

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM MODELO REDUZIDO DE TURBINA HIDROcinÉTICA

Fernanda Muniz de Souza

E-mail: fe_mec@yahoo.com.br

Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Mecânica.
70910-900 Brasília. DF. Brasil

Thiago Fernandes Oliveira

E-mail: thiagokbcinha@gmail.com

Antonio C. P. Brasil Junior.

E-mail: brasiljr@unb.br

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo experimental de um modelo reduzido de turbina hidrocinética. Tal turbina foi desenvolvida para geração de energia elétrica em comunidades ribeirinhas isoladas, com baixo impacto ambiental através de uma fonte renovável de energia (energia hidrocinética de correntes livres de pequenos rios). O fator de escala entre o modelo e o protótipo é de 1:4,3. A máquina hidráulica foi testada para diversos valores de velocidade média do escoamento livre e o coeficiente de potência foi calculado. O efeito de melhora na conversão de energia com o uso de difusores de saída foi verificado para diferentes condições de operação da máquina. Os ensaios em escala reduzida permitiram a otimização de operação da máquina. A metodologia aplicada no trabalho mostra-se satisfatória.

Palavras-chave: Turbinas hidrocinéticas; Energia de desenvolvimento sustentável; Coeficiente de Potência; Razão de velocidade.

1. INTRODUÇÃO

A humanidade passa por uma dependência cada vez maior de energia para mover o mundo em constante desenvolvimento, o que leva a uma incansável busca por fontes de energia limpas e renováveis de baixo impacto ambiental.

O desenvolvimento de sistemas hidrocinéticos de pequeno porte e de baixo impacto ambiental, como forma alternativa de gerar eletricidade, representa um excelente meio de aproveitar a energia renovável dos rios, sem agredir o meio ambiente. Tais sistemas têm como método converter a energia cinética da água em movimento diretamente, sem interromper seu curso natural, de maneira análoga às turbinas de vento.

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, há muitas comunidades isoladas localizadas às margens de rios onde esse tipo de sistema de conversão de energia seria muito bem aplicado. Rios com velocidades de até 2,5 m/s podem ser encontrados em diversas regiões do Brasil, em locais que apresentam grandes distâncias entre as comunidades e são de difícil acesso, dentro da floresta Amazônica, por exemplo.

Existem poucas referências na literatura técnica sobre a concepção e o uso de turbinas hidrocinéticas para gerar eletricidade, e o conhecimento disponível nesta área de aplicação é igualmente restrito. Geralmente, este tipo de turbina é derivado de turbinas de vento, pois o funcionamento de ambas é similar.

Um dos primeiros artigos a respeito da aplicação de uma turbina hidrocinética para gerar eletricidade é de autoria de Hardwood, 1985, do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), de acordo com Tiago Filho (2003). Ele fez experimentos com o protótipo de uma turbina

de quatro metros de diâmetro de eixo horizontal e múltiplas pás em rios da região Amazônica. Um método simplificado e rápido para o design de turbinas axiais de escoamento livre e uma análise hidrodinâmica de rotores axiais para o uso da energia cinética dos rios é apresentada por Mesquita et al (1999 e 2000).

Kanemoto et al (2002) e Inagaki et al (2004) apresentam o desenvolvimento de um tipo de turbina hidráulica para correntes rasas. A simplicidade do modelo e a performance apresentada pelo protótipo são bastante satisfatórias.

Uma outra aplicação tecnológica de turbinas hidrocínéticas é na utilização dos efeitos da maré e das correntes marinhas como fonte de energia. Bahaj & Meyers (2003) analisam os fundamentos aplicáveis para a utilização de turbinas em correntes marinhas para a produção de energia. Testes realizados com turbinas para corrente marinha do tipo Darrieus são analisados por Kiho et al (1996) e Guerra & Mesquita (1997). Alguns aspectos de hidrocínéticas de marés podem ser utilizados para o desenvolvimento de turbinas de rios, estando atento a algumas condições de funcionamento específicas para o caso de correntes marinhas, como a direção variável do escoamento, por exemplo.

Desde 1981 a corporação Underwater Electric Kite (UEK) vem desenvolvendo, testando e comercializando vários tipos de protótipos de turbinas hidrocínéticas em rios, marés e correntes marinhas. Outra corporação que está desenvolvendo projetos de turbinas hidrocínéticas para converter energia de correntes marinhas em energia elétrica é a Marine Current Turbines (MCT). Pouca informação técnica é fornecida a respeito de tais turbinas, pelas empresas, em páginas na Internet.

