

# **Aplicação de Sistema de frenagem por correntes de Foucault a bancada de testes para rotores eólicos**

**Marcelo Albuquerque Martins** (UFC) - marcelo.martins@ufcinfra.ufc.br

**Carla Freitas de Andrade** (UFC) - cbens2020@gmail.com

**Francisco Olimpio Moura Carneiro** (UNILAB) - olimpiomcarneiro@gmail.com

**Paulo Alexandre Costa Rocha** (UFC) - paulo.rocha@ufc.br

## **Resumo:**

*O presente trabalho visou avaliar a aplicabilidade de um sistema de frenagem para uma bancada de testes de um laboratório didático de rotores eólicos, cujo atual sistema de frenagem é um freio a tambor. O sistema é um freio eletromagnético por efeito de correntes de Foucault, onde um eletroímã induz correntes elétricas sobre um disco de alumínio. Foi aplicado o modelo analítico desenvolvido por Wouterse (1991) para descrever o comportamento do freio eletromagnético. Feito isto, foi testado um protótipo do sistema de frenagem, de modo que fosse possível comparar as medições experimentais às estimativas analíticas. Assim, obtendo-se como resultados, para o protótipo de freio eletromagnético, que os valores de torque de frenagem medidos foram, em média, 22,7% inferiores aos valores estimados analiticamente.*

**Palavras-chave:** *Energia eólica, Frenagem, Correntes de Foucault*

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

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

# APLICAÇÃO DE SISTEMA DE FRENAGEM POR CORRENTES DE FOUCAULT A BANCADA DE TESTES PARA ROTORES EÓLICOS

**Marcelo Albuquerque Martins** – marcelo.martins@ufcinfra.ufc.br

**Carla Freitas de Andrade** – carla@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Francisco Olimpio Moura Carneiro** - olimpio@unilab.edu.br

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento  
Sustentável

**Paulo Alexandre Costa Rocha** - paulo.rocha@ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** O presente trabalho visou avaliar a aplicabilidade de um sistema de frenagem para uma bancada de testes de um laboratório didático de rotores eólicos, cujo atual sistema de frenagem é um freio a tambor. O sistema é um freio eletromagnético por efeito de correntes de Foucault, onde um eletroímã induz correntes elétricas sobre um disco de alumínio. Foi aplicado o modelo analítico desenvolvido por Wouterse (1991) para descrever o comportamento do freio eletromagnético. Feito isto, foi testado um protótipo do sistema de frenagem, de modo que fosse possível comparar as medições experimentais às estimativas analíticas. Assim, obtendo-se como resultados, para o protótipo de freio eletromagnético, que os valores de torque de frenagem medidos foram, em média, 22,7% inferiores aos valores estimados analiticamente.

**Palavras-chave:** Energia eólica. Frenagem. Correntes de Foucault.

## 1. INTRODUÇÃO

Os freios de corrente de Foucault são oponentes atrativos em relação freios por atrito mecânico em certas aplicações. Uma possível aplicação é o uso para proteção das turbinas eólicas do excesso de velocidade durante problemas de operação. Eles fornecem benefícios importantes, como boa confiabilidade, baixo custo e baixa necessidade de manutenção.

Em 1942, Smythe desenvolveu um modelo teórico de freio de correntes de Foucault. Ele considerou um disco ferromagnético girando entre eletroímãs, e para anular os efeitos de borda, considerou o disco como tendo diâmetro infinito. Schieber, em 1975, também trabalhou para formular uma equação com o objetivo de modelar o comportamento de um freio de correntes induzidas, mas devido às considerações que aplicou em seu modelo, ele pode ser aplicado com bons resultados apenas para baixas rotações. O principal motivo para isto foi a desconsideração do campo magnético produzido pela corrente elétrica no disco metálico.

Wouterse, em 1991, também estudou os freios de correntes induzidas, e baseado nos trabalhos de Smythe e Schieber, buscou desenvolver expressões que descrevessem o comportamento desse dispositivo em uma situação mais geral, sendo aplicável a uma maior extensão de rotações.

