessitam de baixa manutenção e um custo relativamente baixo, embora necessitem obrigatoriamente de refrigeração para garantir seu bom funcionamento. Assim o objetivo do presente trabalho consiste em se desenvolver um projeto de freio de correntes parasitas para ser utilizado em aerogeradores, com necessidade de potência de frenagem de até 10kw.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Freios de Correntes Parasitas

As pesquisas bibliográficas englobaram tanto freios como dinamômetros de correntes parasitas, por possuírem semelhanças na construção e equacionamento. Os freios de correntes parasitas se utilizam das correntes de Foucault. Pela Lei de Faraday, a passagem de corrente em um condutor induz um campo eletromagnético. Além disso, quando um campo magnético varia próximo a um condutor, esse condutor vai gerar uma corrente elétrica de modo a produzir um campo magnético que anule essa variação de campo magnético. Essas correntes geradas num condutor quando são sujeitas a uma variação de campo eletromagnético são as correntes de Foucault (Wolski, 2005).

O modelo de freio utilizado nesse projeto foi o tipo tambor. As peças principais desse modelo são exemplificadas na patente de Sugimoto et al. (1985), cujo modelo construtivo é mostrado na Fig. 1:

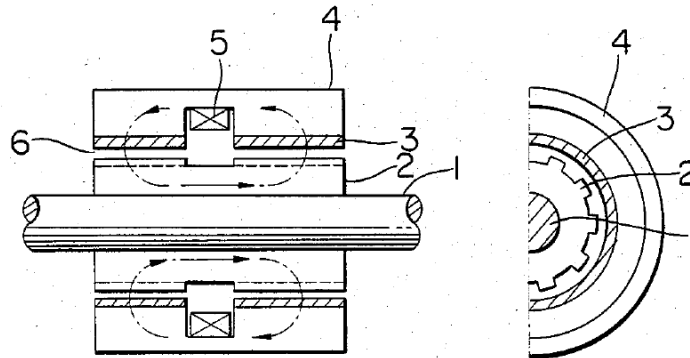


Figura 1 – Partes principais de um freio de correntes parasitas do tipo tambor (Sugimoto et al., 1985).

O funcionamento de um freio de correntes parasitas se dá por meio de um rotor (1) conectado ao eixo do motor. Uma bobina (5) disposta em torno do rotor induz um campo eletromagnético neste. Duas engrenagens (2) giram junto ao rotor passando próximas a dois anéis de alumínio (3) ou outro material diamagnético. Devido a variação de distância entre o vale e os dentes da engrenagem, também varia o campo magnético sobre os anéis. Essa variação induz correntes de Foucault, nas quais os anéis geram um campo magnético contrário para anular essa variação de campo magnético induzida pelos dentes da engrenagem. Essa interação entre os campos freia o movimento do rotor e faz com que os anéis, e conseqüentemente o estator (4) conectado a este, exerçam força no sentido contrário ao do movimento do rotor (Gushiken e Kobayashi, 2006).

Em projetos de freios magnéticos parâmetros como potências, faixas de torque e rotação em que o dispositivo irá operar são dados de entrada, e determinam o funcionamento do freio e poderão ser observados nas curvas de torque de frenagem por rotação. Silva (2007) e Gushiken e Kobayashi (2006) citam o equacionamento de Dietrich (2000) para a estimar o campo magnético que precisa ser induzido no freio, onde são utilizadas hipóteses simplificadoras, dentre as quais pode-se destacar:

- Região ativa (onde agem as correntes parasitas) externa a peça polar e aproximada para um bloco semi-infinito de ferro;
- Permeabilidade magnética constante;
- Aproximação da indução magnética para  $B = a \cdot H^b$ , onde  $B$  é a indução magnética e  $H$  é o vetor campo magnético.

