



ESTUDO E PROJETO PRELIMINAR DE UMA TURBINA DO TIPO BULBO PARA UMA USINA MARÉMOTRIZ

Regina de Nazaré Caldeiras, reginadenazare.c@gmail.com¹

Dalmo Inácio Galdez Costa, dalmo.costa@ufma.br¹

¹Universidade Federal do Maranhão, Av.dos Portugueses 1966, Bacanga.

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo desenvolver um projeto preliminar de uma turbina, para uma usina maremotriz a ser implantada na Barragem do Bacanga em São Luís do Maranhão, discorrendo sobre o caráter técnico envolvido na seleção do modelo, utilizando dados bibliográficos referentes a barragem para a determinação das dimensões do rotor e então fazendo a análise da possibilidade de implantação da quantidade de máquinas pré-selecionada.*

Palavras-chave: *Projeto Preliminar, Barragem do Bacanga, Turbina Hidráulica.*

1. INTRODUÇÃO

A ascendente demanda energética (EPE, 2015) impõe a busca por novas fontes de energia, preferencialmente limpas e renováveis visto que a obtenção através das não renováveis tem se mostrado danosa ao meio ambiente, devido entre outros fatores, às emissões de carbono (IEA, 1991).

Dentre as várias maneiras de produção de energia limpa pode-se destacar as energias provenientes das marés em suas várias modalidades, o Brasil sendo detentor de umas das maiores linhas costeiras do mundo é propício para este segmento energético.

Em especial, pode-se destacar o estuário do Bacanga, em São Luís do Maranhão, como um ponto propício para a implantação de uma usina maremotriz, devido a fatores geomorfológicos e hidrográficos locais (Neto, 2009).

Este trabalho discorre sobre o projeto preliminar das turbinas hidráulicas necessárias à instalação de uma usina maremotriz a ser implantada nesta barragem.

2. O ESTUÁRIO DO BACANGA

Em 1981 a ELETROBRÁS fez um levantamento dos principais pontos do norte/nordeste, que são propícios a geração de energia maremotriz. Entre os locais que se mostraram adequados podemos destacar a Baía de Turiaçu, além de outros 41 pontos nos estados do Maranhão, Amapá e Pará que ao todo tinham um potencial para geração de 72.000.000 MWh (Neto, 2009).

O estuário do Bacanga é parte da baía de São Marcos, sua vegetação é composta basicamente de mangue, tem desnível de águas variando entre 0 m e 6,5 m, possuindo um potencial estimado em 34.000 MWh/ano (Lima et al., 2003), ideal ao aproveitamento de gradiente de marés por suas qualidades geográficas e a geomorfológicas locais, como por exemplo, afunilamento local, desnível de maré e reservatório natural (Neto, 2009).



Figura 1. Baía de São Marcos, a parte destacada é o local apropriado a uma usina maremotriz. (<https://www.google.com.br/maps>).

3. A Barragem do Bacanga

Em 1973 foi construído no ponto mais estreito do estuário do Bacanga uma barragem, visando reduzir a distância entre o centro da cidade de São Luís e o porto do Itaqui (Bezerra, 2009). Devido as características locais, na época, foi considerada a possibilidade da implantação de uma usina para extração de energia a partir das marés, pois o local é um dos pontos mais propícios para esta finalidade ao redor do mundo como pode-se constatar na Fig. 2 (Etemadi et al., 2011; Neto, 2009; Thorpe, 1999).

A vazão na barragem do Bacanga chega a $700\text{m}^3/\text{s}$ diariamente, embora apenas 2 m do desnível possa ser utilizado sem a necessidade de outras intervenções civis. Tal limitação é devido a vários fatores entre eles a possibilidade de inundação em áreas adjacentes ao reservatório caso a cota máxima seja atingida (Lima et al., 2003).

