

Projeto de Freio de Foucault Aplicado para Medição de Potência em Turbina Eólica Savonius

C. Rech*, A. F. Caldeira*, C. F. Maidana*,
G. S. Ritter*, P. N. Balafa**, S. F. Venturini***.

*Universidade Federal de Santa Maria (UFSM - Campus Cachoeira do Sul)
Rodovia Taufik Germano 3013, Passo D'areia, Cachoeira do Sul/RS
(e-mail: charles@ufsm.br; andre.caldeira@ufsm.br; cristiano.maidana@ufsm.br;
greiceschererritter@gmail.com)

**Universidade La Salle (UNILASALLE)

Avenida Victor Barreto 2288, Centro, Canoas/RS
(e-mail: periclesbalafas@gmail.com)

***Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Rua Sarmento Leite 425, Centro Histórico, Porto Alegre/RS
(e-mail: sfventurini@gmail.com)

Abstract: In this work is proposed the design of a dynamometer based on Foucault's Current Break for the evaluation of torque and power provided by a Savonius wind turbine model in a wind tunnel. The applied measurement system is of the open source type using the Arduino platform. For the reaction force metering a load cell with converter and amplifier H711 was used as well as a photoelectric sensor with resolution of one pulse per turn for the rotation measurement. Equations available in the literature were used to estimate the wind turbine performance parameters for the dynamometer sizing. The wire applied for magnetic flux generation in the coils is AWG24, to support an electrical current rating of 0.5 A and a voltage of 1.0 V. The coils size are 3.1 cm of diameter and 3.0 cm of length. Two coils were applied in order to satisfy the wind turbine demand. As a result, the dimensional characteristics of an eddy current brake able to measure a power of up to 0.5 W, generated by a Savonius wind turbine, were obtained, with uncertainty of measurement about 0.01 W, being adequate for the analyzed turbine.

Resumo: Neste trabalho é proposto o dimensionamento de um freio dinâmométrico, baseado nas correntes parasitas de Foucault, para medição de torque e potência de um modelo – em pequena escala, de turbina eólica Savonius, em um túnel de vento. O sistema de medição empregado é do tipo *open source*, utilizando a plataforma Arduino. Para a medição da força de reação foi utilizada uma célula de carga com conversor e amplificador H711 e, para a medição de rotação, um sensor fotoelétrico com resolução de um pulso por volta. Para o dimensionamento do dinamômetro utilizou-se os parâmetros de desempenho da turbina calculados a partir de equações disponíveis na literatura. O fio empregado nas bobinas para geração do fluxo magnético é AWG24, para suporte à corrente elétrica de 0,5 A e tensão elétrica de 1,0 V. As dimensões das bobinas foram de 3,1 cm de diâmetro e 3,0 cm de comprimento. Para atender a demanda da turbina, duas bobinas foram empregadas. Como resultado, foram obtidas as características dimensionais de um freio de Foucault capaz de medir uma potência de até 0,5 W, gerada por uma turbina Savonius, com incerteza de medição de 0,01 W, adequadamente dimensionada para a turbina analisada.

Keywords: Savonius turbine; Foucault dynamometer; wind tunnel; torque and power measurement; instrumentation.

Palavras-chaves: Turbina Savonius; dinamômetro de Foucault; túnel de vento; medição de torque e potência; instrumentação.

1. INTRODUÇÃO

Turbinas eólicas de eixo vertical caracterizam-se por apresentarem eixo de rotação perpendicular à velocidade do vento e solo e por fornecerem baixa velocidade angular e alto torque. Concebida por Sigurd J. Savonius em 1922, a turbina eólica Savonius é tida como um dos modelos mais simples dentre as turbinas eólicas de eixo vertical e opera devido às forças aerodinâmicas de arrasto. Geralmente composta por duas pás – como originalmente projetada, este modelo de

máquina eólica apresenta geometria semelhante ao da letra “S”, fazendo com que em suas pás haja menor resistência para o movimento oposto ao escoamento do que a favor deste, o que resulta na conversão da quantidade de movimento contida nos ventos em torque mecânico no seu eixo (Menet, 2004).

