



Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Luciana Leal Pimentel Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE CENTRAIS MAREMOTRIZES: APLICAÇÃO NA
COSTA ATLÂNTICA DO PARÁ**

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Co-Orientador: Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Dr.- Ing.

Belém - PA
2014

Luciana Leal Pimentel Oliveira

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE CENTRAIS MAREMOTRIZES: APLICAÇÃO NA
COSTA ATLÂNTICA DO PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica, linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Co-Orientador: Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Dr.- Ing.

Belém - PA
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Oliveira, Luciana Leal Pimentel, 1987-
Desenvolvimento de uma metodologia para implantação
de centrais maremotrizes: aplicação costa atlântica do
pará / Luciana Leal Pimentel Oliveira. - 2014.

Orientador: Claudio Jose Cavalcante
Blanco;

Coorientador: Andre Luiz Amarante
Mesquita.

Dissertação (Mestrado) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Belém, 2014.

1. Energia - Fontes alternativas. 2.
Recursos hídricos. I. Título.

CDD 23. ed. 333.79



DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
IMPLANTAÇÃO DE CENTRAIS MAREMOTRIZES: APLICAÇÃO NA
COSTA ATLÂNTICA DO PARÁ

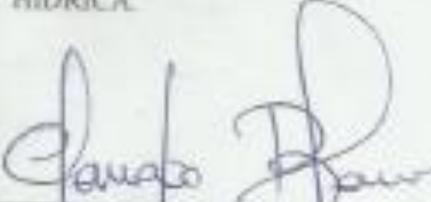
AUTORA:

LUCIANA LEAL PIMENTEL OLIVEIRA

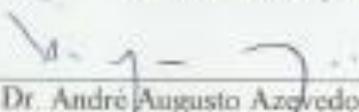
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ENGENHARIA
HÍDRICA.

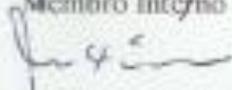
APROVADO EM: 06/10/2014

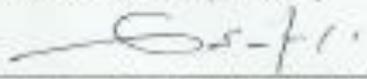
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Claudio Jose Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)

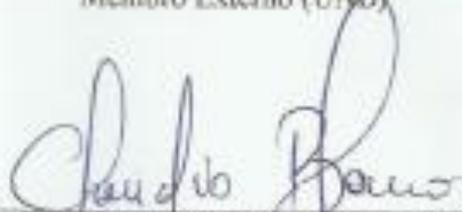

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Co-Orientador (UFPA)


Prof. Dr. André Augusto Azevedo Montenegro Duarte
Membro Interno (UFPA)


Prof. Dr. Marcos Ximenes Ponte
Membro Externo (UFOPA)


Prof. Dr. Antônio César Pinho Brasil Júnior
Membro Externo (UNB)

Visto:


Prof. CLAUDIO JOSÉ CAVALECANTE BLANCO, Ph.D.
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

Ao meu orientador, Professor Claudio José Cavalcante Blanco, pelo apoio constante e orientação dedicada.

Ao meu co-orientador Professor André Mesquita, pela ajuda em todas as etapas do trabalho que foi fundamental, por todo o ensinamento.

À minha mãe, Solange Leal dos Santos, pelo amor e apoio permanente.

Aos irmãos Lucimara, Luciano, cunhado, Luciano Costa pelo incentivo e carinho.

Ao meu marido Éder Bruno, companheirismo de todas as horas.

Aos amigos do grupo de pesquisa (GAES), pelo convívio e amizade, por todos os bons momentos de trabalho e também de descontração.

À UFPA pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro.

RESUMO

Apresenta-se uma metodologia para implantação de centrais maremotrizes, na qual foram modelados fenômenos e parâmetros necessários aos estudos básicos de projeto. A área de estudo escolhida foi a Costa Atlântica Paraense. Assim, um modelo simplificado foi proposto para representar o reservatório. Este modelo foi validado com os resultados obtidos através da batimetria realizada no estuário do Bacanga em São Luís do Maranhão. Além da modelagem do reservatório, as alturas de maré foram modeladas através do processo de interpolação hermitiana. O diâmetro da turbina foi determinado por correlações disponíveis na literatura. A vazão decorrente da variação de altura de queda entre o mar e o reservatório provocada pelas variações maré, foi determinada através da fórmula de Hazen-Williams. A modelagem do reservatório e da altura de maré, mais os métodos de determinação do diâmetro da turbina e da vazão turbinada, permitiram a determinação da potência instalada e da energia gerada em cada local estudado, os quais foram classificados como de pequeno, médio e grande porte. Posteriormente, foi realizada a análise de custos para cada local, incluindo custo de investimento, operação, manutenção e custo unitário de energia. O custo de investimento da energia maremotriz, em comparação com as outras fontes de energia, é alto. Entretanto, o custo unitário de energia é bem mais baixo do que o custo unitário de energia de seu principal concorrente na região, os geradores a diesel. A modelagem dos três casos supramencionados e seus resultados de energia gerada e custos, demonstram que a energia das marés tem potencial para ser explorada na Costa Atlântica do Pará.

Palavras-Chave: Energia Maremotriz, Estuário, Amazônia.

ABSTRACT

It presents a methodology for deploying tidal plants, which were modeled phenomena and parameters needed for basic studies project. The chosen study area was the Atlantic Coast Pará. Thus, a simplified model is proposed to represent the reservoir. This model was validated with the results obtained from the bathymetry held in the estuary of Bacanga in São Luís, Maranhão, Brazil. In addition to the reservoir modeling, tidal heights were shaped by the Hermitian interpolation process. The diameter of the turbine was determined by correlations available in literature. The flow resulting from the height of variation between the sea and the reservoir caused by tidal variations, was determined by Hazen-Williams formula. The modeling of the reservoir and the tide high, more methods of determining the diameter of the turbine and the flow, allowed the determination of the installed capacity and energy generated at each site studied, which were classified as small, medium and large size. Subsequently, the cost analysis was performed for each location, including investment cost, operation, maintenance and unit energy cost. The investment cost of tidal power in comparison with other energy sources, is high. However, the unit cost of energy is much lower than the unit cost of energy of its main competitor in the region, the diesel generators. The modeling of the three cases mentioned above and your energy costs and generated results show that tidal power has the potential to be exploited in the Atlantic Coast of Pará.

Keywords: Tidal Power, Estuary, Amazon.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Participação das fontes de energia primária global..... | 21 |
| Figura 2 – Oferta de energia por fonte no Brasil..... | 22 |
| Figura 3–Participação de Energia renováveis na matriz energética | 22 |
| Figura 4– Relação das marés com as fases da lua e com as posições relativas da terra, da lua e do sol | 24 |
| Figura 5 – Representação das marés de sizígia e quadratura..... | 25 |
| Figura 6 – Oscilações periódicas de maré com seus respectivos parâmetros..... | 26 |
| Figura 7– Ciclo de maré no período de 12 horas e 25 minutos..... | 28 |
| Figura 8 – Maré Semidiurna..... | 28 |
| Figura 9 – Maré Diurna..... | 29 |
| Figura 10 – Maré Mista..... | 29 |
| Figura 11– Regiões mais apropriadas para a utilização da energia das marés..... | 30 |
| Figura 12 – Localização das amplitudes de maré no litoral do Brasil..... | 31 |
| Figura 13 – Energia potencial das marés através de represamento..... | 32 |
| Figura 14 – Esboço simples do esquema de uma planta maremotriz..... | 33 |
| Figura 15 – Representação esquemática nos modos de funcionamento: Geração efeito simples (<i>One-Way</i>)..... | 34 |
| Figura 16 – Representação esquemática nos modo de funcionamento: Geração nos dois sentidos (<i>Two-Way</i>)..... | 35 |
| Figura 17 – Visão em corte de um grupo bulbo..... | 38 |
| Figura 18 – Rotor de uma turbina Bulbo..... | 38 |
| Figura 19 – Modelo esquemático de uma turbina Kaplan..... | 40 |
| Figura 20 – Rotor de uma turbina Kaplan..... | 40 |
| Figura 21 – Modelo esquemático de uma turbina Francis..... | 41 |
| Figura 22 – Seleção de turbinas | 42 |
| Figura 23 – Barragem da usina maremotriz de La Rance | 42 |
| Figura 24 – Usina maremotriz Annapolis | 43 |
| Figura 25 – Localização da usina de Kislaya Guba | 43 |
| Figura 26 – Mapa de localização– Costa Atlântica Pará-Maranhão | 45 |
| Figura 27 – Estações maregráficas dos estados do Pará e Maranhão..... | 46 |
| Figura 28 – Fluxograma da Metodologia Proposta | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 29 – Dimensão do canal trapezoidal: a) Corte transversal. b) Corte longitudinal e suas variáveis..... | 50 |
| Figura 30 – Curva Cota x Volume do Bacanga e do modelo..... | 60 |
| Figura 31 – Simulações do mar e reservatório do estuário do Bacanga..... | 61 |
| Figura 32 – Simulações do mar e reservatório do modelo hipotético..... | 62 |
| Figura 33: Esquema de geração para o Estuário do Bacanga | 62 |
| Figura 34: Aplicação do modelo hipotético no Estuário do Bacanga | 63 |
| Figura 35 – Mapa de localização – Pequeno Porte..... | 64 |
| Figura 36 – Estuário localizado na Vila de Fortalezinha..... | 65 |
| Figura 37 – Simulação das alturas de maré da estação Maregráfica Salinópolis..... | 67 |
| Figura 38 – Área de implantação - Pequeno Porte..... | 68 |
| Figura 39 – Curva Cota x Volume – Pequeno Porte..... | 69 |
| Figura 40 – Nível do reservatório, nível do mar e potência num diâmetro de 1,25 m (1 Turbina) | 71 |
| Figura 41 – Número de Turbinas x Energia gerada por ciclo de maré – Pequeno Porte .. | 72 |
| Figura 42 – Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,4 m..... | 73 |
| Figura 43 – Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,6 m..... | 73 |
| Figura 44 – Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,8 m..... | 73 |
| Figura 45 – Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 1,0 m..... | 74 |
| Figura 46 – Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 1,2 m..... | 74 |
| Figura 47 – Mapa de localização – Médio Porte..... | 75 |
| Figura 48 – Imagem da Vila de Iriteua..... | 76 |
| Figura 49 – Altura de maré da Estação Maregráfica Ilha dos Guarás..... | 78 |
| Figura 50 – Área de implantação de Médio Porte..... | 78 |
| Figura 51 – Curva Cota x Volume na planta de Médio Porte..... | 80 |
| Figura 52 – Nível do reservatório, nível do mar e potência num diâmetro de 2,0 m (1 turbina)..... | 81 |
| Figura 53 – Número de turbinas x energia gerada por ciclo de maré – Médio Porte | 82 |
| Figura 54 – Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,4 m..... | 82 |
| Figura 55 – Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,6 m..... | 83 |
| Figura 56 – Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,8 m..... | 83 |
| Figura 57 – Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 1,0 m..... | 83 |
| Figura 58– Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 1,2 m..... | 84 |