No Brasil, um projeto do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília - UnB, que teve início em 1986, é a experiência de melhor resultado no uso de turbinas hidrocínéticas que utilizam a correnteza de rios para geração de energia elétrica. Van Els et al (2003) apresentam uma visão geral da instalação e da evolução do projeto da turbina hidrocínética instalada em Correntina, na Bahia. Tal máquina está em funcionamento por mais de uma década, provendo eletricidade para um pequeno centro de saúde de uma comunidade isolada.

2. TURBINA HIDROCIÉTICA GERAÇÃO 3

A evolução do projeto do Departamento de Engenharia Mecânica da UnB e a busca por um desempenho ótimo de máquinas axiais livres com difusor levaram a concepção de uma máquina máquina chamada Geração 3. Uma visão geral de tal máquina pode ser vista nos desenhos em CAD da Fig. 1 e o estudo de seu modelo reduzido é apresentado no presente trabalho. É composta por um rotor, de diâmetro d , e por um estator de entrada. A turbina hidrocínética Geração 3 possui dimensões bastante reduzidas se comparadas com as gerações anteriores, o que a torna mais compacta e portátil, de simples estrutura, podendo ser facilmente instalada em comunidades ribeirinhas isoladas, de difícil acesso.

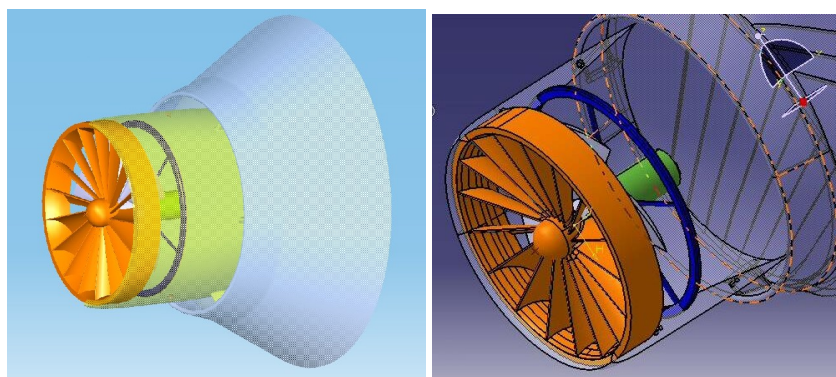


Figura 1 – Desenho em CAD da Turbina Hidrocínética Geração 3 - UnB.

Uma outra característica importante da turbina Geração 3 é a superfície interna da carcaça perfilada, agindo como um difusor, reduzindo a pressão na saída da mesma. Para diminuir as perdas na transmissão da potência da turbina, o gerador da turbina Geração 3 é integrado ao seu núcleo, formando um conjunto com o rotor. Por fim, o uso de um difusor partido faz com que o escoamento externo da turbina passe pelo vão entre a carcaça e o difusor e leva a um controle da camada limite na superfície interna do difusor.

A geometria proposta para a máquina Geração 3 foi concebida com o intuito de obter uma máquina axial de boa performance hidráulica, como as turbinas axiais hidráulicas convencionais, que têm eficiência hidráulica de cerca de 90%. No entanto, como estabelecido por Betz (1926), há um limite para a porcentagem de energia cinética que pode ser convertida, correspondente a 59%, para turbinas abertas. Estudos posteriores realizados por Kirke (2003), Riegeler (1983) e Gilbert & Foreman (1983) reportam o aumento do coeficiente de potência em até 4,25 vezes, se a geometria da turbina for melhorada, utilizando um duto perfilado e difusores.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Modelo Reduzido

A configuração básica do modelo é composta por uma carcaça que envolve um rotor, um estator e um gerador. Acoplado na carcaça encontra-se um difusor de saída, como pode ser observado na Fig. 2.

