

TURBINA HIDROCINÉTICA AXIAL

Sonia Magalhães dos Santos

e-mail: vnsantos@mikrus.com.br

Jorge Alberto Almeida

e-mail: dfsjaa@furg.br

Daniel Alves de Andrade

e-mail: kazoe@bol.com.br

Leonardo Files Dias

e-mail: leonardofiles@bol.com.br

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Av. Itália, km 8 - Campus Carreiros - Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

Resumo. Este trabalho teve como objetivos projetar, construir, instalar e testar uma turbina hidrocínética axial, que funciona através da energia cinética devido à passagem de água pelo rotor, eliminando grandes casas de máquinas, dutos e barragens, pois não exige queda d'água, diminuindo os impactos ambientais. Foi desenvolvido novo procedimento para cálculo dos perfis das pás, baseado em estudos de turbinas eólicas. O diâmetro externo da turbina é de 1,4 m, área útil de 1,47 m², três pás e potência de 1 KVA, podendo operar numa faixa de velocidades d'água de 1,3 m/s a 2 m/s, características da região de Rio Grande/RS. O rotor foi construído com resina poliéster e fibra de vidro. A turbina foi montada numa estrutura móvel, balsa, construída com quatro tonéis de 200 litros, ligados por cantoneiras. Testes feitos na Lagoa dos Patos indicaram uma rotação de 150 rpm e torque de 126 N.m no eixo superior de transmissão. Foram desenvolvidos dois sistemas de transmissão de torque e ampliação de rotação, para obter-se a rotação no alternador de 2054 rpm sem carga e 1800 rpm para a capacidade de carga desejada. O conjunto turbina – estrutura – sistema de transmissão e alternador é robusto e de fácil instalação e manutenção.

Palavras chave: turbina hidrocínética; micro centrais hidrelétricas; geração de eletricidade isolada

1. Introdução

A energia renovável das marés e o fluxo dos oceanos até pouco tempo atrás estava passando despercebida, mas com o provável esgotamento das fontes tradicionais de energia o mundo está se preocupando e buscando fontes alternativas que além de estarem disponíveis em abundância não poluem, destacando-se como energia limpa.

A energia hidrocínética é gerada de grandes fluxos de água, como rios de grandes vazões e que não possuem quedas de água, canais ou das correntes marinhas, usando turbinas completamente submersas. Estas turbinas trabalham no mesmo princípio das turbinas eólicas, entretanto estas usam a energia cinética da água em movimento para a produção de energia, ao contrário das turbinas eólicas onde é usado o ar. A potência que pode ser extraída das correntes é dependente da velocidade do fluxo da água, da área e da eficiência da turbina.

A turbina hidrocínética está em estágio de desenvolvimento, com um pequeno número de protótipos e unidades de demonstração que estão sendo testadas em partes isoladas do mundo (World Energy, 2002).

Os protótipos mais comuns encontrados são as turbinas horizontais e as turbinas verticais. Algumas variantes podem ser usadas nestes dois tipos de turbinas, como o uso de concentradores (ou saias) ou cercas Tidal.

As turbinas horizontais são similares às turbinas eólicas, onde o fluxo é axial ao rotor. Protótipo destas turbinas de até 10 kW foram construídos e testados usando este conceito. Há atualmente algumas plantas a serem instaladas, uma delas na costa sul do Reino Unido usando uma máquina da demonstração de 300 kW.

As turbinas verticais são de fluxo transversal, sendo o exemplo mais conhecido deste modelo a turbina de Darrieus com três ou quatro lâminas finas. Alguns protótipos autônomos foram testados, incluindo uma turbina de 5 kW testada no estreito de Kurushima, Japão. Os estudos mais avançados destes modelos, incluindo as cercas Tidal, estão sendo feitos no Canadá, onde há projetos para instalar um sistema de demonstração de 30 MW nas Filipinas (Blue Energy, 2002).

O princípio das turbinas de águas correntes tem sido utilizado para acionar uma pequena bomba e possibilitar vantagens em um sistema de irrigação, mas também pode funcionar como uma microcentral, principalmente para atender as populações ribeirinhas que vivem em áreas isoladas.

O sistema de energia hidrocínética, tem significativas vantagens sobre sistemas de energia convencionais e outras fontes de energias renováveis. Ela tem uma densidade de energia extremamente elevada, as emissões de gás provocando efeito estufa são zero, opera a um custo baixo e produz um impacto ambiental muito baixo. As vantagens chave que distinguem as correntes do oceano, rios ou lagoas, como uma nova fonte significativa e atrativa da energia são: densidade da água (energia) elevada; ecológica; econômica, versátil e abundante.

As velocidades das correntes são mais baixas que as eólicas, porém devido à densidade mais elevada da água (835 vezes maior do que a do ar) as turbinas são menores do que suas similares eólicas para a mesma capacidade instalada.

A maioria das tecnologias de energia renováveis fornecem eletricidade numa relação produção por área muito pequena. O caso da energia eólica e a solar são exemplos onde se necessita de grandes áreas para pequenas produções tornando-se projetos antieconômicos.

Sendo a água do mar muito mais densa que o ar, conseqüentemente a energia cinética disponível de uma corrente do oceano de 3 m/s é equivalente a uma velocidade do vento de aproximadamente 270 km/h. Em muitos países em torno do mundo, esta tecnologia tem a capacidade de substituir o carvão e as plantas de energia nuclear, podendo produzir eletricidade limpa, de confiança e em grande escala. Uma planta desta forma de energia, instalada em uma passagem do oceano de 1 quilômetro pode produzir mais eletricidade do que uma planta nuclear de grande porte, sem nenhuma poluição, perigo ou emissão radioativa.