| | |
|--|----|
| Figura 59 – Mapa de localização – Grande Porte..... | 85 |
| Figura 60 – Área de implantação de Grande Porte..... | 86 |
| Figura 61 – Curva Cota x Volume Grande Porte..... | 87 |
| Figura 62 – Variações do nível do reservatório, mar e potência | 88 |
| Figura 63 – Número de turbinas x energia gerada por ciclo de maré - Grande Porte | 89 |
| Figura 64 – Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,4 m..... | 90 |
| Figura 65 – Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,6 m..... | 90 |
| Figura 66 – Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,8 m..... | 90 |
| Figura 67 – Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 1,0 m..... | 91 |
| Figura 68 – Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 1,2 m..... | 91 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Estações maregráficas localizadas entre os estados do Pará e Maranhão | 47 |
| Tabela 2 – Especificação as variáveis | 51 |
| Tabela 3 – Parâmetros de entrada para validação do modelo | 59 |
| Tabela 4 – Dados Cota x Volume do Bacanga e do modelo | 60 |
| Tabela 5 – Dados estação Maregráfica de Salinópolis | 66 |
| Tabela 6 – Parâmetros de entrada para o modelo – Pequeno Porte | 68 |
| Tabela 7 – Dados Cota x Volume – Pequeno Porte | 69 |
| Tabela 8 – Variáveis de entrada no dimensionamento do rotor da turbina – Pequeno Porte | 70 |
| Tabela 9 – Parâmetros adimensionais – Pequeno Porte | 71 |
| Tabela 10 – Dados estação Maregráfica Ilha dos Guarás | 77 |
| Tabela 11– Dados Cota x Volume do modelo – Médio Porte | 79 |
| Tabela 12 – Parâmetros de entrada no dimensionamento do rotor da turbina – Médio Porte | 80 |
| Tabela 13 – Parâmetros calculados no dimensionamento do rotor da turbina – Médio Porte | 81 |
| Tabela 14 – Dados Cota x Volume do modelo – Grande Porte | 87 |
| Tabela 15 – Parâmetros adimensionais para o caso de estudo de Grande Porte | 88 |
| Tabela 16 – Investimento para implantação das centrais maremotrizes | 92 |
| Tabela 17 – Composição dos Custos (US\$) | 92 |
| Tabela 18 – Custo unitário de Energia | 93 |
| Tabela 19 – Custo dos empreendimentos de geração de energia | 93 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| AIE | Agência Internacional de Energia |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| PROINFA | Programa de Incentivo a Fontes Alternativas |
| CMMA | Costa de Manguezais de Macro maré da Amazônia |
| FEMAR | Fundação de Estudos do Mar |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |

LISTA DE SIMBOLOS E ILUSTRAÇÕES

| | |
|-------------|---|
| OIE | Oferta Interna de Energia |
| PDE | Plano Decenal de Expansão de Energia |
| F | força de atração gravitacional (N) |
| G | constante gravitacional ($N \cdot m^2 / Kg^2$) |
| m_1 | massa da lua ou do sol (kg) |
| m_2 | massa do planeta (kg) |
| r | distância entre o planeta, a lua ou sol (m) |
| B | Largura superior do reservatório |
| b | Base intermediária |
| b_0 | Largura inferior do reservatório |
| h_0 | Altura do nível inicial da água |
| H | Altura total do reservatório |
| L_i | Comprimento do reservatório trapezoidal |
| α | Ângulo de inclinação da área trapezoidal |
| β | Ângulo de inclinação da área triangular |
| A | Área da secção transversal |
| Q | vazão de projeto |
| H | altura de queda |
| n | rotação em rpm |
| n_q | rotação específica |
| φ | Coefficiente de Vazão |
| Ψ | Coefficiente de Pressão |
| ϑ | Diâmetro Específico |
| D_e | diâmetro dimensional do rotor |
| H_M | altura da maré (m) |
| H_R | altura do reservatório (m) |
| Δh | desnível estabelecido pela barragem em relação ao mar ou ao reservatório (m) |
| C | coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos condutos forçados |
| D | diâmetro da tubulação (m) |
| L | comprimento da tubulação (m) |

| | |
|------------|--|
| Δt | intervalo de tempo |
| ΔV | volume trocado pelo reservatório com o mar |
| P_{ot} | potência hidráulica da central maremotriz (W) |
| η | rendimento total da central (-) |
| g | aceleração da gravidade (m/s^2) |
| CIP | custo de investimento estimado do projeto (\$) |
| C_i | custo de instalação do projeto (\$/kW) |
| P | potência instalada do projeto (kW) |
| CUE | custo unitário de energia (\$/kWh) |
| COM | custo de operação e manutenção (\$) |
| a_n | fator de desconto (-) |
| t | tempo de operação (h) |
| VT | Volume total |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 2 OBJETIVOS | 20 |
| 2.1 GERAL | 20 |
| 2.2 ESPECÍFICOS | 20 |
| 3 REVISÃO DA LITERATURA | 21 |
| 3.1 MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL | 21 |
| 3.2 PRINCÍPIO FÍSICO DA ENERGIA DAS MARÉS | 23 |
| 3.2.1 Elementos da Maré | 26 |
| 3.2.2 Tipos de Maré | 27 |
| 3.3 APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS MARÉS | 30 |
| 3.3.1 Energia Potencial da Maré | 31 |
| 3.4 MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA CENTRAL MAREMOTRIZ | 32 |
| 3.4.1 Geração em efeito simples | 33 |
| 3.4.2 Geração em efeito duplo | 34 |
| 3.5 COMPONENTES BÁSICOS PARA UMA CENTRAL MAREMOTRIZ | 35 |
| 3.5.1 Estuário | 35 |
| 3.5.2 Barragem | 36 |
| 3.5.3 Casa de força | 36 |
| 3.6 TURBINAS HIDRÁULICAS | 37 |
| 3.6.1 Turbinas Bulbo | 37 |
| 3.6.2 Turbinas Kaplan | 39 |
| 3.6.3 Turbinas Francis | 41 |
| 3.7 USINAS MAREMOTRIZES NO MUNDO | 42 |
| 4 ÁREA DE ESTUDO: COSTA ATLÂNTICA DO PARÁ | 45 |
| 4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL | 45 |
| 5 METODOLOGIA | 48 |
| 5.1 MODELAGEM MATEMÁTICA: ESTIMATIVA DE ALTURA DE MARÉ | 49 |
| 5.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE RESERVATÓRIO HIPOTÉTICO | 50 |
| 5.3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DA TURBINA | 52 |
| 5.4 MODELO DE GERAÇÃO DE ENERGIA | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 5.5 ANÁLISE DE CUSTOS | 56 |
| 5.5.1 Custos de Instalação | 56 |
| 5.5.2 Custos de Investimento | 56 |
| 5.5.3 Custo Unitário de Energia (CUE) | 57 |
| 6 LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA | 58 |
| 6.1 MODELO DO RESERVATÓRIO | 58 |
| 6.2 SELEÇÃO DA TURBINA | 58 |
| 6.3 CÁLCULO DA VAZÃO..... | 58 |
| 6.4 ANÁLISE DE CUSTO..... | 58 |
| 7 RESULTADOS..... | 59 |
| 7.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO..... | 59 |
| 7.2 CENTRAL MAREMOTRIZ DE PEQUENO PORTE | 64 |
| 7.2.1 Descrição do Local..... | 64 |
| 7.2.2 Modelagem da Maré | 65 |
| 7.2.3 Aplicação da Modelagem..... | 67 |
| 7.2.4 Definição do diâmetro da turbina..... | 70 |
| 7.2.5 Simulações de Operação | 71 |
| 7.3 CENTRAL MAREMOTRIZ DE MÉDIO PORTE | 75 |
| 7.3.1 Descrição do Local..... | 75 |
| 7.3.2 Modelagem da Maré | 76 |
| 7.3.3 Aplicação do Modelo hipotético | 78 |
| 7.3.4 Definição do diâmetro da turbina..... | 80 |
| 7.3.5 Simulações de Operação | 81 |
| 7.4 CENTRAL MAREMOTRIZ DE GRANDE PORTE..... | 85 |
| 7.4.1 Descrição do Local..... | 85 |
| 7.4.2 Modelagem das Marés | 86 |
| 7.4.3 Aplicação do Modelo hipotético | 86 |
| 7.4.4 Definição do diâmetro da turbina..... | 87 |
| 7.4.5 Simulações de Operação | 88 |
| 7.5 ANÁLISE DE CUSTOS | 92 |
| 8. DISCUSSÃO | 94 |
| 9. CONCLUSÃO | 95 |
| 10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 96 |
| 11 REFERÊNCIAS | 97 |