Dessa forma, em seu estudo, Wouterse passou a considerar a influência do campo magnético gerado pelas correntes induzidas sobre o campo magnético aplicado diretamente ao disco, propondo as equações (1) e (2) como modelos teóricos para o comportamento da frenagem.

$$F(v) = c' \cdot \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B_0^2 \quad (1)$$

Onde:

$F$  é a força, em  $N$ ;

$\sigma$  é a condutividade elétrica, em  $(\Omega \cdot m)^{-1}$ ;

$v$  é a velocidade, em  $m/s$ ;

$vol$  é o volume do disco sob a ação do campo magnético (considerando a espessura do disco e a área sob o polo magnético), em  $m^3$ ;

$B_0$  é o campo magnético, em  $T$ .

$$c' = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\pi^2}{24} \left( \frac{D}{2h} \right)^2 \right) \quad (2)$$

Onde:

$D$  é o diâmetro do polo magnético, em  $m$ ;

$h$  é a altura da bobina, em  $m$ ;

Baseando-se nesses estudos, procurou-se desenvolver um freio de correntes de Foucault para aplicação em uma bancada de testes para rotores eólicos

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O protótipo eletromagnético consiste em um disco de alumínio que está acoplado a um eixo e um conjunto eletroímã-núcleo, que aplica um campo magnético ao disco, de forma que, quando o eletroímã é acionado, são induzidas correntes parasitas no interior do disco e estas correntes são atraídas pelo campo magnético do eletroímã, produzindo uma força que se opõe ao movimento de rotação do disco, qualquer que seja o sentido deste movimento. Os elementos principais do sistema estão ilustrados na Figura 1.

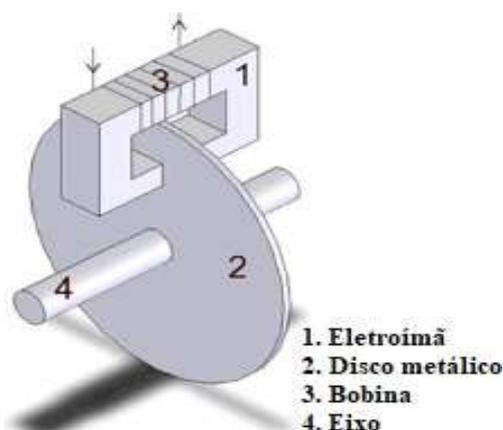


Figura 1- Representação de freio de correntes induzidas

Para a produção do protótipo, foi necessário utilizar uma bobina eletromagnética com pelo menos 150 voltas, com fio de capacidade para correntes de até 10 A, para que fosse possível produzir um campo magnético suficiente para gerar frenagem. Para o projeto, foi selecionada uma bobina do enrolamento primário de um transformador elétrico utilizado em um forno de micro-ondas. A mesma foi selecionada por apresentar uma quantidade de voltas adequada ao projeto e pela possibilidade de adquiri-la no mercado, eliminando a necessidade de fabricar a bobina em laboratório.

Foi fabricado um disco de alumínio de mesmo diâmetro do tambor de freio da bancada de testes (130 mm), com espessura de 3 mm.

Foi selecionada, também, uma fonte elétrica para a alimentação do eletroímã. O equipamento selecionado foi uma fonte chaveada 12V/24V. O protótipo construído é apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Protótipo de freio elétrico em escala reduzida

Para que fosse possível realizar a medição das variáveis necessárias ao estudo dos protótipos de sistemas de frenagem foi utilizada uma bancada de testes instrumentada.



Figura 3 – Bancada de testes para medição de torque e rotação.

Foi empregados os seguintes equipamentos:

- Transdutor de torque e rotação de modelo HBM T20WN cuja faixa de leitura é até 2 N.m com erro de  $\pm 0,2\%$  e leitura de rotação até 3000 RPM.
- Um motor elétrico de 12 V para simular o torque e a potência úteis produzidos por um rotor eólico.
- Uma fonte chaveada de 12V/24 para alimentar a corrente elétrica para o eletroímã
- Uma fonte de corrente contínua de tensão e corrente ajustáveis. O modelo de fonte utilizado foi o MPL-1303M, com tensão ajustável na extensão de 0-32 V e corrente ajustável de 0-3 A, com erro de  $\pm 0,01$  para ambas as grandezas, para a alimentação do motor elétrico e do sistema de aquisição e controle.

O acionamento do protótipo foi realizado utilizando-se um micro controlador na plataforma Arduino e uma placa eletrônica multiplicadora de sinal para converter os sinais do transdutor e controlar a rotação do motor elétrico.