A Fig. 2 mostra a vista em corte do freio considerado no equacionamento:

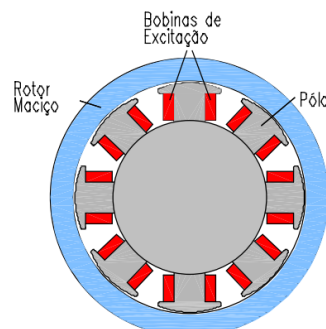


Figura 2 - Freio utilizado no equacionamento (Dietrich, 2000).

Também foi considerando uma região pequena da vista em corte, de modo que se aproxime de uma reta, assim adotando um sistema de coordenadas cartesiano, como mostra a Fig. 3. É possível perceber que cada dente da engrenagem é considerado como um polo:

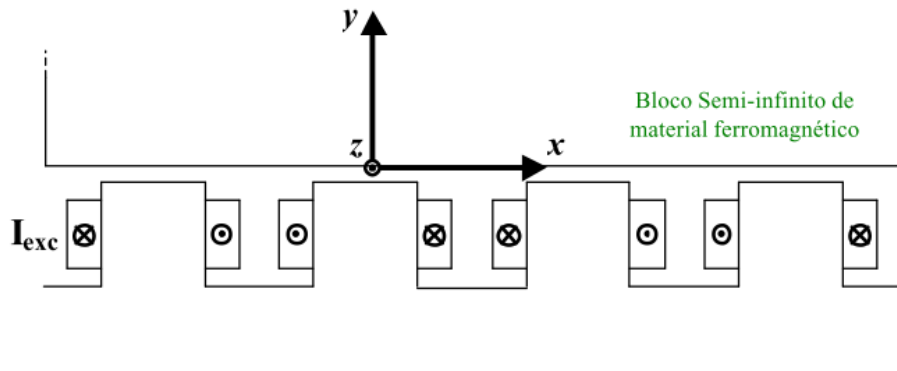


Figura 3 - Sistema de coordenadas utilizado no equacionamento (DIETRICH, 2000).

Utilizando-se as hipóteses simplificadoras acima é possível chegar à Eq. (1) que relaciona a indução B (T), em função das variáveis: torque T(N.m), rotação n (rps), área dos polos do freio Spolo (m<sup>2</sup>), número de pares de polos ou no caso pares de dentes da engrenagem p e relutância magnética do ferro R (A.esp/Wb), como é mostrado na Eq. (1) (Dietrich, 2000):

$$Best = K_{\phi} * \frac{M * [T^{0,35}]}{Spolo * [n^{0,325}]} + K_r * \frac{[n^{0,325}] * [T^{0,65}]}{R * Spolo * M * [p^2]} (135^{\circ}) \quad (1)$$

Além disso há as constantes K<sub>φ</sub>, K<sub>r</sub> e M, esta última calculada pela Eq. (2):

$$M = \frac{[\rho^{0,325}] * [L^{0,65}]}{[D^{0,35}] * [p^{0,675}]} \quad (2)$$

Em que ρ (Ω.m) é a resistividade elétrica, L (m) o comprimento ativo dos polos do freio e D (m) o diâmetro da região ativa do freio no entreferro.

Com isso é possível dimensionar a bobina e a corrente necessária para excitar o sistema. Para isso é utilizada a seguinte Eq. (3) que dimensiona a indução magnética no interior de uma bobina simples (Nussenzveig, 1997), onde B é a indução em T, μ<sub>0</sub> a permeabilidade magnética no interior da bobina (foi usado o ferro fundido cinzento, que ocupa a maior parte do meio da bobina), N é o número de voltas da espira e i a corrente em A.