| | |
|-------------------------|------------|
| APÊNDICE A | 104 |
| APÊNDICE B | 108 |
| APÊNDICE C | 125 |

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica é considerado uma das condições básicas para o desenvolvimento socioeconômico de um país, pois o mesmo está relacionado diretamente com o melhoramento de outros fatores essenciais como saúde, educação, água, saneamento e alimentação. A dependência de combustíveis fósseis para satisfazer a maior parte das necessidades mundiais de energia é o desafio da sustentabilidade que confronta a humanidade. Atualmente, com as mudanças climáticas causadas principalmente pelo aumento da temperatura média global, faz-se necessário o uso de fontes alternativas de energia.

O interesse no desenvolvimento e produção de energias renováveis tem-se acentuado nos últimos anos, sendo importantes na transição para um futuro energético sustentável. Em geral, o foco está em soluções pelo lado do fornecimento que possam dar contribuição significativa para satisfazer as necessidades energéticas do mundo. Nesse contexto, as fontes renováveis podem complementar ou mesmo substituir outros tipos de fontes de energia no setor energético mundial, com o intuito de alcançar novas metas em direção à preservação ambiental.

O Brasil possui uma posição privilegiada quanto ao volume de seus recursos hidrelétricos, porém esta ideia de abundância não é uma realidade, pois na própria Amazônia, há uma grande dificuldade em fornecer energia elétrica às comunidades ribeirinhas isoladas na região.

As centrais maremotrizes têm com fonte de energia as marés caracterizadas pela elevação e queda do nível do mar. É uma fonte de energia renovável importante, pois apresenta um potencial no norte do Brasil, principalmente nos estados do Pará, Maranhão e Amapá. Atualmente a tecnologia está em fase de desenvolvimento e início da sua exploração, no entanto, exige esforços em termos de redirecionamento de investimentos em pesquisas.

Porém, como qualquer aproveitamento de recurso natural, existe a necessidade de cuidados no desenvolvimento dos projetos, levando em consideração a ocorrência dos impactos ambientais. As centrais maremotrizes possuem vantagens nas questões ambientais, pois devem causar menores impactos físicos, já que os reservatórios ocupam áreas já inundadas periodicamente pelas marés. Entretanto, o estabelecimento da barragem e consequentemente do reservatório, cria regiões de montante e jusante com alturas de maré diferentes das anteriores ao empreendimento. Logo, há necessidade de se mensurar e

mitigar, dependendo da magnitude, os possíveis impactos ambientais, que podem afetar a flora e a fauna da região de implantação da central maremotriz.

Diante deste cenário, foi desenvolvida uma metodologia para implantação de Centrais Maremotrizes na costa do estado do Pará, afim de que se torne uma alternativa para o desenvolvimento sustentável, eficiente e eficaz, garantindo o adequado gerenciamento dos recursos hídricos para a geração de energia elétrica na região, estabelecendo diretrizes tecnológicas, econômicas e ambientais.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Desenvolver uma metodologia para implantação de Centrais Maremotrizes na Amazônia.

2.2 ESPECÍFICOS

- Analisar os aspectos tecnológicos das centrais maremotrizes;
- Analisar os levantamentos de dados e de campo necessários à elaboração de um projeto de central maremotriz;
- Desenvolver software para aplicação de modelo de simulação de maré;
- Desenvolver modelo de reservatório para determinação de produção de energia de central maremotriz;
- Aplicar a metodologia a alguns estudos de caso.

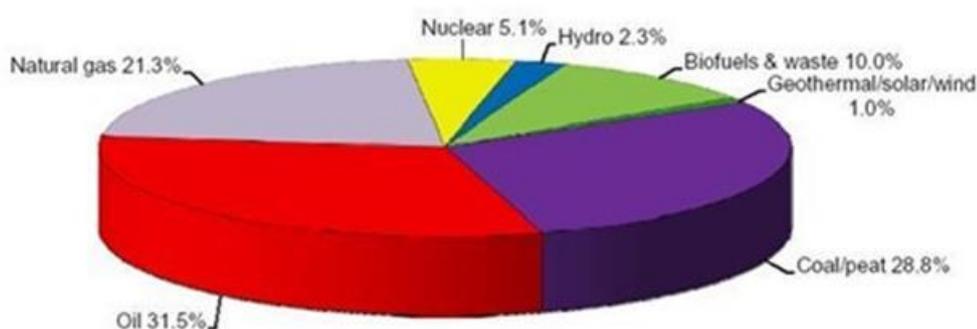
3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 MATRIZ ENERGÉTICA ATUAL

Atualmente, a matriz energética mundial é baseada por fontes não renováveis, como carvão e petróleo que representam, segundo as estatísticas da Agência Internacional de Energia (AIE) de 2011, cerca de 60% do consumo mundial de energia, enquanto que as fontes alternativas, como energia solar, geotérmica, eólica representam menos de 3%.

De acordo com IEA (2013), a participação das energias renováveis cada vez mais cresce na matriz energética mundial. De acordo com a Figura 1, a maior contribuição das energias renováveis vem da biomassa (10%), sendo que a grande maioria desta vem de biomassa tradicional utilizada em países em desenvolvimento. Em segundo lugar, apresenta-se a energia hidráulica, representando 2,3%, e outras renováveis, que somadas chegam a 1%.

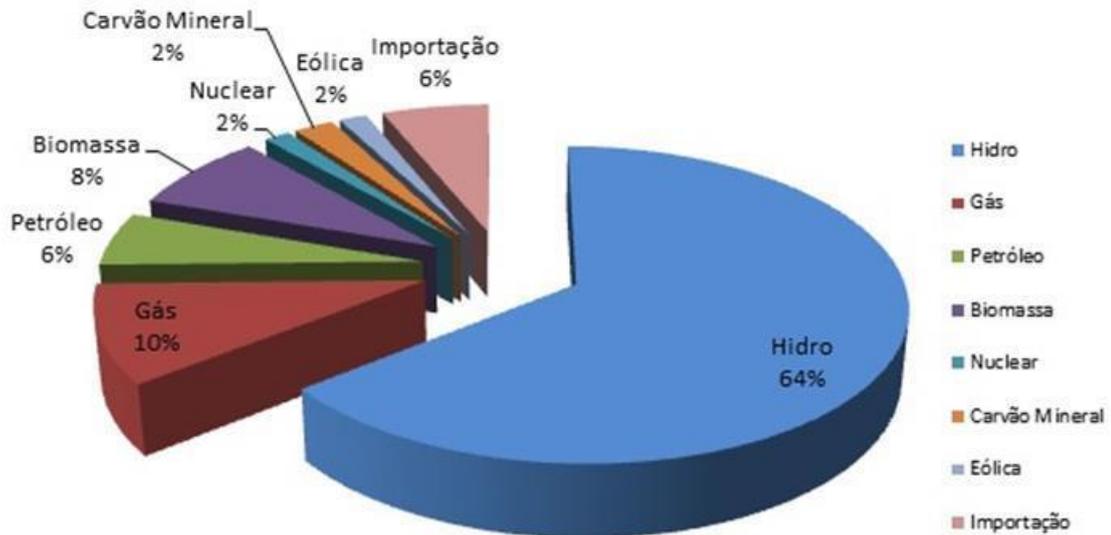
Figura 1: Participação das fontes de energia primária no mundo



Fonte: International Energy Agency (IEA 2014)

Desde 1850, o uso de combustíveis fósseis (carvão, óleo e gás), tem sido dominante para o atendimento da demanda de energia no mundo (SRREN, 2011). De acordo com Mothé e Santos (2008), a poluição do ar, as mudanças climáticas, os derramamentos de óleo, a geração de resíduos tóxicos e o crescimento acelerado das emissões de gases de efeito estufa, são resultados da utilização dessas fontes de energia não renováveis.

