



# ALGORITMO PARA DETERMINAÇÃO DE GRANDEZAS GEOMÉTRICAS DE UMA TURBINA PELTON

## ALGORITHM FOR DETERMINING GEOMETRIC PARAMETERS OF A PELTON TURBINE

K. M. M. ABREU<sup>1</sup>, H. M. P. ROSA<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Produção de Mecânica, Viçosa, Minas Gerais, Brasil

\*Autor correspondente: Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, Fone: +55 31 3899-4968.

Endereço de E-mail: [henrique.rosa@ufv.br](mailto:henrique.rosa@ufv.br) (H. M. P. Rosa).

### ARTICLE INFO

Article history:

Received 2017-09-27

Accepted 2018-03-24

Available online 2018-06-30

#### palavras-chave

Turbina Pelton

Algoritmo

Grandezas Geométricas

Potência

Rendimento

#### keywords

Pelton Turbine

Algorithm

Geometric Parameters

Power

Efficiency

### RESUMO

A turbina Pelton é composta basicamente de rotor e bico injetor. O rotor é formado por um disco com as pás, em formas de conchas, distribuídas ao longo do diâmetro externo. A caracterização de uma Pelton envolve o cálculo de diversos parâmetros geométricos como, diâmetro do rotor, número de pás, número de jatos, diâmetro do jato, dentre outros. Alguns parâmetros são dependentes entre si. Este trabalho tem por objetivo apresentar um algoritmo desenvolvido em software MATLAB® para o projeto de rotor e bico injetor. O algoritmo desenvolvido atende a proposta inicial de calcular as grandezas geométricas para o rotor e o bico injetor, e pode ser utilizado para a elaboração de projeto preliminar, onde o objetivo principal é ter um indicativo das principais dimensões da turbina.

### ABSTRACT

Pelton turbine is basically composed of impeller and jet nozzle. The impeller is formed by a disc with buckets distributed on the external diameter. The characterization of a Pelton involve calculation of several geometric parameters, as, impeller diameter, number of blades, number of jets, diameter of jet, among others. Some parameters are dependent on each other. This work aim to present an algorithm developed in MATLAB® to project the impeller and jet nozzle. The algorithm developed attends the initial proposal to calculate the geometrics size for the impeller and jet nozzle, and may be utilized to elaboration of preliminary project, which the principal object is have an indicative of principals dimensions of turbine.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais abundante na Terra: com um volume estimado de 1,36 bilhão de quilômetros cúbicos (km<sup>3</sup>) recobre 2/3 da superfície do planeta sob a forma de oceanos, calotas polares, rios e lagos. Além disso, pode ser encontrada em aquíferos subterrâneos, como o Guarani, no Sudeste brasileiro. A água também é uma das poucas fontes para produção de energia que não contribui para o aquecimento global – o principal problema ambiental da atualidade. E, ainda, é renovável: pelos efeitos da energia solar e da força da gravidade, de líquido transforma-se em vapor que se condensa em nuvens, que retornam à superfície terrestre sob a forma de chuva. (Aneel)

Desse modo, propõem-se o estudo da energia hidráulica que apesar de ser centenária, as pesquisas e desenvolvimento tecnológico associado continuam. No Brasil isto é particularmente importante, visto que na nossa matriz energética este tipo de energia corresponde a mais de 70% (EPE, 2013), consequência de características favoráveis das bacias hidrográficas e relevos. Embora o potencial para grandes usinas hidroelétricas esteja esgotando, ainda há no Brasil grande potencial para usinas pequenas, mini e micro.

Nas usinas hidroelétricas as turbinas hidráulicas são as máquinas que transformam a energia hidráulica em trabalho mecânico, que é posteriormente transformando em energia elétrica por meio de um gerador. Há vários tipos de turbinas, e a escolha correta em cada projeto, é função principalmente das características de vazão e queda. Uma forma de classificar as turbinas, é com relação a variação de pressão estática na passagem do escoamento pelo rotor. Tem-se turbinas de reação, na qual a pressão diminui, e turbinas de ação, na qual a pressão se mantém constante. Nestas últimas, o rotor fica exposto a pressão atmosférica. Devido a esta condição, a utilização de turbinas de ação resulta em projetos de usinas mais simples, sendo, portanto, convenientes para mini e micro usinas.