### 3. METODOLOGIA

Fazendo uso do modelo teórico desenvolvido por Wouterse (1991), o desempenho teórico esperado do protótipo de freio de correntes induzidas foi calculado, para que seja possível uma comparação com os resultados experimentais do equipamento.

O campo magnético ( $B_0$ ) pode ser obtido a partir da Equação (3), que possibilita calculá-lo a partir do produto do número de voltas de uma bobina ( $N$ ) e a corrente elétrica ( $I$ ). Este produto pode ser denominado força magnetomotriz, conforme a Equação (4).

$$N \cdot I = \frac{2 \cdot x}{\mu_0} B_0 \quad (3)$$

$$B_0 = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2 \cdot x} \quad (4)$$

Para o eletroímã do sistema de frenagem fabricado encontrou-se que o valor do campo magnético vale 0,258 T.

Através da Equação (2), o cálculo do coeficiente geométrico ( $c$ ) foi realizado, encontrando-se o valor de  $c' = 0,297$ .

Utilizando a Equação (1), pode-se relacionar a força de frenagem em função da velocidade, obtendo-se as Equações (5) e (6).

$$T(v) = c' \cdot \sigma \cdot v \cdot vol \cdot B_0^2 \cdot R \quad (5)$$

$$T(rot) = \frac{c' \cdot \sigma \cdot \pi \cdot rot \cdot vol \cdot B_0^2 \cdot R^2}{30} \quad (6)$$

Para determinar o torque de frenagem, foi utilizado o raio efetivo (R), que é a distância entre o centro do disco e o centro da face do polo magnético, que é o ponto de ação da força resultante sobre o disco.

Para o protótipo construído, tem-se o valor de raio efetivo  $R=0,0515$  m. A partir destes dados, obtém-se o valor do torque é determinado pela expressão a seguir.

$$T(\text{rot}) = 7,399 \cdot 10^{-5} \cdot \text{rot } N.m$$

#### 4. RESULTADOS

O sistema de frenagem por correntes de Foucault foi testado em diferentes rotações, com corrente elétrica constante. A Figura 4 mostra a bancada de testes usada no experimento.



Figura 4 – Bancada de testes durante a realização do ensaio com protótipo de freio de correntes induzidas.

Cada um dos testes realizados, para diferentes rotações, resultou numa série de dados. Onde, as médias de cada série de dados foram compiladas em cada linha da Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado das medições de torque do sistema de freio elétrico.

Rotação nominal (RPM)	Rotação média (RPM)	Torque medido (mN.m)	Torque teórico calculado pela Equação (30) (mN.m)
400	426,4	24,954	44,119
600	596,3	29,682	58,462
800	790,2	43,020	70,578
1000	1004,0	42,141	74,278
1200	1273,8	49,292	94,238
1400	1418,9	51,320	104,969
1600	1640,2	69,608	121,343
1800	1818,3	165,684	134,518
2000	2031,8	183,513	150,317

Os valores obtidos foram dispostos em um gráfico  $T(\text{mN.m}) \times \text{Rot (RPM)}$  produzindo as curvas apresentadas na Figura 5.