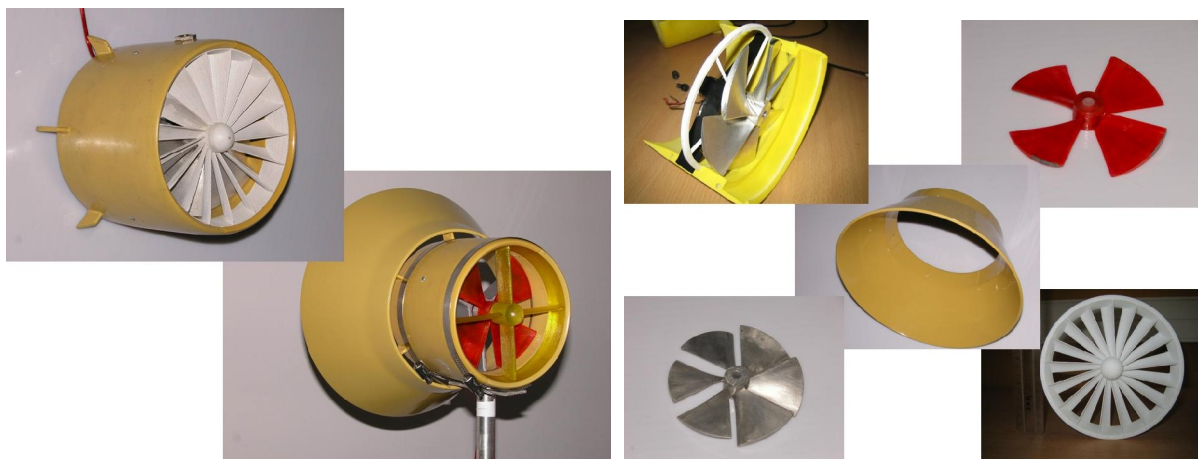


Figura 2 – Fotos do modelo reduzido da turbina hidrocinética em diferentes configurações.

A carcaça e o difusor são fabricados em poliamida a partir do método de prototipagem rápida e receberam um acabamento de pintura automotiva em sua superfície a fim de torná-la mais lisa, controlando a rugosidade do modelo. A carcaça foi desenvolvida utilizando um perfil de asa do tipo CLARK YH em revolução para formar a geometria da parede interna. O estator, também de poliamida, é uma peça fixa que direciona o escoamento que entra na turbina, deixando-o num ângulo predefinido ao chegar ao rotor.

Neste trabalho, foram realizados ensaios com dois rotores diferentes. Um rotor composto de 6 pás, de diâmetro 13,8 cm, fabricado em alumínio utilizando um torno de comando numérico – CNC; e outro rotor composto por quatro pás, de mesmo diâmetro, fabricado em resina acrílica pelo método de prototipagem rápida o que deu à peça uma precisão muito maior de sua geometria, quando comparada ao rotor de seis pás.

O gerador utilizado no modelo reduzido, na verdade, é um micro motor elétrico da marca Escap, modelo L26 213 P – 49, de 5,0 W. No eixo do motor (adaptado para funcionar como gerador) é encaixado o rotor.

3.2 Parâmetros de Similaridade

Para ser de utilidade, um teste com um modelo de turbina hidrocínética deve fornecer dados que possam, por meio de transposição de escalas, fornecer as forças, momentos e cargas dinâmicas que existiriam no protótipo em tamanho real. Para assegurar a semelhança entre os escoamentos para o modelo e o protótipo três condições devem ser atendidas. Tais condições são: similaridade dimensional, dinâmica e cinemática.

A Tab. 1 mostra todos os parâmetros originais para a análise de similaridade para o protótipo e também os respectivos valores para o modelo, obedecendo às regras de similaridade anteriormente citadas. A diferença entre os números de Reynolds para o protótipo e o modelo não representam um problema importante no estudo, usando do modelo reduzido.

Tabela1 Parâmetros de operação para o protótipo e o modelo em escala reduzida.

	Protótipo	Modelo
Fluido	Água	Ar
Diâmetro (m)	0,6	0,14
Rotação (rpm)	60 - 150	600 - 2000
Velocidade do escoamento (m/s)	1,5 – 2,5	2,5 – 6,1
Número de Reynolds	~900.000	~90.000

3.3 Túnel de Vento e Bancada Experimental

Os ensaios para a análise da performance do modelo reduzido foram realizados no túnel de vento do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). O túnel tem seção de teste de 2,6 metros de comprimento e uma seção transversal de 0,6 m x 0,6 m, com um intervalo de velocidade média de escoamento livre de 2 a 25 m/s. A intensidade de turbulência dentro do túnel é menor que 2%. No bocal bidimensional convergente de entrada, da seção de teste, existem telas hexagonais, estilo colméia, para estabilização do escoamento. O túnel de vento opera em ciclo aberto e a pressão dentro da seção de teste é ajustada à pressão atmosférica local. A velocidade do escoamento do ar é medida através de um tubo de Pitot localizado na seção de teste.