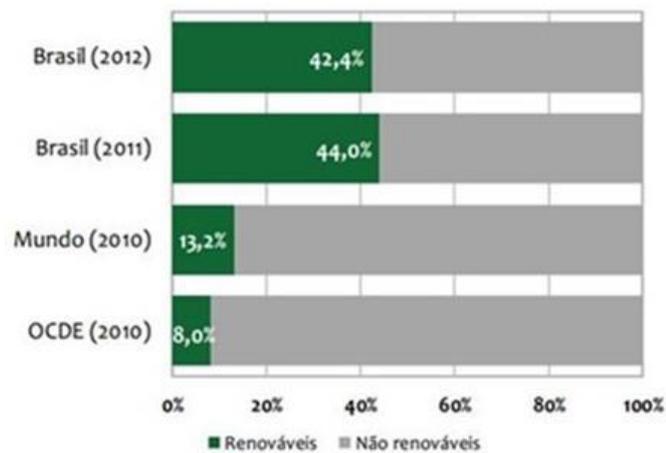
O Brasil apresenta uma situação privilegiada por possuir bacias hidrográficas que proporcionam um grande potencial energético consideravelmente limpo, onde a principal fonte de geração de energia é realizada pela energia hidráulica (Figura 2).

Figura 2: Oferta de energia por fonte no Brasil

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013)

Conforme apresentado na Figura 2, a matriz energética brasileira é predominantemente renovável, grande parte feita por geração hidráulica (64,33%), de importações (6,19%) que são, essencialmente, de origem renovável e da geração térmica originada por biomassa (8,14%), além de dispor de outras formas renováveis de produção de energia. Desta forma, pode-se afirmar que a geração elétrica no Brasil é originada a partir de fontes renováveis.

De acordo com o Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2012 no país, 42,4% da Oferta Interna de Energia (OIE) era renovável, enquanto a média mundial era de 13,2% (Figura 3).

Figura3: Participação da Energia renovável na matriz energética

Fonte: International Energy Agency (IEA 2014)

O estudo do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2021), desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), mostra que nos próximos 10 anos, o conjunto das fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, etanol, biomassa, entre outras) crescerá a uma taxa média de 5,1% ao ano, passando a matriz energética brasileira de uma participação de 43,9% em 2012 para 45% em 2021. Isso mostra uma menor participação, por exemplo, das hidrelétricas que de 77% em 2009 caíram para 64,33% em 2013. Essa queda é resultado da utilização de outras fontes renováveis de energia. Ainda que o aumento seja pequeno, observa-se cada vez mais uma participação das fontes renováveis de energia na matriz energética.

O potencial inexplorado de energia renovável na Terra é enorme e amplamente distribuído. Em muitas situações, a exploração desse potencial oferece oportunidades para promover objetivos de desenvolvimento na parte da qualidade ambiental, desenvolvimento social e econômico, segurança energética e aumento da demanda energética (VANZIN *et al.*, 2005). A União Europeia adotou a meta de suprir 20% de suas necessidades energéticas utilizando fontes renováveis de energia até 2020. No entanto, existem barreiras tecnológicas e de mercado que ainda persistem e devem ser superadas, para que as fontes alternativas de energia possam desempenhar um papel significativo maior no conjunto de fontes de energia utilizadas no mundo. Este panorama energético cada vez mais deverá ser modificado, devido à preocupação com a limitação dos recursos disponíveis utilizados como fonte de energia.

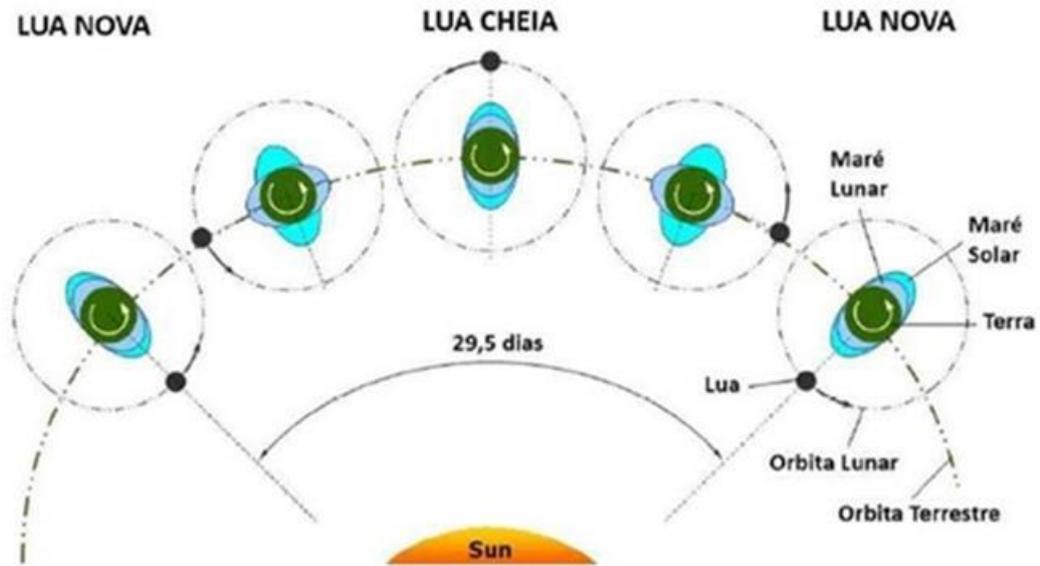
Todos esses fatores mencionados anteriormente tem um peso bastante significativo na evolução futura na matriz energética global, e se as fontes de energias renováveis forem implementadas corretamente, as mesmas terão participação cada vez mais relevante, tornando-se imprescindíveis no futuro.

3.2 PRINCÍPIO FÍSICO DA ENERGIA DAS MARÉS

Maré é definida como a oscilação vertical da superfície do mar sobre a Terra. Representa a energia dissipada pelos movimentos das marés, geradas pela atuação das forças gravitacionais da lua e do sol, sobre diversos pontos da Terra (ROURKE, BOYLE *et al.*, 2009). Na Terra, a atração gravitacional atua na direção do seu centro de massa, confinando as águas oceânicas a sua superfície. No entanto, as forças gravitacionais da Lua e do Sol e a força centrífuga do sistema Sol/Terra/Lua atuam externamente sobre as águas oceânicas da Terra. Estas forças externas atuam como forças geradoras ou forças de tração. Os seus

efeitos sobrepõem-se à força gravitacional da Terra e atuam de modo a atrair as águas oceânicas horizontalmente para vários pontos da superfície da Terra (Figura 4).

Figura4: Relação das marés com as fases da lua e com as posições relativas da terra, da lua e do sol



Fonte: Abreu, 2010

Pela lei da gravitação universal, a força de atração gravitacional entre dois corpos de massas M e m é diretamente proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa. A força de atração gravitacional exercida pelo sol ou pela lua pode ser calculada pela:

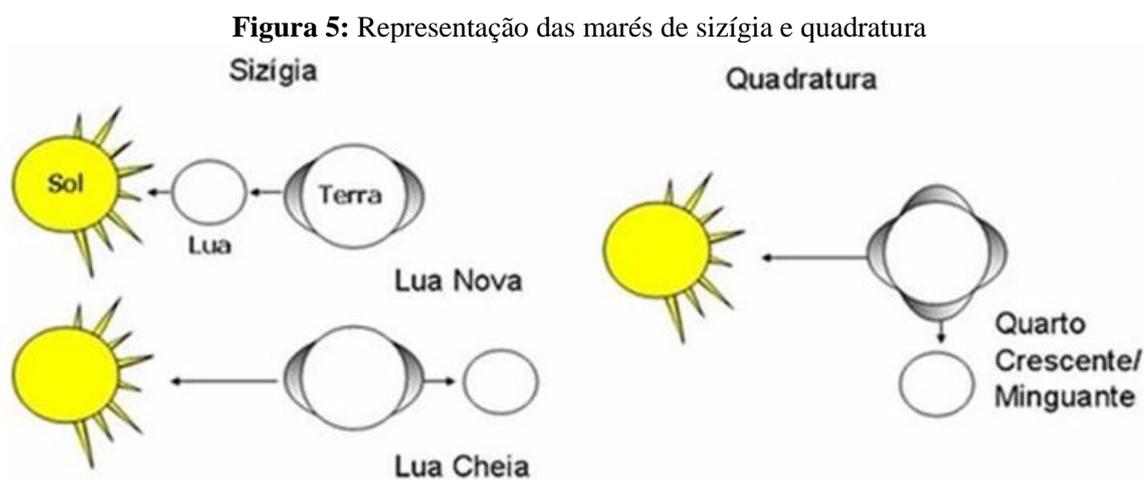
$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

Em que,

- F: força de atração gravitacional (N);
- G: constante gravitacional ($\text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$);
- m_1 : massa da lua ou do sol (kg);
- m_2 : massa do planeta (kg);
- r: distância entre o planeta, a lua ou sol (m).

O efeito da força da gravidade exercida pela Lua na Terra é cerca de 2 vezes maior do que a exercida pelo sol, devido à menor distância entre a terra ea lua.