O grande volume e as grandes densidades das correntes marítimas, permitem que este tipo de tecnologia gere 200 vezes a energia produzida por outros tipos de energia renováveis dentro de uma mesma área, fazendo com que esta se torne altamente atrativa.

Este sistema é significativamente diferente dos sistemas convencionais de barragens, e depende apenas das correntes do oceano para gerar eletricidade. A disposição das turbinas permite, por serem lentas, que a água e os peixes fluam livremente e com segurança através da estrutura sem causar nenhum impacto. O projeto aberto da comporta e a rotação lenta das turbinas (aproximadamente 25 rpm) permitem uma migração virtualmente desimpedida dos peixes bem como dos sedimentos marinhos. No caso dos mamíferos maiores, estes são protegidos por uma cerca protetora que envolve todo o sistema impedindo um contato dos mesmos com as turbinas em movimento.

O sincronismo do fluxo das marés não é afetado, assegurando-se a integridade dos sistemas marinhos.

Ao contrário dos sistemas maré motrizes convencionais não há a necessidade de construção de barragens para o armazenamento da água das marés viabilizando assim os projetos.

Outra grande vantagem deste sistema é que quando implantado em grande escala este projeto contribuirá significativamente na redução de emissões do gás estufa originado dos combustíveis fósseis, a principal causa da mudança do clima na terra. Uma planta de grande porte deste sistema deixa de produzir até dez milhões de toneladas de CO₂ a cada ano.

Com este sistema espera-se ter um custo importante de competição de custo da potência instalada de US\$1.200/kW para unidades em grande escala, e US\$ 3.000 para sistemas pequenos e gerar a eletricidade em uma taxa competitiva de aproximadamente US\$ 0,06/ kWh, sem os custos ecológicos associados com as fontes de energia convencionais (Blue Energy, 2002).

Uma instalação hidrocínética pode ser instalada em águas profundas bem como águas mais rasas do oceano, ou através de uma passagem onde as velocidades atinjam valores econômicos de projeto. Os modelos variam de 2 kW até as grandes turbinas para o oceano na classe de MW, que podem ser combinadas nas disposições de acordo com a demanda desejada. Estes sistemas ainda podem ter funções múltiplas, como uma ponte para o transporte (estrada, linha do trilho), linhas de telefone, reduzindo os custos do projeto.

A energia do oceano pode ser o maior recurso de energia renovável do planeta. Os exames preliminares mostram um potencial global girando por volta de 450 GW, representando um mercado de mais de US\$ 550 bilhões. Nas áreas onde as pesquisas foram mais detalhadas, estas conduziram à descoberta de locais adicionais que sugerem que nosso recurso real é consideravelmente maior.

Outros projetos importantes desenvolvidos ou em desenvolvimento são:

O do Dept^o. de Engenharia Mecânica da UnB, para atendimento do posto médico Prof. Lúcio Salomão localizado no município de Correntina (BA). A seleção do rio para os testes foi justamente por ele ter muitas correntezas e pouca queda d'água, favorecendo o princípio da energia cinética. A turbina tem as seguintes características técnicas: diâmetro da hélice de 1,8 m; de 6 a 50 rpm; transmissão mecânica com 2 diferenciais e correias; gerador síncrono monofásico de 2 kVA; proteção sobre tensão com controlador eletrônico e regulação eletrônica do campo de excitação (UnB, 1990). A Figura 1 ilustra o desempenho da turbina.

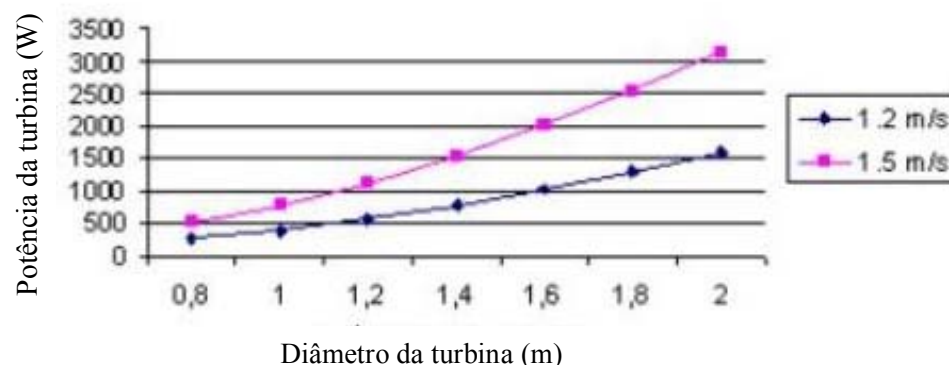


Figura 1. Potência da turbina (W) X Velocidade da água (m/s) X diâmetro da turbina (m) (UnB, 1990).

Para velocidades de correntes menores que 0,8 m/s, a potência torna-se muito baixa para qualquer interesse de aplicação, e neste caso, somente condições extremamente econômicas poderão viabilizar a sua utilização.