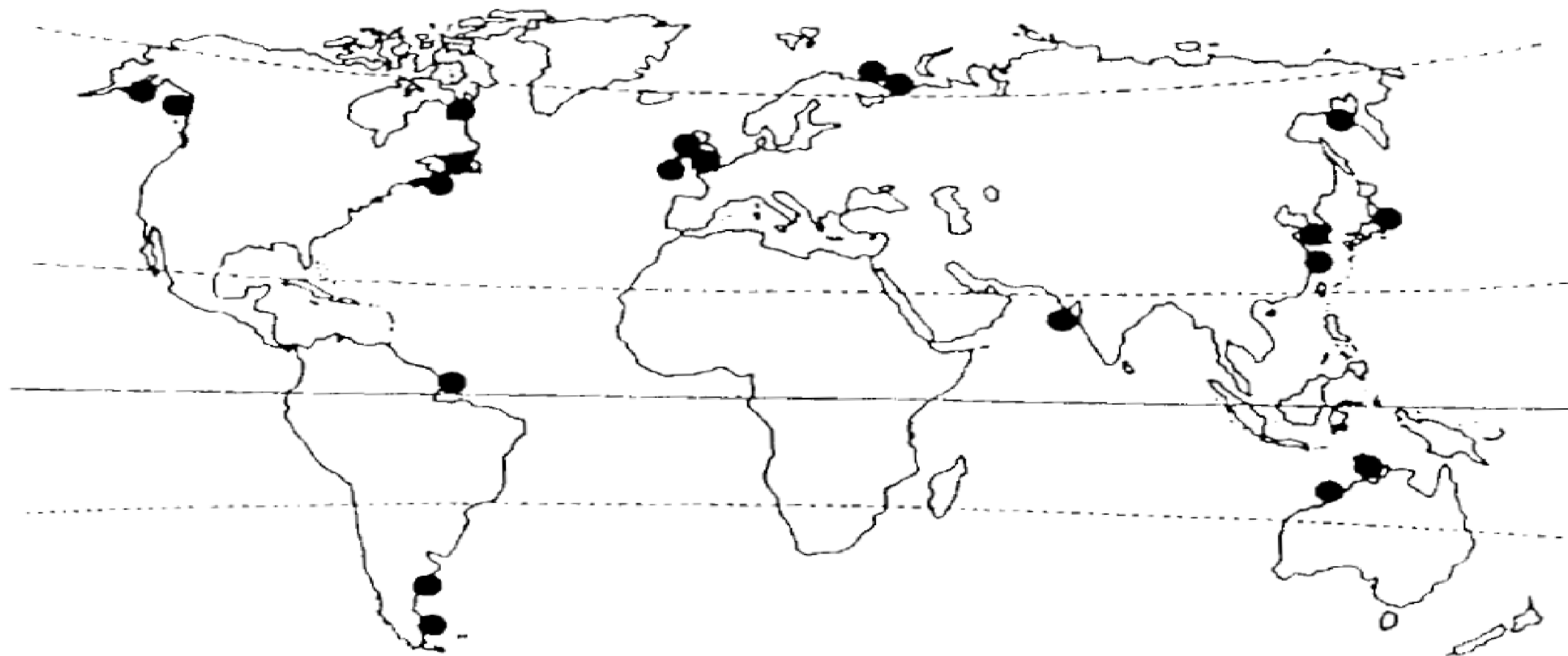


Figura 2. Pontos propícios a instalação de usinas maremotriz ao redor do mundo (Bezerra Leite Neto et al., 2011)

4. A Usina Maremotriz

Uma usina maremotriz é composta basicamente de:

- Reservatório: onde é armazenada ou represada a água.

- Canal: Estrutura por onde entra a água.
- Duto: Canal responsável por guiar a água até as turbinas:
- Turbina: Máquina hidráulica responsável por converter a energia cinética e de pressão da água em trabalho mecânico.
- Casa de Força: Local onde são armazenados os componentes eletromecânicos.
- Linhas de distribuição: Estrutura responsável por levar a energia elétrica produzida até seu destino final.

As usinas deste tipo valem-se da interação gravitacional entre a lua e as marés para geração, dependendo em sua maioria da contribuição natural para implantação, ou seja, que já haja o desnível local, pois quanto menor a interferência no local, menores serão os impactos ambientais (Flórez, 2014).

5. Projeto Preliminar das Turbinas Hidráulicas

5.1. As Turbinas Hidráulicas

A turbinas hidráulicas são máquinas que possuem pás ligadas a um eixo, quando um fluxo de água entra em contato com as pás, exercem nesta um torque e assim a energia cinética e de pressão da água é convertida em potência no eixo, este ligado direta ou indiretamente (por um conjunto de engrenagens) a um gerador elétrico que fará a conversão da energia mecânica em energia elétrica (Macintyre, 1983).

5.2. Dados do Projeto Bacanga

O ponto onde será instalada a usina maremotriz possui um reservatório com a capacidade descrita na Tab.1. A vazão média para as cotas deve considerar as limitações locais, como o fato das margens do reservatório serem habitadas limitando sua capacidade. A vazão admitida nesse trabalho será de 516,8 m³/s calculada a partir da obtenção do volume disponível para uso entre as cotas 2,5m e 4,5 m que devem ser utilizadas no intervalo de tempo de 22350 s que é aproximadamente um ciclo de maré, considerando um dia lunar (24h50min) no qual a maré faz dois ciclos compostos de preamar e baixa-mar (MIGUENS, 1993).

Tabela 1. Relação entre a cota e o volume no estuário do Bacanga.

Cota(m)	Volume(m³)
0	640000
0,5	990000
1	1460000
1,5	2100000
2	3100000
2,5	4950000
3	7720000
3,5	10650000
3	13580000
4,5	16500000
5	19430000
5,5	22360000
6	25280000
6,5	28210000

(Neto, 2012)

As medidas do local onde será implantada a usina podem ser vistas na Fig. 3, é necessário destacar que o comprimento do local onde serão implantadas as máquinas é de 23 m e que o local é formado por vegetação de mangue, um bioma que por sua fragilidade pede a menor interferência possível. Tais considerações determinam a quantidade mais adequada de máquinas.

A intenção dos pesquisadores do projeto Bacanga é que, ao seu final, a estrutura apresente a configuração mostrada na Fig. 4, o que será o ponto de partida adotado neste trabalho.