Segundo Ferreira (2007), a posição relativa entre sol, lua e Terra também interfere na intensidade da maré. Constatou-se que as marés são originadas através do efeito combinado de forças de tração geradas pelo Sol e pela Lua (Figura 5), gerando marés de sizígia e quadratura.



Fonte: Ferreira, 2007

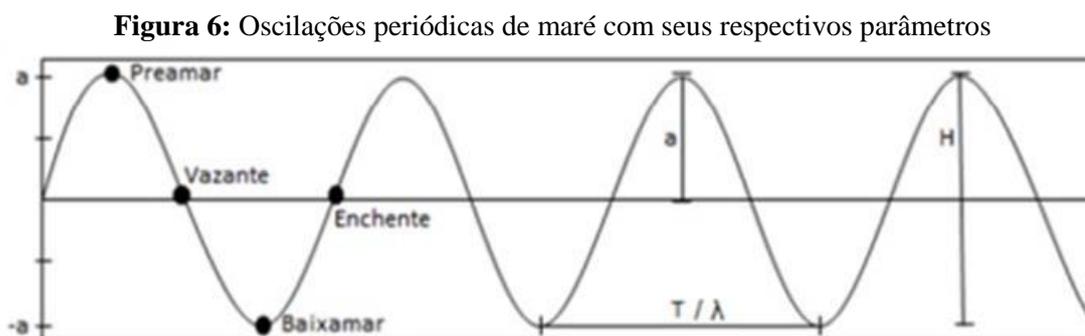
Quando a Lua encontra-se na posição de Lua Nova ou Lua Cheia e está alinhada com o sol, os efeitos de força gravitacional somam-se, causando maiores amplitudes de maré, onde as preamares são maiores que a média e a baixa-mares são menores que a média. Este tipo de maré é denominado maré de sizígia (“*spring tide*”).

Nas posições de Quarto Crescente e Quarto Minguante da Lua, as suas forças gravitacionais subtraem-se, reduzindo o efeito da maré. As preamares são inferiores à média e as baixa-mares são superiores à média. Tais marés de amplitude mais reduzida são denominadas maré de quadratura (“*neap tide*”).

Existem dois tipos de marés, as chamadas astronômicas e meteorológicas. A maré astronômica é o movimento periódico de subida e descida do nível do mar que obedece à força do campo gravitacional do sistema Terra-Sol-Lua. Já a maré meteorológica existe devido aos efeitos meteorológicos, tais como ação dos ventos e das ondas, influenciando na variação do nível da água, portanto, sendo responsável pelo aumento ou diminuição do nível do mar (VALENTINI, 2003). No Brasil, o litoral norte e nordeste são influenciados pelas marés astronômicas devido à proximidade da linha do equador, gerando significativas alturas de marés. Já o litoral sudeste e sul do Brasil sofrem influência da maré meteorológica, devido às tempestades intensas no Atlântico Sul (FERREIRA, 2007).

3.2.1 Elementos da Maré

As subidas e descidas do nível d'água são denominadas respectivamente de enchente e vazante e estão relacionadas às correntes de maré (Figura 6). Quando se encontra na máxima elevação de maré (preamar) tem-se a estofa de maré enchente e na mínima elevação (baixamar) estofa de maré vazante (ALFREDINI, 2009). A seguir são apresentados alguns elementos de maré (MIGUENS, 1996):



Fonte: Colombi, 2011

- Preamar ou Maré Alta

Maior altura que alcançam as águas em uma oscilação, ou seja, nível máximo de uma maré cheia.

- Baixamar ou Maré baixa

Menor altura que alcançam as águas em uma oscilação; ou seja, nível mínimo de uma maré vazante.

- Enchente

Intervalo de tempo durante o período entre uma baixamar e uma preamar sucessiva, quando a altura de maré aumenta.

- Vazante

Intervalo de tempo durante o qual o nível do mar diminui.

- Amplitude de Maré (a)

É a diferença de altura entre as preamares e baixa-mares consecutivas que ocorrem num determinado local.

A amplitude de maré num determinado local não é constante, mas varia de dia para dia. Parte desta variação é provocada pelos efeitos do vento e da meteorologia. É um fenômeno periódico relacionado com as posições do Sol e da Lua com relação à Terra.

- Nível de Redução:

O nível de redução, são as referidas alturas das águas, normalmente corresponde ao nível médio das baixa-mares de sizígia nas cartas náuticas brasileiras.

- Altura da Maré (H)

É a distância vertical entre o nível do mar em um determinado instante e o nível de redução (plano de referência que constitui a origem de contagem das profundidades e das alturas da maré).

- Estofo da Maré

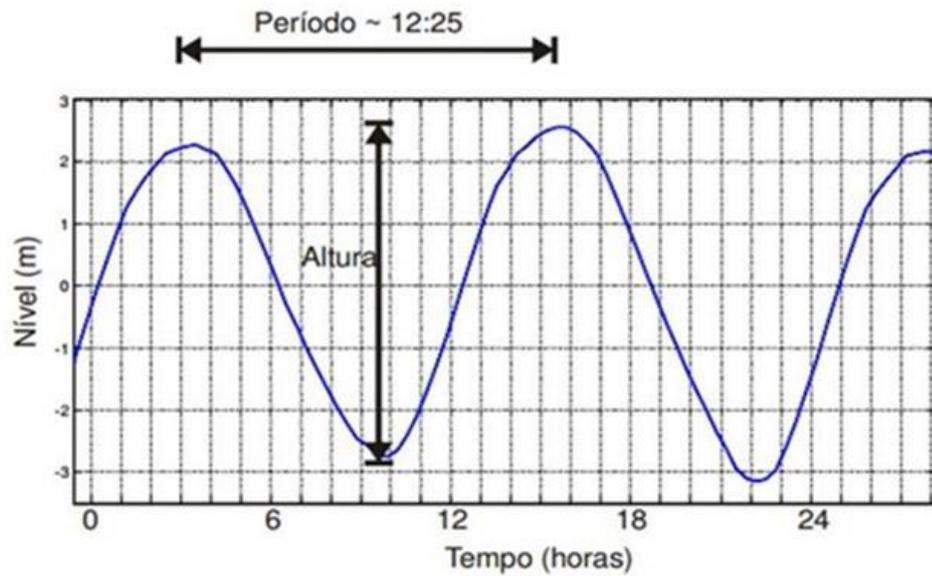
Período durante o qual o nível do mar fica praticamente estacionado, ou seja, não ocorre qualquer alteração na altura de nível.

- Nível Médio (NM)

Altura média da superfície do mar em todos os estágios de oscilação da maré, observados em um período de tempo, ou seja, equivale ao nível em que permaneceria o mar na ausência das forças geradoras de maré.

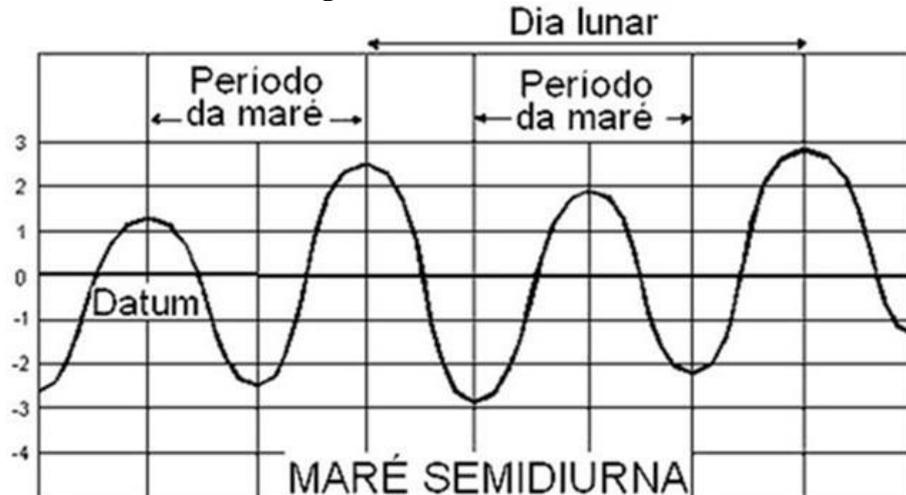
3.2.2 Tipos de Maré

Em qualquer local, a superfície do oceano oscila entre pontos altos e baixos. Cada ciclo de maré leva em média 12 horas e 25 minutos, de modo que dois ciclos de maré ocorrem para cada dia lunar em aproximadamente 24 horas e 50 minutos (Figura 7), portanto, as marés não ocorrem todos os dias à mesma hora num mesmo local.

Figura 7: Ciclo de maré no período de 12 horas e 25 minutos

Fonte: Araquistain, 2010

O tipo de maré refere-se à forma característica da subida e descida da maré e podem ser agrupadas em três classes ou tipos: semidiurno, diurno e misto (ARAQUISTAIN, 2010).

