



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



DIMENSIONAMENTO E MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS PÁS DE UMA TURBINA PELTON PARA SER APLICADA A UMA BANCADA DIDÁTICA

Claudia Vanessa Kraulich (FAHOR) ck000979@fahor.com.br

Ana Paula Ost (FAHOR) ao000987@fahor.com.br

Ademar Michels (FAHOR) michelsademar@fahor.com.br

Resumo

A utilização de bancadas didáticas como método que venha a ampliar e facilitar a qualificação de futuros Engenheiros que sejam capacitados à dimensionar, projetar e analisar máquinas de fluxo, tem evoluído significativamente frente à complexidade do funcionamento das turbinas hidráulicas, sendo assim, o objetivo do presente estudo é dimensionar as pás de uma Turbina tipo Pelton para ser aplicada à uma bancada didática que simule o comportamento de uma Central Hidrelétrica. As turbinas Pelton além de serem largamente utilizadas para geração de energia elétrica em pequenas e grandes centrais hidrelétricas, possibilitam a simulação da queda d'água, justamente, por serem indicadas para situações de grandes variações de altura e pequenas vazões volumétricas, sendo, portanto, indicadas para este fim. Como metodologia de pesquisa definiu-se o estudo teórico pelo fato de utilizar-se de embasamento teórico sobre as características funcionais e construtivas das turbinas Pelton. Como principais resultados de pesquisa apresentam-se um memorial de cálculo das pás do rotor, bem como o modelo computacional da pá que através dos cálculos se mostra adequado as características funcionais pré-determinadas para a turbina de bancada.

Palavras-chave: Turbina Pelton; Pás; Bancada Didática; Memorial de Cálculo.

1. Introdução

As turbinas hidráulicas dividem-se em diversos tipos, sendo os principais: Pelton, Francis, Kaplan e Bulbo. A escolha do tipo de turbina varia conforme a aplicabilidade, cada tipo é indicado para funcionar em uma determinada faixa de vazão e queda.

Como a intenção deste trabalho é a aplicação em uma bancada didática que simule uma Central Hidrelétrica com uma turbina hidráulica de vazão $0,005\text{m}^3/\text{s}$, altura de 20m e rotação de 500RPM, o tipo de turbina escolhido é do tipo Pelton. As turbinas Pelton são utilizadas justamente em casos como este, ou seja, em grandes variações de altura e pequenas vazões volumétricas, possibilitando a simulação da queda d'água através de uma bomba.

Sendo assim, este estudo objetiva o dimensionamento e modelagem do

principal elemento construtivo de uma turbina hidráulica: as pás. As pás constituem o rotor da turbina, onde ocorre a transformação de energia de fluido em energia mecânica.

Além disto, devido a complexidade dos cálculos busca-se apresentar ao final deste trabalho um memorial de calculo que possa ser útil para outros estudos similares, o que acarretará na otimização do tempo e entendimento.

2. Revisão da Literatura

2.1 Configurações da Turbina Pelton

A turbina Pelton, inventada pelo americano Lester Allan Pelton no ano de 1870, é uma típica turbina de impulsão. É constituída basicamente de um bico injetor e de um rotor. O rotor possui varias pás em torno de sua circunferência, o jato atinge as pás a uma pressão constante a qual impulsiona a turbina (MACINTYRE, 1983).

É comumente utilizada em usinas cuja altura da queda d'água é maior do que 250m, embora seja também utilizada para alturas menores. Há instalações de usinas nos Alpes suíços em que a altura chega a quase 1.800m. (COSTA, 2003).

As pás possuem um formato característico de concha (figura 1) que desvia o fluxo para uma direção quase oposta a direção de origem. As conchas tem cavidades duplas para distribuir o fluxo igualmente para cada lado de modo que os esforços axiais se anulam.



Figura 1 – Turbina Pelton. Fonte: Brasil, 2010.

Essas turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal. O eixo vertical torna possível a incidência de quatro a seis jatos, enquanto que o eixo horizontal permite no máximo a incidência de dois jatos, contudo é mais econômico, pois permite um acesso mais fácil para manutenções e reparos que as pás possam necessitar, não havendo a necessidade de desmontar a turbina para realização dos mesmos. O melhor rendimento total possível é quando o rotor Pelton com eixo horizontal é acionado por um só jato. O eixo vertical permite maiores velocidades e é preferido em grandes instalações (PFLEIDERER, 1979).