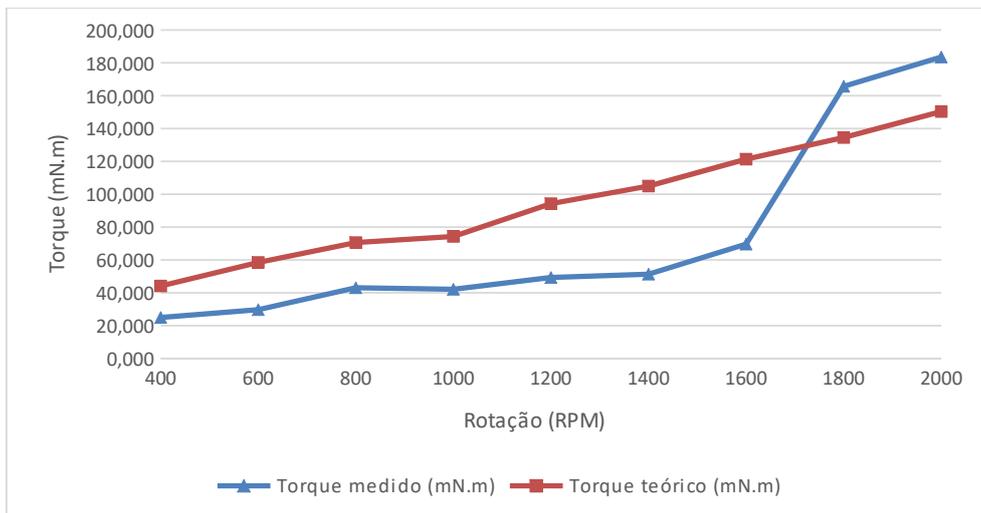


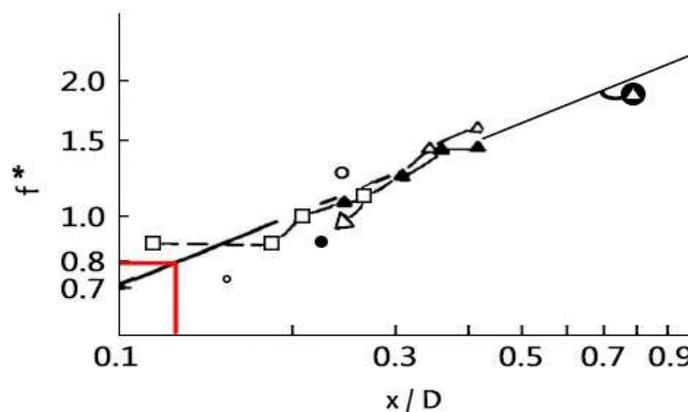
Figura 5 – Dados de Torque medido e Torque teórico *versus* Rotação para o freio elétrico.

Nota-se certa diferença entre as curvas dos resultados experimentais e dos valores analíticos, em que os resultados experimentais de torque, em média, foram 45,2% inferiores aos valores analíticos na faixa de 400 RPM a 1600 RPM e 22,6% superiores aos valores analíticos, em média, na faixa de 1800 RPM a 2000 RPM e, considerando toda a extensão de dados, a média dos resultados experimentais representa 77,3% da média dos valores analíticos.

Quanto ao modelo analítico, sua confiabilidade pode ser avaliada através dos resultados apresentados por Wouterse (1991), onde este modelo foi experimentalmente validado e comparado aos experimentos realizados por Lentz, Zimmermann, DumoulinBerkens e Van Sterkenberg.

A Figura 6 apresenta os dados de  $f^*$  versus  $x/D$ , onde  $f^*$  é a razão entre a força de frenagem experimental e a força de frenagem calculada a partir do modelo analítico e  $x/D$  é a razão entre o entreferro e o diâmetro da face do polo magnético do freio testado.

A partir do gráfico apresentado na Figura 6, depreende-se que a modelagem analítica de Wouterse (1991) apresenta a melhor previsão dos resultados experimentais para  $x/D$  aproximadamente 0,2. No tocante ao protótipo fabricado no âmbito deste trabalho, sua razão  $x/D$  é 0,127; e baseado neste valor, foi traçada a linha vermelha na Figura 6, o que resulta em um valor esperado de  $f^*$  de aproximadamente 0,8. Como o valor médio de  $f^*$  para o protótipo é de 0,7729; entende-se que este valor está em conformidade com a literatura.



**Valores experimentais conjugados com a teoria**

- Lentz [3]; polo retangular
- Zimmermann [4]; polo circular
- Dumoulin [6]; polo circular
- Berkens [8]; polo circular
- ▲ Van Sterkenberg [9]; polo circular
- △ Van Sterkenberg [9]; polo circular
- ⊙ Valor teórico

Figura 6 - Dados de  $f^* \times x/D$  para diversos autores.

Observou-se, também, a simulação em elementos finitos realizada por LINDENBURG (2016), que simulou um sistema de frenagem com dimensões semelhantes ao sistema utilizado neste trabalho. O aparato simulado por Karakoc (2016) é formado por um disco de 3 mm de espessura e 50 mm de raio, que rotaciona à velocidade de 100 rad/s (954 RPM) e está exposto a um campo de indução magnética de 0,3 T. Aplicando estes parâmetros de velocidade angular e indução magnética ao modelo de Wouterse (1991), o torque analítico resulta em 31,37 mN.m, ao passo que o modelo de simulação com elementos finitos apresenta o valor de aproximadamente 35 mN.m, o que representa um valor aproximadamente 11 % superior ao valor analítico.

