

ANÁLISE TEÓRICA DA INFLUÊNCIA DE PERFIS SOBRE A POTÊNCIA DE UMA TURBINA WELLS EMPREGADA EM DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

GUSTAVO DA CUNHA DIAS¹, SONIA MAGALHÃES DOS SANTOS², ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS³, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA⁴, CLÁUDIO RODRIGUES OLINTO⁵

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo teórico a respeito da influência de diversos perfis aerodinâmicos (NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0020 e NACA0021) sobre a potência e torque gerados em uma turbina Wells. Em todos os casos avaliados, o rotor possui um raio da turbina $r_t = 245$ mm e uma razão de aspecto de $AR = 0.7$. O objetivo principal é obter uma recomendação teórica a respeito de qual perfil aerodinâmico pode ser empregado para os rotores de pequenos dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, mais especificamente coluna de água oscilante com potências inferiores a 1 kW. Para realizar a estimativa da potência e torque foram utilizadas recomendações teórico-experimentais da literatura. Os resultados indicaram que o melhor perfil aerodinâmico (NACA0021) é capaz de conduzir a uma potência mecânica de aproximadamente 319 W, apresentando um desempenho 36 % superior ao perfil NACA0020, que conduziu aos piores resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Perfil aerodinâmico. Potência. Recomendação teórica. Turbina Wells.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE PROFILE INFLUENCE ON THE WELLS TURBINE POWER EMPLOYED IN CONVERSION DEVICES OF WAVE ENERGY

ABSTRACT

This paper presents a theoretical study about the influence of different airfoils (NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0020 and NACA0021) on the power and torque generated at a Wells turbine. In all the evaluated cases, the rotor of the turbine has a radius $r_t = 245$ mm and an aspect ratio $AR = 0.7$. The main goal is to get a recommendation as to which theoretical aerodynamic profile can be used for small devices rotors conversion of sea wave energy into electrical energy, more specifically oscillating water column with outputs below 1 kW. To accomplish the estimation of power and torque were used recommendations of theoretical and experimental literature. The results indicated that the best airfoil (NACA0021) is able to drive a mechanical power of approximately 319 W, with a performance greater than 36% NACA0020 profile, which led to poor outcomes.

KEYWORDS: Airfoils. Power take-off. Theoretical recommendation. Wells turbine.

¹ Professor. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. e-mail: gustavodias@furg.br.

² Professora (Aposentada). Universidade Federal do Rio Grande – FURG. e-mail: sonia036@gmail.com.

³ Professor. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. e-mail: elizaldosantos@furg.br.

⁴ Professor. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. e-mail: luizrocha@mecanica.ufrgs.br.

⁵ Professor. Universidade Federal do Rio Grande – FURG. e-mail: claudiolinto@furg.br.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda energética e o protocolo de Kyoto, visando à redução da emissão de gases que causam o efeito estufa, tem aumentado o interesse pelo estudo de energias renováveis [1]. Entre estas formas, a energia obtida a partir do movimento das ondas do mar apresenta um crescente interesse, principalmente devido ao seu elevado potencial energético, que é estimado em até 10 TW [2-4]. De acordo com Falcão [5] o nível de energia das ondas é usualmente expresso em potência por unidade de comprimento (ao longo da crista de onda). Valores considerados bons em localizações *offshore* variam entre 20 e 70 kW/m (em média por ano) e ocorrem predominantemente entre moderadas e elevadas latitudes. Nesse sentido, as costas da América do Sul, África e Austrália são particularmente atrativas para exploração de energia das ondas.

Com relação aos conversores de energia das ondas (WEC – do inglês: *Wave Energy Converters*) podem ser classificados de acordo com sua localização na costa: (i) *onshore* (acesso por terra), (ii) *nearshore* (dispositivos localizados em profundidades menores do que 20 m) e *offshore* (dispositivos localizados em profundidades maiores do que 20 m) [6]. Os WECs também podem ser classificados de acordo com o seu princípio físico de funcionamento em três principais classes: (i) coluna de água oscilante (CAO), (ii) corpos oscilantes e (iii) dispositivos de galgamento [3,5]. Vale destacar que importantes trabalhos de revisão a respeito das tecnologias de conversão de energia das ondas, assim como, a sua evolução em todo o mundo têm sido apresentados na literatura [7-9].