O aparato experimental preparado para a realização dos ensaios da turbina foi montado para a execução de medições de tensão nos terminais de saída do gerador, frequência de rotação do rotor e velocidade média do escoamento no túnel de vento. Um diagrama esquemático da bancada experimental para os testes no túnel de vento é mostrado na Fig. 3.

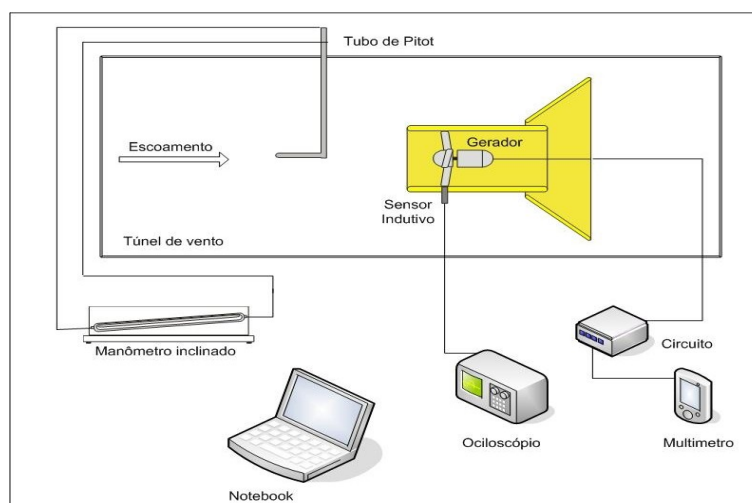


Figura 3 - Diagrama da bancada experimental do ensaio em túnel de vento.

A frequência de rotação do rotor era medida usando um sensor de proximidade indutivo. A tensão elétrica era medida a partir de um voltímetro de mesa, que era montado conforme o circuito mostrado na Fig. 4, a seguir.

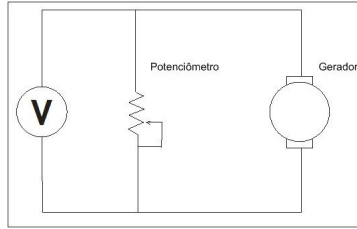


Figura 4 - Circuito elétrico para medição dos dados de saída do gerador.

3.4 Procedimentos Experimentais

Os procedimentos experimentais dos ensaios foram realizados para diferentes configurações do modelo reduzido da turbina. A intenção é comparar os diferentes comportamentos da turbina com o rotor de quatro e de seis pás, em diferentes velocidades do escoamento livre e também verificar a melhoria da performance com o uso do difusor de saída.

Para cada configuração, as velocidades do vento no túnel foram ajustadas nos valores de 2,7; 3,6; 4,8; e 6,0 m/s. Em cada velocidade média do escoamento, uma carga elétrica era aplicada ao gerador, usando resistências de potência que variavam entre 3,5 a 120 O. Para cada valor de carga aplicada, a rotação era medida, juntamente com a voltagem do gerador.

O coeficiente de potência e a razão de velocidade, denotados por C_p e λ , podem ser determinados pelas Eq. (1) e (2), respectivamente. A razão de velocidade representa a razão entre a velocidade no ponto mais extremo na pá do rotor e a velocidade média do escoamento livre.

$$C_p = \frac{P}{E_0} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_\infty} \quad (2)$$

Nas equações acima, P é a potência no eixo do gerador, E_0 é a energia do escoamento contida na área da carcaça da turbina (potência hidrocínética da corrente livre), ρ é a densidade do ar e $A = \frac{\pi r^2}{2}$ corresponde a área da secção perpendicular ao escoamento de entrada da turbina. A velocidade angular é ω , e o raio do rotor é r e V_∞ é a velocidade do escoamento livre.

A potência no eixo do gerador pode ser determinada por:

$$P = P_{elet} + \text{perdas} \quad (3)$$

Onde $P_{elet} = \frac{V^2}{R}$, sendo V a voltagem lida no voltímetro de mesa e R a resistência aplicada ao gerador. As perdas equivalem às perdas internas do gerador (atrito, efeito Joule e magnética), durante o processo de conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Para se chegar à potência no eixo (P) foi utilizado um método que calcula as perdas internas em micro motores, proposto por Brasil (2005). Um ensaio com o gerador (funcionando como motor) a vazio, sem a aplicação de carga, foi realizado a fim de obter tais perdas internas e, com elas, chegar à eficiência do gerador, que dependem da velocidade angular e da corrente interna do mesmo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Fig. 5 e 6 podem ser observados os gráficos do coeficiente de potência do modelo da turbina conforme as resistências elétricas são variadas para os ensaios do modelo com o rotor de quatro pás. Os gráficos apresentados levam em conta as diferentes velocidades do escoamento.