A incidência de jatos sobre o rotor, em cada volta, depende do número destes, de modo que, quanto maior a queda, menor deverá ser o número de impactos sobre a pá por minuto, do mesmo modo, quanto maior o número de jatos, maior a potência

para uma mesma queda e também maior será o desgaste por abrasão, caso a água contiver areia em suspensão (MACINTYRE, 1983).

2.2 Número de Jatos

Para determinação do número de jatos, Macintyre (1983), sugere a utilização da seguinte fórmula, onde H é dado em pés, n em rpm e N em cv:

$$a = \left(\frac{n \sqrt{N}}{25 \times H(\text{pés})} \right)^2 \quad (1)$$

A escolha do número de jatos pode ainda se dar de maneira gráfica utilizando-se do gráfico da Hitachi (Figura 02), desde que conheçamos a altura de queda (H) e os valores de potência (N):

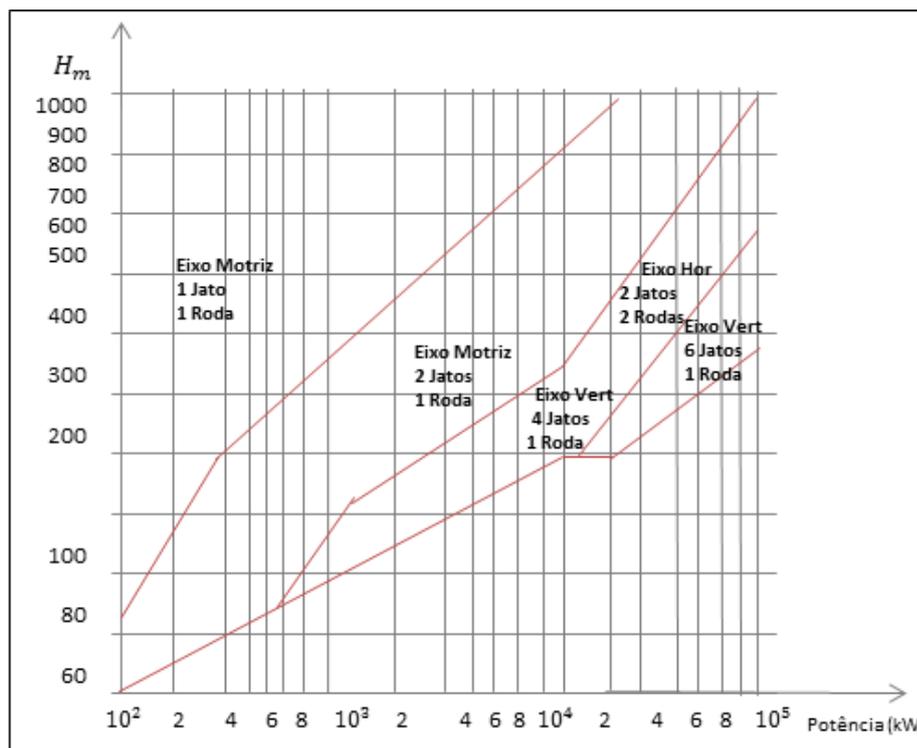


Figura 2: Gráfico de Hitachi para escolha do número de jatos em turbinas Pelton. Fonte: Adaptado de Macintyre (1983).

Ou ainda baseado na velocidade específica, em conjunto com o uso do gráfico da figura 3 que indica o número de jatos em função da velocidade específica. Neste caso a velocidade específica será:

$$n_s = \frac{n \times \sqrt{N}}{H \times \sqrt[4]{H}} \quad (2)$$

Sendo:

n = rotação (rpm);

N = potência (cv);

H = altura de queda (m).

De acordo com o gráfico a turbina recomendada será de 01 jato.