O protótipo da empresa *Marine Current Turbines Ltd* que colocará em funcionamento uma turbina de 300 KW na costa norte de Devom no sudoeste da Inglaterra, que consiste em um par de rotores de fluxo axial de aproximadamente 15 m de diâmetro, onde cada turbina está acoplada a um gerador através de uma caixa de engrenagens como ocorre em turbinas eólicas. A turbina é montada em um tubo de aço possuindo um rasgo onde o rotor se desloca e está ligada ao continente por um cabo submarino. Este projeto permite que a turbina quando em manutenção seja suspensa para fora da água facilitando seu acesso dispensando mergulhadores. Para um projeto de uma fazenda com 794 turbinas com custo de US\$ 900 milhões, incluindo a conexão com o continente, a produção chegaria a 1,3 GW/h com um custo de US\$ 0,07 por kWh. A Fig. 2 ilustra o protótipo.

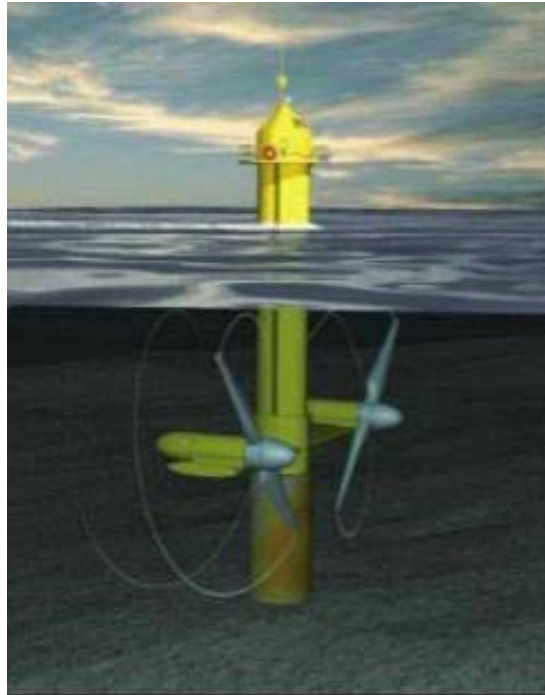


Figura 2. Turbina hidrocínética da empresa *Marine Current Turbines Ltd*, 2002.

O *Amazon Aquacharger* (carregador de baterias) que é um sistema ideal nas áreas onde grandes setores da população vivem em comunidades dispersadas ao longo dos rios e de canais. As comunidades rurais, centros de saúde, escolas, alojamentos turísticos e estações de pesquisa que se situam frequentemente ao longo dos rios são beneficiadas por esta forma de energia. (Thropton Energy Services, 2002).

Conforme Fig. 3, o *Amazon Aquacharger* é um sistema turbina-gerador e controles para ser montado sobre barcos abertos e funciona como um moinho de vento sub-aquático com rotor de três lâminas. A turbina é baixada dentro de um rio ou canal, onde a profundidade é maior que 1,75 m e a velocidade livre da água fica entre 0,45 m/s e 1,5 m/s e pode produzir até 500 W. O uso de uma alta eficiência, baixo atrito no alternador e um projeto aerodinâmico das pás, fazem com que a turbina seja ativada em baixas velocidades de correntes, maximizando o potencial das águas. A potência gerada é armazenada em baterias de 12 V, e pode ser utilizada em refrigeradores, luzes, TVs portáteis, equipamentos de comunicação e inversores para operar em aplicações de 120 ou 240 V.

As características do sistema são:

A baixa velocidade da água que o sistema requer para operação permite que ele seja versátil, podendo ser empregado na maioria dos rios; possui a capacidade de carregar seis baterias de 12V simultaneamente; usa a energia renovável e não necessita nenhum combustível ou óleo; é fácil de operar-se e manter; provou ser altamente apropriado para o uso em posições isoladas; quase totalmente silencioso ao funcionar; não necessita nenhum trabalho de engenharia civil de grande escala; diâmetro da turbina de 1,8 m; simples de ser montado, desmontado e transportado para recolocações; pode funcionar 24 horas por dia e ser totalmente independente; o rotor é protegido do chão e de objetos flutuantes; possui controle que liga automaticamente o sistema quando as baterias atingem o limite inferior pré-estabelecido e o desliga quando as mesmas atingem a carga máxima; possui controle automático que baixa e levanta a turbina, podendo este ser realizado manualmente e necessita de um barco aberto com comprimento mínimo de 5 m.

Embora os custos de operação sejam baixos, o custo de instalação de um sistema de energia renovável é mais elevado do que um gerador a diesel equivalente. Para compensar o custo elevado inicial, a vida de serviço longa e a confiabilidade elevada são uma exigência. O propósito deste sistema não é um atrativo para as grandes companhias e ainda está muito longe de ser economicamente atrativo para os grandes centros consumidores mas sim para comunidades isoladas na beira de rios como mostra a Fig. 3.



Figura 3. Turbina hidrocínética da empresa *Thropton Energy Services*, 2002.

O trabalho aqui apresentado baseou-se nos projetos desenvolvidos ou em desenvolvimento no mundo e teve como objetivos projetar, construir, instalar e testar uma turbina hidrocínética axial. Foi desenvolvido novo procedimento para cálculo dos perfis das pás, baseado em estudos de turbinas eólicas, podendo operar numa faixa de velocidades d'água de 1,3 m/s a 2 m/s, características da região de Rio Grande/RS.