Neste trabalho é dada atenção ao dispositivo de coluna de água oscilante, que consiste de uma estrutura de aço ou concreto com uma câmara, com no mínimo, duas aberturas, uma em comunicação com o mar e outra com a atmosfera (FIGURA 1). Sob a ação das ondas a superfície livre dentro da câmara oscila e movimenta o ar acima da superfície livre. O ar é então forçado através de um conjunto turbina-gerador que gera energia elétrica [10]. Em geral, as turbinas do tipo Wells são empregadas. Essas turbinas, uma vez em movimento, são retificadoras, ou seja, rotacionam no mesmo sentido independentemente do sentido do fluxo de ar: saindo quando há pressurização do ar dentro da câmara ou entrando quando há uma depressão dentro da câmara [11].

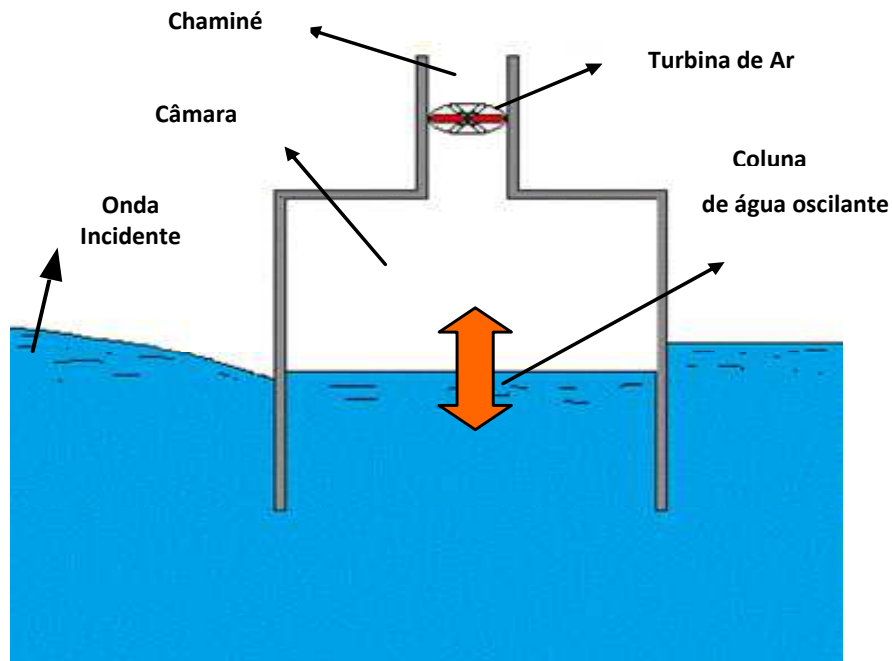
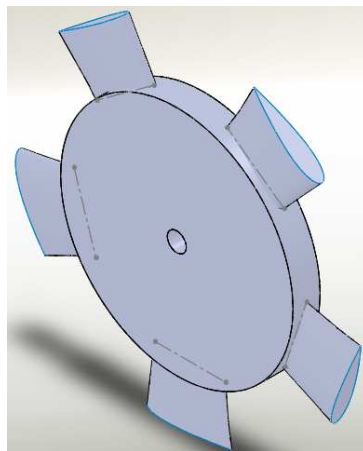


Figura 1 - Ilustração do princípio de funcionamento de um dispositivo de coluna de água oscilante (CAO).

A turbina Wells é uma turbina axial que se caracteriza por ter pás com perfil simétrico, posicionadas radialmente ao longo do cubo. A FIGURA 2(a) apresenta uma ilustração de uma turbina Wells e a FIGURA 2(b) esboça esquematicamente os diagramas de velocidades e forças que surgem durante a passagem do escoamento de ar, na admissão e exaustão pela chaminé do dispositivo CAO.



a)