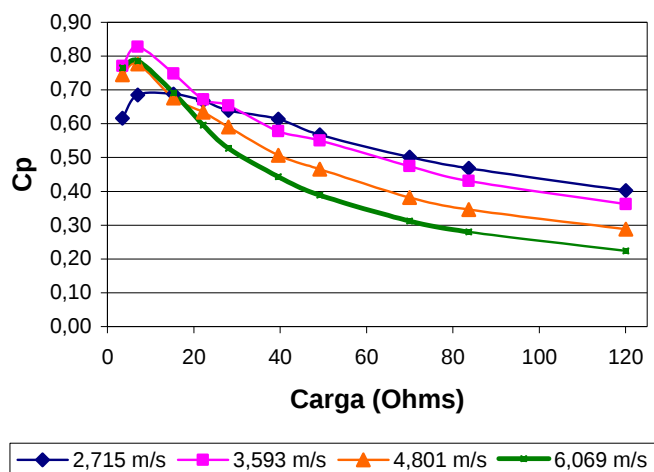


Figura 5 - Coeficiente de Potência x Carga (quatro pás - sem difusor).

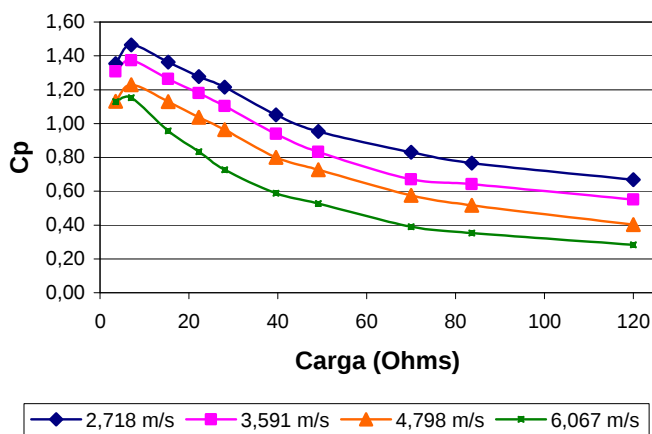


Figura 6 - Coeficiente de Potência x Carga (difusor cônico).

Pode ser observado que, conforme se aumenta a carga, a potência gerada pela máquina apresenta um máximo. Esta característica é verificada para as duas configurações (sem difusor e com o difusor cônico). O valor máximo no coeficiente de potência está relacionado com valores ideais da velocidade do rotor (dada uma velocidade do escoamento) e com o valor da carga aplicado. A mudança na carga elétrica corresponde a uma mudança no torque que age sobre a turbina. Conforme a resistência decresce, o torque para girar o gerador aumenta. Ou seja, quando a resistência da carga é baixa, um alto torque é necessário para girar o gerador e a turbina se torna mais lenta. Por outro lado, quando o circuito está aberto, a resistência é infinita e o gerador gira a um torque mínimo. Assim, a turbina se torna mais rápida. Entre essas duas condições extremas, o coeficiente de potência atinge o valor máximo.

É importante ressaltar que o comportamento do rotor em uma condição de escoamento livre não é previamente conhecido. O triângulo de velocidade, na entrada da máquina, é definido pelo valor

real da velocidade axial do escoamento pelo rotor, que é diferente do valor da velocidade do escoamento livre (V_∞). Isso acontece por causa do efeito de desaceleração do escoamento livre na frente da turbina. No ensaio sem o difusor, o valor da velocidade axial pelo rotor é menor do que a do escoamento livre. Com a presença dos difusores, a sucção na saída da máquina produz uma região de baixa pressão que aumenta a velocidade do escoamento através da máquina, compensando o efeito de desaceleração.

O mesmo comportamento descrito anteriormente pôde ser observado para os ensaios com o rotor de seis pás.

Nas Fig. 7 e 8 o coeficiente de potência para diferentes valores de velocidade do escoamento é mostrado, para as combinações com o rotor de seis pás. Verifica-se que o valor ótimo do coeficiente de potência do modelo com os difusores ocorre para uma razão de velocidade λ de cerca de 3,0 a 3,5. Esse valor define os valores ideais da velocidade do rotor para uma dada velocidade de corrente do rio.

