



CAPÍTULO 11

MODELO DA TURBINA EÓLICA DE EFEITO MAGNUS¹

Maro Jinbo

Carlos Filipe Gonçalves dos Santos

Edson Ribeiro dos Santos

Marcelo Franklin Lorensetti

Matheus Henrique dos Santos do Valle Buso

Mauricio Daniel Marczal

Mauro Ceretta Moreira

RESUMO

Apresenta-se a modelagem matemática de turbinas eólicas que não utilizam pás convencionais para captar a energia cinética dos ventos. No lugar das pás, a turbina possui cilindros girantes acionados por um ou mais motores elétricos. Cilindros girantes imersos no ar criam diferenças de pressões originando forças (de sustentação) transversais à direção do fluxo de ar. Este fenômeno físico é conhecido como Efeito Magnus. Essas forças aplicadas aos cilindros girantes de uma turbina proporcionam o torque no eixo principal que é transmitida ao gerador elétrico. Características relevantes da turbina eólica de efeito Magnus que aperfeiçoam o seu desempenho também são apresentados, tais como: número ideal de cilindros, características da superfície dos cilindros, relação ótima entre o comprimento e diâmetro dos cilindros entre outras. Faz-se referência a uma empresa japonesa que fabrica comercialmente este tipo de turbina eólica, a Mecaro, cuja patente de invenção foi registrada no Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Turbina Eólica; Efeito Magnus; Cilindros Girantes; Energia Eólica.

INTRODUÇÃO

Sistemas de geração de energia elétrica baseados em fontes renováveis como a solar e a eólica estão se tornando cada vez mais importantes com o aumento percentual de suas contribuições na matriz energética dos países. Fatores como a escassez do potencial hidráulico a ser explorado, resíduos do uso da energia nuclear e a poluição causada pelo carvão mineral fortalecem ainda mais a utilização da eólica.

A potência instalada de sistemas eólicos vem crescendo em todo mundo de forma exponencial. A tecnologia de turbinas eólicas vem evoluindo favorecendo o aumento do diâmetro do rotor e com isso a potência captada pelas turbinas.

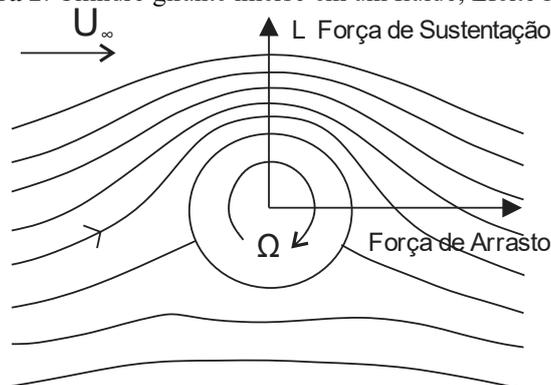
A turbina eólica que trata o presente capítulo baseia-se no princípio físico conhecido como Efeito Magnus que é apresentado na Figura 1. Tem-se um cilindro de raio R rotacionando

¹ Edital 94/2013 CNPq



com velocidade angular Ω no sentido horário, imerso em um fluido de densidade ρ , cuja velocidade laminar do fluido é U_∞ . Na parte superior do cilindro tem-se maior velocidade do fluido, conseqüentemente menor pressão e na parte inferior tem-se menor velocidade, conseqüentemente maior pressão, criando-se uma força resultante F_s que é a força de sustentação (*lift force*) no sentido de baixo para cima.

Figura 2: Cilindro girante imerso em um fluido, Efeito Magnus.



Fonte: A autoria própria, 2016.

A Equação (1) expressa a força de sustentação F_s obtida do teorema de Kutta-Joukowski (LUO, 2011).

$$F_s = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot U_\infty \cdot \Omega \cdot R^2 \quad (1)$$

TURBINA EÓLICA DE EFEITO MAGNUS

HISTÓRICO

Em 1852 o cientista alemão Heinrich Gustav Magnus descobriu o fenômeno que ficou conhecido como Efeito Magnus.