Figura 8: Maré Semidiurna

Fonte: Araquistain, 2010

A maré semidiurna, então, apresenta duas preamares e duas baixa-mares no período de um dia lunar, sendo o intervalo de tempo entre uma preamar e baixamar consecutiva de pouco mais de 6 horas. Normalmente, há apenas variações nas alturas de duas preamares ou de duas baixa-mares sucessivas. No Brasil, as marés em geral têm comportamento semidiurno desde Vitória no Espírito Santo, até o litoral norte do país (MARINHA, 2007). O padrão semidiurno, entretanto, vai variar em diversos locais da Terra, em virtude dos efeitos

de massas terrestres, latitude do lugar, atrito, viscosidade do meio líquido, produzindo marés diurnas e marés mistas.

As marés diurnas constituem um padrão, no qual ocorrem apenas uma preamar e uma baixamar a cada dia lunar (Figura 9).

Figura 9: Maré Diurna

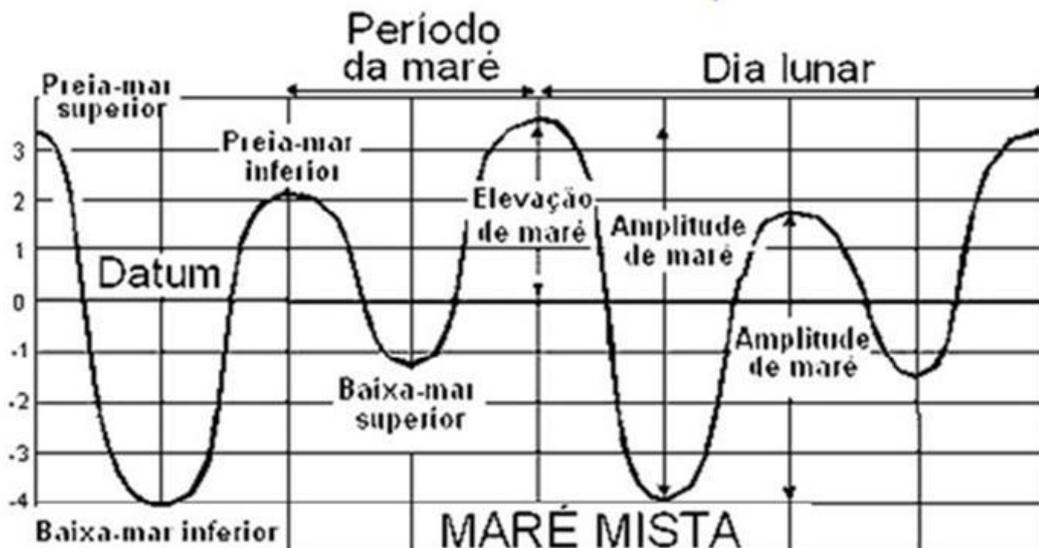


Fonte: Araquistain, 2010

Exemplos de áreas onde se observam esse tipo de maré: costa norte do Golfo do México, Mar de Java, situado no meio das ilhas indonésias de Bornéu e Golfo de Tonkin, que é um braço do mar da China Meridional, com 500 km de comprimento por 250 km de largura.

As marés mistas constituem um tipo de maré caracterizado por grandes diferenças de altura entre duas preamares ou duas baixa-mares consecutivas (Figura 10). Elas podem ter predominância diurna, como exemplo em Manila, nas Filipinas, ou dominância semidiurna, como exemplo São Francisco, Califórnia.

Figura 10: Maré Mista



Fonte: Araquistain, 2010

De forma a distinguir as duas marés do dia, foram atribuídos nomes a cada uma delas. Das duas preamares, a maior é denominada “preamar superior” e a menor “preamar inferior”. De um modo semelhante, as duas baixa-mares são chamadas de “baixa-mar inferior” e “baixa-mar superior”.

3.3 APROVEITAMENTO DA ENERGIA DAS MARÉS

A maré é uma fonte decorrente do processo natural das variações de nível entre as marés altas e baixas, resultante da força gravitacional da Terra com a Lua e o Sol. O primeiro registro deste tipo de fonte de energia renovável foi relatado pelos romanos após suas incursões à Gália e Bretanha (atual França e Reino Unido). Desde a ocupação romana na Inglaterra, vários moinhos foram construídos, utilizando a força das marés para seu funcionamento (FERREIRA, 2007). De acordo com os registros, o mais antigo moinho de maré foi construído em 762 D.C. A energia das marés, embora conhecida e explorada desde a idade média, atualmente vem sendo utilizada como uma fonte alternativa para a geração de energia elétrica com grande eficiência e por ser renovável.

A maremotriz é uma das mais propícias formas de geração de energia, mas no mundo, há um número limitado de lugares onde é possível a sua viável exploração. Essa forma de geração de energia é utilizada na Argentina, Austrália, Canadá, Coréia, China, Índia, Reino Unido, Estados Unidos, além da França, onde foi construída a primeira usina maremotriz do mundo, em La Rance, em 1966.

Na Figura 11, são apresentados os principais locais apropriados com amplitudes de marés para o aproveitamento dessa forma de geração de energia.

Figura 11: Regiões mais apropriadas para a utilização da energia das marés

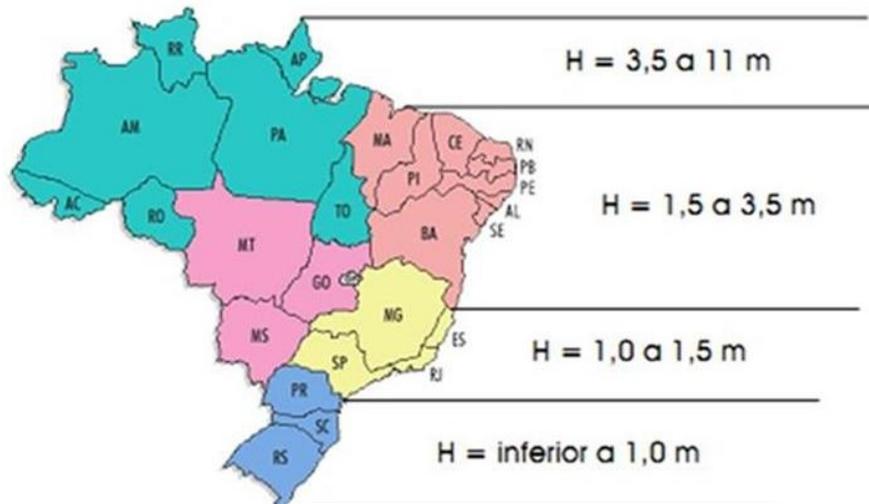


Fonte: Ferreira, 2007

A altura da maré tem um papel fundamental nos ambientes estuarinos. Sua importância está relacionada ao volume de água marinha que entra (enchente) e sai (vazante) durante um ciclo completo de maré.

A Figura 12 apresenta as variações de maré nas regiões brasileiras, podendo-se observar que as maiores amplitudes de maré estão localizadas na costa norte do Brasil, especificamente nos estados do Pará, Maranhão e Amapá.

Figura 12: Localização das amplitudes de maré no litoral do Brasil



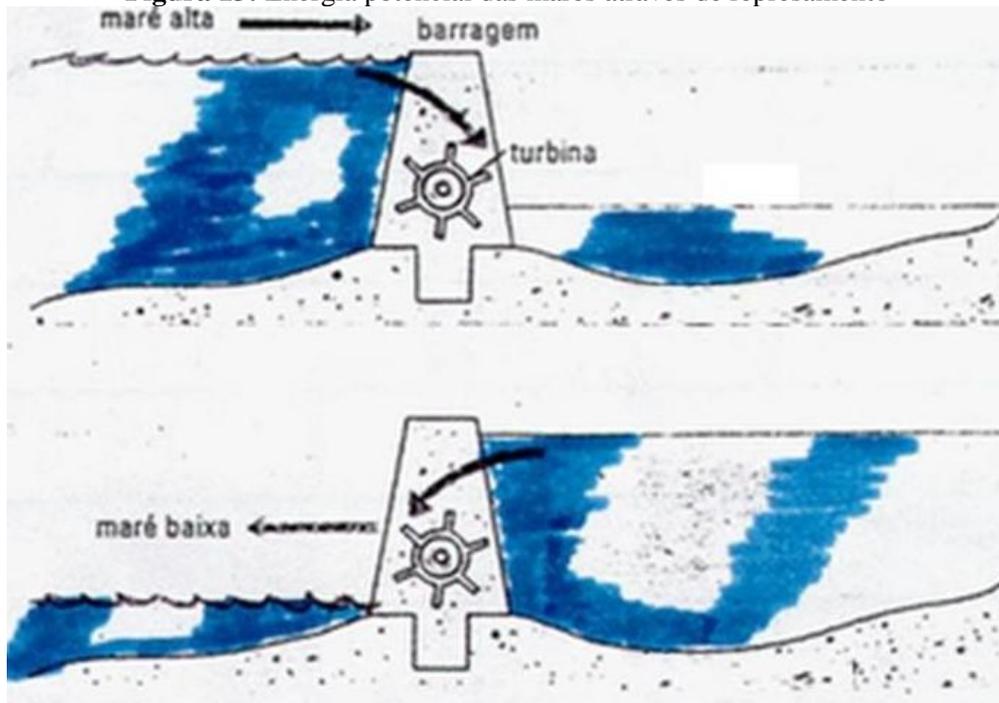
Fonte: Ferreira, 2007

Para o processo de geração de energia maremotriz, este pode ser dividido em dois campos, o da utilização da energia potencial das marés com barragem, ou a utilização da energia cinética através das correntes marítimas que são provocadas pelas marés.

