



Estudo Analítico do Desempenho de uma Turbina de Eixo Vertical de Pás Móveis

Willmari Suarez ¹, Ramiro G. Ramirez C. ²

1,2 Instituto de Engenharia Mecânica

Universidade Federal de Itajubá UNIFEI

Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, 37500-903

marwill13@hotmail.com, ramirez@unifei.com.br

RESUMO

Este trabalho tem como finalidade a análise do comportamento de uma turbina eólica de eixo vertical, que utiliza de forma eficaz a energia entregue pelo ar para transformá-la em potência de eixo, que depende apenas da área de atuação das palhetas. A turbina é projetada para reduzir o torque negativo provocado pelos painéis quando estão colocados na direção oposta do vento, pelo uso de palhetas móveis que ficam na posição horizontal ou fechada. Esta turbina pode ter múltiplas aplicações, como trabalho mecânico e geração de energia, considerando a alta eficiência em baixas velocidades, de simples construção com uma tecnologia de projeto básico.

O objetivo deste trabalho é obter uma estimativa do desempenho da turbina, através de uma abordagem teórica – numérica, que poderá corroborar com posteriores análises e aperfeiçoamento do projeto da turbina. O desempenho teórico da turbina eólica de pás articuláveis foi determinado através da solução numérica com base na Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), para a variação do coeficiente de arrasto médio (c_d), em regime permanente para diferentes aberturas das palhetas e diferentes velocidades de perturbação.

Palavras-chave: *Turbina eólica, DFC, Coeficiente de potência, Energia Eólica.*

INTRODUÇÃO

A energia eólica como fonte de geração de energia livre de emissões de gases de efeito estufa, atingiu, nos últimos 25 anos, um grau de maturidade tecnológica e de competitividade



econômica, que se tornou a opção mais atraente para novas instalações de geração de energia, tendo em vista a diversificação dentro da estrutura energética de praticamente todos os países do mundo.

A energia eólica também apresenta um impacto ambiental moderada, contra o enorme impacto de outras fontes de geração de eletricidade como nas formas convencionais térmicas. [5]

Esta TEV (Turbina de eixo Vertical) é composta por dois rotores fixados em um eixo vertical, cada um dos rotores composto por dois eixos normais, possuindo quatro pás formadas por duas paletas retangulares que abrem e fecham pela ação do vento, (vide Fig 2).

A TEV tem, como característica, seu acionamento que independe da direção do vento, em qualquer direção, não sendo necessários equipamentos adicionais como: sensores, biruta, motores, etc para redirecioná-la à direção do vento [8], [1].

2. Metodologia

A figura 1 mostra esquematicamente, em perspectiva, o movimento de uma pá desde sua posição fechada, $\theta=0$ até $\theta=\frac{\pi}{2}$, sendo θ o ângulo de abertura da pá em uma posição intermediária com suas lâminas parcialmente abertas, resultando a área projetada A_p de uma pá retangular de dimensão composta por dois painéis de dimensões ab . Nota-se que o ângulo θ , corresponde tanto à abertura da pá como à rotação da turbina.

$$A_p = absen^2\theta \quad (1)$$

Admitindo a equação de conservação da energia, desconsiderando as perdas, energia potencial nula, pode-se afirmar, teoricamente, que toda energia cinética por unidade de massa do ar em escoamento, $\frac{C^2}{2} \left(\frac{J}{kg} \right)$ que incide sobre uma lâmina é absorvida por ela na forma de energia de pressão, $\frac{p}{\rho} \left(\frac{J}{kg} \right)$, igualmente distribuída em toda a lâmina. Sendo assim, pode-se determinar a força resultante, $F_\theta(N)$ atuante no centro de pressão, no caso coincidente com o de centro de

gravidade, cg conforme. A força de arrasto pode ser considerada o déficit na quantidade de movimento entre a condição do escoamento não perturbando o montante do rotor, e a condição do escoamento na esteira.