Em 1926 o engenheiro aeronáutico nascido na Alemanha, Anton Flettner construiu um sistema eólico de 30 kW de potência para velocidade de vento nominal de 10 m/s. O sistema eólico possuía uma turbina de eixo horizontal baseado no princípio do efeito Magnus com 4 cilindros acionados por motores elétricos no lugar das pás convencionais. Os cilindros tinham 5 m de comprimento e 0,8 m de diâmetro no ponto médio. O rotor possuía um diâmetro de 20 m e o sistema eólico foi colocado em uma torre de 33 m de altura.

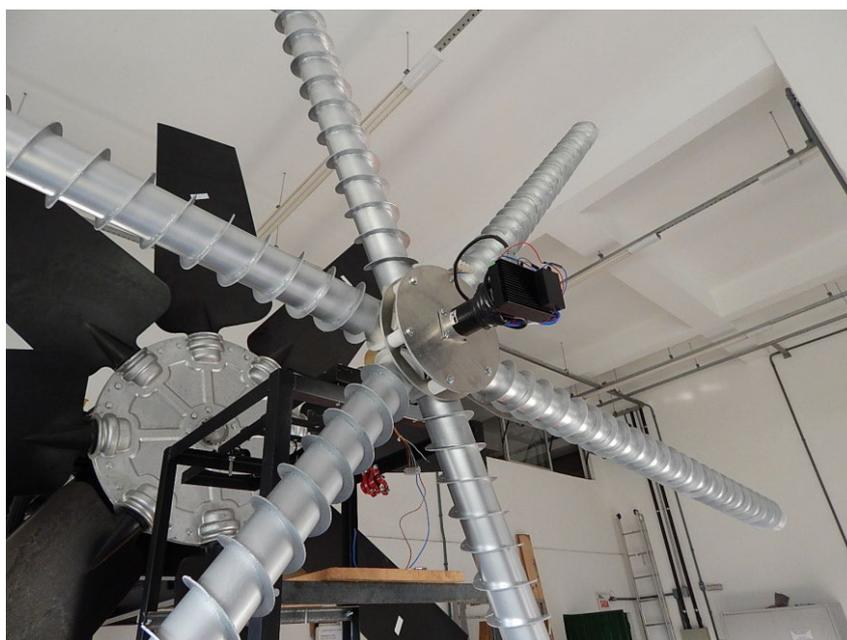
Em 1983 nos Estados Unidos ressurgiram experimentos com a turbina eólica de eixo horizontal e efeito Magnus, a *Barrel-Blade* (forma de barril), foi denominado assim pela aparência dos cilindros com barris. Ao longo dos anos muitos países tentaram desenvolver a



turbina eólica de efeito Magnus, mas sem sucesso, pois a superfície lisa dos cilindros consumia excessiva energia no acionamento dos mesmos, o que reduzia a eficiência e o tornava inviável.

Em 1998 foi fundada a empresa MECARO no norte do Japão que iniciou suas atividades desenvolvendo equipamentos para linhas de produção das indústrias. Através de esforços em conjunto entre indústria, governo (prefeitura de Akita) e universidades, após 4 anos de pesquisas conseguiram desenvolver uma turbina eólica de efeito Magnus viável comercialmente. Realizando experimentos com protótipos de turbinas de efeito Magnus, a MECARO percebeu que cilindros em forma de espiral, melhoravam a eficiência da turbina, em velocidade mais baixas de vento. Ou seja, as barbatanas em espiral dos cilindros aumentavam o Efeito Magnus e conseqüentemente o torque da turbina eólica. Na Figura 2 tem-se um protótipo de turbina eólica de efeito Magnus de 3,0 m diâmetro do IFSC (Instituto Federal de SC) câmpus Chapecó (JINBO, 2016).

Figura 2: Protótipo de turbina eólica de efeito Magnus.



Fonte: A autoria própria, 2016.

Em janeiro e fevereiro de 2007 a equipe da MECARO foi realizar testes no túnel de vento da NASA no centro de pesquisas na Califórnia EUA, cujos resultados comprovaram sua eficácia e sua segurança. Melhorias adicionais foram realizadas em parceria com as universidades japonesas de Tokyo e Kogakuin. Em abril de 2007 iniciaram a produção em larga escala. A MECARO registrou patentes no Japão, nos USA, na Coréia e no Brasil entre outros países (MURAKAMI, 2009).