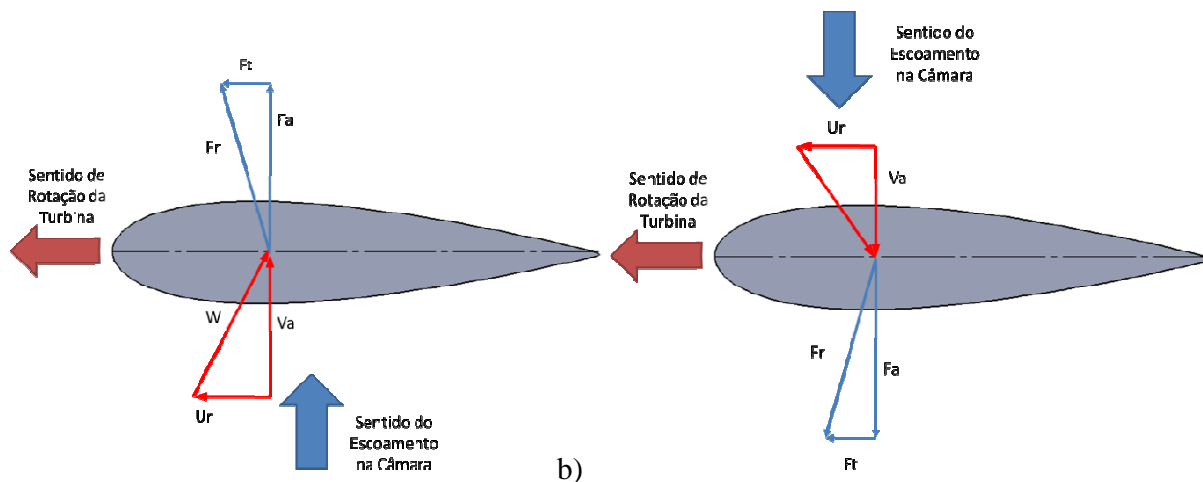


Figura 2 - Turbina Wells: (a) ilustração da geometria, (b) diagrama de forças e velocidades na admissão e exaustão de ar.

O estudo de parâmetros que conduzam a turbina a uma maior conversão de energia também é um objeto de estudo que merece ser levado em consideração. Com relação ao estudo de turbinas, trabalhos propostos na literatura [12-15] demonstram que os parâmetros primários para o desenvolvimento de uma turbina Wells são dependentes da pressão e da vazão na entrada da turbina. Seus indicadores de desempenho são o torque, a potência e a eficiência, para uma dada vazão. No que tange ao dimensionamento das turbinas, devem ser levados em consideração parâmetros adimensionais como o coeficiente de fluxo, razão entre raios da raiz e extremidade da pá, solidez da turbina e razão de aspecto, além de outros parâmetros, como o número de pás, tipos de perfis, ângulo de ataque do perfil, frequência das ondas e número de Reynolds do escoamento de ar que incide na turbina.

O emprego do perfil NACA0021 foi investigado teoricamente para turbina do tipo Wells usada em um dispositivo de coluna de água oscilante (CAO) de pequena escala [16]. Mais tarde foi avaliado numericamente o desempenho de uma turbina Wells com pás de corda constante e com um perfil NACA0021, sendo investigados vários coeficientes de fluxo (razão entre a velocidade axial e a velocidade tangencial na ponta da pá). Os resultados do modelo numérico (baseado no método de volumes finitos) foram confrontados com resultados experimentais. O modelo numérico apresentou um comportamento satisfatório, predizendo adequadamente os perfis de velocidades na turbina, bem como, da eficiência em função do coeficiente de fluxo. Outro estudo experimental avaliou a influência de diferentes ângulos de ataque da pá sobre a

eficiência da turbina [17]. Nesse trabalho foi considerado um perfil NACA0012. Outros autores, [18-23], indicam que o perfil NACA0021 conduzem a melhor performance em turbinas Wells convencionais para dispositivos de grande escala. Posteriormente, foi investigada numérica e experimentalmente a eficiência da turbina Wells para quatro tipos de perfis: NACA0020, NACA0015, CA9 e HSIM 15-262123-1576 [24]. Os experimentos foram conduzidos para um escoamento transiente com comportamento senoidal e irregular, baseado em um clima de ondas da Irlanda. Os autores concluíram que, em escoamentos transientes, com condições de operação em duas direções a geometria que conduz aos melhores resultados foi a com perfil CA9 e com solidez de 0.64. Concluiu-se então que os resultados apresentados na literatura não são unânimes a respeito de qual perfil aerodinâmico conduz a maior taxa de conversão de energia para o projeto de uma turbina Wells de pequena escala.