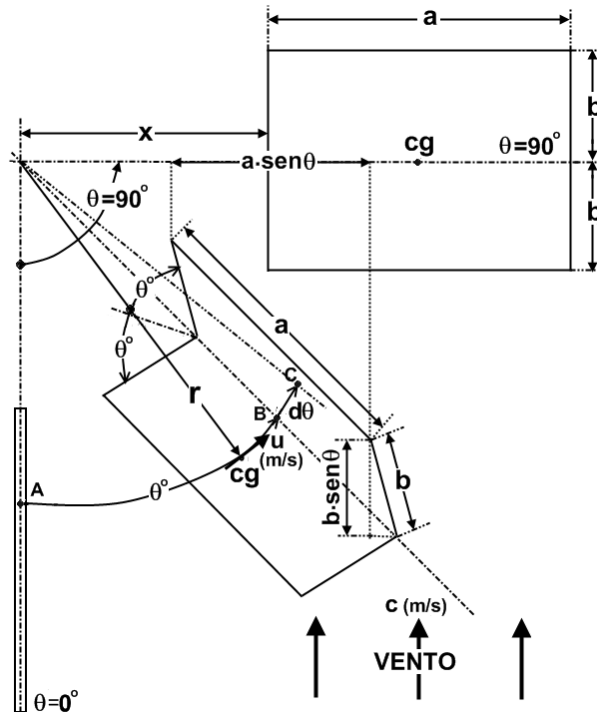


Figura 1. Esquema em perspectiva do movimento de uma pá.

Fonte: Zulcy de Sousa, Testes e Ensaio da Tev Endicon.

$$\frac{p}{\rho} = \frac{F_{\theta}}{\rho A_p} = \frac{C_{\infty}^2}{2} \quad (2)$$

$$F_{\theta} = \frac{C_{\infty}^2 \rho A_p}{2} \quad (3)$$

Considerando que este tipo de turbina gera movimento transformando a energia recebida em forma de pressão, variando entre a posição $\theta = 0$ até $\theta = \frac{\pi}{2}$, sendo necessário determinar o

coeficiente de arrasto, considerando que $c_d = F_\theta / 0,5\rho C_\infty^2 A_p$, sendo o coeficiente de arrasto calculado em cada posição do rotor, considerando tanto as contribuições de atrito e de forma.

É possível obter um valor médio do coeficiente de arrasto \bar{c}_d através do cálculo em Fluent®, considerando diversas posições de abertura das pás e diferentes velocidades do vento. Para o cálculo em CFD, foi utilizado um domínio suficientemente amplo, quantificado de tal forma que os efeitos da esteira sejam dissipados nesse domínio. Foi utilizado modelo de turbulência k-épsilon com funções de parede pré-definidas pelo usuário, malha tetraédrica com refino nas paredes .[4] :

$$F_\theta = \rho ab \frac{C^2}{2} \text{sen}^2 \theta \quad (4)$$

A Figura 2 mostra as duas posições limites das pás, onde foram calculados os valores do coeficiente de arrasto.

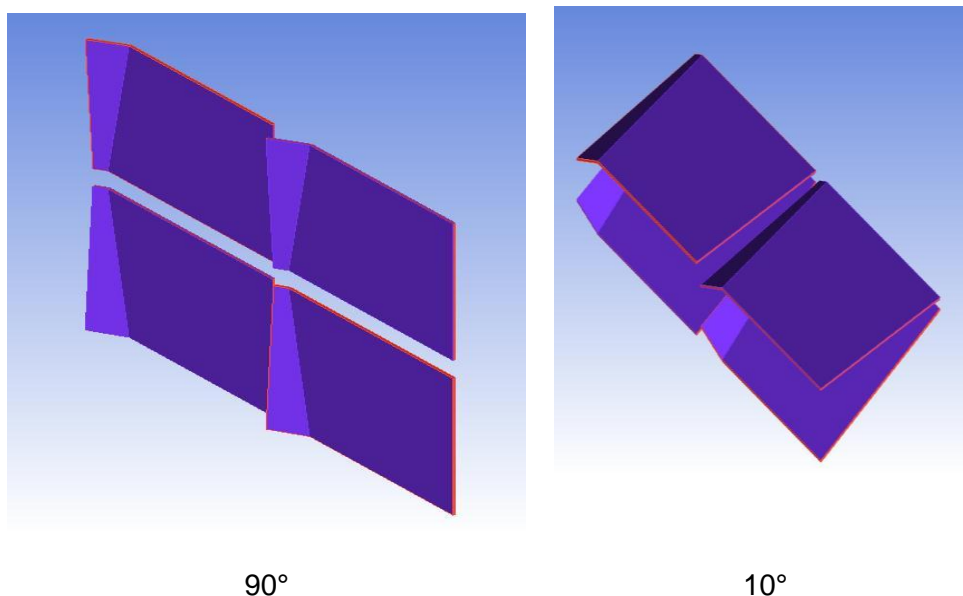


Figura 2. Variação da posição da pá para cálculo do coeficiente de arrasto médio.