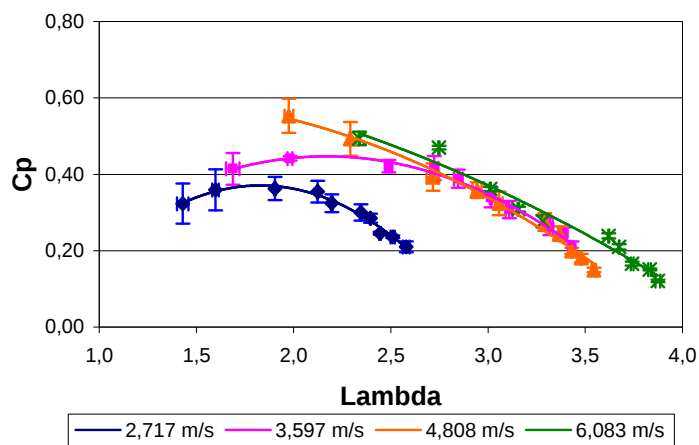


Figura 7 - Coeficiente de Potência x λ (seis pás - sem difusor).

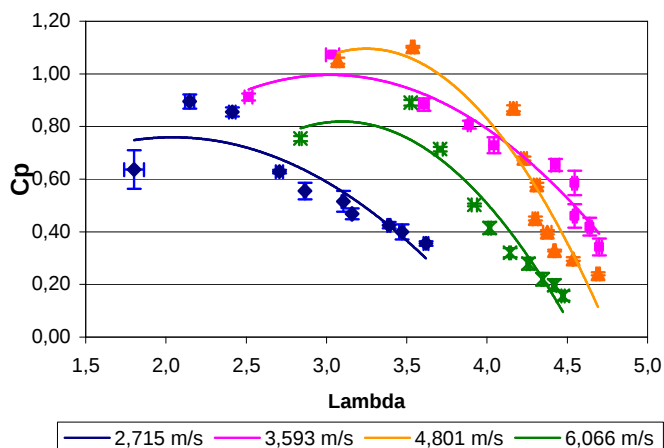


Figura 8 - Coeficiente de Potência x λ (seis pás - difusor cônico).

Um resultado importante, tirado dessas curvas, é a diferença das curvas típicas para turbinas de vento. Em geral, para turbinas eólicas, as curvas do $C_p(\lambda)$ se colapsam formando uma só. Para turbinas com uma alta frenagem do escoamento (alta solidez), as curvas do coeficiente de potência

não colapsam. Neste caso, o Número de Reynolds deve ser usado com parâmetro para descrever o problema.

Os gráficos acima também mostram um aumento de cerca de 100% do coeficiente de potência com o uso do difusor cônico, em diferentes velocidades do escoamento. Esses valores podem ser usados para transpor os resultados do modelo para a máquina em escala real.

Nas Fig. 9 e 10, a seguir, observamos os coeficientes de potência para diferentes velocidades do escoamento, agora para os ensaios com o rotor de quatro pás. O valor ótimo do coeficiente de potência do modelo com os difusores, para esta configuração, também ocorre para uma razão de velocidade λ de cerca de 3,0 a 3,5. Como a solidez do rotor de quatro pás é consideravelmente menor do que a do rotor de seis pás, as curvas do coeficiente de potência ficam mais próximas umas das outras, tendendo a formarem uma só. O efeito de frenagem do escoamento, neste caso, é menor do que para o caso do modelo com o rotor de seis pás.

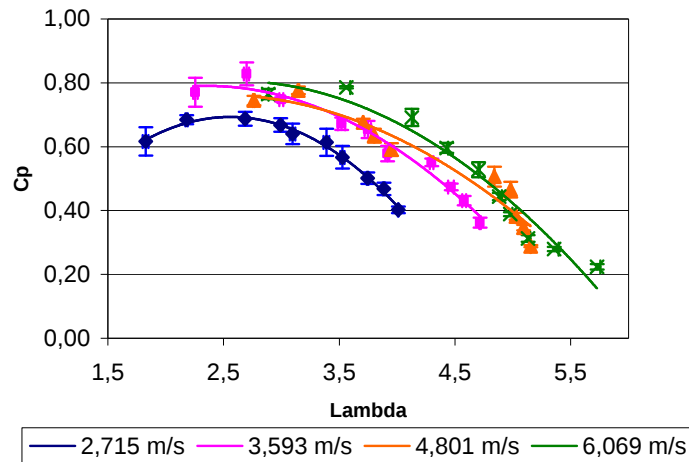


Figura 9 - Coeficiente de Potência $\times \lambda$ (quatro pás - sem difusor).