A partir do produto do torque pela velocidade angular tem-se a potência entregue no eixo da turbina, que pode ser aproveitada tanto para a geração de energia elétrica, quanto para trabalhos mecânicos diversos. O projeto adequado para

concepção de turbinas Savonius, considerando a disponibilidade da energia eólica, possibilita melhores resultados de potência extraída. Faz-se necessário, portanto, construir aparatos de medição experimental para quantificar a potência entregue e validar a metodologia de projeto e construção da turbina.

Segundo Plint (1997) são encontrados diferentes métodos para a medição da potência onde a aplicação da carga ou frenagem, contrárias ao movimento do eixo, resultam em reações. Os valores dessas reações podem ser medidos de diversas maneiras, como em tensão elétrica, através de células de carga conectadas ao eixo de rotação por meio de uma viga em balanço. Dentre os métodos de impor a carga para medição da força de reação, destaca-se o freio de correntes parasitas – também conhecido como freio de Foucault, que possibilita o controle da força frenante aplicada, tornando este mecanismo uma excelente ferramenta de medições de torque e potência (Micco, 2017).

O Freio de Foucault opera utilizando um disco de material condutor elétrico que, quando submetido a um campo magnético produzido por um eletroímã, provoca uma variação no fluxo magnético que, por sua vez, provoca a indução de correntes parasitas nesta área. O campo magnético induzido por tais correntes e o campo induzido pelo eletroímã se opõem, tendendo a se anularem, o que gera uma força oposta à rotação do disco, resultando na sua frenagem. Na Fig. 1 é representado o mecanismo de funcionamento de um Freio de Foucault.

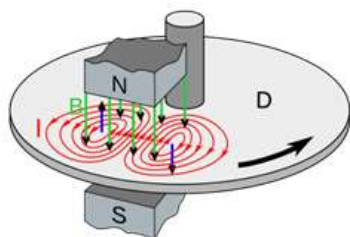


Fig. 1 Mecanismo de funcionamento de um Freio de Foucault (Adaptado de Chetvorno, 2020).

O freio de Foucault é amplamente utilizado como freio de emergência em trens, metrô e caminhões de carga – para descida em declives acentuados. Como exemplo clássico, tem-se o trem de alta velocidade Maglev da China, pois, devido à enorme quantidade de energia para desacelerar, a partir de velocidades superiores a 400 km/h, os modelos mecânicos não atendem em razão da alta geração de calor e desgaste mecânico, impostos pela grande inércia do sistema (Zhi-Ding et. al., 2010).

Cabe ressaltar ainda a aplicação do freio de Foucault para medição do desempenho de turbinas e motores de combustão interna que, conforme descrito por Pereira (2006), é de extrema importância visto que são projetados e construídos constantemente novos equipamentos para este fim e devem ser validados.

Neste trabalho é apresentado o dimensionamento do freio de Foucault para medição de torque e potência disponibilizada por uma turbina eólica do tipo Savonius em um túnel de vento.

2. METODOLOGIA

Para o dimensionamento do sistema de medição aplicaram-se parâmetros calculados de torque e potência disponibilizados pela turbina – modelada em pequena escala e construída em PLA (ácido polilático), através de impressão 3D, voltada ao ensaio experimental em túnel de vento. Dimensões da turbina, túnel de vento e taxa de efeito de bloqueio são apresentadas na Tabela 2, e o modelo da turbina admitido no projeto é ilustrado na fig. 2.

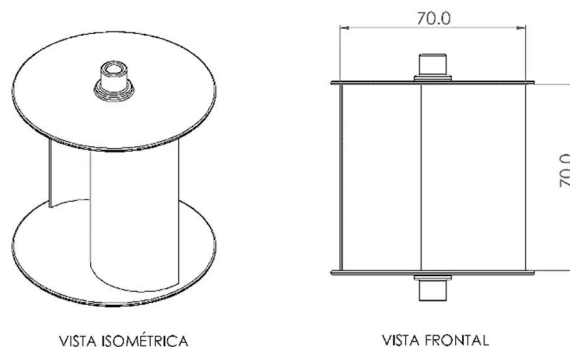


Fig. 2 Modelo e dimensões da turbina eólica Savonius [mm] (Autores).