$$B = \mu_0 * N * i \quad (3)$$

Na construção do gráfico de potência versus rotação, será usada a Eq. (4), com P sendo a potência em W, T sendo o torque em N.m e ω sendo a rotação em rpm:

$$P = T * (\omega * 2\pi / 60) \quad (4)$$

Também é interessante se calcular a razão entre a potência elétrica necessária para se excitar a bobina, ou seja, a potência demandada para o acionamento do freio e a potência bruta de frenagem (kW/kW). Para isso calculou-se a potência elétrica de alimentação da bobina em três valores de corrente de excitação através da seguinte expressão:

$$P = R * i^2 \quad (5)$$

## 2.2 Configuração Adotada

Inicialmente foram pesquisados diversos modelos de freios ou dinamômetros de correntes parasitas tais como disco, tambor radial e tambor cilíndrico. O projeto e a disposição das peças adotados aqui foram baseados no trabalho de Silva (2007), que utiliza um modelo conhecido como tambor cilíndrico capaz de ocupar uma menor seção transversal, ou seja, causar menores problemas aerodinâmicos para o aerogerador.

Utilizando a Eq. (1) é possível se obter uma relação entre toque ( $T$ ), e a rotação ( $N$ ) e a indução eletromagnética ( $B$ ). Já a indução pode ser equacionada em função da corrente de excitação aplicada na bobina, segundo a Eq. (2). O projeto foi elaborado considerando-se a necessidade de se frear um aerogerador que forneça um torque máximo de 80 N.m alcançado na rotação de 1200 rpm, com a potência de 10 kW. Nesse ponto foram necessários 6,13 T de excitação gerada pela bobina. Desse modo, utilizando a Eq. (3), foi estimada uma bobina de diâmetro entre 108 e 170mm e largura de 9mm, formada por 488 espiras de fio de cobre 18AWG (suporta até 2,5 A), com uma corrente de excitação de 2A.

Após estas estimativas das dimensões do freio segundo o equacionamento apresentado para o problema magnético, foi elaborada uma versão em CAE/CAE do dinamômetro que é apresentada nas Fig. 4 e 5. A vista esquemática da Fig. 5 indica os principais componentes: rotor em ferro fundido, anéis de alumínio, estator em aço ou ferro fundido, bobina de cobre, e suporte da bobina em ABS.

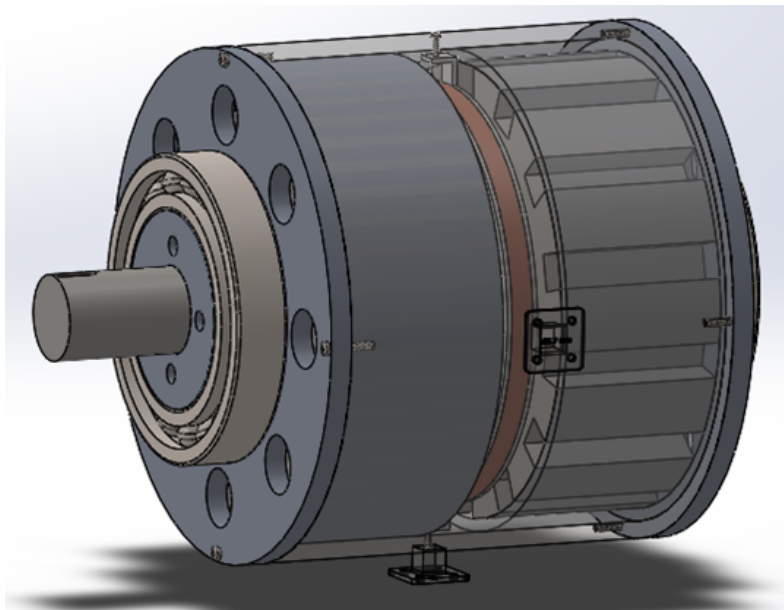


Figura 4 - Dinamômetro de correntes parasitas.