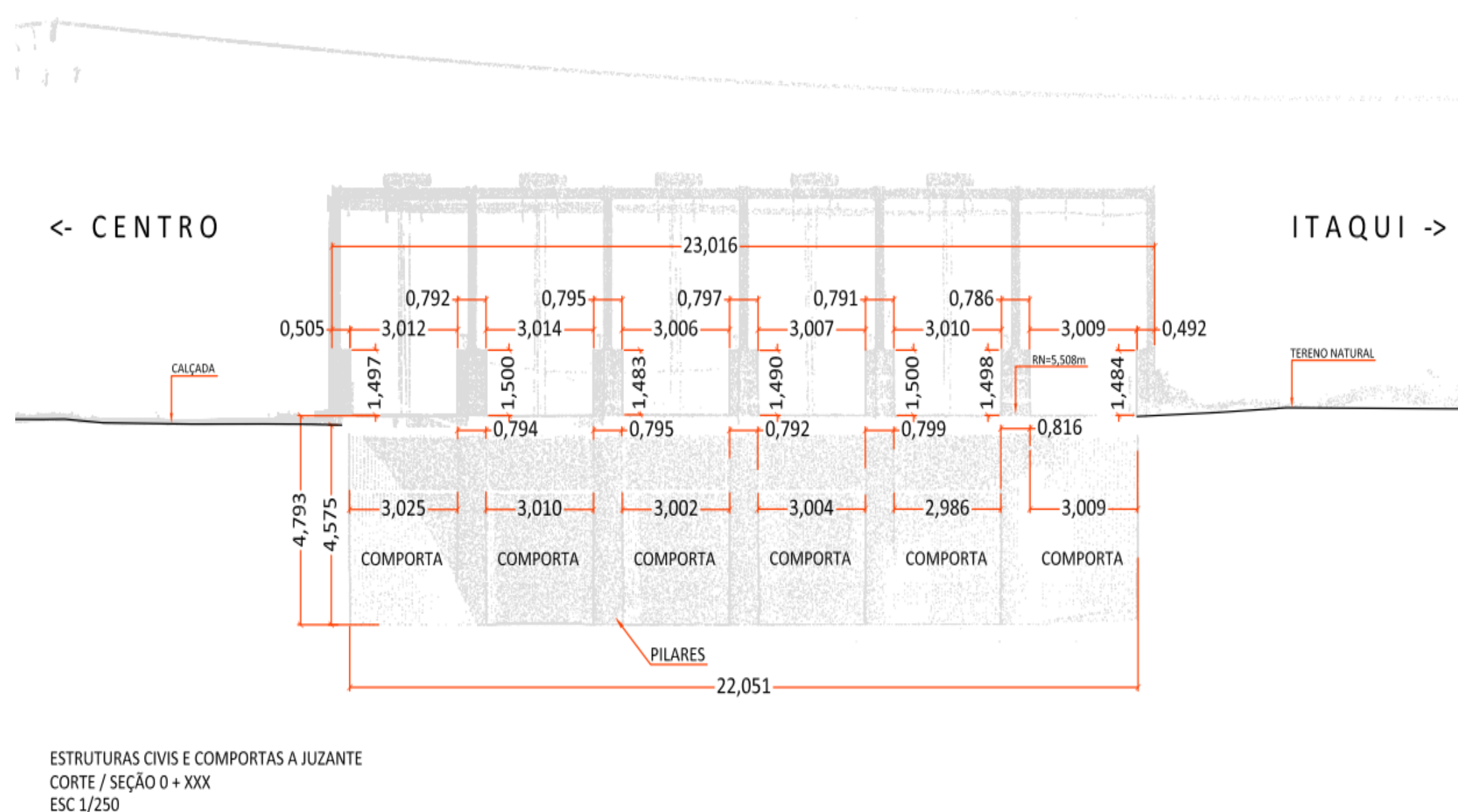


Figura 3- Medição da parte da barragem que ficará diretamente conectada a usina. (Grupo de sistema de potência UFMA, 2013).



Figura 4. Idealização do resultado da usina na barragem do Bacanga. (Grupo de sistema de potência UFMA, 2013).

5.3. Seleção do Modelo de Turbina Adequado ao projeto do Bacanga

Selecionar o tipo de turbina para um projeto, seja ele qual for, exige conhecimento dos detalhes característicos locais, pois cada uma dessas máquinas é projetada especificamente para as condições do local onde serão implantadas.

Neste trabalho os critérios utilizados foram:

- Condições locais: Por ser uma área de preservação devemos priorizar a menor interferência possível, mas considerando também a necessidade de um projeto eficiente.

Dados do local:

- Condições topográficas, hidrográficas e geológicas.
- Dados das alturas das marés locais, baixa mar, preamar, marés de sizígia e marés de quadraturas. Também é necessário ter dados e conhecimento a respeito de fenômenos menos recorrentes das marés, para controle de quando

abrir as comportas para não sobrecarregar as máquinas.

- Medições da umidade temperatura e pressão locais, de preferência em um ciclo completo (um ano) ou mais. Fazem-se necessárias posteriormente para aperfeiçoamento do projeto.
- Dados da vazão local que pode ser medida através de processos conhecidos como o uso de flutuador, Calha Venturi, vertedor, molinete e etc.