2.1 Coeficiente de torque na turbina C_T

O cálculo do torque produzido por uma turbina eólica Savonius pode ser realizado através do conhecimento da geometria da turbina, a velocidade de corrente livre do escoamento, neste caso o vento, além do coeficiente de torque, segundo a expressão (1) de Burton, et al. (2011):

$$C_T = \frac{T_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot A_v \cdot Rp} \quad (1)$$

em que T_T representa o torque disponibilizado pela turbina, C_T o coeficiente de torque, ρ a densidade do ar, Rp o raio da área das pás, A_v a área de varredura das pás e V_∞ a velocidade de corrente livre.

Valores aproximados de coeficientes de torque para turbinas Savonius podem ser encontrados em Alé (2012), onde apresentam-se em função da razão da velocidade de ponta de pá TSR – do inglês *Tip Speed Ratio*, tomando como referência, para o cálculo do torque, valores máximos para o coeficiente de torque conforme apresentado na Fig. 3.

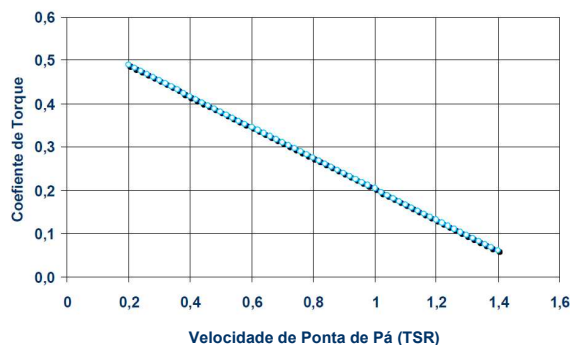


Fig. 3 Coeficiente de torque em função da razão da velocidade de ponta de pá (Adaptado de Alé, 2012).

2.2 Velocidade de corrente livre V_∞

A velocidade de corrente livre V_∞ é a velocidade do vento, sem a interferência da turbina. Considerando que a turbina eólica proposta atua próxima à superfície, são admitidos valores de velocidade média dos ventos de superfície, medidos a uma altura de 10 m do solo, pelas estações meteorológicas regionais.

Assim, os valores de velocidade do escoamento são obtidos através de dados históricos meteorológicos de centros de medição regionais, neste caso, a Tabela Climatológica do Aeroporto Internacional Salgado Filho (SBPA) - Porto Alegre/RS, onde os históricos apontam ventos com velocidade média anual de aproximadamente 4,3 m/s e rajadas da ordem de 14,4 m/s (Redemet, 2020).

Tendo em vista que o desempenho da turbina não se dá em função dos picos da velocidade do vento, ou rajadas, mas sim, pela média da velocidade constante do escoamento, adota-se valores da ordem de 1 m/s a 10 m/s para cálculo do torque máximo da turbina.

2.3 Coeficiente de potência na turbina C_P

A potência extraída de uma turbina eólica é dada pelo produto da potência disponível na corrente livre do vento pelo respectivo coeficiente de potência e, pode-se também, considerar a potência extraída como produto do torque pela frequência ou velocidade angular, no eixo da turbina eólica, conforme (2) de Burton, et al. (2011):

$$C_P = \frac{P_E}{P_D} = \frac{T_T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 \cdot A_v} \quad (2)$$

em que C_P é o coeficiente de potência e P_E a potência extraída pela turbina.

Valores aproximados de coeficientes de potência, para turbinas Savonius podem, igualmente, serem obtidos em Alé (2012), onde apresentam-se também em função de TSR, tomando-se como referência, valores máximos de C_P . A Fig. 4 traz essa relação.

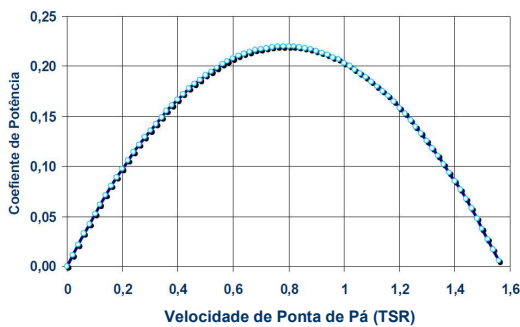


Fig. 4 Coeficiente de potência em função da razão da velocidade de ponta de pá (Adaptado de Alé, 2012).