No presente trabalho é apresentado um estudo teórico a respeito da influência de diversos perfis aerodinâmicos (NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0020 e NACA0021) sobre a potência e torque gerados em uma turbina Wells. Em todos os casos avaliados, o rotor possui um raio da turbina de $r_t = 245$ mm e uma razão de aspecto de $AR = 0.7$. O objetivo principal é obter uma recomendação teórica a respeito de qual perfil aerodinâmico pode ser empregado para os rotores de pequenos dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica, mais especificamente coluna de água oscilante com potências inferiores a 1kW.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Segundo Raghunathan [25] os fatores que controlam o desempenho da turbina Wells são: as condições de admissão do escoamento, regime (laminar ou turbulento), incompressibilidade ou compressibilidade (dependendo do número de Mach do escoamento), a folga entre rotor e carcaça, as pás guias do fluxo, a relação entre raio do cubo e raio da pá, o diâmetro da turbina, o número de pás e a geometria do perfil das pás. Sendo assim tais variáveis podem ser agrupadas em quatro grupos como propriedades termofísicas do fluido, características do escoamento, restrições geométricas e propriedades dos perfis. As propriedades do fluido (viscosidade cinemática e massa específica) foram consideradas para um escoamento de ar a $T_\infty = 30^\circ\text{C}$. Além disso, adotou-se um escoamento com velocidade média da corrente livre de $V_\infty = 16$ m/s. Com relação aos aspectos construtivos, foram impostas restrições geométricas que tornem possível a futura validação da metodologia, através da comparação com resultados experimentais no túnel de vento do Laboratório de Sistemas

Térmicos da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), o qual possui uma secção transversal quadrada de $A_t = 0.25 \text{ m}^2$. Para a determinação dos tipos de perfis a serem estudados neste trabalho, foi realizado um levantamento de 24 estudos numéricos e experimentais (alguns destes não citados aqui por simplicidade) referentes ao desenvolvimento de turbinas Wells durante os anos de 1995 a 2011. Entre os perfis referenciados, mais de 80 % apontaram o uso da série NACA de quatro números, mas especificamente os modelos NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0020 e NACA0021 [26]. Outro aspecto que merece destaque é a solidez (s), que é um parâmetro geométrico que relaciona o bloqueio de fluxo de ar dentro da turbina. De acordo com Mohamed [26] para facilitar a partida da turbina é recomendado o uso de $s = 0.51$ para uma razão de aspecto de $AR = 0.6$, onde AR é a razão entre o comprimento da pá e o comprimento da corda do perfil. Ainda a respeito destes parâmetros, é recomendado $s = 0.4$ para $AR = 0.7$ [17].

Os coeficientes das forças axial e tangencial são dados pelas Equações (1) e (2):

$$C_A = C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$C_T = C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha) \quad (2)$$

O coeficiente de fluxo ϕ é dado pela Equação (3):

$$\phi = \tan(\alpha) = \frac{V_A}{u_R} \quad (3)$$

O rendimento global da turbina η é dado pela Equação (4):

$$\eta = \frac{C_T}{C_A \phi} \quad (4)$$

O torque da turbina T é dado pela Equação (5):

$$T = \frac{1}{2} \rho W^2 Z b c R_t C_T \quad (5)$$

A potência gerada P é dada pela Equação (6):

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V_a)^3 \quad (6)$$

A vazão de ar da turbina Q é dada pela Equação (7):

$$Q = V_A \cdot A \quad (7)$$

A variação de pressão gerada na turbina Δp é dada pela Equação (8):

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho W^2 ZbcV_A \frac{C_A}{Q} \quad (8)$$

onde C_L e C_D são os coeficientes de sustentação e arrasto respectivamente. O ângulo α fica compreendido entre a corda do perfil e a velocidade do escoamento, V_a e U_r são as velocidades axial e tangencial, C_T e C_A são os coeficientes de força tangencial e axial respectivamente. A variável ρ é a massa específica do ar, W é a velocidade relativa do escoamento, Z é o número de pás na turbina, b é o comprimento da pá, c é o comprimento da corda e R_r é o raio da turbina. A variável A representa a área varrida da turbina e Q é a vazão do escoamento.