2. Projeto da turbina hidrocínética

Com base nos projetos desenvolvidos pela UnB (1990), construiu-se uma turbina hidrocínética com as características apresentadas na Tab. 1:

Tabela 1. Características de projeto do rotor da turbina

	Descrição da característica	Valor	Unidade	Observações
d_e	Diâmetro externo da turbina	1,40	m	
d_i	Diâmetro interno da turbina	0,30	m	
v	Velocidade da corrente de água	1,60	m/s	
W_c	Potência de projeto para a condição real	1,20	kW	
W_{ct}	Potência de projeto ou potência teórica da turbina	3,00	kW	
η	Rendimento global da turbina	40	%	
n	Rotação para a condição real da turbina	33,60	rpm	6 a 50 rpm (UnB, 1990).

Para que se possa aplicar a metodologia para projeto de turbinas axiais proposta por Souza, 1991, deve-se transformar a energia cinética em energia potencial, sendo que esta é aplicada em função da altura da queda da água, de acordo com Eq. 1.

$$W_p = A * v * \rho * g * h \quad (1)$$

onde:

W_p =Potencia gerada devido à altura equivalente h (W)

A = Área útil das lâminas do rotor (m²)

v = Velocidade da água (m/s)

ρ = Massa específica da água (kg/m³)

g = Aceleração da gravidade (m/s²)

h = Altura equivalente à energia cinética (m).

A equação da potência devido à energia cinética é representada pela Eq. 2:

$$W_c = \frac{1}{2} (A * v) * \rho * v^2 \quad (2)$$

Entretanto, para casos práticos de funcionamento do dispositivo em rios ou correntes marítimas, esta energia não está totalmente disponível para a extração, pois a água não pode simplesmente parar quando passa da turbina; necessita de alguma velocidade, o que representa energia para se mover, afastando-se assim da saída da turbina. Além deste fator tem-se também as ineficiências da própria turbina, denotadas pelo seu coeficiente de desempenho C_p .

De acordo com Worl Energy, 2002, verifica-se que o máximo valor de C_p para um dispositivo semelhante em funcionamento num rio é de 16/27 ou 0,592.

Aplicando-se este fator à equação (2), a potência devido à energia cinética é representada pela Eq. 3:

$$W_c = \frac{8}{27} A * \rho * v^3 \quad (3)$$

Para determinar a altura equivalente à energia cinética produzida (h), deve-se igualar as Eqs. 1 e 3, obtendo-se:

$$h = \frac{8 * v^2 * \cos \theta}{27 * g} \quad (4)$$

A partir da Eq. 4 a determinação das dimensões do rotor será feita seguindo a metodologia proposta por Souza, 1991.

Para efeito de cálculos será suposto que o sentido de fluxo é axial ao eixo da turbina, considerando que esta é a situação mais crítica e é onde ocorrem os maiores esforços.

Aplicando-se os parâmetros hidráulicos do projeto ao conjunto de Eqs. 4 a 22, obtém-se os dados de projeto do rotor da turbina, de acordo com as Tabs. 1 e 2, onde estão definidas as variáveis envolvidas:

$$d_i = d_e * r \quad (5)$$

$$A = \pi * \frac{(d_e^2 - d_i^2)}{4} \quad (6)$$

$$W_{ct} = \frac{W_c}{\eta} \quad (7)$$

$$Y = g * h \quad (8)$$

$$Q = v * A \quad (9)$$

$$n_{qA} = 10^3 * n * \frac{Q^{0,5}}{Y^{0,75}} \quad (10)$$

$$Z = 19,993 - 4,932 * 10^{-2} * n_{qA} + 4,650 * 10^{-5} * n_{qA}^2 - 1,412 * 10^{-8} * n_{qA}^3 \quad (11)$$

$$v_m = \frac{4 * Q}{\pi * (d_e^2 - d_i^2)} \quad (12)$$

$$t_i = \frac{\pi * d_i}{Z_{ADOTADO}} \quad (13)$$

$$L_i = (1,689 + 2,368 * 10^{-3} * n_{qA} - 7,235 * 10^{-6} * n_{qA}^2 + 4,302 * 10^{-9} * n_{qA}^3) * t_i \quad (14)$$

$$u_i = \pi * n * d_i \quad (15)$$

$$\frac{\Delta v_{ui}}{2} = \frac{Y * \eta_h}{2 * u_i} \quad (16)$$

$$\beta_{\infty i} = \arctan \left[\frac{v_m}{u_i - \frac{\Delta v_{ui}}{2}} \right] \quad (17)$$

$$w_{\infty i} = \frac{v_m}{\text{sen } \beta_{\infty i}} \quad (18)$$

$$c_{si} = \frac{2 * Y * \eta}{Z * n * L_i * w_{\infty i}} \quad (19)$$

$$u_e = \pi * n * d_e \quad (20)$$

$$\frac{\Delta v_{ue}}{2} = \frac{Y * \eta}{2 * u_e} \quad (21)$$

$$\beta_{\infty e} = \arctan \frac{v_m}{u_e - (\Delta v_{ue} / 2)} \quad (22)$$

O comprimento da corda do perfil no diâmetro externo (L_e) foi obtido através de uma lei de formação inovadora para turbinas hidráulicas, a partir do projeto de turbinas eólicas (Eggleston e Stoddart, 1987), conforme Fig. 4.