No modelo de Wouterse (1991), a área da face do polo magnético é significativamente menor que a área do disco, entretanto, no freio testado neste trabalho, a proporção entre a área da face do polo magnético e a área do disco é consideravelmente maior. Contudo, este fator não se mostrou relevante na previsão dos valores experimentais.

De modo geral, os resultados experimentais representaram 0,6987 dos valores analíticos, em média. Sendo, o fator 0,6987 recomendado para compor a equação de cálculo do torque de frenagem (Equação 6) em dimensionamentos futuros, para rotações abaixo do patamar de 1600 rpm (aplicações em energia eólica tipicamente apresentarão rotações consideravelmente menores que o limite de 1600 rpm).

## 5. CONCLUSÃO

Nesse artigo, foi desenvolvido um sistema de frenagem eletromagnético para aplicação em bancadas de teste para rotores eólicos, para uso em túnel de vento ou em campo, de modo que o sistema de frenagem produza o contratorque que seria produzido pelo gerador elétrico em situações reais de operação de turbinas eólicas.

O sistema de frenagem eletromecânico trás vantagens importantes à bancada de testes de rotores eólicos, pois permite que o pesquisador, a partir do controle da corrente elétrica aplicada ao sistema de frenagem, defina as condições de teste a que o rotor é submetido.

Para efetivar tal controle, também se faz necessário que o pesquisador tenha acesso a modelo matemático que o permita prever o contratorque produzido pelo freio para uma dada rotação e um dado valor de corrente elétrica. No presente trabalho um freio eletromagnético de correntes de Foucault foi fabricado e testado experimentalmente. E selecionou-se na literatura um modelo analítico do comportamento deste equipamento.

O modelo analítico apresentou valores consistentes com os resultados experimentais, de modo que foi definido o fator de correção de 0,6987 para aplicação no referido modelo, de modo que possa prever de maneira mais fiel o comportamento do sistema de frenagem que foi testado.

## REFERÊNCIAS

KARAKOC, Kerem; SULEMAN, Afzal; PARK, Edward J.. **Analytical modeling of eddy current brakes with the application of time varying magnetic fields**. Applied Mathematical Modelling, [s.l.], v. 40, n. 2, p.1168-1179, jan. 2016. Elsevier BV.

LINDENBURG, C.. **Investigation into Rotor Blade Aerodynamics: Analysis of the stationary measurements on the UAE phase-VI rotor in the NASA-Ames wind tunnel**. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2003.

PEREIRA, A. H., 2006; **Freio Eletromagnético para Ensaios de Motores Elétricos de Indução**, Dissertação (Programa de Pós-Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

PINHEIRO FILHO, Ricardo Ferreira. **Estudo De Um Sistema De Frenagem Eletromagnética Empregando Correntes Parasitas**. 2014. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de programa de pós-graduação em engenharia elétrica e de computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

ROCHA, P.A.C.; CARNEIRO, F.O.; LOPES, A.S.; MAIA, I.A.; MODOLO, A.B. **Montagem e testes de uma bancada para medição de desempenho de aerogeradores em escala**. Revista Brasileira de Ensino de Física, Fortaleza, v. 32, n. 2, jul. 2011.

SCHIEBER, David. **Optimal dimensions of rectangular electromagnet for braking**  
**Purposes**. IEEE Transactions on magnetics. vol. 11, no. 3, p.948 – 952, maio 1975.

WOUTERSE, J. H.. **Critical torque and speed of eddy current brake with widely separated soft iron poles**. Electric Power Applications, IEE Proceedings B; vol. 138, no. 4, pp.153-158, jul. 1991.

## **APPLICATION OF AN EDDY CURRENT BRAKING SYSTEM TO A TEST BENCH FOR WIND ROTORS**

**Abstract.** *The present work aimed to evaluate the applicability of a braking system to a test bench of a wind rotor used for educational purposes, whose current braking system is a drum brake. The system is an electromagnetic eddy current brake, where an electromagnet induces electric current on an aluminum disk. The analytical model developed by Wouterse (1991) was applied to describe the behavior of this electromagnetic brake. This done, a braking system prototype was tested, so that it was possible to compare the experimental measurements with the analytical estimates. Thus, the results obtained for the electromagnetic brake prototype showed that the measured braking torque values were, on average, 22.7% lower than the analytically estimated ones.*

**Key words:** *Wind Power, braking, Eddy currents.*