A vazão na turbina e a variação de pressão gerada são grandezas necessárias para o dimensionamento da câmara do dispositivo de coluna de água oscilante sendo assim a interface entre o mesmo e a turbina. A TABELA 1 apresenta as variáveis de entrada e calculadas para o dimensionamento da turbina.

Tabela 1 – Variáveis de entrada e calculadas no dimensionamento da turbina.

Grupo	Variáveis	Perfis				
		NACA0012	NACA0015	NACA0018	NACA0020	NACA0021
Restrições Geométricas	número de pás - Z	5	5	5	5	5
	Solidez - s	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Raio da pá - Rt (mm)	245	245	245	245	245
	Relação Raio do Cubo e Raio da Raiz - h	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Raio do Cubo - rh (mm)	171.5	171.5	171.5	171.5	171.5
	Comprimento da pá - b (mm)	73.5	73.5	73.5	73.5	73.5
	Área varrida - A (m ²)	0.18857	0.18857	0.18857	0.18857	0.18857
	Razão aspecto da pá - AR	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Folga entre carenagem e rotor - TC (mm)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
	Razão Folga Turbina / corda - TC/c	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Corda - c (mm)	105	105	105	105	105
Propriedades Físicas do Fluido	ν - viscosidade cinemática (m ² /s)	0.00001604	0.00001604	0.00001604	0.00001604	0.00001604
	ρ - massa específica do ar (kg/m ³)	1.165	1.165	1.165	1.165	1.165
Características do Escoamento	Número de Reynolds - Re	404677.15	404677.15	404677.15	603162.99	404677.15
	Velocidade axial no túnel - Va (m/s)	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
	Velocidade tangencial ponta pá - U_R (m/s)	12.19500817	14.62742282	16.03078646	10.48571546	19.28388437
	Velocidade relativa - W (m/s)	61.81925	61.81925	61.81925	92.14033	61.81925
	Coefficiente de fluxo - Φ	0.26795	0.26795	0.26795	0.17633	0.26795
	Vazão em volume - Q (m ³ /s)	3.0171856	3.0171856	3.0171856	3.0171856	3.0171856
Propriedades do Perfil	Coefficiente de sustentação max - CL	0.97	1.05	1.10	0.60	1.20
	Coefficiente de arraste - CD	0.11347	0.10559	0.10127	0.05	0.08859
	Ângulo de ataque - α	15	15	15	10	15
	Coefficiente força axial - CA	0.9682481	1.043482672	1.087763088	0.599567061	1.180107919
	Coefficiente força tangencial - CT	0.14197	0.17029	0.18662	0.05495	0.22449

Conforme Abbott, & Doenhoff [27] a coordenada local na direção y_t em função da coordenada local na direção x é calculada de acordo com a Equação (9). Considerando-se uma corda c adimensional unitária e t igual a 0.21, para o perfil simétrico NACA0021, com x variando de 0 a 1. As curvas das superfícies superior e inferior dos perfis em coordenadas bidimensionais são traçadas com o comprimento de corda estabelecido para a turbina, desde o cubo do eixo até a extremidade da pá, conforme TABELA 1.

$$y = \frac{t}{0.2} c \left[0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 - 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad (9)$$

Contudo, os pontos para estes perfis estão dispostos em um sistema de coordenadas locais (x, y) , próprios de cada estação da pá (na direção circunferencial), sendo necessário convertê-los em um sistema de coordenadas global (X, Y, Z) para assim modelar a pá da turbina Wells como um sólido.

A mudança entre os sistemas de coordenadas de cada ponto de um perfil (P_j) é determinada de acordo com as Equações (10)–(12):

$$X_j = r \cdot \text{sen} \left[\frac{(x_j - x_{jM})}{r} \right] \quad (10)$$

$$Y_j = -r \cdot \text{cos} \left[\frac{(x_j - x_{jM})}{r} \right] \quad (11)$$

$$Z_j = -(y_j - y_{jM}) \quad (12)$$

onde X_j, Y_j, Z_j são as coordenadas do sistema global de um ponto P_j da superfície (mm), X_{jM}, Y_{jM} são as coordenadas do ponto médio em cada estação da pá (mm), r é o raio da estação (mm), desde o raio do cubo até a extremidade da pá.