2.4 Razão da velocidade de ponta de pá – TSR

A razão da velocidade de ponta de pá TSR é razão da velocidade tangencial V_T na pá da turbina eólica pela velocidade de corrente livre V_∞ e, portanto, diretamente

relacionada à velocidade angular da turbina ω , bem como sua geometria, sendo:

$$TSR = \frac{V_T}{V_\infty} = \frac{\omega \cdot R_T}{V_\infty} \quad (3)$$

em que R_T é a distância entre o cento do eixo à ponta da pá, ou seja, o raio da turbina eólica.

2.5 Relação entre TSR, C_T e C_P

Uma vez que valores de coeficiente de torque C_T e coeficiente de potência C_P podem, ambos, serem expressos em função de valores de TSR, tem-se que:

$$C_P = \frac{P_E}{P_D} = \frac{T_T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 \cdot A_v} = \frac{T_T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2 \cdot R_T} \cdot \frac{\omega \cdot R_T}{V_\infty} \quad (4)$$

$$C_P = C_T \cdot TSR \cdot T_T$$

E assim, a expressão (5).

$$C_P = C_T \cdot TSR \rightarrow TSR = \frac{C_P}{C_T} \rightarrow C_T = \frac{C_P}{TSR} \quad (5)$$

2.6 Geometria da turbina

A geometria de uma turbina eólica e sua respectiva classificação de porte, leva em conta não apenas suas dimensões, mas também o valor de sua potência nominal, e são classificadas em três grupos: grande, intermediária e pequena.

Classificações como mini ou micro turbinas, figuram como subclasses das turbinas de pequeno porte e apresentam potência nominal em faixa de até 30 kW, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de turbinas eólicas conforme potência nominal.

Potência nominal (kW)	Escala de classificação
> 1	Micro
< 30	Mini
< 250	Pequeno porte
≥ 250 e ≤ 1000	Médio porte
> 1000	Grande Porte

(Adaptado de Lehmann e Koenemann, 2005)

Os valores de potência extraída da micro turbina eólica Savonius proposta neste trabalho, fundamenta-se na concepção da geometria da turbina em função de melhores valores de torque possíveis. Na Tabela 2 são apresentadas as dimensões do modelo da turbina projetada.

Tabela 2. Geometria da micro turbina eólica Savonius.

Dimensões da turbina e túnel de vento			
Área de desenvolvimento	A_D	0,070686	m ²
Efeito de bloqueio	E_B	7,5	%
Área da turbina	A	0,0049	m ²
Diâmetro	D	0,07	m
Altura	H	0,07	m
Raio	R_T	0,035	m
Corda	c	0,0385	m
Excentricidade	e	0,007	m
Excentricidade secundária	a	0	m
Placa de extremidade	D_O	0,077	m
Número de pás	N	2	-
Razão de aspecto	R_A	1,0	-
Razão de excentricidade	R_E	10,0	%
Razão de excentricidade secundária	R_{AE}	0	%

2.7 Cálculo do torque e potência na turbina

Considerando valores para velocidade de corrente livre da ordem de 10 m/s e vazão mássica de 0,06 kg/s, conforme médias anuais históricas para a região, os valores calculados de torque e potência em função do coeficiente de torque C_T mínimo, médio e máximo considerando, também, a geometria da turbina são mostrados na Tabela 3.

O valor máximo do torque e potência calculados são utilizados para o dimensionamento do freio de Foucault aplicado para medição do desempenho da turbina eólica em funcionamento em um túnel de vento estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de torque e potência calculados.

Valores de torque e potência calculados em função de C_T					
		Mínimo	Médio	Máximo	
Razão da velocidade de ponta de pá	TSR	1,4	0,8	0,2	-
Coefficiente de torque	C_T	0,06	0,28	0,49	-
Torque	T_T	0,00063	0,00289	0,00515	N.m
Potência disponível no vento	P_D	3,0012	3,0012	3,0012	W
Coefficiente de potência	C_P	0,084	0,220	0,098	AD
Potência extraída pela turbina	P_E	0,2521	0,6603	0,2941	W

2.8 Dimensionamento do Freio de Foucault

Na Figura 5 é apresentando um desenho esquemático do freio proposto. É composto por duas bobinas fixadas na extremidade

de uma haste. Na outra extremidade há uma célula de carga para medir a força de reação imposta no freio.