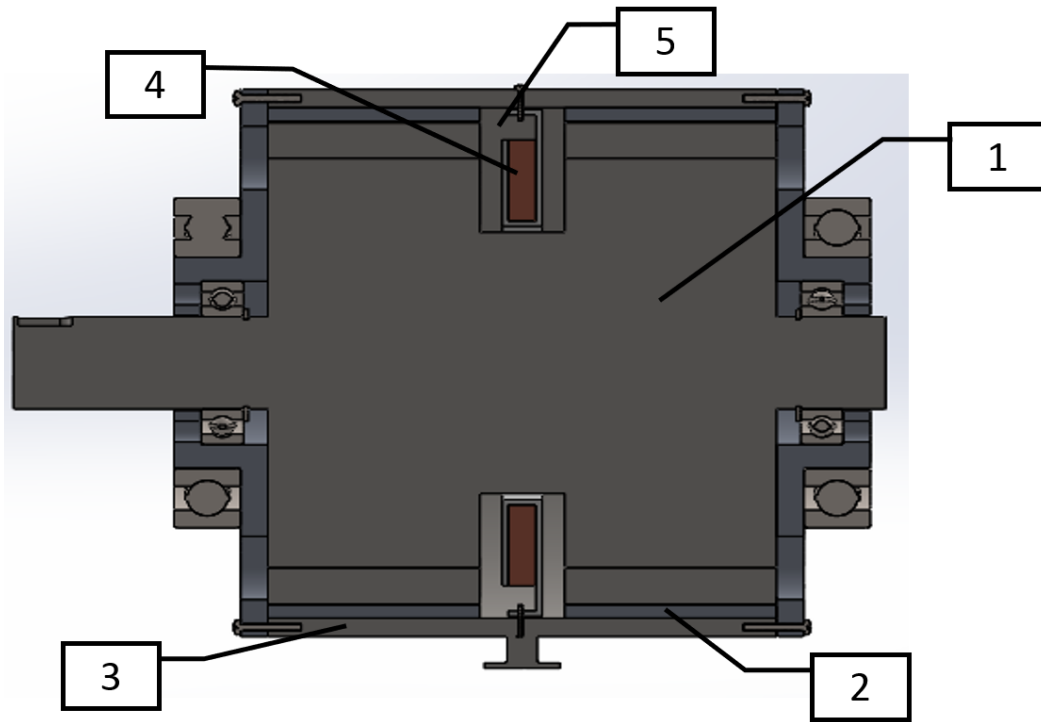


Figura 5 - Vista em corte do freio: Rotor (1), anéis de dissipação (2), estator (3), bobina (4), suporte da bobina (5).

Foram realizadas simulações de elementos finitos utilizando software Ansys 2019 versão estudante sobre o eixo do rotor, assegurando que suportaria o peso das engrenagens e o torque, e que sua deformação continuaria dentro da folga planejada entre as peças, mostrado na Fig. 6. As simulações mostraram que com o torque de 80N.m e a aceleração da gravidade sobre o eixo, o valor de tensão de Von Mises máximo foi de 40,348 MPa, com ponto mais crítico a ranhura do eixo para encaixe do anel elástico, observado no detalhe da Fig. 6 (C). Assim para o limite de resistência a tração de 152MPa para o ferro fundido cinzento (Norton, 2013), se obtêm um coeficiente de segurança estático de 3,7. Além disso os “gaps” entre as engrenagens e os anéis de 2mm ficam acima da deformação esperada de apenas 0,04mm. Os rolamentos 6061 e 6007 selecionados para o projeto foram sobre dimensionados, e foram utilizados anéis elásticos para evitar cargas axiais que a dilatação do eixo possa gerar sobre os rolamentos.