As turbinas hidráulicas de ação caracterizam-se pelo fato de o rotor estar exposto a pressão atmosférica. Dentre os tipos mais conhecidos, tem-se a turbina Pelton, inventada no século XIX (Pfleiderer, 1979). O rotor é formado por um disco com as pás, em formas de conchas, distribuídas ao longo do diâmetro externo. O impacto da água com as pás promove um desvio do escoamento, e, conseqüentemente o aparecimento de momento que faz o rotor girar, produzindo trabalho mecânico. Outro componente fundamental, é o injetor, também chamado de bocal, que além de regular a vazão, direciona o jato de água no sentido das conchas.

A caracterização de uma turbina Pelton envolve o cálculo de diversos parâmetros geométricos como, diâmetro da turbina, número de pás, número de jatos, diâmetro do jato, dentre outros. Alguns desses parâmetros são dependentes entre si e o dimensionamento correto é importante para garantir o desempenho adequado da turbina e do bico injetor. Diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos com objetivo de identificar os valores otimizados para os parâmetros geométricos de turbinas Pelton.

Segundo Zidonis e Aggidis (2016), o número de pás é um importante parâmetro de otimização em turbinas Pelton. Os testes apresentados no artigo mostraram que é possível reduzir a complexidade e o custo de um projeto diminuindo o número

de pás e perdendo pouca eficiência com a alteração.

Zidonis et al (2015) apresentaram um método genérico de otimização de rotores de turbinas Pelton utilizando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), e verificaram que análises numéricas são precisas para serem utilizadas na previsão da eficiência de uma turbina Pelton.

Este trabalho tem por objetivo apresentar um algoritmo desenvolvido para o projeto de uma turbina Pelton e o seu respectivo bico injetor segundo metodologias descritas por Pfleiderer e Macintyre. Em um primeiro momento é realizada a leitura dos dados de entrada e em seguida calculados os valores geométricos do conjunto (rotor e bico injetor). Por fim, o programa constrói os gráficos de desempenho avaliando força, momento, potência e rendimento hidráulico.

## 2. METODOLOGIA

O algoritmo foi escrito no software MATLAB® e utilizou-se da metodologia descrita a seguir. Para o projeto da turbina, inicialmente, fez-se a avaliação de qual o tipo de turbina com melhor operação na faixa de operação definida. Como critério de escolha de uma turbina leva-se em consideração a altura de queda, a vazão e a potência. Esta escolha depende ainda do número de rotações do gerador que a turbina irá acionar (Macintyre, 1983).

Como valores de referência utilizou-se os dados da bancada de testes hidráulico do DEP (Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica), contidos na tabela 1.

**Tabela 1 – Dados de entrada referentes à bancada do DEP.**

Variáveis de Entrada	Valores
Vazão (m <sup>3</sup> /s)	0,001
Altura de queda (m)	8
Rotação (RPM)	500

A seleção da turbina foi feita através da análise de rotação específica  $nq_A$ . Segundo Henn, 2011 os valores indicados para uma turbina Pelton estão entre 5 a 70. O valor de  $nq_A$  é calculado através da equação 1:

$$nq_A = 10^3 n \frac{Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}} \quad (1)$$

Onde  $n$  é a rotação [rps],  $Q$  é a vazão, [m<sup>3</sup>/s],  $g$  é a gravidade, [9,81m/s<sup>2</sup>].

Para os dados de entrada o  $nq_A$  foi de 10, que indica que se trata de uma turbina Pelton.

Em seguida, é necessário calcular o número de jatos ( $a$ ) que irão atuar na turbina. Macintyre (1983) sugere a determinação através da equação 2:

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

Onde  $N$  é a potência nominal da turbina, [CV].

A velocidade do jato ( $c_1$ ) na saída do bocal injetor é definida, Pfleiderer (1979), pela equação 3:

$$c_1 = \phi \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Onde  $\phi$  é um coeficiente menor que 1, que contempla as perdas no bico injetor. Macintyre (1983) preconiza  $\phi = 0,97$ .