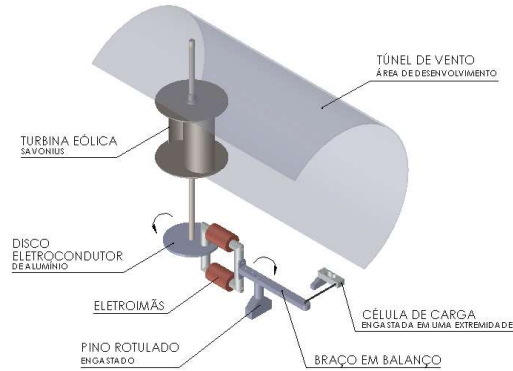


Fig. 5 Projeto básico do Freio de Foucault proposto.

2.9 Seleção do disco eletro condutor

O disco proposto é de alumínio por apresentar uma baixa densidade e com isto menor inércia imposta para turbina, e ainda é um bom condutor elétrico. O diâmetro do disco implica na massa do conjunto responsável pela difusividade térmica em relação ao calor gerado pela frenagem e também pela confiabilidade estrutural, considerando vibrações e acoplamento no sistema (Micco, 2017).

2.10 Esforços frenante no disco e fluxo magnético

A força necessária para frear o disco, em relação ao torque aplicado no raio do disco quando sujeito a um fluxo magnético pode ser calculado de maneira simplificada apresentado por Halliday (2009), e mostrado na Fig. 6.

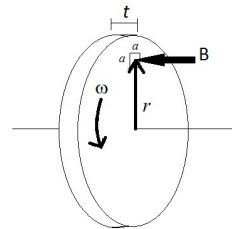


Fig. 6 Metodologia simplificada para um disco condutor sob a ação de um campo magnético B na área limitada pela área de lado a. (Adaptado de Halliday, 2009)

Conforme proposto por Halliday (2009), o torque (T_d) imposto no disco é dado por:

$$T_d = -\omega \cdot \sigma_{Al} \cdot t \cdot r^2 \cdot a^2 \cdot B^2 \tag{6}$$

em que ω representa a velocidade angular do disco, σ_{Al} a condutividade elétrica do disco, t a espessura do disco, r o raio efetivo entre o centro do eixo de giro do disco e o centro do polo da bobina, a a área, B a densidade de fluxo magnético gerado pela bobina e conduzido pelo núcleo ferromagnético. O fator c é um coeficiente geométrico, de ajuste sugerido em Wouterse (1991), que levam em consideração a relação entre a resistência do contorno total do disco e a resistência do

contorno da parte do disco que fica sob os polos do eletroímã, dado por:

$$c = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_e}{r}\right)^2 \left(\frac{r - R_e}{D}\right)^2} \right] \quad (7)$$

em que R_e corresponde ao raio externo do disco, D_e o diâmetro do eletroímã (Pereira, 2006).

O entreferro corresponde a distância percorrida entre os polos do eletroímã. Considera-se o centro do núcleo como o caminho percorrido pelo fluxo magnético desprezando o efeito de espalhamento nas demais áreas.

A densidade do fluxo magnético B necessário para impor a carga no disco girante a partir do efeito Joule, é dada por (8).

$$B = \sqrt{\frac{Td}{-\omega \cdot \sigma_{Al} \cdot t \cdot c \cdot r^2 \cdot a^2}} \quad (8)$$

Os ferros condutores do fluxo magnéticos devem ser posicionados devido aos efeitos de borda, conforme Wouterse (1991) a um diâmetro medido entre o centro do polo e a extremidade do disco, chamada de raio efetivo do disco r (Pereira, 2006).

2.11 Eletroímã

A configuração de montagem do eletroímã, conforme descrito por Pereira (2006), em que é considerada a posição dos polos, é mostrado na Fig. 7. Neste projeto utilizou-se a configuração “a”, por apresentar compacidade e facilidade de montagem, mesmo sabendo que Pereira (2006) apresenta como desvantagem um maior caminho percorrido pelo campo magnético.