CARACTERÍSTICAS QUE MELHORAM O DESEMPENHO DA TURBINA EÓLICA MAGNUS

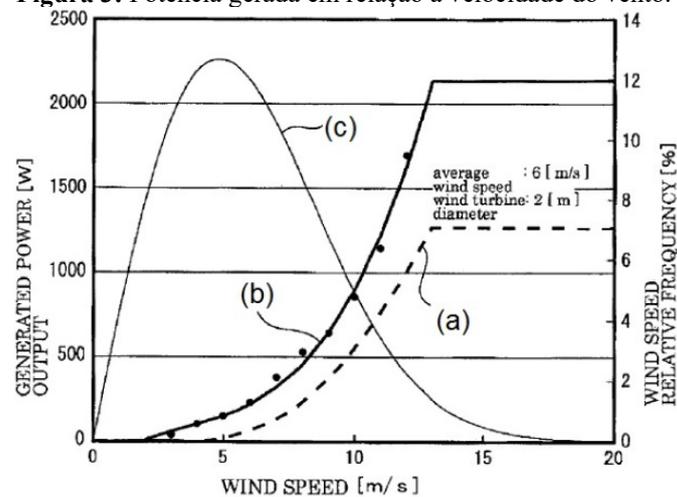
Murakami *et. al.* (MURAKAMI, 2009) apresentou as características que viabilizaram o funcionamento da turbina de efeito Magnus desenvolvida pela empresa MECARO. A barbatana em espiral com pelo menos duas entradas, disposta sobre a superfície do cilindro aumenta de forma determinante o efeito Magnus, como pode ser visto na Figura 2. A rotação do cilindro com barbatana deve girar no sentido que gere um fluxo de ar paralelo ao cilindro. Este fluxo de ar deve ser no sentido da extremidade para o eixo central da turbina, pois proporciona um aumento significativo do efeito Magnus, comprovado experimentalmente. Devido a presença da barbatana em espiral o torque resultante é aumentado e pode chegar até a 4 vezes o torque resultante de um cilindro sem barbatana (MURAKAMI, 2009).

Duas outras características relevantes do conceito de turbina Magnus de Murakami são os discos (*end cap*) de diâmetro maior que o cilindro girante e um conjunto de pás, formando uma espécie de cata-vento, disposto ao redor da extremidade externa dos cilindros. Estes dois dispositivos também contribuem de forma significativa no aumento do efeito Magnus.

A patente de Murakami (2009) apresenta o torque produzido por um cilindro girante a 1080 RPM e suas variações devido às características dos perfis dos cilindros. Pode-se constatar que a presença da barbatana em espiral, proporciona um aumento significativo de torque.

A Figura 3 apresenta os resultados experimentais obtidos ao ar livre na prefeitura de Akita no Japão, local onde a velocidade média anual dos ventos é de 6 m/s. Estas informações foram extraídas da patente de invenção registrada no Brasil em 2004 pela MECARO. A curva (a) é referente à potência gerada por uma turbina eólica convencional com 2 m de diâmetro.

Figura 3: Potência gerada em relação a velocidade do vento.



Fonte: Murakami, 2009.



A curva (b) é referente a potência gerada por uma turbina eólica de Efeito Magnus com características já descritas nesta seção, também com 2 m de diâmetro. Pode-se constatar que a turbina Magnus apresentou um desempenho superior à turbina convencional, iniciando em velocidades ainda menores e gerando maior potência em toda faixa de velocidade dos ventos. A curva (c) é referente à distribuição de Rayleigh da velocidade média anual dos ventos no local do experimento, a prefeitura de Akita, Japão.

Bychkov (2008) na Rússia realizou experimentos com protótipos de turbinas de efeito Magnus em um túnel de vento de seção transversal 3,6 por 3,6 m. Os protótipos possuíam diâmetros entre 1,3 a 2,0 m, com número de cilindros entre 3 a 6 unidades, cujos diâmetros eram de 5 e 6 cm. Aplicou rotação nos cilindros até 8000 RPM. Os experimentos concluíram que uma turbina eólica de efeito Magnus otimizada deve ter $N = 6$ cilindros, o comprimento do cilindro deve ser 15 vezes seu diâmetro (BYCHKOV, 2008). Além disso, constatou-se que a turbina Magnus mesmo em velocidades de vento de 2 m/s apresenta um coeficiente de potência não menor que $C_p = 0,43$, considerando-se que as turbinas convencionais geralmente não operam abaixo dos 4 m/s. Com isso consegue-se captar mais energia dos ventos ao longo de um período de tempo. A turbina pode ser operada também para velocidades maiores que 35 a 40 m/s de vento, bem superiores ao limite de turbinas convencionais que é de 25 m/s.

