

OTIMIZAÇÃO GEOMÉTRICA DE ROTORES WELLS COM BASE NAS ANÁLISES DOE

Pâmela Badessa Maia ^(a), Ramiro G. Ramirez Camacho ^(b), Nelson Manzanares Filho ^(c),
Waldir de Oliveira ^(d) e Edna Raimunda da Silva ^(e)

Universidade Federal de Itajubá - Brasil

(a) pamelabadessamaia@unifei.edu.br

(b) ramirez@unifei.edu.br

(c) nelson@unifei.edu.br

(d) waldir@unifei.edu.br

(e) edna@unifei.edu.br

INTRODUÇÃO

A energia das ondas pode ser uma alternativa viável para incrementar a matriz elétrica brasileira, pois além de ser considerada uma fonte de energia renovável, o Brasil possui aspectos que favorecem a implementação deste tipo de energia, como por exemplo um extenso litoral (~8500 Km) e valores significativos de potencial de energia das ondas ao longo do litoral brasileiro, especialmente nas regiões Sudeste e Sul.

Dos vários dispositivos de extração de energia das ondas, as usinas de coluna de água oscilante (Vide Fig. 1) se destacou em relação aos demais dispositivos devido ao seu aspecto construtivo simples.

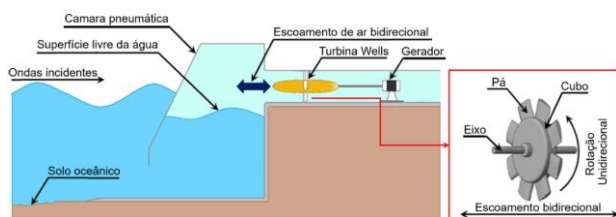


Figura 1.- Ilustração de uma usina OWC onshore e um rotor Wells de fluxo puramente axial com seus principais elementos construtivos.

Nestas usinas são frequentemente utilizadas as turbinas Wells cujas principais vantagens são: (i) capacidade de extrair energia em baixos valores de coeficiente de vazão; (ii) possibilidade de armazenar energia por efeito volante, já que o rotor pode ser acoplado diretamente a um gerador elétrico ao atingir elevados valores de rotação (~ 500 a 5000 rpm); (iii) construção relativamente simples e econômica, já que o modelo dispensa o uso de válvulas retificadoras; (iv) apresentar bons valores de eficiência de pico (70% a 80%) (Falcão, 2010; Shehata et al. , 2017, Torresi et al., 2019).

Como principais desvantagens podem ser mencionadas: (i) baixa eficiência aerodinâmica (ii) queda acentuada de potência após ocorrência de

stall; (iii) faixa operacional limitada devido ao bloqueio da turbina na condição de *stall* (Falcão, 2010; Raghunathan & Tan, 1982; Shehata et al., 2017; Takao et al., 2002);

Para superar as desvantagens citadas, desde a sua invenção no início dos anos de 1970 por Alan Arthur Wells, vários autores realizaram estudos e propuseram mudanças na geometria da turbina.

Sendo assim, com o objetivo de maximizar o coeficiente de torque (C_T) e a eficiência (η) do rotor da turbina Wells, o presente trabalho apresenta uma metodologia de otimização baseada na geração de plano de experimentos (Design of Experiments – DOE), integrada com solução numérica do escoamento através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

METODOLOGIA

A turbina Wells do presente trabalho possui geometria idêntica a da turbina Wells utilizada no estudo experimental de Curran & Gato (1997) e numérico de Kotb *et al.* (2021). Na Tabela 1 são apresentadas as principais especificações da turbina, enquanto que na Figura 2 é apresentada a vista em perspectiva do rotor Wells.

Tabela 1.- Especificações do rotor Wells original (Adaptado de Kotb et al., 2021)

Parâmetros	Dimensões
Número de pás, Z	8
Ângulo do canal periódico, θ	45°
Comprimento da corda, c	0,125 m
Máxima espessura da pá, t	0,01875 m
Diâmetro do cubo, D_{hub}	0,400 m
Diâmetro da carcaça, D_{shroud}	0,590 m
Folga de topo, t_c	0,001m
Solidez na altura média da pá, σ	0,64
Rotação nominal, n	2000 rpm
Perfil aerodinâmico	NACA0015

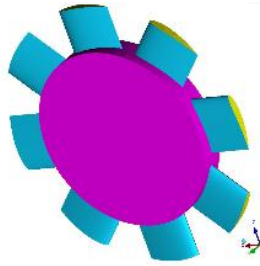


Figura 2.- Rotor Wells original

Na Figura 3 é apresentado o detalhe do refinamento da malha do tipo não estruturada aplicada ao domínio computacional do canal hidráulico periódico da turbina Wells. Já na Figura 4 podem ser observadas as partes que constituem o canal, bem como as condições de contorno aplicadas à cada uma delas.