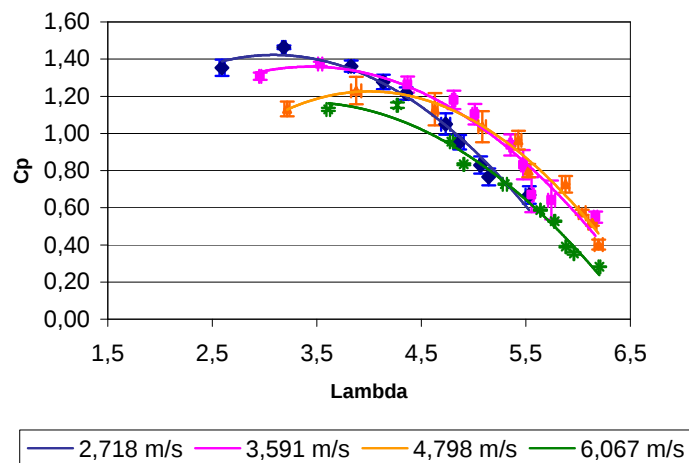


Figura 10 - Coeficiente de Potência $\times \lambda$ (quatro pás - difusor cônico).

Para comparar os resultados obtidos, tanto nos ensaios do modelo com o rotor de seis pás quanto com o de quatro pás, traçamos os gráficos mostrados na Fig. 11. Nele, observamos o coeficiente de potência para uma velocidade de escoamento de 2,7 m/s, de todas as configurações.

Na figura, fica claro que o ensaio com o uso do rotor de quatro pás, com o difusor cônico, é o que alcançou um maior coeficiente de potência. Este foi de aproximadamente 1,4, ou seja, 75% maior do que o ensaio com o rotor de seis pás, utilizando o mesmo difusor. A velocidade de 2,7 m/s foi escolhida para ser mostrada, pois é a que mais se aproxima das condições reais de operação (para a escala real) que é a velocidade do rio de 1,5 m/s.

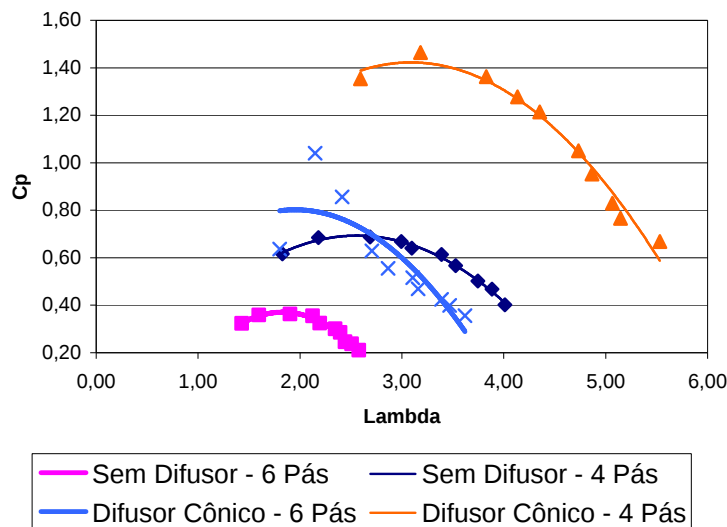


Figura 11 – Comparação entre os ensaios a $V_\infty = 2,7 \text{ m/s}$.

5. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais deste trabalho permitem obter as características do modelo reduzido da turbina hidrocínética Geração 3, em várias condições de operação. Estas características podem ser perfeitamente transpostas para o protótipo em escala real. Os experimentos em túnel de vento podem ser usados para simular o escoamento de água no protótipo da turbina. Pode-se verificar a diferença entre os dois tipos de rotores utilizados em diferentes situações e a contribuição da utilização do difusor na melhora do desempenho da turbina. Os seguintes resultados principais foram observados:

→ O coeficiente de potência máximo no valor de 1,4 foi obtido para a turbina com rotor de 4 pás com difusor cônico a uma velocidade do escoamento livre de 2,7 m/s. A razão de velocidade correspondente ao pico de coeficiente de potência está entre o intervalo de 3,0 a 3,5.

→ O aumento no coeficiente de potência na turbina com a utilização do difusor chegou a mais de 100%, demonstrando que a utilização de difusores é perfeitamente viável em termos de melhora na eficiência da turbina.