Para o dimensionamento específico das pás deste trabalho, foram estabelecidas cinco estações facilitando a posterior construção da turbina. A FIGURA 3 ilustra a geração de pontos para as cinco estações de um perfil NACA0021.

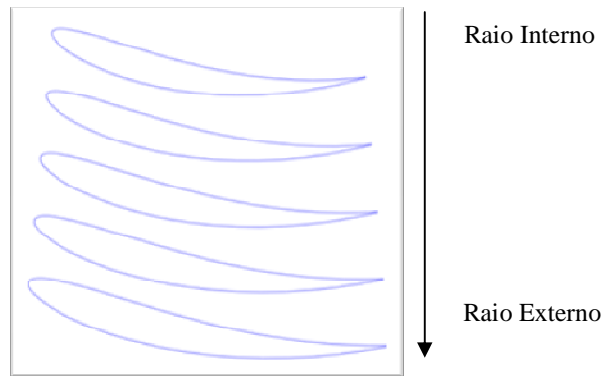


Figura 3. Geração das estações da pá com perfil NACA0021.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados apresentados na TABELA 2, o perfil NACA 0021 obteve o melhor resultado para o escoamento proposto. Os valores apontam para um acréscimo de 37% e 84% de potência e torque, respectivamente, comparado com o perfil NACA 0020, de menor desempenho para as condições de entrada do projeto. Comparado com os valores médios de potência e torque dos perfis, o acréscimo foi de 17% e 33% para o perfil NACA 0021. Os resultados indicaram que o melhor perfil aerodinâmico (NACA0021) é capaz de produzir uma potência mecânica de aproximadamente 319 W, um torque de 4.72 N·m e um rendimento de 71%.

Tabela 2 – Resultados obtidos para os perfis analisados

Grupo	Variáveis	Perfis				
		NACA0012	NACA0015	NACA0018	NACA0020	NACA0021
Resultados	Rendimento - η	0.5472086	0.60903191	0.64029186	0.51975593	0.70995409
	Torque - T (N.m)	2.987777	3.58371859	3.92754268	2.56900029	4.72455167
	Força tangencial - F_t (N)	12.1950082	14.6274228	16.0307865	10.4857155	19.2838844
	Velocidade angular w (rad/s)	243.725767	243.725767	243.725767	370.369425	243.725767
	Frequência (rpm)	2327.40963	2327.40963	2327.40963	3536.76749	2327.40963
	Potência (W)	246.201578	274.017288	288.081853	233.85	319.424471
	Variação de pressão - Dp (Pa)	441.056969	475.327867	495.498509	606.733258	537.563484
	Coefficiente de pressão - P^*	0.1061778	0.114428	0.11928377	0.0632513	0.12941028

A FIGURA 5 apresenta as variáveis fundamentais associadas ao desempenho da turbina: torque, potência e rendimento em função dos coeficientes de sustentação e de arrasto, para os perfis analisados. Como o ângulo de ataque foi fixado em 15° os resultados apresentados se referem a valores de coeficiente de sustentação máximo. O Perfil NACA0021

foi o que apresentou melhor desempenho. Este comportamento está relacionado ao coeficiente de sustentação do perfil, conforme FIGURA 5. Ainda é possível constatar a pequena influência do coeficiente de arrasto dos perfis em relação aos resultados de potência mecânica, rendimento e torque.