3.3.1 Energia Potencial da Maré

O aproveitamento deste tipo de energia requer o represamento, por uma barragem, da diferença de altura entre as marés, ou seja, quando a maré sobe, a água enche o reservatório passando através de uma turbina hidráulica, produzindo energia elétrica, quando a maré desce, o reservatório é esvaziado, a água sai, passando novamente através da turbina, e em sentido contrário, produzindo energia elétrica (Figura 13).

Figura 13: Energia potencial das marés através de represamento



Fonte: ENR, 2012

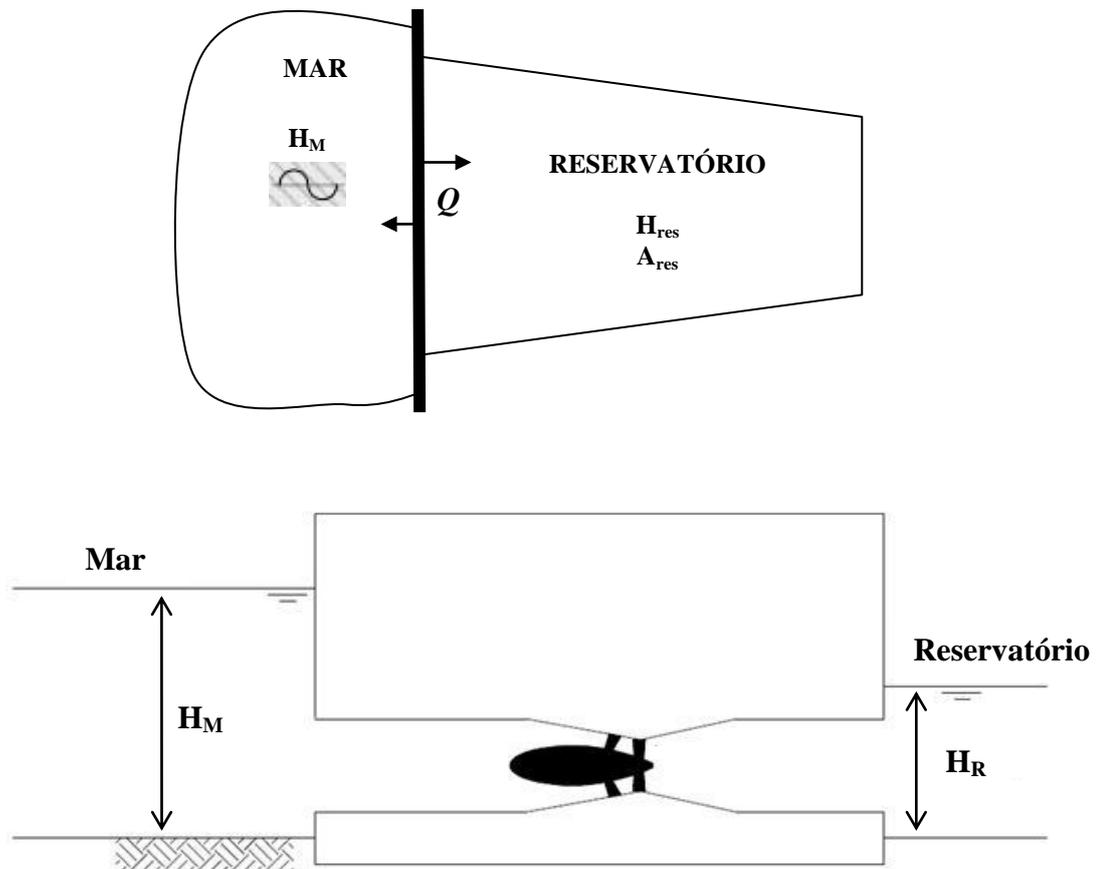
Nesse caso, para o aproveitamento hidrelétrico, além das amplitudes de maré, precisa-se avaliar a morfologia da área de estudo, buscando conhecer se a área é adequada para o represamento da água (NETO, 2011).

3.4 MODOS DE OPERAÇÃO DE UMA CENTRAL MAREMOTRIZ

O modo de operação, também chamado modo de geração, descreve o método de geração de energia de uma central maremotriz. O modo de operação mostra a diferença de altura entre o nível do mar e o nível do reservatório (Figura 14).

O objetivo principal é criar um reservatório, onde o nível de água sobe e desce, com uma lei de tempo diferente do mar, e com o desnível suficientemente elevado entre os lados da barragem, as turbinas podem ser acionadas para geração de energia. Para que este aproveitamento ocorra, as marés precisam ter certa amplitude, a morfologia do local deve ser adequada, ou seja, condições topográficas favoráveis para o represamento da água.

Figura 14: Esboço simples do esquema de uma planta maremotriz



Fonte: Autora, 2014

Para o aproveitamento desta forma de geração de energia, dois possíveis modos podem ser considerados:

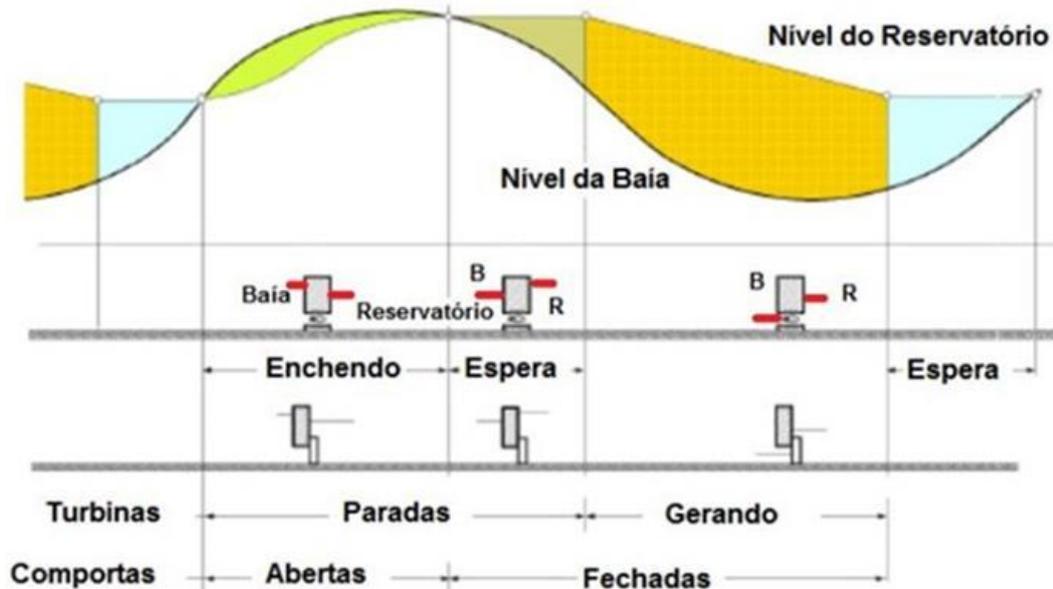
- **Geração em efeito simples:** onde ocorre apenas durante a maré vazante ou a maré enchente;
- **Geração em efeito duplo:** quando há a combinação das duas formas.

3.4.1 Geração em efeito simples

A geração em maré vazante ou em maré enchente é a mais simples estratégia de operação de uma usina maremotriz. Logo após a maré encher, as comportas de enchimento do reservatório são fechadas. O processo de geração de energia é iniciado somente quando a maré é vazante, quando há uma queda d'água suficiente para o início do funcionamento das turbinas. Esta operação é mantida até que a queda d'água torne-se a mínima possível para geração de energia. Neste ponto, bloqueia-se a passagem de água pelas turbinas, cessando-se a geração de energia até que a altura de queda d'água torne-se novamente suficiente para o

funcionamento das turbinas, isto após a maré alta seguinte. Na Figura 15, é ilustrado este processo de operação.