Sun et. al. (2012) realizaram e validaram com dados experimentais as simulações numéricas 3D de perfis cilíndricos de turbinas de efeito Magnus (SUN, 2012)(ZHUANG, 2012). Utilizaram o software comercial CFD (*Computation Fluid Dynamics*), o CFX da ANSYS^R. O perfil de formato cônico truncado apresentou o maior coeficiente de potência líquido C_p entre os 6 perfis simulados. Dentre os perfis que são cilíndricos lisos, o perfil que possui a maior razão entre o comprimento e o diâmetro, apresentou o maior valor de C_p . Os perfis ondulados reduzem consideravelmente a vibração e a força de arrasto, apesar de apresentarem os menores valores de C_p . Além disso, as simulações apontaram que o número ideal de cilindros é de $N = 6$ e a razão entre o comprimento e o diâmetro dos cilindros deve ficar entre 14 e 15 para um desempenho otimizado da turbina (LUO, 2011) (BYCHKOV, 2007) (BYCHKOV, 2008).

MODELO DA TURBINA DE EFEITO MAGNUS

A Figura 4 ilustra uma turbina eólica de efeito Magnus, onde:

N = número de cilindros em rotação;

R_1 = raio da turbina [m];



Ω_1 = velocidade angular da turbina [rad/s];

R_2 = raio dos cilindros [m];

Ω_2 = velocidade angular dos cilindros [rad/s];

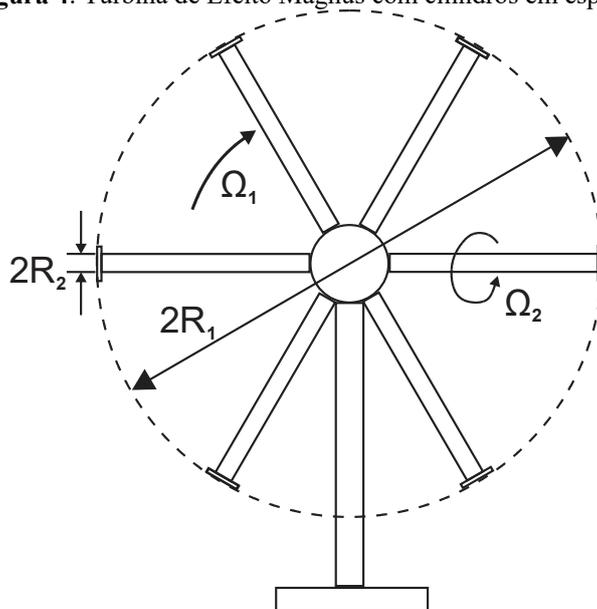
U_∞ = velocidade laminar do vento [m/s];

ρ = densidade do ar [kg/m^3].

A razão entre a velocidade tangencial da turbina e a velocidade real do vento é conhecida como *TSR (Tip-Speed-Ratio)* da turbina Magnus, cuja expressão é (2):

$$\lambda_1 = \frac{\Omega_1 \cdot R_1}{U_\infty} \quad (2)$$

Figura 4: Turbina de Efeito Magnus com cilindros em espiral.



Fonte: Autoria própria, 2014.

A expressão da velocidade relativa do cilindro girando em relação à velocidade do vento é definida pela equação (3):

$$\lambda_2 = \frac{\Omega_2 \cdot R_2}{U_\infty} \quad (3)$$

A razão entre comprimento e raio dos cilindros é fornecida pela equação (4):



$$A = \frac{R_1}{2 \cdot R_2} \quad (4)$$

A equação analítica (5) é referente ao coeficiente de potência C_P da turbina eólica de efeito Magnus e foi obtida com base nos princípios da dinâmica dos fluidos e da teoria da quantidade de movimento (momento) do elemento pá (*BEM – Blade Element Momentum Theory*) (LUO,2012). Portanto, a equação (5) relaciona o C_P com a potência mecânica P :

$$C_P = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot U_\infty^3 \cdot \pi \cdot R_1^2} = \frac{N \cdot \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot R_2^2}{U_\infty^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2 \cdot N \cdot \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot R_2^2}{U_\infty^2}}\right) \quad (5)$$