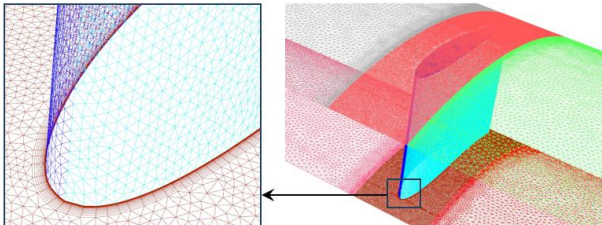


Figura 3.- Detalhe do refinamento da malha na superfície do rotor Wells e das camadas prismáticas aplicadas na superfície das pás

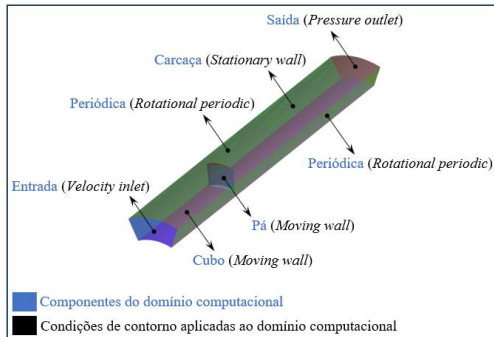


Figura 4.- Domínio computacional e condições de contorno

Para as simulações numéricas do escoamento tridimensional da turbina Wells, foi utilizado o código comercial ANSYS-FLUENT®, onde as médias de Reynolds nas Equações de Navier-Stokes (RANS) são discretizadas utilizando a abordagem do método dos volumes finitos. Foi admitido para o escoamento as condições padrão fornecidas para o ar pelo software, e ainda considerado escoamento do tipo isotérmico, incompressível e em regime permanente. Quanto ao modelo de turbulência optou-se pelo k-ε Realizável com opção de tratamento de parede ativado e convergência de resíduos de 10^{-4} .

Para o processo de otimização foram habilitadas como variáveis geométricas de projeto parametrizadas a espessura e o comprimento de corda da pá, localizados na altura média e no topo

da pá. Com relação a geração do plano de experimentos, considerou-se o tipo fatorial completo de 3 níveis, resultando na criação de uma população composta por 81 combinações, conforme pode ser observado nas Figuras 5 e 6.

		Corda (C_2)		
		1,00	1,20	1,40
Corda (C_1)	0,90			
	1,05			
	1,20			
		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
		Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
		Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9

Figura 5.- Geometria da pá considerando apenas a variação dos comprimentos das cordas

		Espessura (T_2)		
		1,00	1,15	1,30
Espessura (T_1)	0,90			
	1,00			
	1,10			
		Grupo 10	Grupo 11	Grupo 12
		Grupo 13	Grupo 14	Grupo 15
		Grupo 16	Grupo 17	Grupo 18

Figura 6.- Geometria da pá considerando apenas a variação da espessura

RESULTADOS

A metodologia de otimização baseada na geração de planos de experimentos integrada com a solução numérica do escoamento permitiu encontrar a geometria de rotor ótima apresentada na Figura 7, sendo os valores das variáveis de projeto geométrico parametrizadas ótimos: $C_1 = 0.95$ ($c = 0.11875$ m), $C_2 = 1.45$ ($c = 0.18125$ m), $T_1 = 0.90$ ($t = 0.01687$ m) e $T_2 = 1.0$ ($t = 0.01875$ m).