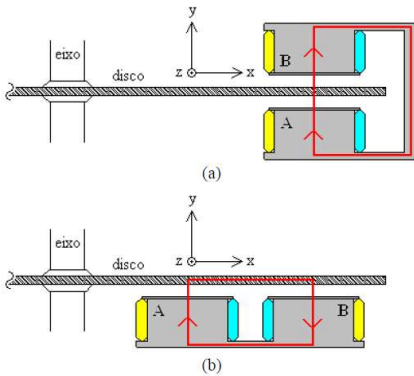


Fig. 7 Esquemas de montagem “a” e “b” para o eletroímã no disco (Pereira, 2006).

2.12 Cálculo do número de espiras

Conforme descrito por Chapman, 2005, o número de espiras pode ser calculado, baseado na densidade do fluxo magnético necessário, conforme:

$$N \cdot I = B \cdot a \cdot \mathfrak{R} \quad (9)$$

em que N representa o número de espiras, I a corrente elétrica que percorre os indutores, a a área de seção no entreferro e \mathfrak{R} a relutância total do caminho percorrido pelo fluxo magnético calculada conforme (Chapman, 2005):

$$\mathfrak{R} = \frac{lc}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot a} \quad (10)$$

em que lc representa o comprimento característico do caminho percorrido pelo fluxo magnético, μ_r a permeabilidade magnética relativa do metal considerado, μ_0 permeabilidade magnética no vácuo.

2.13 Instrumentação da medição

As medições de torque e potência são realizadas a partir da aquisição de dados provenientes da célula de força instalada na posição oposta da aplicação da força no disco (Fig. 5) e do valor de rotação proveniente do sensor fotoelétrico. Ambos os dados são adquiridos e processados em uma plataforma Arduino com *software* específico confeccionado.

2.14 Medição de torque com a célula de carga

A força de reação é medida através de uma célula de carga com capacidade máxima de 50 gf e com incerteza de medição relativa de 0,1% F.S., da marca Keyes, acoplada na extremidade oposta das bobinas (Fig. 5). Para condicionamento da célula de carga utiliza-se um condicionador/amplificador HX 711. Para calibração utilizou-se pesos de referência devidamente aferidos em uma balança com resolução 0,01 gf. O torque é obtido a partir do produto da força medida pela distância de aplicação descrito na Fig. 5 como braço em balanço.

2.15 Medição da rotação com sensor fotoelétrico

A rotação é medida com a utilização de um sensor óptico da marca Autonics, posicionado próximo ao eixo de rotação do sistema, com resolução de um pulso por volta. A escolha do sistema de medição de rotação do tipo fotoelétrico se deu considerando a não interferência do campo magnético do freio com a sinal fotoelétrico do sensor. A potência é calculada a partir do produto do torque pela rotação angular.

2.16 Sistema de aquisição de dados

Os dados são adquiridos e processados utilizando a plataforma Arduino *open source* de baixo custo.

2.17 Incertezas na medição

As medições são realizadas de forma quase-estática, visto que para cada período de aquisição de dados a rotação é estabilizada para que o sistema entre em regime permanente do escoamento. Para tanto a incerteza da medição é calculada utilizando a metodologia proposta por Kleine Mc klintok (1953) em Beckwith et al. (1993), visto que o experimento é de primeira ordem e o escoamento plenamente desenvolvido.

3. RESULTADOS

Os dados de dimensionamento do freio de Foucault, aplicado como dinamômetro para a medição de torque e potência do modelo de turbina Savonius proposto, em túnel de vento, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados utilizados para o dimensionamento do Freio de Foucault.

Raio externo do disco	R	0,030	m
Raio efetivo do disco	r	0,025	m
Espessura do disco	t	0,003	m
Área de seção do eletroímã	A	0,0000196	m ²
Diâmetro do eletroímã	D	0,005	m
Torque do disco	T_d	0,005147	N.m
Velocidade Angular	w	57,14	rad/s
Condutividade elétrica do alumínio	σ_{Al}	$3,8 \times 10^7$	S/m
Comprimento percorrido pelo fluxo magnético	l_c	0,0045	m
Permeabilidade magnética no vácuo	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	-
Permeabilidade relativa	μ_r	1,00002	-

Para atender as especificações conforme Tabela 5 foi definido conforme Norma *American Wire Gauge* (AWG) o fio esmaltado bitola 24, com capacidade máxima de 0,612 A, diâmetro de 0,51 mm e capacidade de 18 espiras por centímetro.