Por fim, a utilização de turbinas hidrocínéticas para atender a demanda de energia elétrica, em comunidades isoladas, demonstra ser uma alternativa interessante, de baixo custo, alta confiabilidade e, principalmente, baixo impacto ambiental, aliado à simplicidade de montagem e operação da máquina.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por um Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ELETRONORTE S/A. Os autores gostariam de agradecer a Escola Central de Lyon, na França, pelo apoio no design e na fabricação do modelo. Aos professores Aldo J. De Souza (UnB) e Lucio B. Salomon (UnB) pelas sugestões e discussões a respeito do assunto abordado e a Rafael Luz pela ajuda nos experimentos.

7. REFERÊNCIAS

- Bahaj, A.S., Meyers, L.E., Fundamentals applicable to the utilization of marine current turbines for energy production, *Renewable Energy* Vol.28, pp. 2205-2211, 2003.
- Betz, A., *Wind Energy und ihre Ausnutzung durch Windmuehlen*, 1926.
- Brasil Jr., ACP, Rey, R. Modeling Losses on Small DC Electrical Motors. Nota técnica interna - Universidade de Brasília/ ENSAM.
- Van Els, R.H., Campos, C.O., Balduino, L.F., Henriques, A.M.D., Hydrokinetic Propeller Type Turbine for the Electrification of Isolated Households or Community and Social End-Users, *17 Congresso de Engenharia Mecânica*, Sao Paulo – Brasil, 2003.
- Tiago Filho, G.L.T., The state of the art of Hydrokinetic power in Brazil, *Waterpower XIII Conference*, New York – USA, 2003.
- Guerra, D.R.S., Mesquita, A.L.A., Development and testing of small Darrieus type turbine for tidal currents in the mouth of he Amazon, *14 Congresso de Engenharia Mecânica*, Bauru-Brasil, 1997.
- Kanemoto, T., Misumi, H., Uno, M., Kashiwabara, T., Akaike, S., Nemoto, M., Development of New type hydraulic turbine suitable for shallow stream, *21 Simpósio IAHR*, Lausanne – Suíça, 2002.
- Kiho, S., Shiono, M., Suzuki, K., The power generation from tidal currents by Darrieus turbine, *Proc. of World Renewable Energy Conference*, pp. 1242-1245, 1996.
- Kirke, B., Developments in Ducted water current turbines, tidal paper, 2003, www.cyberiad.net/library/pdf/bk_tidal_paper15aug03.pdf.
- Inagaki, A., Kanemoto, T., Yonoyama, Y., Maruyama, M., Proposition of gyro-type hydraulic turbine to coexist with natural ecosystem, *22 IAHR Simpósio de Máquinas Hidráulicas e Sistemas*, Estocolmo – Suécia, 2004.
- Mesquita, A.L.A., Serra, C.M.V., Cruz, D.O.A., Simplified Method for Axial-Flow Turbomachinery Design, *Jornal da Sociedade Brasileira de Ciências Mecânicas e Engenharia*, Vol. 21, pp 61-70, 1999.
- Mesquita, A.L.A., Blanco, C.J., Gouveia, M.S., Analisis Hidrodinamica de Rotores Axiales para Uso de Energia Cinetica de los Rios, *Informacion Tecnologica del Chile*, Vol. 11:2, 2000.

EXPERIMENTAL STUDY OF A HYDROKINETIC TURBINE REDUCED MODEL

Fernanda Muniz de Souza

University of Brasilia. Department of Mechanical Engineering.
70910-900 Brasília. DF. Brazil
E-mail: fe_mec@yahoo.com.br

Thiago Fernandes Oliveira

E-mail: thiagokbcinha@gmail.com

Antonio C. P. Brasil Junior.

E-mail: brasiljr@unb.br

Abstract: *The present work presents an experimental study of a reduced model of hydrokinetic turbine. The turbine was developed in order to generate energy for small and remote communities located beside river streams, with a low environmental impact and a renewable energy source (hydrokinetic energy of free stream in small rivers). The scale factor between the model and the prototype is 1:4,3. The hydraulic machine was tested for different conditions of free stream velocities, and the power efficiency was calculated. The effect of the diffuser enhancement on the conversion of energy was verified for different operational conditions of the machine. The small scale experiment has permitted the optimization of the operation of the machine. The methodology applied in this work proved to be satisfactory.*

Keywords: Hydrokinetic turbines; energy for sustainable development; power coefficient; Speed ratio.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.