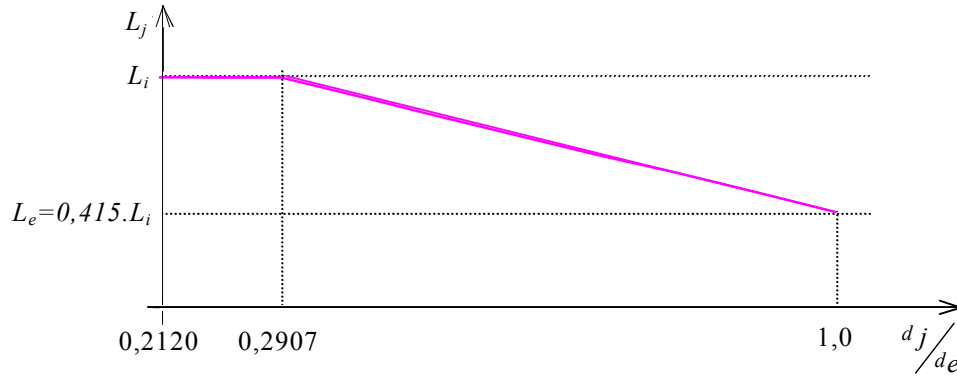


Figura 4. Lei de formação inovadora do perfil da pá do rotor.

Conforme Fig. 4, a lei de formação inovadora do perfil da pá do rotor propõe que L_j seja igual a L_i até d_j/d_e atingir 0,2907 e que L_e atinja 41,5% do valor de L_i . Assim, os valores de L_j são obtidos a partir da Eq. 23, onde:

d_i = diâmetro interno do rotor (m)

d_e = diâmetro externo do rotor (m)

d_j = diâmetro genérico do rotor, variando de d_i a d_e (m)

$$L_j = -304,66 \times (d_j / d_e) + 458,06 \quad (23)$$

A lei de formação do comprimento das seções dos perfis do rotor permitiu que o comprimento do perfil externo, L_e se tornasse menor do que o comprimento do perfil interno, L_i , o que era desejado conforme Fig. 2.

As Eqs. 24 a 34 complementam os cálculos das dimensões do rotor da turbina (Souza, 1991).

$$F = 1300 * h * \frac{(L_i + L_e) * (d_e - d_i)}{4} \quad (24)$$

$$M_f = F * \frac{(d_e - d_i)}{4} \quad (25)$$

$$e_{gi} = 7,365 \times 10^{-3} * \sqrt[3]{M_f} \quad (26)$$

$$e_{ge} = 0,33 * e_{gi} \quad (27)$$

$$D_p = 1,5 * e_{gi} \quad (28)$$

$$\tau = \frac{6 * M_f}{D_p * e_{gi}^2} \quad (29)$$

$$f_j = \frac{(e_g / L)_j}{0,112} \quad (30)$$

$$y_{gi} = 0,5 * e_{gi} + 0,014 * f_i * L_i \quad (31)$$

$$y_{ge} = 0,5 * e_{ge} + 0,014 * f_e * L_e \quad (32)$$

$$y_{máxi} = 1,02 * e_{gi} + 0,011 * f_i * L_i \quad (33)$$

$$y_{máxe} = 1,02 * e_{ge} + 0,011 * f_e * L_e \quad (34)$$

Tabela 2. Parâmetros hidráulicos e dados de projeto do rotor da turbina

	Descrição do parâmetro	Eq.	Valor	Unidade	Observações
h	Altura equivalente à energia cinética	4	0,08	m	
A	Área útil do rotor	6	1,47	m ²	
Y	Trabalho específico	8	0,759	m ² /s ²	
Q	Vazão através da turbina	9	2,35	m ³ /s	
n_{qA}	Rotação específica genérica	10	1056,70	rps	240 a 1060 para turbinas axiais
v_m	Velocidade meridional	12	1,6	m/s	
t_i	Passo no diâmetro interno	13	0,31	m	
L_i	Corda do perfil no diâmetro interno	14	0,3694	m	
u_i	Velocidade tangencial no diâmetro interno	15	0,522	m/s	
$\frac{\Delta v_{u_i}}{2}$	Componente da velocidade absoluta na direção tangencial no diâmetro interno	16	0,29	m/s	
$\beta_{\infty i}$	Ângulo do escoamento não perturbado com a direção tangencial no diâmetro interno	17	81,7	graus	
$w_{\infty i}$	Velocidade relativa do escoamento não perturbado no diâmetro interno	18	1,62	m/s	
c_{si}	Coefficiente de sustentação para o perfil no diâmetro interno	19	0,6067		Para $C_{si} \leq 1,20$
u_e	Velocidade tangencial no diâmetro externo	20	2,46	m/s	
$\frac{\Delta v_{u_e}}{2}$	Componente da velocidade absoluta na direção tangencial no diâmetro externo	21	0,0617	m/s	
$\beta_{\infty e}$	Ângulo do escoamento não perturbado com a direção tangencial no diâmetro externo	22	33,62	graus	
L_e	Comprimento da corda do perfil no diâmetro externo		0,1534	m	Lei de formação inovadora da Eq. 23
F	Força que atua na pá, no diâmetro médio	24	143,9	N	Para sobrepressão de 30% pelas variações das correntes de água
M_f	Momento fletor que atua na pá	25	40	N.m	
e_{gi}	Espessura mínima no centro de gravidade do perfil interno	26	0,035	m	Adotou-se: $e_{gi} = 0,04m$
e_{ge}	Espessura mínima no centro de gravidade do perfil externo	27	0,015	m	Adotou-se o mesmo valor calculado
D_p	Diâmetro do pino de fixação da pá ao cubo do rotor	28	0,06	m	
τ	Tensão máxima atuante na pá	29	$250 \cdot 10^4$	N/m ²	
f_i	Fator de engrossamento e/ou afinamento do perfil interno	30	0,85		
f_e	Fator de engrossamento e/ou afinamento do perfil externo	30	0,87		
y_{gi}	Ordenada do perfil no diâmetro interno no centro de gravidade	31	0,0269	m	
y_{ge}	Ordenada do perfil no diâmetro externo no centro de gravidade	32	0,0077	m	
y_{maxi}	Ordenada máxima do perfil no diâmetro interno	33	0,0391	m	
y_{maxe}	Ordenada máxima do perfil no diâmetro externo	34	0,0164	m	