Para a determinação do coeficiente de arrasto foi calculada a força de arrasto sobre a pá através da integração das tensões de cisalhamento e de pressão utilizando o programa computacional Fluent CFD® , na figura 3, mostra as linhas de corrente de velocidade geradas

quando a pá se encontra totalmente aberta, e na figura 4, é possível observar os contornos de pressão. É possível observar que, no centro do painel apresenta maiores valores de pressão e atrás deste, valores negativos de pressão resultando na força de arrasto de pressão no painel.

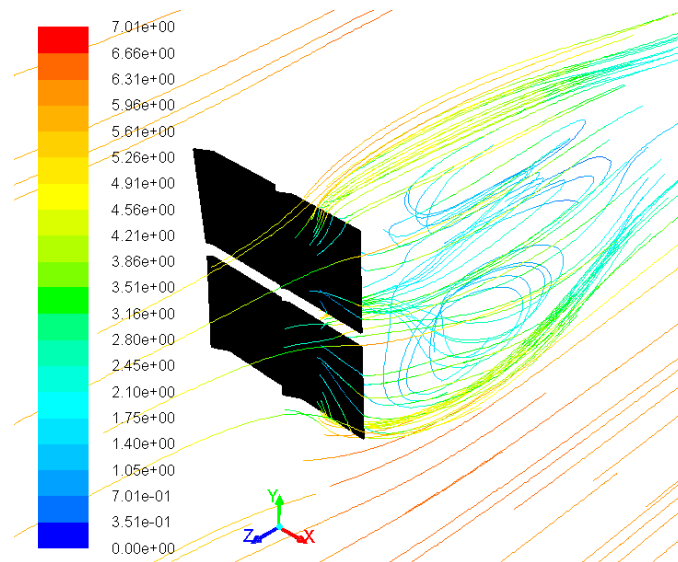


Figura 3. Linhas de corrente de velocidade

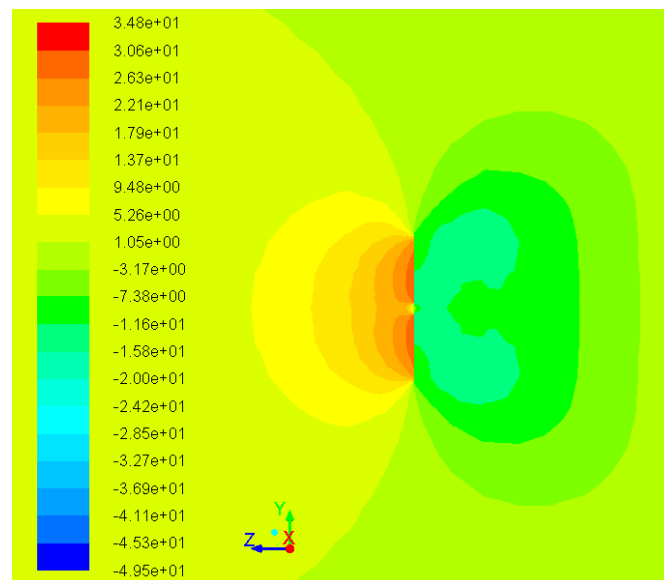


Figura 4. Contornos de pressão

Os resultados mostrados na Tabela 1 indicam a variação do coeficiente de arrasto com a velocidade e o ângulo de abertura, onde é considerado um coeficiente de arrasto médio para

cada velocidade. Entretanto, deve-se notar que existem grandes variações de arrasto entre as posições entre 90 e 10 graus, verificando-se as grandes contribuições do arrasto de forma.