Para todos os casos a turbina é projetada para as condições locais extremas, cotas máximas e para o número de rotações máxima do gerador que será colocado nela, a menos que seja solicitado algo diferente (Sousa, 2011).

Para este caso, é necessário considerar que não é possível atingir a cota máxima pois há moradores no entorno do reservatório, sendo indicado manter as cotas entre 2,5 e 4,5 m (Lima et al., 2003). Estima-se a vazão considerando que uma máquina motriz hidráulica é sempre projetada para resistir ao máximo esforço ao qual será submetida, medida que visa impedir que a máquina venha a sofrer falha prematura. Abaixo temos um cálculo simplificado da vazão relacionados a cota máxima e mínima que podem ser atingidas no reservatório.

Como acontece uma preamar e uma baixa-mar duas vezes a cada 24h e 50min (Miguens, 1993), convertendo este tempo em segundos, e considerando a vazão que houve nesse intervalo de tempo entre as cotas 2,5 m e 4,5 m a vazão aproximada é de 513 m³/s, por exemplo. No que tange a seleção do gerador, como a ideia inicial é inserir a energia elétrica na rede e a frequência desta é 60Hz, foi admitido suficiente 1,67 Hz (100 rpm) para este caso, pois o número de rotações para turbinas hidráulicas é determinado pelo gerador que será utilizado, não obstante, a máquina pode se adaptar a uma faixa razoável de geradores com o uso de engrenagens planetárias por exemplo.

Para esta aplicação o tipo de turbina que melhor se aplica é o tipo Kaplan devido ao fato da queda bruta (H) indicada ser de apenas 2m, visando a melhor eficiência possível selecionaremos um dos modelos derivados, a Bulbo ou a Straflo, que são especializados para baixas quedas.

Considerando que se deve interferir minimamente no local onde será implantada a Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e verificando que a obra civil depende do diâmetro do rotor como mostrado na Fig. 5, concluiu-se que dentre os mais variados tipos de turbinas existentes no mercado hoje, a mais adequada à futura usina do Bacanga é a turbina Bulbo. Este modelo é uma turbina de pás Kaplan, dotada de uma ogiva na qual fica instalado o gerador, o que minimiza as perdas mecânicas e também é o mais adequado para cotas inferiores a 10 m. Por não necessitar de inclinação na instalação, há uma minimização dos impactos da obra, no modelo Straflo, por exemplo, o rotor por vezes chega a ser 50% maior que o bulbo para a mesma aplicação (Macintyre, 1983; Sousa, 2011).