Por fim, Macintyre (1983) determina o diâmetro máximo ( $d_{max}$ ) do jato segundo equação 4:

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

Com os dados de entrada e os valores obtidos através das equações de 1 a 4 é possível determinar as características geométricas do rotor e bico injetor, através do algoritmo desenvolvido e implementado no MATLAB®. O algoritmo emprega a metodologia de cálculo descrita por Pfeleiderer (1979) e Macintyre (1983). A figura 1 mostra algumas das grandezas da agulha bico injetor.

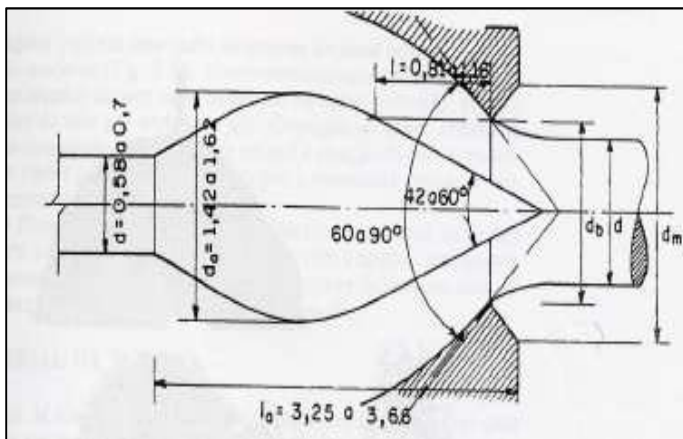


Figura 1 – Grandezas para o dimensionamento da agulha do bico injetor. Referência: Macintyre (1983)

### 3. RESULTADOS

A tabela 2 contém os valores das grandezas referentes ao jato de água que alimenta a turbina Pelton.

Tabela 2 - Grandezas do jato d'água.

Grandezas	Símbolo	Resultado
Número de Jatos	$a$	1
Velocidade do Jato	$c_1$	12,15 m/s
Diâmetro Máximo do Jato	$d_{max}$	1,12 cm

A tabela 3 apresenta os valores das grandezas calculadas referentes ao rotor.

Tabela 3 - Grandezas geométricas do rotor.

Dimensão	Fonte	Símbolo	Resultado
Diâmetro do Rotor	Pfleiderer	$D$	20,89 cm
Número de Pás	Pfleiderer	$Z$	28
Largura	Macintyre	$B$	2,80 cm
Comprimento	Macintyre	$L$	2,84 cm
Excesso	Macintyre	$M$	0,67 cm
Excesso de Gume	Macintyre	$m$	0,36 cm
Profundidade	Macintyre	$T$	1,01 cm
Largura do Rasgo	Macintyre	$b$	1,38 cm
Ângulo do Gume Central	Pfleiderer	$\beta_1$	10°
Ângulo do Bordo de Fuga	Pfleiderer	$\beta_2$	10°
Ângulo da Inclinação da Aresta da Concha	Macintyre	$\Phi$	20°
Ângulo	Macintyre	$\lambda$	24°

A tabela 4 apresenta os valores das grandezas calculadas referentes ao bico injetor.

Tabela 4 - Grandezas geométricas do bico injetor.

Dimensão	Símbolo	Resultado
Diâmetro de Saída do Bocal	$d$	0,93 cm
Diâmetro da Seção de Entrada do Bocal	$d_r$	3,03 cm
Diâmetro de Entrada do Bocal	$d_e$	5,05 cm
Diâmetro da Haste	$d_h$	0,72 cm
Diâmetro da Agulha	$d_a$	1,70 cm
Comprimento da Agulha	$l_a$	3,88 cm
Curso da Agulha	$l$	1,12 cm
Ângulo da Ponta da Agulha	$\theta_1$	50°
Ângulo do Bocal	$\theta_2$	75°

Os valores indicados nas tabelas 2 a 4 estão de acordo com projetos similares encontrados em catálogos de fabricante.