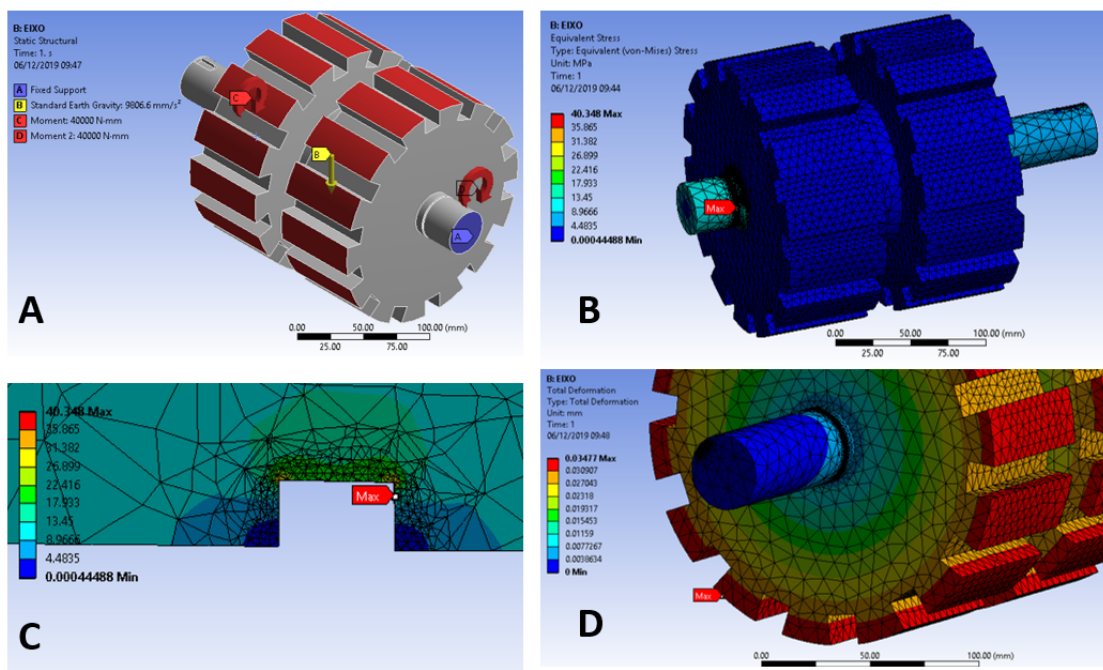


Figura 6 - Restrições e cargas (A), tensão equivalente Von Mises (B e C) e deslocamento (D).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Curvas de Desempenho e Eficiência

O desempenho do freio magnético é apresentado na Fig.7 por meio do torque de frenagem a ser obtido com as correntes de excitação de 0,5, 1, 1,5 e 2 A. Observe-se que a partir do ponto de torque máximo de 80 Nm as curvas indicam uma redução gradual do torque de frenagem. Esta redução se faz necessária para a limitação de potência dissipada nos anéis em 10 kW, valor máximo permissível para se evitar o sobre aquecimento do freio. Com a corrente de excitação de 0,5 A não há a necessidade de limitação no torque de frenagem, enquanto para 1 A, 1,5 A e 2 A esta limitação se dá em 1900, 1500 e 1200 rpm, respectivamente.

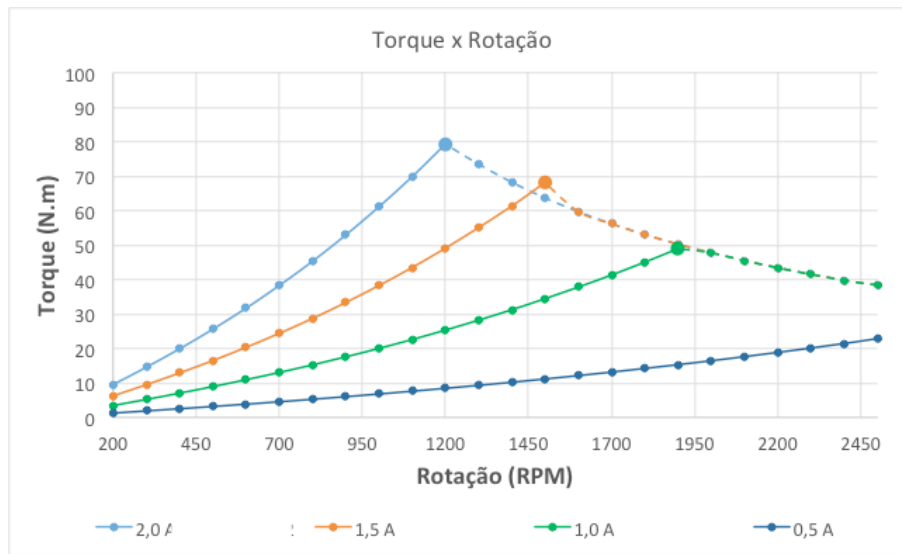


Figura 7 - Curva de torque obtida para o freio.