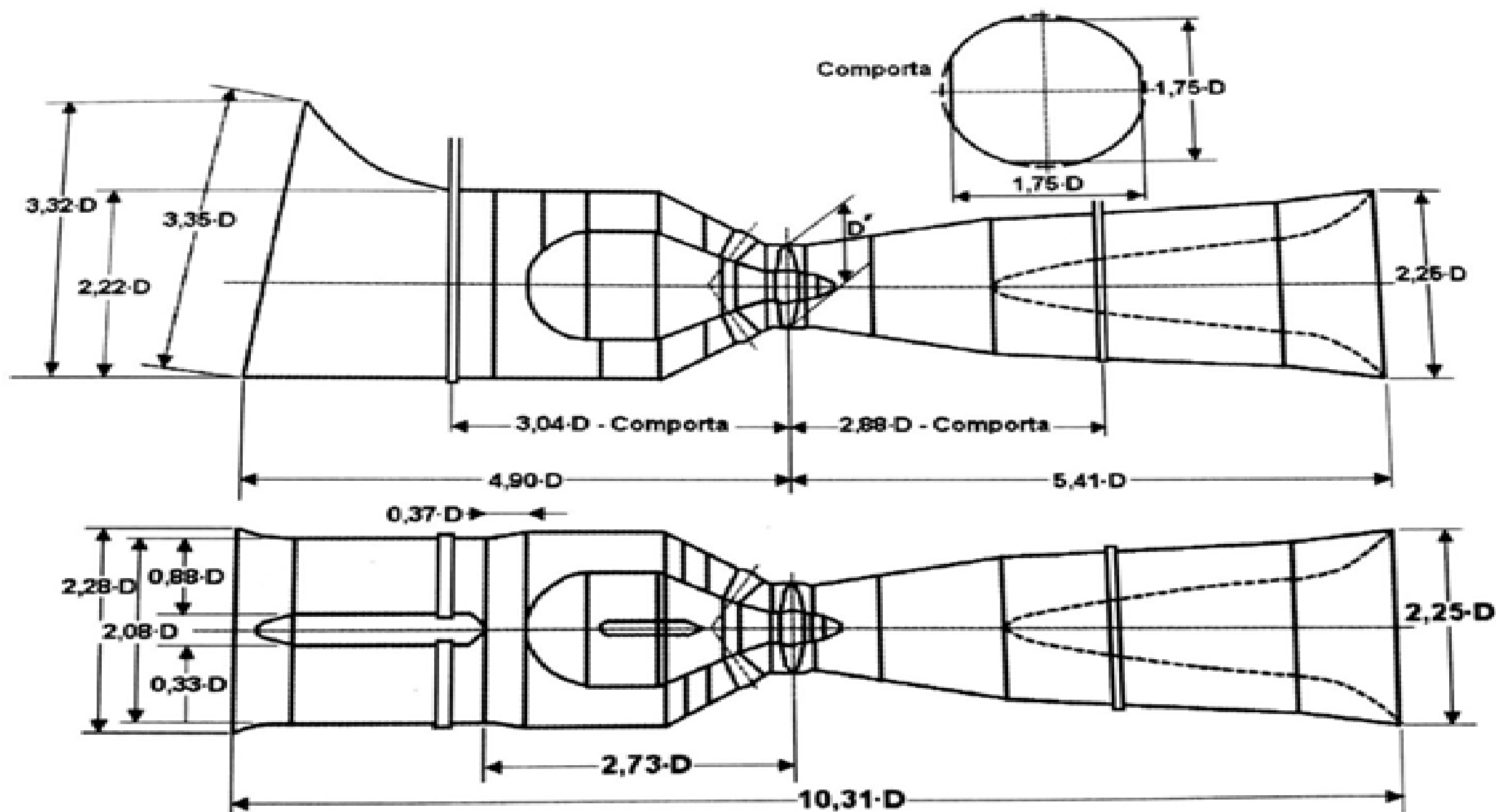


Figura 5. Relação do Diâmetro do Rotor com a parte civil.(SOUSA, 2011).

Fica demonstrado na Fig. 6 a estrutura interna de uma turbina do tipo bulbo e seus detalhes internos, tal como a posição de suas partes.

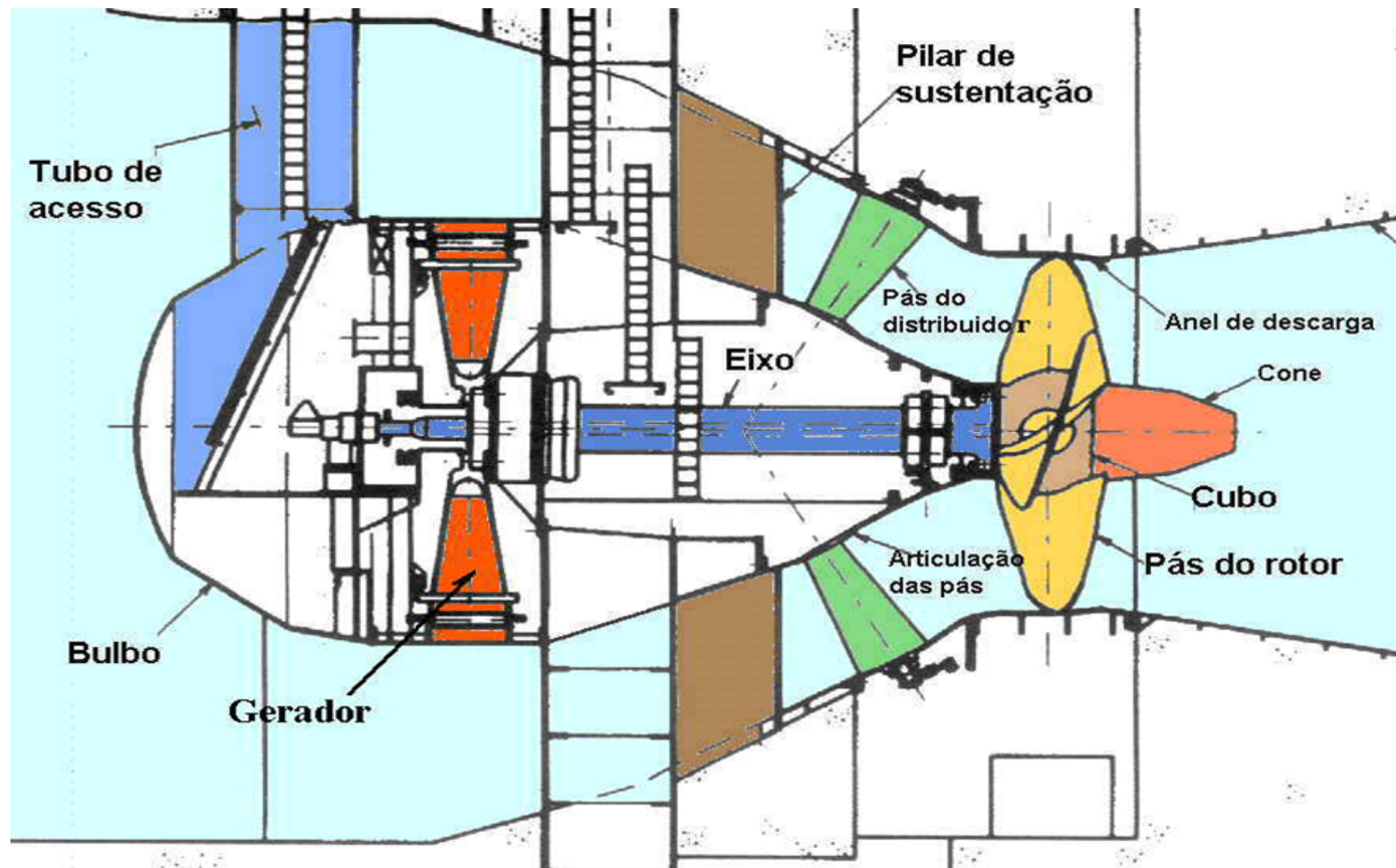


Figura 5. Partes de uma turbina bulbo (Mackenzie, 2015).