Para análise da turbina dimensionada construiu-se gráficos para avaliar as condições de operação do sistema. A equação 5 caracteriza o comportamento da força hidráulica em função da velocidade periférica do rotor.

$$F = \rho Q (C_1 - U) (1 + K \cos \beta_2) \quad (5)$$

O gráfico da figura 2 representa a variação da força e hidráulico conforme a velocidade periférica do rotor se altera. O valor máximo ocorrem quando o valor da velocidade é zero e ainda não houve conversão da energia hidráulica em mecânica

Através da equação 6, é possível calcular o momento hidráulico em função da velocidade periférica do rotor.

$$M = FR \quad (6)$$

A variação do momento hidráulico conforme a velocidade periférica do rotor se altera está presente na figura 3.

A potência hidráulica é calculada pela equação 7 e também é função da velocidade periférica do rotor.

$$P = FU \quad (7)$$

Por fim, determina-se o rendimento hidráulico pela equação 8.

$$\varepsilon = \left( \frac{2\varphi^2 (C_1 - U) (1 + \cos \beta_2) U}{c_1^2} \right) \quad (8)$$

Na figura 4 nota-se que o valor máximo de potência hidráulica ocorre aproximadamente quando a velocidade periférica do rotor atinge a metade do valor da velocidade do jato.

Do mesmo modo, conforme a figura 5, o valor máximo de rendimento hidráulico ocorre aproximadamente quando a velocidade periférica do rotor atinge a metade do valor da velocidade do jato.

Os gráficos das figuras 2 a 5 foram gerados automaticamente pelo programa. Estes gráficos mostram que os resultados estão em consonância com a teoria de turbinas Pelton, sobretudo os gráficos da potência e rendimento, cujos valores máximos são obtidos quando a velocidade periférica é metade da velocidade do jato.

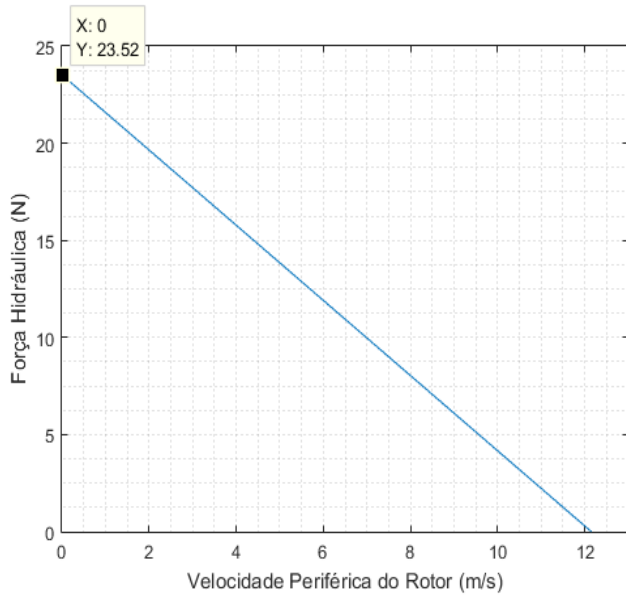


Figura 2 - Gráfico de força hidráulica.

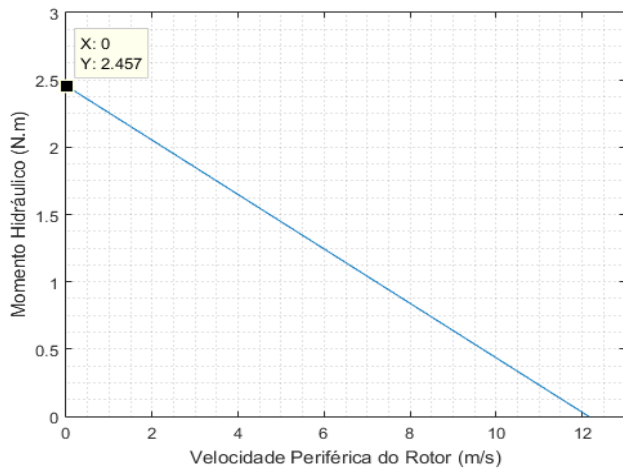


Figura 3 - Gráfico de momento hidráulico.