3. Construção do Rotor da Turbina

Para cada secção do perfil da pá foram calculados seus pontos superiores e inferiores (y_s' e y_i') para cada tamanho de corda (L). Com isto obteve-se 11 perfis desenhados em papel em escala 1x1. Logo após, foram reproduzidos numa chapa de alumínio. A Fig. 5 mostra o perfil interno (i), com coordenadas em mm.

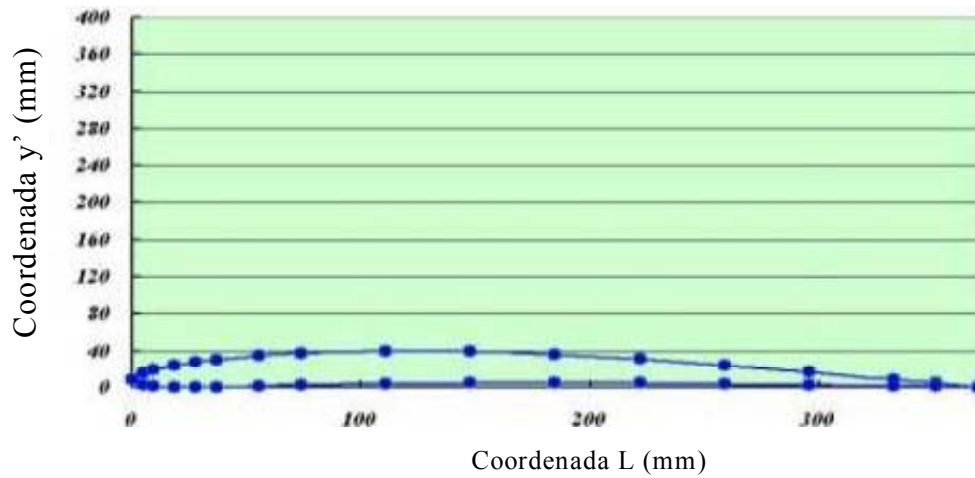


Figura 5. Perfil interno (i) da pá do rotor da turbina.

Para montar-se a estrutura do molde os perfis em alumínio foram ligados através de seu centro de gravidade com um arame de construção, conforme Fig. 6. Isto deu o apoio necessário para que fosse possível, através de um transferidor dar o ângulo correto (β) de secção a secção. Tacos de maneira cortados na medida certa deram certeza que todos os pontos de um perfil ficassem eqüidistantes do perfil seguinte.



Figura 6. Estrutura do molde da pá do rotor com os perfis em alumínio.

Para a construção do molde, Fig. 7, foi utilizada massa plástica, mistura de resina poliéster com pigmentos (conhecida como pó industrial) formando uma pasta fácil de trabalhar e com bom rendimento. Foram colocados pinos de sustentação no interior das pás e que vão prender as pás no flange.



Figura 7. Molde da pá do rotor da turbina.

As pás foram reproduzidas através do método manual de laminação. Foi aplicada uma cera desmoldante sobre o molde; logo após depositou-se uma manta de fibra de vidro umedecida com resina poliéster utilizando pincel e um rolo eliminando quase que totalmente as bolhas que poderiam se formar causando um efeito não desejável. A reprodução da pá utilizando este método atingiu um efeito esperado e um ótimo acabamento que foi finalizado com a aplicação de gel onde foram eliminadas as imperfeições superficiais. Os espaços vazios foram preenchidos com resina, que foi aplicada de maneira controlada e gradativa em função da reação química da resina x catalisador quando ocorre um aumento significativo da temperatura. A Fig. 8 mostra as 3 pás reproduzidas.



Figura 8. Pás do rotor da turbina em fibra de vidro com resina poliéster.

O cubo do rotor foi confeccionado utilizando um duto de 300 mm, correspondendo ao diâmetro do perfil interno das pás (d_i). A Fig. 9 mostra o rotor montado.



Figura 9. Rotor da turbina montado.

4. Montagem da Turbina

A próxima etapa é dimensionar o sistema que vai transmitir a potência gerada pela turbina através de seu torque e rotação a um gerador. A Fig. 10 mostra a montagem da árvore de transmissão com coroa e pinhão ligados por corrente.

O método utilizado para o dimensionamento da árvore de transmissão foi o da Teoria de Tresca-Soderberg, segundo Deutschman, 1990, obtendo-se os valores mostrados na Tab. 3.