5.4. Dimensionamento do Rotor da Máquina.

Um dos principais pontos a serem dimensionados em um projeto de uma usina maremotriz é o rotor das máquinas bem como a quantidade de máquinas, visto que destas dependem o dimensionamento da estrutura (Sousa, 2011). Esta pode ser observada na Fig. 6 que mostra as dimensões do em função do diâmetro do rotor da máquina. Máquinas deste tipo, são projetadas para o que será seu esforço máximo, visando evitar danos a mesma, também são únicas pois são feitas especificamente para um local e situação predeterminados.

Fazendo uso dos dados supracitados sobre o estuário do Bacanga, abaixo será descrito o rotor ideal, considerando as leis de conservação de massa para o caso da distribuição da vazão por máquina. Neste caso serão cinco sendo todas semelhantes, sendo por tanto suficiente descrever as características apenas de uma.

A quantidade de máquinas foi determinada por um dos fatores, a relação direta do diâmetro com a entrada do conduto, comprimento total do lado onde serão implantadas as máquinas, que como pode ser visto na Fig. 4 será a frente da barragem. É possível, portanto, o uso de uma área maior que o comprimento do lado da barragem onde será o fim da rampa, disposta atrás da saída do tubo restaurador. Cinco máquinas é a quantidade ideal pois, seis necessitariam de demasiado espaço e quatro apresentariam um rotor que implicaria em uma entrada muito grande.

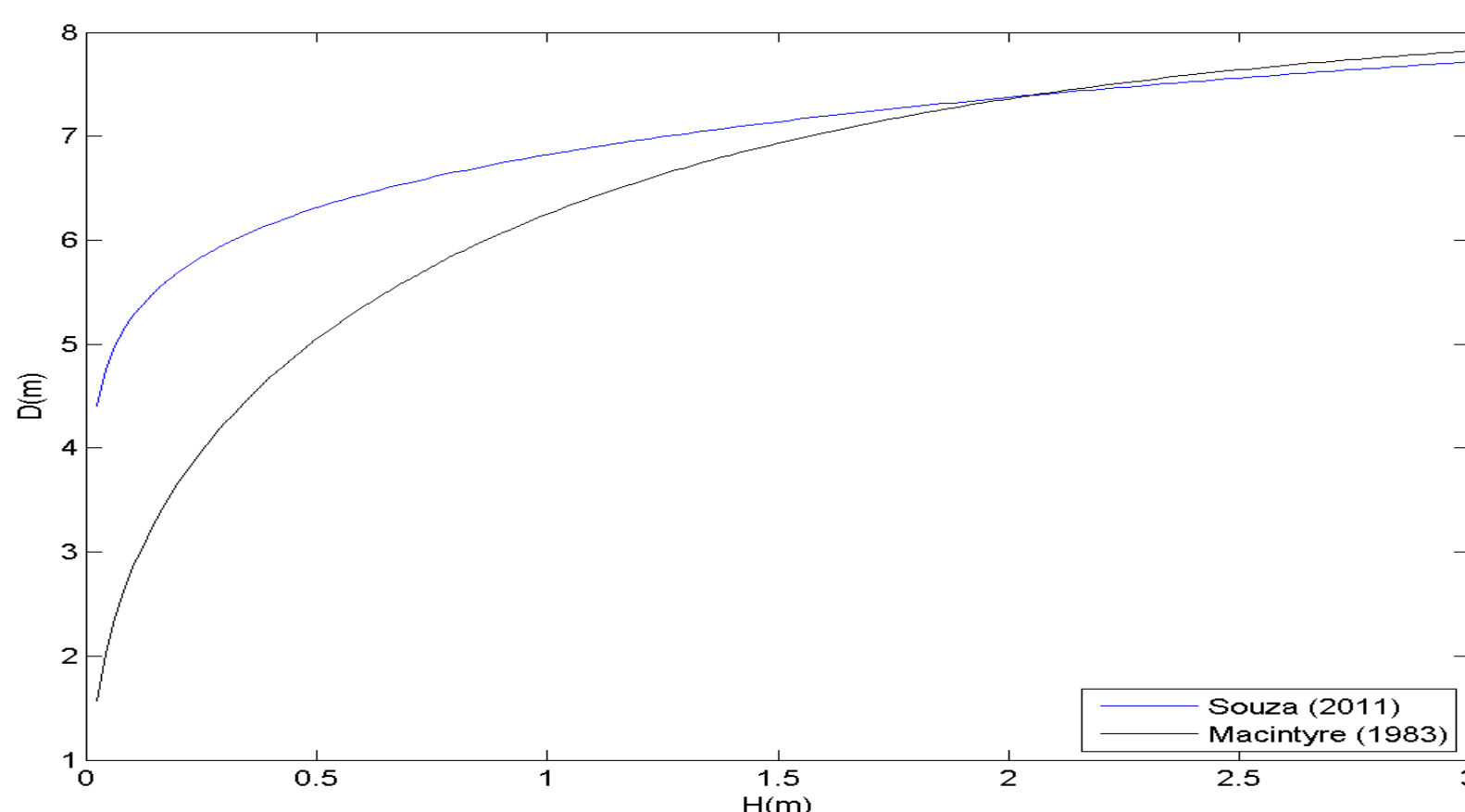


Figura 7. Relação entre as equações de determinação do diâmetro do rotor de Zulcy e Macintyre.