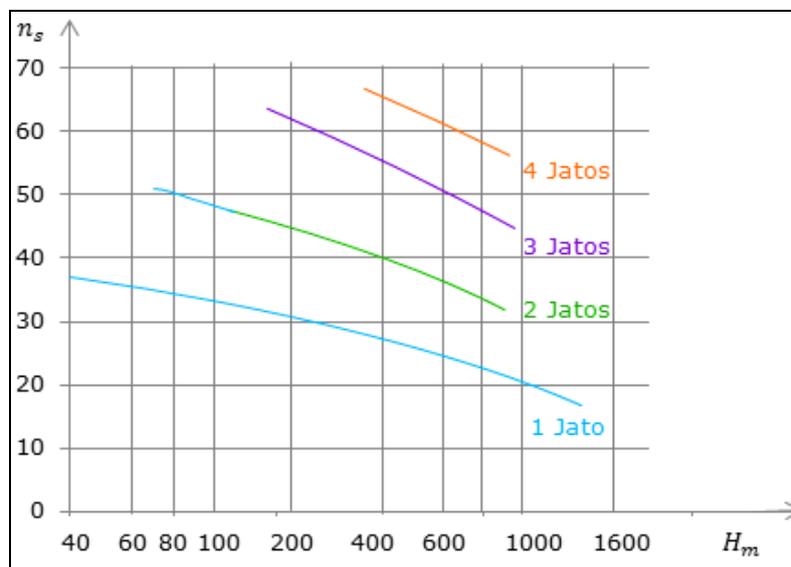


Figura 3 – Gráfico número de jatos (Turbina Pelton). Fonte: Adaptado de Macintyre, 1983.

2.3 Forma e Dimensões da Pá

As pás da turbina Pelton são a parte que exige maior cuidado no projeto e execução, pois delas dependerá o bom funcionamento da máquina. A pá possui duas partes côncavas onde a água age para transformar energia cinética em trabalho mecânico. No centro existe um gume, para receber a água sem choque, dividindo o jato em duas partes iguais.

A forma característica da pá está indicada na Figura 4, que representa uma vista frontal e em corte. A parte superior do gume (c) nunca deve ser atingida pelo jato. Na ponta extrema da pá pratica-se um rasgo que impede que qualquer partícula tenha sua trajetória relativa fora da superfície côncava da pá.

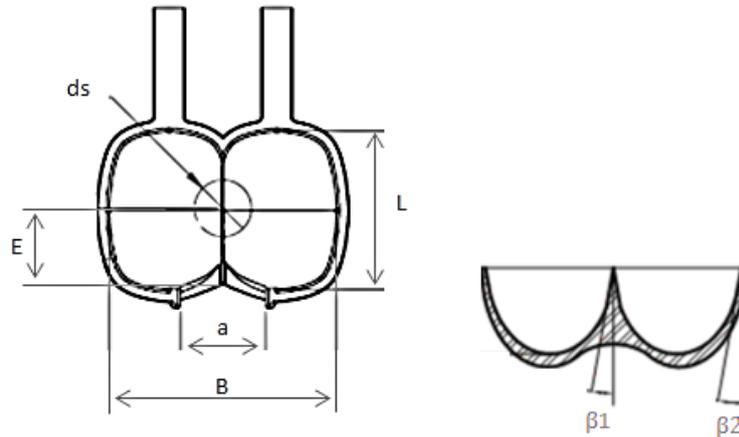


Figura 4– Pá de turbina Pelton. Fonte: Adaptado de Pfeleiderer, 1979.

O dimensionamento da pá é feito exclusivamente mediante dados práticos e em função do máximo diâmetro do jato dado pela fórmula (PFLEIDERER, 1979):

$$d_{max} = 151 \sqrt{\frac{N}{a \times \eta}} \quad (3)$$

Onde:

N1 = potencia unitária (cv)

a = numero de jatos

η = rendimento total da turbina

O diâmetro máximo do jato pode ainda ser determinado pela formula de Macintyre (1983):

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi c_1}} \quad (4)$$

Onde:

Q = vazão volumétrica (m³/s)

c1 = velocidade do jato na saída do injetor (m/s)

Da mesma forma a velocidade do jato na saída do rotor será dada pela equação:

$$c_1 = \varphi \sqrt{2gH} \quad (5)$$



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



Onde:

φ = coeficiente de velocidade (adimensional)

g = gravidade (m/s^2)

H : altura (m)

De acordo com Pfeleiderer (1979), a superfície das pás deve ser conveniente para a direção radial de admissão do jato, ela é formada de maneira que ao longo de toda a aresta de saída elíptica exista um ângulo da pá β_1 suficientemente pequeno. O ângulo β_1 deve ser tomado sempre menor que o ângulo de fluxo β_0 podendo ser determinado como aproximadamente:

$$\beta_0 - \beta_1 = 15^\circ \frac{d_{max}}{B} \quad (6)$$

Onde:

d_s : diâmetro máximo do jato;

B : largura da pá

Deve-se tomar sempre o valor mais próximo possível do limite, entre 4° e 7° , sendo este valor condicionado pelo fato de que o jato existente na carga total não deve alcançar a próxima pá.