Tabela 3. Dados do sistema de transmissão

Elemento	Valor	Unidade
Diâmetro do Eixo	0,0254	m
Coroa	52	dentes
Pinhão	11	dentes
Comprimento do eixo submerso	0,700	m
Eixo Superior	0,500	m
Relação de Transmissão	4,7	
Passo da corrente	0,0127	m

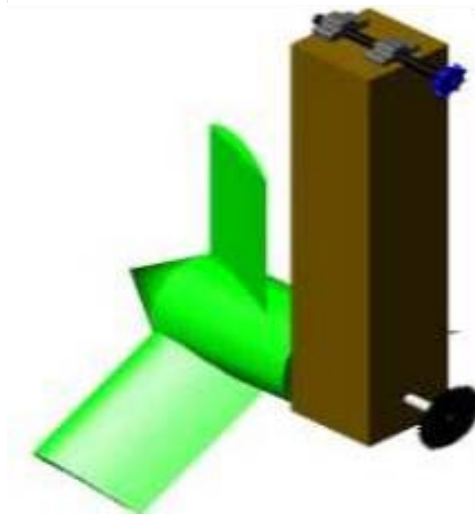


Figura 10. Montagem da árvore de transmissão.

Para sustentar a turbina foi escolhida uma estrutura do tipo móvel, pois o que se precisa fazer é só transportá-la até a água. A alternativa encontrada para flutuação da estrutura foi a de usar tonéis de 200 litros que deram um bom empuxo devido ao seu grande volume. Com eles foi construída uma balsa toda montada em cantoneiras soldadas de 1 ¼" com espessura de 1/8". As partes móveis foram fixadas com parafusos de 3/8". A construção da balsa partiu do princípio que a turbina fosse independente da balsa facilitando assim o transporte do laboratório até a água. Na Fig. 11 pode-se ver a o desenho da balsa e a turbina montadas. A quantidade de tonéis foi suficiente para comportar o peso da turbina, a estrutura e duas pessoas que somavam juntas 160 kg.

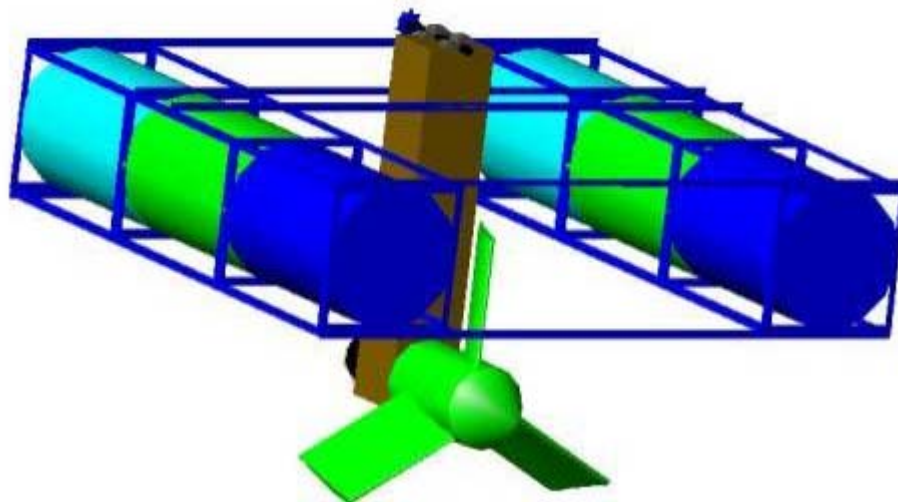


Figura 11. Turbina Montada na Balsa.

5. Testes da Turbina

Os testes foram feitos de maneira controlada rebocando a balsa utilizando um barco no Estuário da Lagoa dos Patos, próximo a Rio Grande/ RS, gerando uma correnteza artificial com velocidade medida por um sistema de posicionamento global GPS. Assim foi possível levantar o comportamento da turbina, seu torque e rotação, sendo importantes para o desenvolvimento do sistema de ampliação. A Tab. 4 mostra os dados fundamentais obtidos nos testes e a Fig. 12 apresenta a turbina sendo rebocada pelo barco e estão sendo feitas medições de torque e rotação.

Tabela 4. Dados Fundamentais Obtidos nos Testes

Parâmetro	Valor	Unidade
Velocidade do Barco	1,3	m/s
Rotação no eixo superior	150	rpm
Torque	126	N.m
Rotação no eixo submerso	50	rpm



Figura 12. Turbina sendo rebocada pelo barco e medições de torque e rotação.

Os valores de torque encontrados estão dentro da especificação atribuída ao gerador, já que este necessita para gerar o valor proposto no projeto, 1 kVA, um torque mínimo de 12 N.m. Mas só o torque não satisfaz pois é necessária uma rotação mínima para que o gerador funcione. Como a rotação máxima obtida no eixo superior foi de 150 rpm, então desenvolveu-se um sistema de ampliação que transformará a rotação fornecida ao eixo superior pela turbina em uma rotação maior que 1800 rpm.

A Fig. 13 apresenta a disposição do sistema de ampliação constituído de correias e polias.

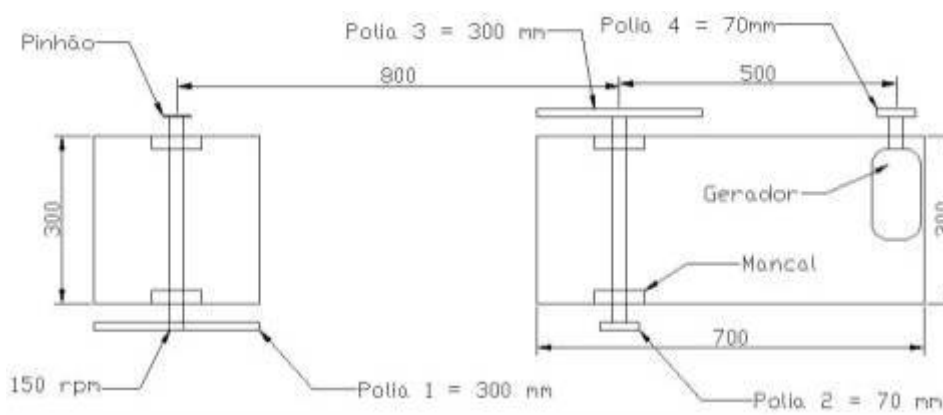


Figura 13. Disposição do Sistema de Ampliação.