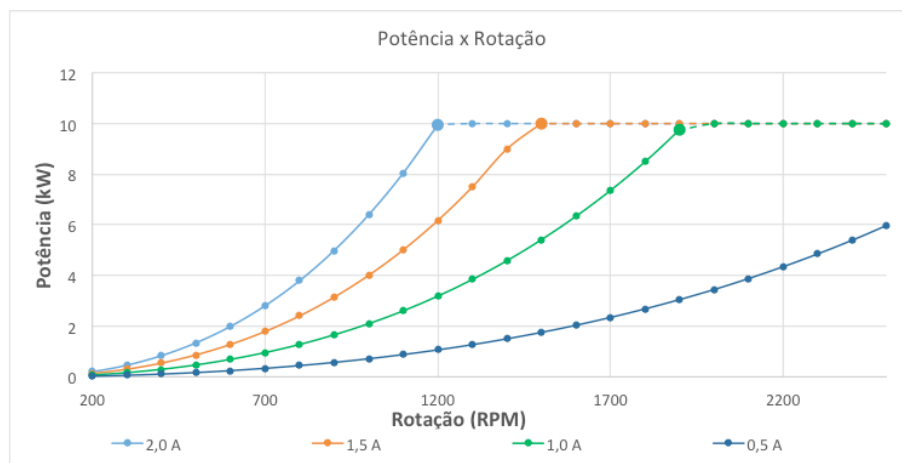


Figura 8 - Curva de potência obtida para o freio.

A limitação de potencia de frenagem em 1200 rpm aparece como uma linha horizontal nos diagramas de potencia da Fig. 8. Nota-se aqui uma característica interessante do freio por correntes parasitas: sua potencia de frenagem aumenta rapidamente com a rotaçao mesmo mantendo-se um dado valor de corrente e potencia de excitaçao aplicados à bobina. A flexibilidade para a aplicaçao do controle de frenagem também é evidente, considerando-se o ponto de projeto de 1200 rpm nota-se que correspondem às correntes de excitaçao de 2, 1,5, 1 e 0,5A potências de frenagem de 10, 6,17, 3,18 e 1,06 kW, respectivamente.

Também é interessante se calcular a razão entre a potência elétrica necessária para se excitar a bobina, ou seja, a potência demandada para o acionamento do freio e a potência bruta de frenagem (kW/kW). Pode-se assim levantar a potência necessária para o sistema de controle e acionamento do freio. Em um freio baseado na dissipação de potência via resistor elétrico, a razão entre as potências de controle e de frenagem é próxima à unidade. Além disto, a frenagem por resistência de dissipação demanda uma carga adicional ao gerador elétrico expondo-o a maior desgaste. Conforme se observa nos dados apresentados na Fig.9, para o sistema de correntes parasitas esta relação mostrou-se inferior a 10%.