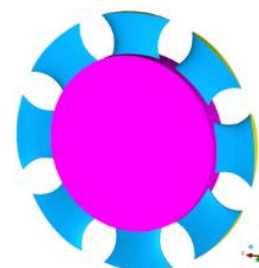
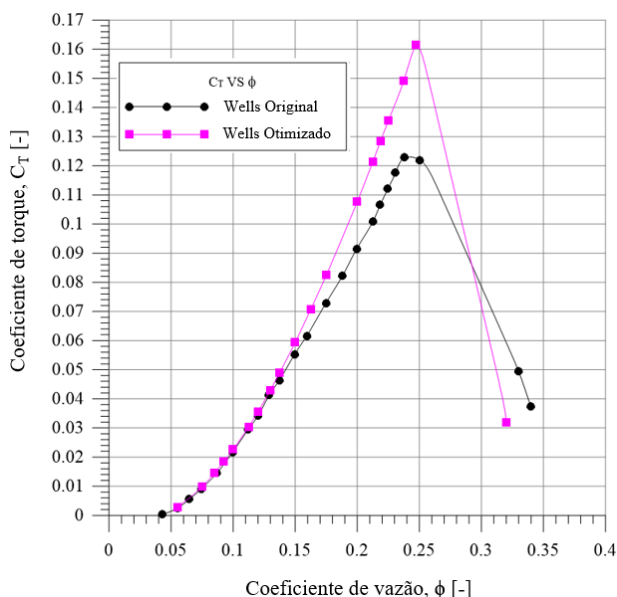
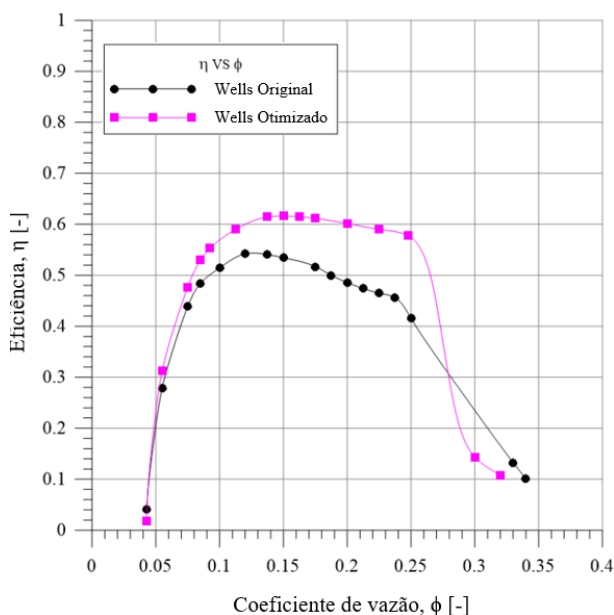


Figura 7.- Rotor Wells otimizado.

Conforme apresentado na Figura 8, para vazões parciais o comportamento da turbina Wells para ambos os rotores são semelhantes, entretanto para valores de vazão correspondentes à faixa operacional da turbina tem-se um melhor desempenho da turbomáquina com rotor otimizado evidenciado pelo ganho de coeficiente de torque e de eficiência.



(a)



(b)

Figura 8.- Comparação entre as curvas de desempenho (a) C_T e (b) η obtidas para as turbinas de rotor Wells original e otimizado

CONCLUSÕES

A geometria otimizada do rotor Wells do presente estudo foi capaz de proporcionar um ganho de 31,11% para o máximo coeficiente de

torque e de 13,59% para a máxima eficiência. Além disso, a geometria ótima possui faixa operacional de maior estabilidade com discreto estadiamento do fenômeno *stall* quando comparada à geometria original.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) APQ-01865-18 e APQ-01591-18, e do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) 408029/2022-6.

REFERÊNCIAS

- Curran, R., & Gato, L. M. C. (1997). The energy conversion performance of several types of Wells turbine designs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 211(2), 133–145. <https://doi.org/10.1243/0957650971537051>
- Falcão, A. F. d. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Kotb, A. T. M., Nawar, M. A. A., Attai, Y. A., & Mohamed, M. H. (2023). Performance optimization of a modified Wells turbine for wave energy conversion. *Ocean Engineering*, 280(May), 114849. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114849>
- Raghunathan, S., & Tan, C. P. (1982). Performance of the Wells turbine at starting. *Journal of Energy*, 6(6), 430–431. <https://doi.org/10.2514/3.48058>
- Shehata, A. S., Xiao, Q., Saqr, K. M., & Alexander, D. (2017). Wells turbine for wave energy conversion: a review. *International Journal of Energy Research*, 41(1), 6–38. <https://doi.org/10.1002/er.3583>
- Takao, M., Setoguchi, T., Kaneko, K., Raghunathan, S., & Inoue, M. (2002). Noise characteristics of turbines for wave power conversion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 216(3), 223–228. <https://doi.org/10.1243/095765002320183540>

Torresi, M., Stefanizzi, M., Fornarelli, F., Gurnari, L., Filianoti, P. G. F., & Camporeale, S. M. (2019). Performance characterization of a wells turbine under unsteady flow conditions. AIP Conference Proceedings, 2191(December).
<https://doi.org/10.1063/1.51388>