Tabela 1. Resultados do cálculo de coeficiente de arrasto em DFC

Ângulo (°)	Velocidade (m/s), C_∞					
	2	3	4	5	6	7
90	2,191879	1,93813	1,810605	1,732117	1,678375	1,639882
80	2,245346	1,988355	1,8594	1,779606	1,725313	1,686318
70	2,347003	2,080599	1,94838	1,866117	1,810362	1,770302
60	2,522794	2,237857	2,095677	2,007947	1,948949	1,906525
50	2,817282	2,495554	2,336886	2,237587	2,171506	2,124258
40	3,304665	2,931221	2,749564	2,632882	2,555225	2,500486
30	4,102654	3,669667	3,459911	3,32514	3,232802	3,167227
20	5,567869	4,978303	4,695517	4,513351	4,398189	4,313879
10	10,00278	8,778525	8,091081	7,674823	7,368658	7,149194
\bar{C}_d	3,900252	3,455357	3,227447	3,085508	2,987709	2,917564

Considerando o arrasto médio nas diferentes posições para cada velocidade, é possível, com ajuda do programa computacional Matlab® realizar um ajuste de curvas, pelo método de Gauss resultando a seguinte equação para $\bar{c}_d(c_\infty)$.

$$\bar{c}_d(c_\infty) = a_1 e^{\left(-\left(\frac{c_\infty - b_1}{c_1}\right)^2\right)} + a_2 e^{\left(-\left(\frac{c_\infty - b_2}{c_2}\right)^2\right)} \quad (5)$$

Onde $a_1 = 3,049 \times 10^5$, $b_1 = -30,25$, $c_1 = 8,942$, $a_2 = 4,115$, $b_2 = -24,81$, $c_2 = 53,93$

A Fig.5 mostra a função de arrasto médio $\bar{c}_d(c_\infty)$.