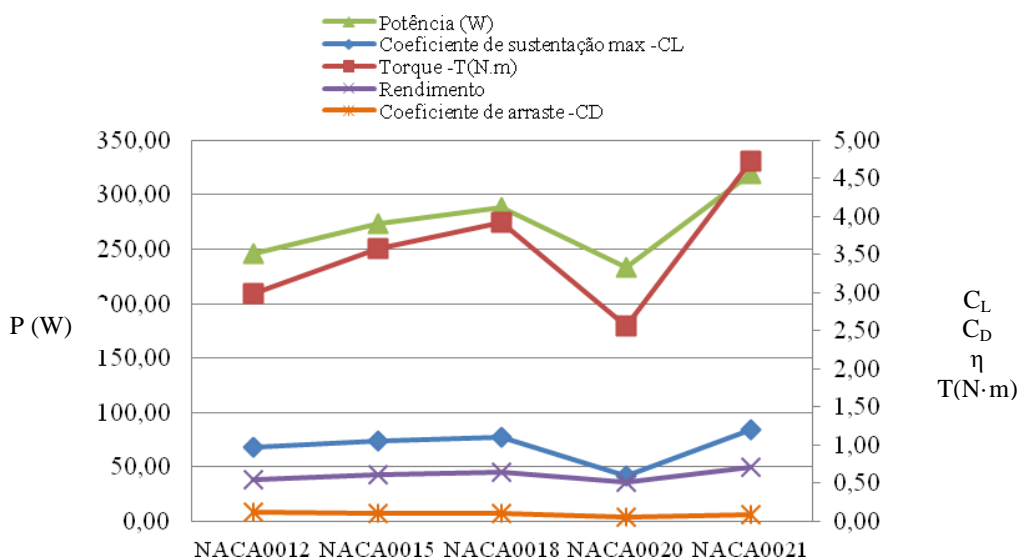


Figura 5 - Potencia [W], coeficiente de sustentação (C_L) e de arraste (C_D), torque [N.m] e rendimento (η).

4. CONCLUSÕES

Concluiu-se que o perfil NACA0021 apresentou o melhor desempenho em relação aos perfis NACA0012, NACA0015, NACA0018 e NACA0020, com relação à potência mecânica, torque e rendimento, atendendo o objetivo principal do trabalho, de obter uma recomendação teórica a respeito de qual perfil aerodinâmico pode ser empregado para os rotores de pequenos dispositivos de conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica. Mais especificamente coluna de água oscilante com potências inferiores a 1kW. Os resultados indicaram que o desempenho da turbina está relacionado predominantemente com os coeficientes de sustentação (C_L) para o ângulo de ataque estabelecido. A determinação experimental destas variáveis em túnel de vento utilizando a turbina projetada com perfis NACA0021 e NACA0018 para determinar o desempenho real da turbina será objeto de futuros trabalhos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEELS,C.; TROCH,P.; DE VISCH,K.; KOFOED, J. P.; DE BACKER, G. Application of time-dependent mild slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 35, p. 1644 – 1661. 2010.
- [2] Engineering Committee on Oceanic Resources – Working Group on Wave Energy Conversion, **Wave Energy Conversion**. Editor: John Brooke, Elsevier, Oxford, 2003.
- [3] CRUZ, J.; GUNNAR, M.; BARSTOW, S.; MOLLISON, D. **Green Energy and Technology, Ocean Wave Energy**. Editor: Joao Cruz, Springer. 2008.
- [4] MARGHERITINI, L.; HANSEN, A.M.; FRIGAARD, P. A method for EIA scoping of wave energy converters – based on classifications of the used technology. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 32, p. 33 – 44. 2012.
- [5] FALCÃO, A.F.O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.14, p. 899-918. 2010.
- [6] CRUZ, J.M.B.P.; SARMENTO, A.J.N.A. Energia das ondas – Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. **Ener. Alfragide**, Instituto do Ambiente. 2004.
- [7] CLÉMENT, A.; MCCULLEN, P.; FALCÃO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER ,F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN, K.; PETRONCINI, S.; PONTES, M.T.; SCHILD, P.; SJÖSTRÖM, B.O.; SØRENSEN, H.C.; THORPE, T. Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, p. 405 – 431, 2002.
- [8] ZHANG, D.; LI, W.; LIN, Y. Wave energy in China: Current status and perspectives. **Renewable Energy**, v. 34, p. 2089 – 2092, 2009.
- [9] BAHAJ,A. Generating electricity from the oceans. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 3399 – 3416. 2011.
- [10] NIELSEN, F.G.; ANDERSEN, M.; ARGYRIADIS, K.; BUTTERFIELD, S.; FONSECA, N.; KUROIWA, T.; LE BOULLUEC, M.; LIAO, S-J.; TURNOCK,S. R.; WAEGTER, J.; Ocean wind and wave energy utilization. **ISSC**, Southampton. 2006.
- [11] TWIDELL, J.; WEIR,T. **Renewable Energy Resources**. London. Taylor & Francis, 2006.
- [12] CAMPOREALE, S.M.; TORRESI, M.; PASCAZIO, G.; FORTUNATO, B. A 3D unsteady analysis of a Wells turbine in a sea-wave energy conversion device. **American Society of Mechanical Engineers, International Gas Turbine Institute, Turbo Expo**, Atlanta, Georgia, USA, GT2003-38715. 2003.