Foram consideradas duas bibliografias sobre o dimensionamento de máquinas de fluxo, em especial a turbina bulbo, (Sousa, 2011) e (Macintyre, 1983). É apresentado na Fig. 7 a relação de similaridade entre as equações que determinam o diâmetro do rotor bulbo nas bibliografias supracitadas para uma queda de 2m. Os valores presentes na

Tab. 2 foram inseridos nas Eq. (1) e Eq. (2).

Tabela 2. Dados bibliográficos utilizados.

Número de Rotações (n)	100 rpm
Queda (H)	2m
Vazão Total (Q)	516,8 m³/s
Vazão por Máquina (Q _u)	103,4m³/s

A partir de agora, tendo então obtido os valores da vazão, do número de rotações e das cotas, podemos então calcular o diâmetro do rotor das turbinas Bulbo que serão usadas no projeto. Para este cálculo será assumido um número de cinco turbinas, inserindo estes valores na Equação (1) (Sousa, 2011):

$$D=9,64 \frac{H^{0,112} Q^{0,269}}{n^{0,483}}$$
 (1)

$$D= \sqrt{\frac{Q}{Q_{II} \sqrt{H}}}$$
 (2)

A Eq. (1) deixa claro como o número de rotações influencia no rotor bulbo, de forma que este pode ser reduzido conforme o número de rotações aumente. Esta propriedade é decorrente da rotação presente no denominador da equação, pois o número de rotações sempre será maior que 1, fazendo dessa parcela crescente e por tanto pode-se alterar (neste caso diminuir) o diâmetro do rotor apenas aumentado n. O diâmetro do rotor da extremidade de uma pá a outra para os dados da Tab. 2 é de 3,92 m por máquina, o que de acordo com a Fig. 6 resulta em uma entrada de 8,94m de diâmetro, considerando a entrada sem inclinação.

Para este diâmetro externo do rotor temos, de acordo com (Macintyre, 1983), um rendimento esperado entre 91% e 92% e potência de 2,5 MW por máquina, valores que podem ser obtidos através da Eq. (3), admitindo-se primeiro o qualquer valor para o rendimento, entre 85% e 94% que são os extremos rendimentos da Tab. (3) e calculando a potência com qualquer um destes valores, a potência obtida em watts, será consultado na Tab. (3) e determinará o real valor do rendimento.

$$N= \frac{735500 \delta QH}{75}$$
 (3)

Consultando a Tab. (3) o valor do rendimento real pode ser encontrado, a partir da potência da máquina.

Tabela 3. Relação entre potência e rendimento em watts.

N _{watt}	< 73550	73550-735500	735500-36775000	<36775000
δ %	85%-87%	88%-90%	91%-92%[	93%-94%

(Macintyre, 1983)

Onde N é a potência útil e δ o rendimento total.

Uma vez obtido o diâmetro do eixo externo, os valores mostrados na Tab. (4), referentes a esta máquina, são obtidos.

Tabela 4. Resultados sobre o rotor (Parte 1).

Diâmetro do eixo maciço (d)	$d_1 \cong (0,4 \text{ a } 0,5)D$	1,76m
Velocidade Específica (n _s)	$n_s = \frac{n \sqrt{N}}{H^4 \sqrt{H}}$	202 rad/s
Seção de Livre Passagem da Água pela Turbina (S)	$S= \frac{(D^2 - d^2)}{4} \pi$	9,64m²
Velocidade Meridiana (V _m)	$V_m = \frac{Q}{S}$	10,73m/s

Passo entre as Pás (t)	$t = \frac{\pi (D_m + d_1)}{Z \cdot 2}$	2,97m
------------------------	---	-------

Onde Z é o número de pás, para este caso três, devido a baixíssima queda (ALBUQUERQUE, 2006; MACINTYRE, 1983), os valores supracitados determinarão os próximos detalhes técnicos que se sucedem, determinando valores básicos para o diagrama de velocidades e ângulos para a pá.

Tabela 5. Resultado sobre o rotor (Parte 2)

Comprimento das Pás (l)	$l = \gamma \cdot t$	0,5m
Velocidade Periférica média (u)	$u = \frac{\pi D_m}{60}$	20,52m/s
Rendimento Hidráulico (ε)	$\epsilon = \eta + 0,5$	96%
Componente Periférica da velocidade Absoluta (V _{u1})	$V_{u1} = \frac{\epsilon g H}{u}$	0,9m/s
Velocidade Relativa (W _∞)	$W_{\infty} = \sqrt{\left(u - \frac{V_u}{2}\right)^2 + V_m^2}$	22,76m/s

O γ do comprimento das pás é dado por:

$$\gamma = \frac{78}{\sqrt[3]{n_s^2}}$$

(4)

A Tabela (6) apresenta os principais ângulos referentes a pá, tal como a Portança e a grade caracterizada pelas pás do rotor. Segue-se então os ângulos principais para a geometria das pás da turbina:

Tabela 6. Ângulos principais referentes as pás e coeficiente de portança do rotor.