Tabela 5. Dados calculados do dimensionamento do Freio de Foucault.

Relutância	\mathcal{R}	182699725	A.e/Wb
Coefficiente de eficiência geométrico	c	0,463	-
Densidade do fluxo magnético	B	0,374	T
Número de bobinas	N_b	2	-
Tensão elétrica máxima	U	1	V
Corrente elétrica máxima	I	0,5	A
Número de espiras	N	2679	-
Comprimento carretel de bobinas	C_c	3,0	cm
Diâmetro carretel bobinas	D_c	3,1	cm

Para melhor configuração e proporção de área disponível do protótipo, foi escolhido 3 cm de comprimento da bobina para o arranjo das espiras, totalizando 25 camadas de 0,51 mm,

dispostas em duas bobinas, o que corresponde a uma espessura de 25,5 mm de cada bobina. Considerando o núcleo do condutor magnético de 5 mm, um isolador carretel de 0,5 mm de parede, o diâmetro externo de cada bobina é de 3,1 cm.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi dimensionado um freio de Foucault – freio de correntes parasitas, para aplicação como dinamômetro voltado à medição de torque e potência de um modelo de turbina eólica Savonius, de pequena escala, em túnel de vento.

O valor nominal utilizado de potência foi de $0,5 \pm 0,01$ W, a partir do valor disponibilizado pela turbina projetada. Para atender este valor de potência, foi necessário a utilização do fio AWG24 com capacidade máxima de 0,612 A e diâmetro de 0,51 mm, comportando 18 espiras por centímetro. A máxima tensão elétrica utilizada é de 1 V com corrente elétrica de 0,5 A. O controle de carga, dependente da tensão elétrica aplicada, é realimentado pela rotação e verificado no sensor fotoelétrico com resolução de 1 pulso por volta. A força de reação é medida com uma célula de carga de 50 g_f com incerteza de 0,1 aplicada a uma distância de 25 mm $\pm 0,1$.

Verifica-se que a utilização do freio de correntes parasitas como dinamômetro permite medir potência e torque com alta confiabilidade e baixo custo, considerando a confecção do protótipo e o material utilizado. Conseqüentemente, uma vez validado, sua aplicação em turbinas eólicas com ranges de potência imediatamente acima do disposto neste trabalho, fica exclusivamente condicionada ao adequado dimensionamento do sistema de medição dinamométrica.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Projelmec – Ventilação Industrial pelo projeto e confecção do túnel de vento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alé, Jorge A. V. (2012). Small Wind Turbines Workshop, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, Porto Alegre/RS.
- Beckwith, T.G.; Marangoni, R.D.; Leinhard, J.H. (1993). Mechanical Measurements. Reading: Addison-Wesley, 5th edition.
- Burton, Tony et al. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.
- Chapman, S.J. (2013). Fundamentos de Máquinas Elétricas. AMGH Editora. Rio Grande do Sul.
- Chetvorno. (2015). A diagram showing how a disk-type eddy current brake works. Wikipedia Commons. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Eddy_current_brake_diagram.svg; Acesso em 01/05/2020.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. (2009). Fundamentos de Física. Vol. 3: Eletromagnetismo. Editora LTC.
- Menet, J. (2004). Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation. Université Polytechnique Hauts-de-France.
- Micco, F. K.; Rech, C.; Schneider, P. S. (2017). Methodology evaluation for the design of a Foucault Brake. 24th International Congress of Mechanical Engineering. Curitiba.

- 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.
- Plint, M, A & Martyr, A. (1997). Engine Testing Theory and Practice. Butterworth-Heinemann.
- REDEMET, Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (2020). Tabela Climatológica 2001-2010 do Aeroporto Internacional Salgado Filho (SBPA). Porto Alegre/RS. Disponível em: redemet.aer.mil.br. Acessado em 01 de maio de 2020.
- Zhi-Ding et. al. (2010). Analysis of simulation design of the disc eddy current braking device. International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE). Institute of Railway & Urban Rail Transit. Tongji University. Shanghai. China.