O valor limite do coeficiente de potência para turbinas eólicas de efeito Magnus é $C_P=0,593$. Modificando-se a equação (5), baseado em valores de C_P obtidos experimentalmente, obtêm-se a equação (6) que representa o modelo mais próximo da realidade (LUO, 2012).

$$C_P = \frac{P}{\rho \cdot U_\infty^3 \cdot \pi \cdot R_1^2} = \frac{N \cdot \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot R_2^2}{2 \cdot U_\infty^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2 \cdot N \cdot \Omega_1 \cdot \Omega_2 \cdot R_2^2}{U_\infty^2}}\right) \quad (6)$$

Considerando-se $\sigma_T = 2 \cdot N \cdot R_2 / (2 \cdot \pi \cdot R_1)$ a equação (6) pode ser reescrita como:

$$C_P = \frac{\pi \cdot \sigma_T \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \pi \cdot \sigma_T \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}\right) \quad (7)$$

Utilizando-se a equação (7) traçam-se as curvas do coeficiente de potência C_P da turbina eólica de Efeito Magnus na Figura 5, com os valores da Tabela 1. As curvas apresentadas e obtidas através da equação analítica (7) dizem respeito a eficiência da turbina na conversão de energia eólica para mecânica.

Tabela 1: Parâmetros da Turbina Magnus.

Parâmetro	Descrição	Valor
N	Número de cilindros	5
A	Relação R_1 e R_2	20
σ_T	<i>Rotor Solidity</i>	0.04
λ_1	<i>TSR Tip Speed Ratio</i>	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
λ_2	Veloc. relativa do cilindro	0 a 10

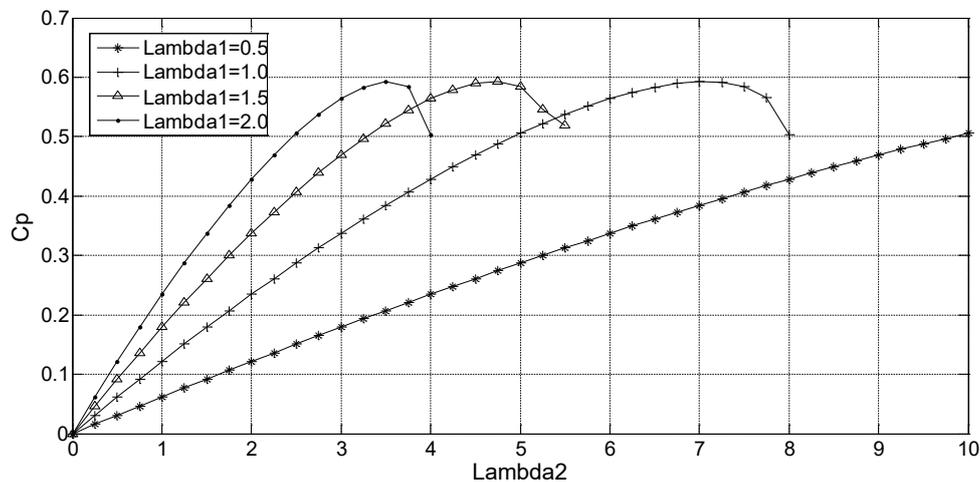
Fonte: Autoria Própria, 2016.

Pode-se concluir que o aumento da rotação dos cilindros da turbina Magnus proporciona um aumento no C_P até o limite de Betz, cujo valor é 0,593 e a partir deste ponto faz decrescer o C_P e conseqüentemente a potência.



Pela observação da equação (6) que relaciona C_p com a potência, pode-se afirmar que a partir do limite de Betz o aumento na potência depende do aumento na velocidade do vento U_∞ e/ou do raio da turbina R_1 .