Ângulo β ₁	0,50rad
Ângulo β ₂	0,48rad
Ângulo β _∞	0,49rad
Coeficiente de Portança (C _a)	0,53
Ângulo de Ataque α _i	0,05rad
Ângulo do Perfil β _p	0,44rad

Os valores supracitados são suficientes para a determinação dos principais pontos da geometria do rotor e sua caracterização de maneira preliminar.

6. Conclusão e Considerações Finais

Desde que haja um prolongamento da posição da usina em relação a barragem suficientemente grande, a implantação, do ponto de vista da execução das máquinas, não apresentou problemas significativos, apenas uma alta rotação da turbina unidade, que se mostra eficiente para uma usina de pequeno porte. Vale ressaltar, que esse projeto foi baseado em dados bibliográficos, sendo necessária reavaliação no caso de execução, tal como a necessidade de leituras dos dados locais durante pelo menos um ano completo, para melhor monitoramento da vazão e com os dados dessas medições será refeito o dimensionamento com maior precisão, para que com a geometria definida, prossiga o trabalho fazendo avaliações de cavitações e turbilhonamento, dentre outros fatores em um programa CFD, na máquina e adequação da mesma caso necessário.

7. Agradecimentos

A Deus por tudo que me proporcionou e pelo companheirismo constante, mesmo que eu não mereça. A minha mãe e a Ubirajara por estarem sempre prontos a socorrer-me e me incentivar nas diversas vezes que eu desisti. Ao professor Osvaldo por ter acreditado em mim e me dado uma oportunidade, me ajudado, e também por sua paciência e compreensão comigo, aos amigos do GSP por sempre estarem prontos a tirar dúvidas, tal como ao professor Dalmo pela ajuda constante (mesmo fora do horário comercial) e pela compreensão e apoio. E a todos os meus amigos. Destaco também a obra excelente do Macintyre que muito me ensina até hoje.

8. Referências

- (IEA), I. E. A. WEO2015 "Special Report on Energy and Climate Change" Executive Summary Portuguese version. Preserving the global environment: the challenge of shared leadership, 1991.
- ALBUQUERQUE, R. B. DA F. E. "Projeto de Turbinas Hidráulicas Axiais com Parametrização da Geometria, Equação de Equilíbrio Radial e Técnicas de Otimização". p. 94, 2006.
- BEZERRA LEITE NETO, P. et al. "Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências". Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, v. 19, n. 2, p. 219–232, 2011.
- BEZERRA, P.; NETO, L. "Otimização da geração de eletricidade a partir de fonte maremotriz". 2012.
- EPE. "Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2015-2024)". Ministério de Minas e Energia, p. 90, 2015.
- ETEMADI, A. et al. "Electricity generation by the tidal barrages". Energy Procedia, v. 12, p. 928–935, 2011.
- FLÓREZ, R. O. "Pequenas Centrais Hidrelétricas". 1ª edição Oficina de Texto, 2014.
- GRUPO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA UFMA. barragem medições, São Luís, 2013.
- LIMA, S. L. DE et al. "Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas". n. 1999, 2003.
- MACINTYRE, A. J. "Máquinas Motrizes Hidráulicas". Primeira ed. Rio de Janeiro: 1983.
- MACKENZIE. Image34. Disponível em: <[http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas Hidráulicas/CAPÍTULO 3REV.htm](http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidraulicas/CAPITULO%203REV.htm)>. Acesso em: 3 mar. 2016.
- MIGUENS, A. P. "Marés E Correntes De Maré; Correntes Oceânicas". Primeira edição. 2012.
- NETO, P. B. L. "Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz". 2009.
- SOUSA, Z. DE. "Projeto de Máquina de Fluxo TOMO IV Turbinas Hidráulicas com Rotores Axiais". 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: 2013.
- THORPE, T. "An overview of wave energy technologies: Status, performance and costs. Wave Power: Moving towards commercial viability", p.16, November, 1999.

9. RESPONSABILIDADE AUTORAL

O autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ESTUDO E PROJETO PRELIMINAR DE UMA TURBINA DO TIPO BULBO PARA UMA USINA MARÉMOTRIZ STUDY AND PRELIMINARY DESIGN OF A BULB TURBINE FOR TIDAL ENERGY PLANT

Regina de Nazaré Caldeiras, reginadenazare.c@gmail.com¹

Dalmo Inácio Galdez Costa, dalmo.costa@ufma.br¹

¹Universidade Federal do Maranhão, Av. dos Portugueses 1966, Bacanga.

Abstract. *This work's aim is to develop an initial design of a hydraulic turbine, to be implanted at a power plant which uses tide motion at Bacanga's dam in São Luís, Maranhão. It deals with the technical details related to model selection, literature data with informations relative to the Bacanga's dam to determine rotor dimensions. Then, analysis of viability of implantation and quantity of machines is selected.*

Keywords: *Initial concept, Bacanga's dam, Hydraulic Turbine, Bulbo Turbine.*