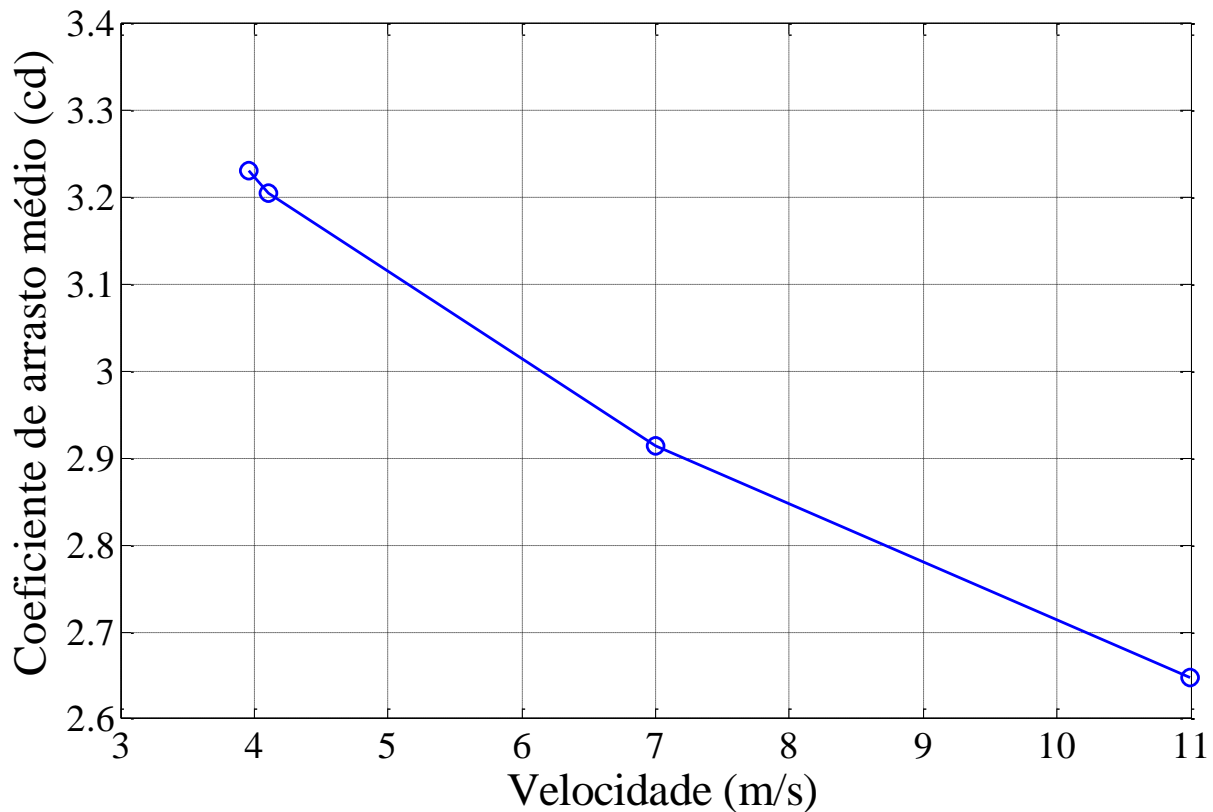


Figura 5. Variação do coeficiente de arrasto médio com a velocidade

O trabalho elementar do momento d_τ desta força F_θ sobre a pá para obter seu deslocamento do arco, $dAC = rd\theta$ resulta:

$$d_\tau = F_\theta r d\theta = \rho ab \frac{C_\infty^2}{2} \overline{\text{sen}^2 \theta} r c_d(C_\infty) d\theta \quad (6)$$

Integrando esta expressão entre $\theta = 0$ até $\theta = \frac{\pi}{2}$ obtém-se o trabalho realizado pela força do vento sobre a pá, neste intervalo.

$$\tau_{0;\pi/2} = \rho ab \frac{C_\infty^2}{2} \frac{\pi}{4} \overline{r c_d(C_\infty)} \quad (7)$$

Como este trabalho é igual ao que a pá realiza entre $\theta=0$ até $\theta=\frac{\pi}{2}$, o trabalho teórico total realizado por uma pá entre, $\theta=\frac{\pi}{2}$ até $\theta=\pi$ resulta:

$$\tau_{0;\pi} = \rho ab C_{\infty}^2 \frac{\pi}{4} \overline{rc_d}(C_{\infty}) \quad (8)$$

A potência $P_{0;\pi}(W)$ entregue pelo vento à pá neste intervalo com uma rotação n (rad/s) resulta:

$$P_{0;\pi} = \tau_{0;\pi} n = \rho ab C_{\infty}^2 \frac{\pi}{4} \overline{rc_d}(C_{\infty}) n \quad (9)$$

Para um rotor de 8 pás dispostas no mesmo plano horizontal em dois eixos a 90° , Figura 1, sua potência teórica, $P_{tr}(W)$ será:

$$P_{tr} = 2\pi \rho ab C_{\infty}^2 \overline{rc_d}(C_{\infty}) n \quad (10)$$

Para dois rotores

$$P_{tr} = 4\pi \rho ab C_{\infty}^2 \overline{rc_d}(C_{\infty}) n \quad (11)$$

Com a Eq. (11) e a velocidade de rotação obtida experimentalmente é possível obter os valores de aproximação de desempenho da turbina eólica pelo método semi-analítico.

Tabela 2. Resultados do modelo analítico

Velocidade (m/s)	Rotação (rpm)	Torque (N.m)	Potência Teórica (W)	Potência do ar (W)	Cp
3,9567	18,6667	50,7702	15,7952	48,7388	0,3241
4,1104	23,0794	54,3496	20,9059	54,6396	0,3826
6,9969	33,1071	143,2545	79,0437	269,51	0,2933
10,9927	40,4444	321,2684	216,5584	1045,156	0,2072

A tabela 2 mostra os resultados obtidos com a formulação analítica e velocidade e rotação experimental para determinar as grandezas que determinam o desempenho da turbina, como pode ser observada na Fig.6, existe ainda uma diferença significativa entre os resultados teóricos e experimentais. Estas diferenças são evidentes considerando que temos uma

aproximação do coeficiente de arrasto médio, como também que o modelo analítico não estão considerados os efeitos por perdas mecânicas provocadas pelo acionamento das pás.

Os resultados experimentais foram obtidos do banco de ensaios de turbinas eólicas da Universidade Federal de Itajubá. Os ensaios foram realizados num ambiente aberto com um ventilador axial de rotação e vazão variável.