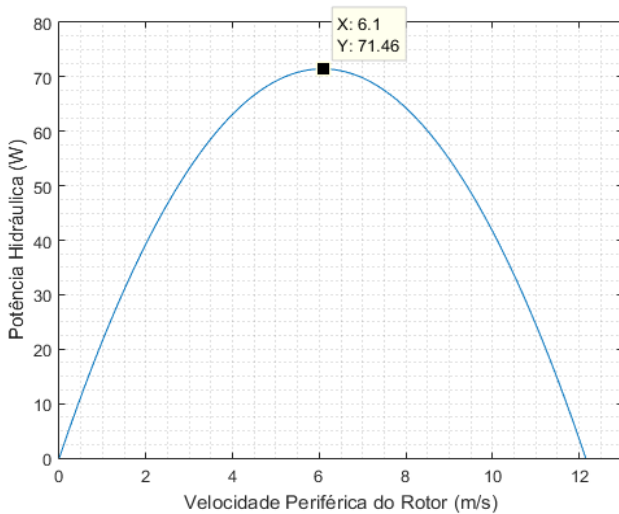


Figura 4 - Gráfico de potência hidráulica.

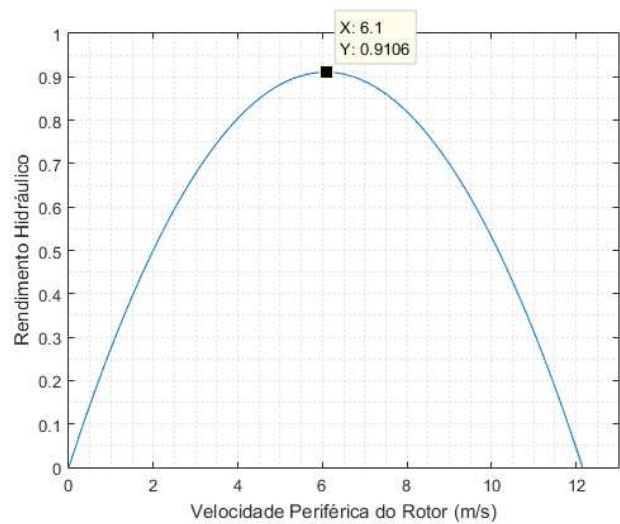


Figura 5 - Gráfico de rendimento hidráulico.

#### 4. CONCLUSÕES

Dimensionar uma turbina Pelton é uma atividade complexa e exige um estudo profundo dos parâmetros geométricos da turbina. Construiu-se um algoritmo no software MATLAB® baseado na metodologia proposta por Pfeleiderer (1979) e Macintyre (1983) para agilizar o dimensionamento.

O algoritmo desenvolvido atende a proposta inicial de calcular as grandezas geométricas para o rotor e o bico injetor, e pode ser utilizado para a elaboração de projeto preliminar, onde o objetivo principal é ter um indicativo das principais dimensões da turbina.

É importante destacar que para assegurar a eficiência do projeto final de uma turbina Pelton é fundamental, partindo do projeto preliminar, realizar uma análise por simulação numérica, utilizando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), onde será possível observar o escoamento do fluido de trabalho e realizar os ajustes necessários para uma turbina com máxima eficiência.

#### AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ pela concessão de bolsa de iniciação científica que contribuiu para o desenvolvimento do estudo relativo ao artigo.

#### REFERÊNCIAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica no Brasil. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap3.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap3.pdf)>. Acesso em: 22/09/2017.

EPE-Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2022. Rio de Janeiro. Ministério de Minas e Energia, 2013.

HENN, E. L. Máquinas de Fluido. Santa Maria. Santa Maria. Editora UFSM, 2011.

MACINTYRE, A. J., Máquinas Motrizes Hidráulicas. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1983.

PFLEIDERER, C.; PETERMAN, H. Máquinas de Fluxo. Rio de

Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1979.

ŽIDONIS, A.; AGGIDIS, G. A. Pelton turbine: Identifying the optimum number of buckets using CFD. **Journal of Hydrodynamics**, 28 (1), 75-83, 2016.

ŽIDONIS, A.; PANAGIOTOPOULOS, A; AGGIDIS, G. A. Parametric optimisation of two Pelton turbine runner designs using CFD. **Journal of Hydrodynamics**, 27 (3), 403-412, 2015