A largura B da pá é limitada pelo raio de curvatura que na superfície interna do jato não deve ser muito pequeno. Desejando-se o máximo rendimento a carga total, deve-se tomar B como:

$$B = (3,5 \text{ a } 4).d_{max} \quad (7)$$

No plano mais longitudinal do rotor perpendicular ao eixo do jato, coloca-se o ponto mais interno da aresta de entrada junto no limite do jato e o ponto mais externo a uma distância E conforme a equação:

$$E = (0,9 \text{ a } 1,2).d_{max} \quad (8)$$

A pá recebe um recorte na parte mais externa a largura, de maneira que o jato não alcance a pá muito cedo, sendo definido por Pfeleiderer (1979) conforme equação:

$$a = 1,2.d_{max} + 5 \quad (9)$$



3ª SEMANA INTERNACIONAL DAS ENGENHARIAS DA FAHOR

Horizontina - RS - Brasil
16 a 18 de Outubro de 2013



Para o restante das dimensões principais a prática aconselha a utilização dos valores encontrados pelas seguintes equações (MACINTYRE, 1983):

$$L = (2,5 \text{ a } 2,8).d_{max} \quad (10)$$

$$T = (0,8 \text{ a } 1,0).d_{max} \quad (11)$$

Onde:

L = Comprimento da pá (mm);

T = espessura da pá (mm).

3. Métodos e Técnicas

Para realização deste trabalho foi utilizado material de apoio bibliográfico para a etapa de dimensionamento das pás da turbina Pelton. O resultado obtido através dos cálculos foi descrito computacionalmente utilizando-se a ferramenta de modelamento 3D disponível no software SolidWorks 2012.

De acordo com Severino (2000), um ensaio teórico consiste na exposição lógico-reflexiva com ênfase na argumentação e interpretação pessoal. A pesquisa inicia-se então por meio de pesquisa bibliográfica, priorizando a consulta de obras de autores considerados referência sobre o tema proposto.

Nestes processos, de acordo com a recomendação de Cervo e Bervian (2002), adotou-se a seguinte abordagem: visão sincrética - leitura de reconhecimento que tem o propósito de localizar as fontes em uma aproximação preliminar sobre o tema; visão analítica - caracteriza-se como uma leitura crítico/reflexiva dos textos selecionados; visão sintética – é interpretativa e de síntese.

De acordo com Gil (1999), o estudo pode ainda ser caracterizado por sua finalidade descritiva, pelo fato de apresentar, neste caso, como objetivo principal a descrição de um método de cálculo para dimensionamento das pás de uma turbina Pelton.

4. Resultados e discussões

Com base nos estudos e pesquisas definiu-se um memorial de cálculo para o dimensionamento das pás de uma turbina Pelton.

Antes de iniciar os cálculos, é preciso reunir algumas informações com a equipe do projeto. Há dados que são constantes (tabela 1) e outros que precisam ser determinados dependendo da aplicabilidade da turbina (tabela 2).

Os dados variáveis para este estudo baseiam-se na aplicação da turbina, ou seja, à bancada didática, e foram fornecidos pela equipe de projeto da mesma.

Tabela 1
Dados constantes

Dados Constantes	
Gravidade (g)	9,81 m/s ²
Massa específica da água (ρ)	1000 kg/m ³
Coefficiente de velocidade (φ_v)	0,99

Fonte: Os autores

Tabela 2
Dados variáveis

Dados Variáveis	
Potência turbina (P)	1000 W
Altura da queda (H)	20 m
Rotação motor (n)	500 rpm
Coefficiente de pressão (ψ)	5
Numero de jatos (z)	1
Rendimento (η)	90 %

Fonte: Os autores

Após os dados definidos, parte-se para os cálculos, na seguinte ordem:

- Diâmetro do Jato (Eq. 4 e 5)