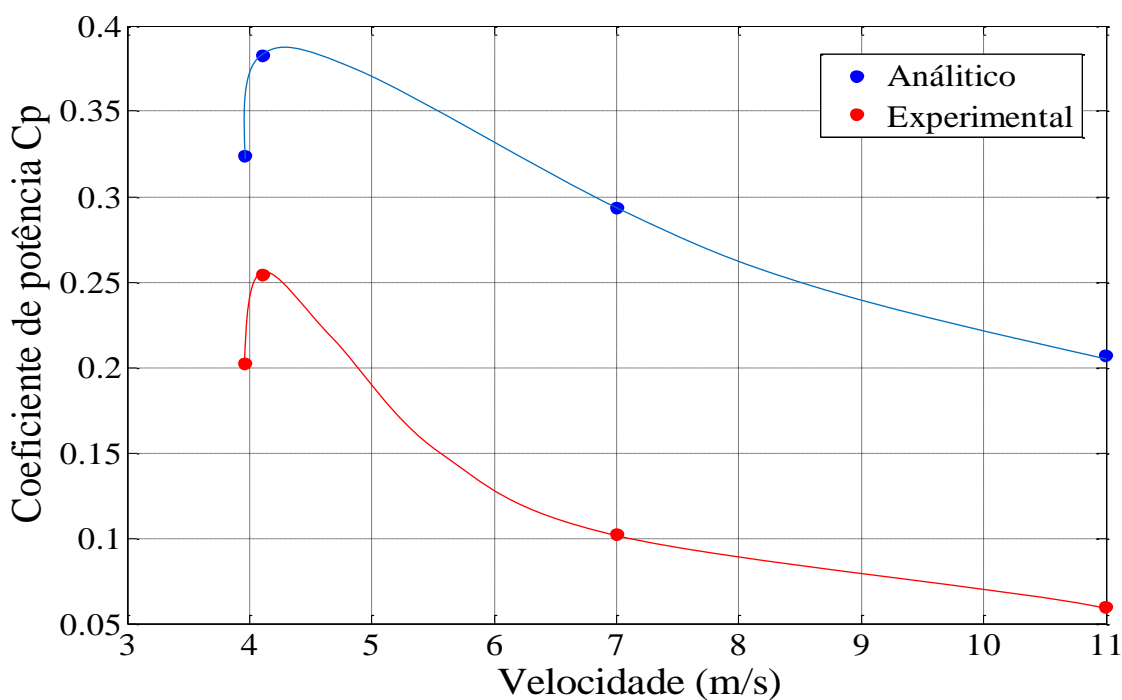


Fig. 6. Comparação do Coeficiente de potência experimental e teórico.

3 CONCLUSÃO

Com base numa abordagem teórica e numérica, é possível quantificar o comportamento de uma turbina eólica de eixo vertical de pás dobráveis. Apresentam-se resultados do comportamento do coeficiente de potência, nas análises teóricas, numéricas e experimentais, onde as variações de coeficiente de potência em função da velocidade do vento seguem uma mesma tendência. Uma análise desse resultado mostra que o máximo Coeficiente de Potência obtido analiticamente é de 38%, sendo que a faixa de velocidade do funcionamento da turbina em maior rendimento é de 3 a 7 m/s. Esse tipo de turbina torna-se, portanto, interessante em regiões de baixa velocidade do vento.



REFERÊNCIAS

- [1] Akwa, J. V.; “Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [2] A.Y. Qasim, R. Usubamatov, Z.M. Zain. Design of Vertical Axis Wind Turbine with Movable Vanes. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(11): 896-902, 2011 ISSN 1991-8178
- [3] GRUBB, M. J; MEYER, N. I. Wind energy: resources, systems and regional strategies. In: JO-HANSSON, T. B. et. al. Renewable energy: sources for fuels and electricity. Washington, D.C.: Island Press, 1993
- [4] HERNANDEZ, W. D. S. ; DONADON, M. V. ; CAMACHO, R. G. R. . Determinação de Leis de Transposição de Eficiências em Turbinas Eólicas utilizando Técnicas de CFD. In: 7mo Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo. 7mo Congresso Internacional de Bioenergia, 2012.
- [5] LAYTON, JULIA. Como funciona a energia eólica. A moderna tecnologia de geração eólica. Brasil. 2011 Disponível em: <<http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>> Acesso em: 24 may 2016
- [6] Nakajima, M., Lio, S., & Ikeda, T. Performance of Double-step Savonius Rotor for Environmentally Friendly Hydraulic Turbine. Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 3, pp. 410–419, 2008.
- [7] Petry, M Petry, G Konzen, e J a V Alé. Ensaio Laboratorial para Testes em Bancada de Geradores Eólicos de Pequeno Porte. IV CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2006.
- [8] Sulzy Souza Sulzy. TEORIA PRELIMINAR PARA TURBINA EÓLICA VERTICAL. páginas 1–6, 2014.