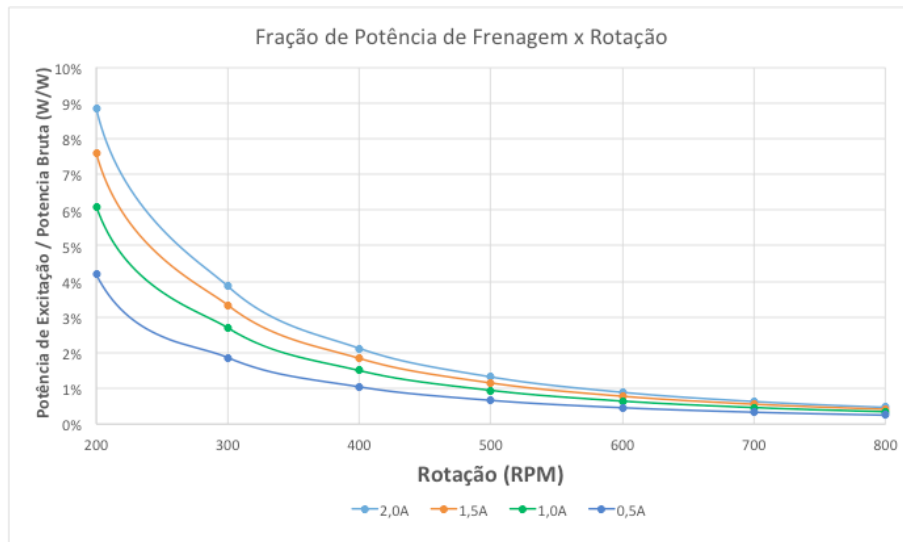


Figura 9 - Curva de eficiência versus rotação para o freio.

#### 4. CONCLUSÃO

O projeto de freio foi desenvolvido com sucesso, apresentando-se seus desenhos esquemáticos e curvas de desempenho e eficiência. Obteve-se uma potência necessária para o sistema de controle da ordem de 10% com relação à potência bruta de frenagem, um valor bem inferior ao exibido por sistemas de dissipação elétrica. Destaca-se ainda a simplicidade, confiança e maior facilidade em ser controlado se comparado aos freios mecânicos.

#### Agradecimentos

Ao Laboratório de Motores de Combustão Interna, onde o trabalho foi desenvolvido, ao Prof. Dr. Sérgio Daher e Prof. Dr. Wilkley Bezerra do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, e ao pesquisador do laboratório Lamotriz Dr. Victor de Paula pelo auxílio na elaboração do projeto.

#### REFERÊNCIAS

- Dietrich, A. B. 2000. Um Estudo De Correntes Induzidas Em Meios Maciços Ferromagnéticos – Aplicação no Projeto de Freios de Correntes Parasitas, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, USP, São Paulo. Disponível em: <[https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29032001-165638/publico/Dissertacao\\_Completa.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29032001-165638/publico/Dissertacao_Completa.pdf)>.
- Gushiken, E. Y.; Kobayashi, R. M. Projeto de um Dinamômetro para Motores de Veículos Mini Baja, 2006. Universidade de São Paulo.
- Mathew, S. Wind Energy. 2006. Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer-verlag. 246p. Berlim.
- Norton, R. L. 2013. Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada. 4 ed. Bookman. Porto Alegre.
- Nussenzweig, H. M. 1997. Curso de Física Básica: Volume 3. 1º ed. Edgard Blucher. São Paulo.
- Silva, I.L., 2007. Desenvolvimento e Teste de um Protótipo de Freio Eletromagnético de Correntes Parasitas a Tambor, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Mecânica, UFC, Fortaleza.
- Wolski, B. 2005. Fundamentos de Eletromagnetismo. 1º ed. Ao Livro Técnico. 239p. Rio de Janeiro.
- Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. 2019. Balanço Energético Nacional. Ano base 2018. Disponível em: < <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019> >.

## PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF AN EDDY-CURRENT WIND TURBINE SPEED LIMITER

**Abstract.** *The wind energy sector has been growing significantly in recent years, especially the wind potential of the northeast region. This sector uses high technology, including the brake subsystem. Most of the low-power systems in use today apply mechanical brakes or braking resistors, which have several disadvantages. This research presents the development and design of an eddy current brake for wind turbines. The project used a drum type eddy current brake, with a 2A supply current, producing a of 80 N.m and a breaking power of 10 kW. Performance curves were produced for different supply currents, and the break structure was validated. Thereby, the project presented characteristics similar to the mechanical brakes actually used, besides having several advantages in relation to them, such as less maintenance and better controllability.*

**Key words:** *Wind Energy, Wind Turbine, Brakes*