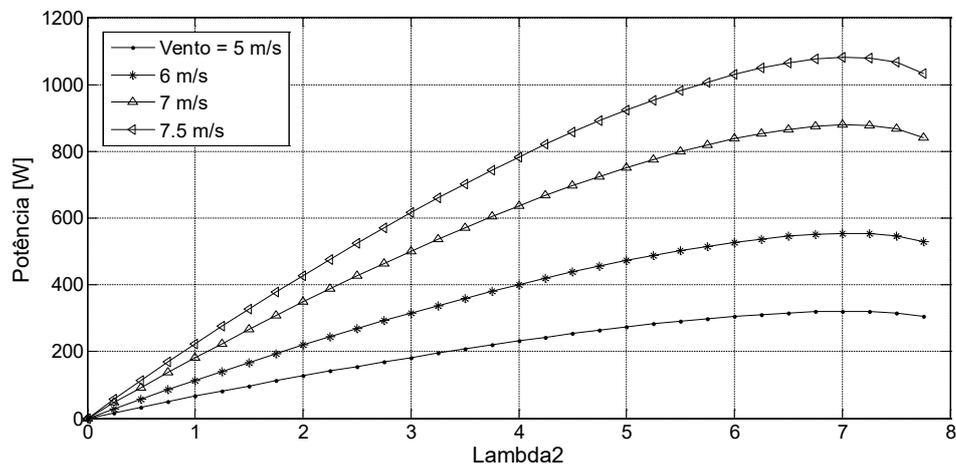
Figura 5: Coeficiente de Potência da Turbina Magnus.



Fonte: Autoria Própria, 2014.

Aplicando-se na equação (7) os mesmos valores anteriormente utilizados de N , A , σ_T da Tabela 1, mas escolhendo-se $\lambda_1 = 1$ e raios da turbina $R_1 = 1.5$ m obtêm-se as curvas da Figura 6.

Figura 6: Potência mecânica da Turbina x Velocidade do vento.



Fonte: Autoria Própria, 2014.

As curvas representam as potências mecânicas teóricas para 4 velocidades de ventos variando-se as rotações dos cilindros. Um vento de 7,5 m/s ultrapassaria teoricamente a potência de 1 kW para uma turbina com estas dimensões. Também se destaca o fato de que o aumento de λ_2 , ou seja, da velocidade de rotação relativa dos cilindros, com vento constante, acima do valor que resulta no limite máximo de C_p , a potência começar a decrescer.



CONCLUSÕES

A turbina eólica de efeito Magnus tem a vantagem de operar em faixas de velocidade de vento inferiores e superiores quando comparado com as turbinas convencionais de 3 pás. Portanto, em um determinado período de tempo pode captar mais energia que uma turbina convencional.

O perfil dos cilindros girantes com barbatanas e tampas circulares com diâmetro maior que os cilindros na extremidade oposta ao eixo principal desenvolvido pela empresa MECARO viabilizou comercialmente a turbina Magnus.

Apresentou-se um modelo matemático para as turbinas eólicas de efeito Magnus validadas através de simulações e melhoradas através de dados experimentais.

Simulações numéricas e experimentais em túnel de ventos apontam que para o número ideal de cilindros é $N = 6$, a relação entre comprimento e raio do cilindro deve ficar entre 14 a 15. Estes valores melhoram significativamente o desempenho da turbina.

REFERÊNCIAS

BYCHKOV, N.; DOVGAL, A.; KOZLOV, V. “Magnus wind turbine as an alternative to the blade ones”. *Journal of Physics: Conference Series* 75, 2007.

BYCHKOV, N.; DOVGAL, A.; SOROKIN, A. “Parametric Optimization of the Magnus wind turbine” *International Conference on Methods of Aerophysical Research, ICMAR 2008*.

BYCHKOV, N. M. “Magnus wind turbine, calculated characteristics of the wind wheel”. *Thermophysics and Aeromechanics*, Vol.15 no2, 2008.

JINBO, M. “Contribuições ao Projeto de Sistemas Eólicos de Efeito Magnus com Rastreamento da Potência Máxima”. Tese (Doutorado em Eng. Elétrica), PPGEE UFSM, Santa Maria - RS, 2016.

LUO; D.; HUANG, D; WU, G. “Analytical solution on Magnus wind turbine power performance based on the blade element momentum theory”. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 3, 2011.

MURAKAMI, N.; et. al. “Magnus Type Wind Power Generator”. United States Patent. US7.504.740 B2. March, 17, 2009.

SUN, X.; et. al. “A three-dimensional numerical study of the Magnus wind turbine with different blade shapes”. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 4, 2012.

ZHUANG, Y.; et. al. “Numerical study on aerodynamic performances of the wind turbine rotor with leading-edge rotation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 4, 2012.