BIOGRAFIAS

Willmari Dayana Suarez Hernandez– Nasceu na Venezuela no dia 08/01/1989. Possui graduação em ENGENHARIA AERONÁUTICA pela *Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armada* (2010) e mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2012) . Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em energias renováveis e Processos para extração de energia. Atuando principalmente na área de dinâmica dos fluidos computacionais.

É pesquisadora e aluna de Doutorado na Universidade Federal de Itajubá, desenvolvendo uma pesquisa sobre novas formas de geração de energia através de análises computacionais e experimentais, validando metodologias para o aperfeiçoamento de projetos de turbinas eólicas.

Entre os trabalhos publicados encontram-se:

HERNANDEZ, W. D. S. ; DONADON, M. V. ; CAMACHO, R. G. R. . Determinação de Leis de Transposição de Eficiências em Turbinas Eólicas utilizando Técnicas de CFD. In: 7mo Congresso Internacional de Bioenergia, 2012, São Paulo. 7mo Congresso Internacional de Bioenergia, 2012.

MONTERO, O. J. V. ; HERNANDEZ, W. D. S. ; CAMACHO, R. G. R. . STEAM TURBINE CASCADE OPTIMIZATION USING CONTROLLED RANDOM SEARCH ALGORITHM AND CFD TECHNIQUES FOR ORC APPLICATION. In: 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2012, Rio de Janeiro. Proceedings of ENCIT 2012, 2012.

Ramiro G. Ramirez Camacho. – Nasceu na Bolívia no dia 10/02/1965, Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1992), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (1996), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá (2001) e pós doutorado no Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA (2005) Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Mecânica dos Fluidos, Dinâmica dos fluidos computacional e Máquinas de Fluxo, atuando principalmente nos seguintes temas: escoamento potencial, grades lineares, camada limite, turbomáquinas, método dos painéis, elementos de contorno, CFD, técnicas de otimização e simulação do escoamento em turbomáquinas.



Entre os trabalhos publicados encontram-se:

AGUIRRE, C. A. ; **CAMACHO, R. G. R.** . HEAD LOSSES ANALYSIS IN SYMMETRICAL TRIFURCATIONS OF PENSTOCKS - HIGH PRESSURE PIPELINE SYSTEMS CFD. In: 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement, 2014, Itajubá - MG. 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement, 2014.

OLIVEIRA, A. A. C. ; **CAMACHO, R. G. R.** ; OLIVEIRA, W. ; SILVA, E. R. . METHODOLOGY FOR AERODYNAMIC DESIGN AND OPTIMIZATION OF AXIAL ROTOR BLADE BASED ON THE EFFECTS OF SWEEP AND DIHEDRAL. In: 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement - September, 16 - 19, 2014, 2014, Itajubá - MG. 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement, 2014.

RIO, G. N. ; **CAMACHO, R. G. R.** . Tracing og a Hydraulic Channel of Friendly Fish Turbine. In: 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement, 2014, Itajubá - MG. 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement - September, 16 - 19, 2014, 2014.

BOLANOS, G. A. I. ; Tiago, G. L ; **CAMACHO, R. G. R.** . Performance and Near Wake Analysis of a Hydrokinetic Rotor for Multistage Purposes Using. In: 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement, 2014, Itajubá - MG. 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement - September, 16 - 19, 2014, 2014.

BOLANOS, G. A. I. ; Tiago, G. L ; **CAMACHO, R. G. R.** . In-Series multistage hydrokinetic turbine: a first CFD study of near wake. In: 27th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014, Montreal - Canada. 27th Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 2014, 2014.