Sabendo que a vazão é dada por: $P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$, onde P= potência; ρ = massa específica da água; g= gravidade; Q= vazão; H= altura de queda, temos:

$$Q = 5 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$C_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

$$C_1 = 19,61 \text{ m/s}$$

$$ds = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot C_1}}$$

$$ds = 0,0018 \text{ m ou } ds = 18,02 \text{ cm}$$

- Largura da pá (Eq. 5):

$$B = 3 . ds$$

$$B = 72,08mm$$

- Excesso (Eq. 6)

$$E = 0,9 . ds$$

$$E = 16,2mm$$

- Largura do rasgo (Eq. 7)

$$a = (1,25 . ds) + 5$$

$$a = 27,5mm$$

- Comprimento da pá (Eq. 8)

$$L = 2,8 . ds$$

$$L = 50,62mm$$

- Profundidade (Eq. 9)

$$T = 1 . ds$$

$$T = 18,02mm$$

Após os cálculos concluídos parte-se para o modelamento 3d da pá fazendo uso do Software Solidworks (figura 5).

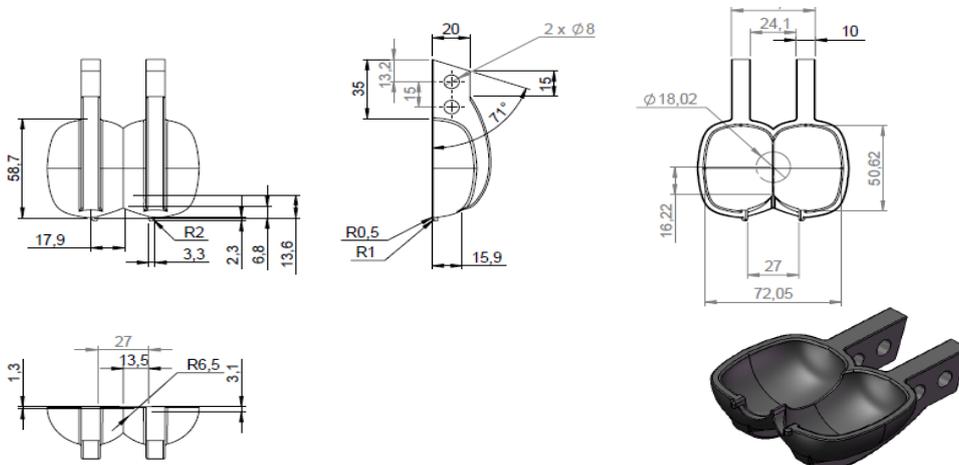


Figura 5 – Dimensões Pá (em mm) e pá acabada

Após parte-se para a produção do protótipo, neste caso feito em alumínio fundido (figura 6).



Figura 6 – Protótipo da Pá fundida em alumínio

5. Conclusões

O dimensionamento e desenho das pás do rotor de uma turbina é um dos aspectos mais importantes no desenvolvimento de uma central hidrelétrica, pois envolve o estudo de fenômenos relativamente complexos referentes aos processos fluido dinâmicos. Devido a isso, o princípio básico adotado para para este trabalho foi o de reunir diferentes conceitos teóricos para os cálculos que deveriam ser desenvolvidos.

Durante o desenvolvimento do estudo verificou-se que algumas dimensões não são calculáveis, mas podem ser estimadas no modelamento a partir das dimensões básicas descritas no memorial. Desta forma, conclui-se que o alcance do objetivo pode ser visto através do modelo 3D da pá e do protótipo da pá fundida em alumínio. O modelo da pá inclui todas as dimensões calculadas no memorial, garantindo a sua funcionalidade e aplicabilidade.

Referências

- BRASIL, A. N. *Máquinas Termohidráulicas de Fluxo*. Faculdade de Engenharia, Universidade de Itaúna, 2010. Disponível em <<http://www.alexbrasil.com.br>>. Acesso em: 23 abr. 2013.
- CERVO, A. I.; BERVIAN, P. A. *Metodologia científica*. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.
- COSTA, A. S. *Turbinas Hidráulicas e Condutos Forçados*. 2003. Disponível em <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/dincont/turb-hidr-2003.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2013.
- GIL, A. C. *Métodos e Técnicas de pesquisa social*. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- MACINTYRE, Archibald Joseph. *Máquinas Motrizes Hidráulicas*. Rio de Janeiro : Editora Guanabara AS, 1983.
- PFLEIDERER, C. *Máquinas de Fluxo*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- SEVERINO, A. J. *Metodologia do trabalho científico*. 21. ed. São Paulo: Cortez, 2000.