A rotação no eixo da polia 2 será encontrada pela igualdade da velocidade tangencial, de acordo com a Eq. 35:

$$n_2 = \frac{n_1 \times r_1}{r_2} \quad (35)$$

As Eqs. 36 e 37 permitem encontrar a rotação que é transmitida da polia 3 para a polia 4, obtendo-se assim a rotação no eixo do gerador.

$$n_3 = n_2 \quad (36)$$

$$n_3 \times r_3 = n_4 \times r_4 \quad (37)$$

A Tab. 5 apresenta os resultados de rotação obtidos com o sistema de transmissão da Fig. 13.

A rotação encontrada satisfaz as condições impostas pelo gerador, tendo uma sobra de 955 rpm, que dará segurança para o gerador realmente produzir 1 KVA alcançando os objetivos do projeto.

Tabela 5. Rotações obtidas com o sistema de ampliação.

Parâmetro	Descrição do Parâmetro	Valor	Unidade
r_1	Raio da polia 1 (ligada ao eixo do pinhão)	0,150	m
n_1	Rotação do eixo da polia 1	150	rpm
r_2	Raio da polia 2	0,035	m
n_2	Rotação do eixo da polia 2	642,9	rpm
r_3	Raio da polia 3	0,150	m
n_3	Rotação do eixo da polia 3	642,9	rpm
r_4	Raio da polia 4 (ligada ao eixo do gerador)	0,035	m
n_4	Rotação do eixo da polia 4	2755	rpm

6. Conclusões

O projeto executado faz parte das atividades do grupo de pesquisa em Fontes Alternativas de Energia do Departamento de Física da FURG, que estuda a produção de energia dentro de seu ecossistema costeiro. As condições locais de Rio Grande/RS numa região sem quedas d'água porém com mananciais abundantes de correntes de água de baixa velocidade motivou a realização deste projeto. O desafio proposto de projetar, construir e instalar uma turbina hidrocínética axial, foi plenamente atingido. A turbina desenvolvida apresentou condições de torque e rotação que permitem gerar 1 kVA num alternador com carga instalada. O conjunto é de fácil instalação, manutenção e acesso para obtenção das variáveis envolvidas durante a sua operação.

Referências Bibliográficas

- Blue Energy Canada Inc, "Davis Hydro Turbine Prototypes", www.bluenergy.com, acesso em 18/11/2002.
 Deutschaman, A. D. , "Machine Design Theory and Practice", USA, Macmillan Publishing Co. Inc., 1990.
 Eggleston, D. M. ; Stoddard, F. S., "Wind Turbine Engineering Design", New York , Ed. Van Nostrand Reinhold, 1987.
 Marine Current Turbines Ltd," Energy derived from the oceans' currents", www.marineturbines.com, acesso em 18/11/2002.
 Souza, Z., "Dimensionamento de Máquinas de Fluxo:Turbinas, Bombas, Ventiladores", SP. Edgar Blücher Ltda, 1991.
 Thropton Energy Services,"Amazon Aquacher", www.throptonenergy.com, acesso em 18/11/2002.
 Universidade de Brasília, "Projeto Turbina Hidrocínética", www.turbinahidrocinetica.com.br, acesso em 18/11/2002.
 World Energy, "Situação da Energia no Mundo", www.worldenergy.org, acesso em 20/10/2002.

WATER CURRENT TURBINE

Sonia Magalhães dos Santos

e-mail: vnsantos@mikrus.com.br

Jorge Alberto Almeida

e-mail: dfsjaa@furg.br

Daniel Alves de Andrade

e-mail: kazoe@bol.com.br

Leonardo Files Dias

e-mail: leonardofiles@bol.com.br

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Av. Itália, km 8 - Campus Carreiros - Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

Abstract

This work had as goal to project, build, install and test an axial hydrokinetic turbine, nominated water current turbine, which uses the kinetic energy due to the water flow across the rotor, eliminating big powerhouses, ducts and dams, because it does not require the existence of waterfalls, decreasing the environmental impact. A new procedure to calculate blade profile was developed, based in wing turbine studies. The turbine has an outside diameter of 1.4 m and a useful area of 1.47 m². It has three blades, and it operates at 1 kVA power, with water speed ranging from 1.3 to 2.0 m/s. The environment conditions are those of the geographic area of Rio Grande, RS, Brazil. The rotor was built using polyester resin and fiberglass. The turbine was mounted in a mobile structure with four barrels of 200 liters, linked by L-brackets. Tests performed at the Patos Lake indicated a 150-rpm rotation and a 126 N.m torque in the transmission top axis. Two torque transmission and rotation amplification systems were developed, to acquire an alternator rotation of 2054-rpm with no charge and an alternator rotation of 1800-rpm at the desired charge. The array turbine – structure – transmission system and alternator is robust and easy to install and repair.

Keywords: water current turbine; micro central hydroelectric; isolated electricity generation.