- [13] LEE, H.; KIM, J.; LEE, Y.; SETOGUCHI, T.; KANG, C. Numerical analysis of flow characteristics in a Wells turbine for wave power conversion. **Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference**, Seattle, USA, p. 427-433, 2000.
- [14] MANUN, M. **The Study on the Hysteretic Characteristics of the Wells Turbine in a Deep Stall Condition**. Saga, PhD Thesis, Saga University, Japan, 2006.
- [15] YU, Z.; MAEDA, H. Optimal matching design method of the Wells turbine with the air chamber in an oscillating air flow. **Journal of Hydrodynamics**, v. 3(2), 1991.
- [16] SUZUKI, M.; ARAKAWA, C. Design Method of Wave Power Generating System with Wells Turbine. **Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference**, Kitakyushu, Japan, p. 26-31, 2002.
- [17] SETOGUCHI, T.; SANTHAKUMAR, T.; TAKAO, M.; KIM, T.H.; KANEKO, K. A modified Wells turbine for wave energy. Saga University, Japan; IIT Madras, India; Matsue College of Technology, Japan; **Renewable Energy**, n. 28, p. 79–91, 2003.
- [18] RAGHUNATHAN, S.; TAN, C. P.; WELLS, N. A. J. Wind tunnel tests on airfoil in tandem cascade. **AIAA Journal**, v. 19 (11), p. 1490 –1492, 1981.
- [19] INOUE, M.; KANEKO, K.; SETOGUCHI, T.; RAGHUNATHAN, S. The fundamental characteristics and future of Wells turbine for wave power generator. **Journal of Science of Machines**, v. 39, p. 275 – 280, 1987.
- [20] RAGHUNATHAN, S.; TAN, C. P. The effect of blade profile on the performance of Wells turbine. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 6, p. 17–22, 1985.
- [21] THAKKER, A.; FRAWLEY, P.; BAJEET, E.S. Numerical analysis of Wells turbine performance using a 3D Navier-Stokes explicit solver. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**, Stavanger, Norway, v. 1, p. 604 – 608, 2001a.
- [22] THAKKER, A.; FRAWLEY, P.; BAJEET, E.S. Analysis of a stall-resistant aerofoil in view of wave power conversion. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**, Stavanger, Norway, v. 1, p. 614–619, 2001b.
- [23] WEBSTER, M.; GATO, L.M.C. Effect of rotor blade shape on the performance of the Wells turbine. **Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference**, Brest, France, v. 1, p. 169–173, 1999.
- [24] THAKKER, A.; ABDULHADI, R. Effect of Blade Profile on the Performance of Wells Turbine under Unidirectional Sinusoidal and Real Sea Flow Conditions. **International Journal of Rotating Machinery**, article ID 51598, 2007.
- [25] RAGHUNATHAN, S. The Wells air turbine for wave energy conversion. **Progress Aerospace Science**, v. 31, p. 335-386, 1995.
- [26] MOHAMED, M.H.A. **Design Optimization of Savonius and Wells Turbines**. MSc Thesis. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg University, Germany, 2011.

[27] ABBOTT, I.H.; DOENHOFF, A. E.V. **Theory of wings sections**, New York, USA. Dover Publications, Inc. 1959.

6. AGRADECIMENTOS

L. A. O. Rocha agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa. E. D. dos Santos agradece a FAPERGS pelo apoio financeiro (Processo: 12/1418-4). Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro (Processo: 555695/2010-7).