Figura 15: Representação esquemática de funcionamento: Geração efeito simples (*One-Way*)

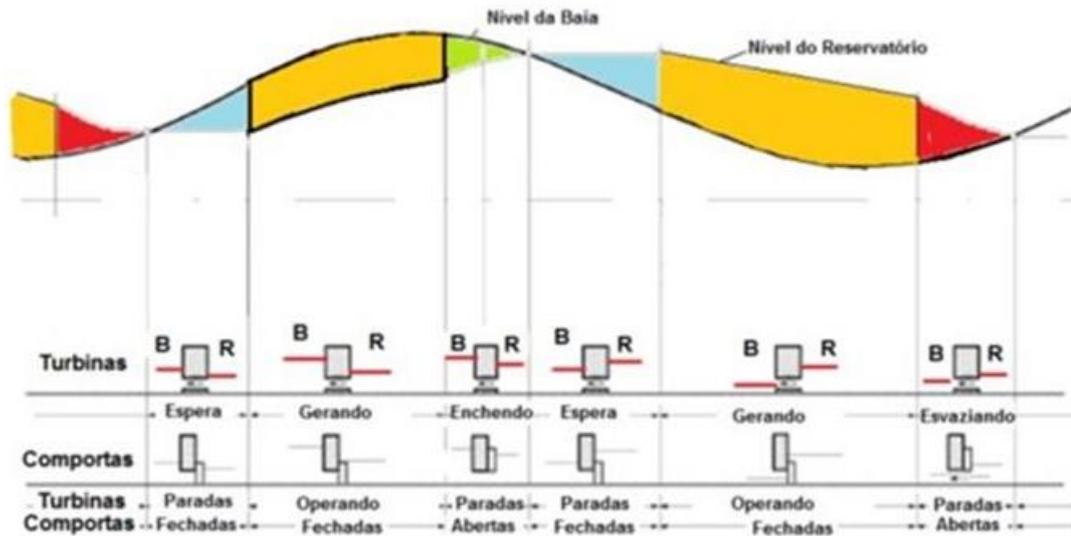


Fonte: Hammons, 1993

3.4.2 Geração em efeito duplo

A geração em efeito duplo aproveita a energia potencial da maré tanto na vazante como na enchente. Na enchente, fecha-se a comporta interrompendo a entrada de água no reservatório através da turbina, onde o nível do reservatório permanece constante e o nível do mar continua a aumentar, até que o desnível d'água entre o mar e o reservatório seja suficiente para a geração de energia. Neste momento, abrem-se as comportas para que a turbina entre em operação e é mantida até que o desnível entre o mar e o reservatório torne-se o mínimo possível. Nesse instante, a turbina para de gerar, porém o reservatório permanece enchendo, até o momento de equilíbrio de altura com o mar. A partir desse instante a maré começa a vazar, as comportas são fechadas e o nível do reservatório permanece em seu nível máximo até que o processo de geração se inicie novamente. A Figura 16 ilustra o processo de geração em duplo efeito com as variações dos níveis de água do mar e do reservatório, durante um ciclo de geração.

Figura 16: Representação esquemática de funcionamento: Geração nos dois sentidos (*Two-Way*)



Fonte: Hammons, 1993

3.5 COMPONENTES BÁSICOS PARA UMA CENTRAL MAREMOTRIZ

3.5.1 Estuário

Cameron e Pritchard (1963) conceituaram estuários como um corpo d'água costeiro semifechado, com comunicação livre com o alto-mar, sendo, portanto, fortemente afetado pela ação das marés. São consideradas zonas de transição entre ambientes marinhos e de água doce, isto é, possuem características físicas, químicas e biológicas encontradas apenas nestes ambientes (ODUM, 1988). O fluxo de água doce oriunda das áreas terrestres, com o aporte de nutrientes e matéria orgânica, além dos padrões de circulação e mistura de águas, responsável pelos gradientes de salinidade, são alguns fatores que desempenham papel fundamental na dinâmica e na produtividade desse ecossistema (KNOX, 2000).

No estuário, interagem a vazão natural do rio, a altura de maré e o volume de água acumulado no mesmo, onde estas amortecem os grandes efeitos de maré e vazões de cheia, por curtos intervalos de tempo.

O estuário como um todo, também é um reservatório de sedimentos, que pode em menor ou maior escala cedê-los para o oceano. Estudos estuarinos requerem conhecimentos batimétricos tanto das áreas alagadas como dos canais ou calhas principais do complexo estuarino. Imagens de satélites podem ser usadas na delimitação dos campos de velocidade da água; e da direção e sentido da velocidade média da pluma de sedimentos suspensos.

Estuários são importantes sob diferentes aspectos (MELLO, 1999):

- São zonas de equilíbrio entre as águas continentais, representadas pelas vazões dos rios e a penetração das marés, conjuntamente com os volumes de água armazenados no estuário nas suas áreas alagadas. Este equilíbrio tem uma influência no carregamento dos sedimentos para o mar e, dependendo da deriva litorânea, na deposição e erosão das praias;
- Definem um ecossistema muito importante para a vida de certas espécies do oceano;
- Apresentam como vegetação característica, os manguezais. Estes ajudam a reter os sedimentos e abrigam a maior parte das espécies do ecossistema, notadamente, próximo às suas raízes submersas. São, portanto, um berçário natural para inúmeras espécies;
- Apresentam valor paisagístico e turístico.

3.5.2 Barragem

Os homens constroem barragens para a utilização dos recursos hídricos há mais de 5.000 anos. As barragens são caracterizadas como obras de intervenção no curso natural dos rios. Estes reservatórios são construídos com a finalidade de utilizar o volume de água armazenado para diversos usos, como para fins de abastecimento, irrigação, controle de cheias, navegação, recreação ou geração de energia (LORIGGIO, 2003).

Hwang (1984) definiu barragem como estrutura disposta em um curso de água, tendo função de armazenamento, visando à elevação do nível d'água do corpo hídrico. O barramento de um corpo d'água, embora apresente função útil, proporciona alterações no regime de vazões à jusante e à montante. Essa alteração do fluxo natural de um rio resulta em um conjunto de fenômenos que merecem atenção nos estudos hidrológicos e ambientais a serem realizados. A qualidade das águas dos reservatórios e, conseqüentemente, dos recursos hídricos que lhes dão origem, é um problema que preocupa cada vez mais as autoridades ambientais e as companhias concessionárias, responsáveis pelas barragens.

3.5.3 Casa de força

Tem a finalidade de abrigar as turbinas e os geradores destinados à produção de energia elétrica, bem como alojar as máquinas e equipamentos elétricos e mecânicos auxiliares para o funcionamento da central, deixando espaço necessário ao redor para operação e manutenção. No caso de máquinas de pequeno porte, elas poderão ser fornecidas pré-montadas. A sua configuração varia segundo as características do aproveitamento

hidrelétrico, tais como tipo de aproveitamento (baixa ou alta queda), tipos de turbinas e geradores utilizados. Seu posicionamento deve ser também levado em consideração devido aos custos relacionados. Em centrais maremotrizes, a casa de força está associada à barragem, integradas num mesmo conjunto.

3.6 TURBINAS HIDRÁULICAS

Para a produção de eletricidade a partir da energia hidráulica, o elemento essencial é a turbina hidráulica. As turbinas podem ser consideradas motores hidráulicos que convertem a energia contida na água em energia mecânica, esta energia então, transferida ao gerador que converte energia mecânica em energia elétrica, disponibilizada aos consumidores através da rede elétrica. Basicamente, uma turbina é composta por uma parte fixa (distribuidor) e outra parte móvel (rotor), a caixa espiral e o tubo de sucção. As turbinas podem ser classificadas em dois tipos básicos: turbinas de ação e turbinas de reação (DIEZ, 1996).

As turbinas de ação são aquelas em que o trabalho mecânico é obtido pela transformação da energia cinética da água em escoamento através do rotor. Neste tipo de turbina, não ocorre variação de pressão do líquido, quando este passa pelo rotor da turbina. As turbinas que se enquadram nesta definição, por exemplo, são as turbinas Pelton.

As turbinas de reação são aquelas em que o trabalho mecânico é proveniente de dois efeitos que ocorrem no rotor da turbina. Primeiramente, em função da variação da pressão no interior do rotor, surge uma parcela de energia. Esta parcela é denominada de reação. A segunda parcela, denominada impulsiva, é decorrente da variação da direção dos vetores de velocidade do fluxo que ocorre quando o fluido passa por entre as pás do rotor. As turbinas que se enquadram nesta definição são as do tipo Bulbo, Francis e Kaplan.

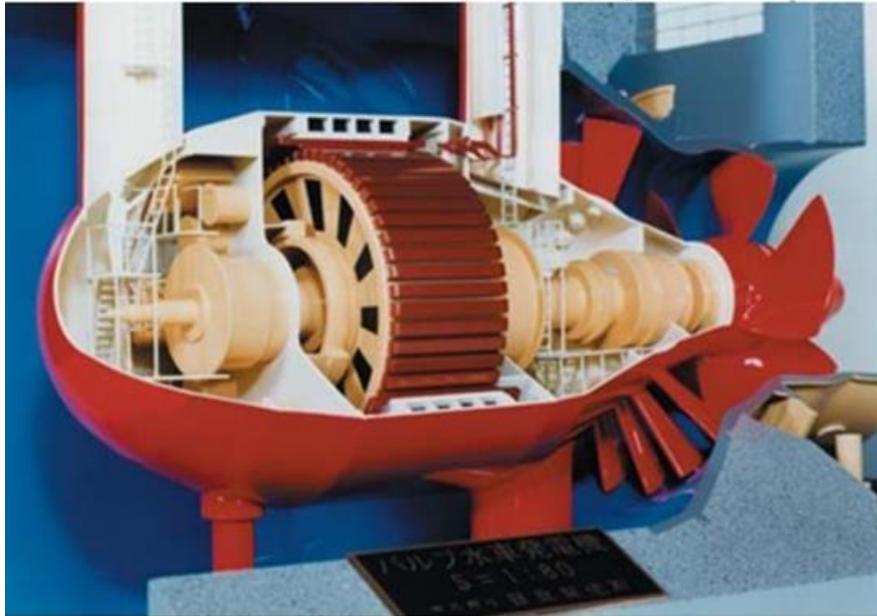
A seguir são apresentadas as características dos principais tipos de turbinas hidráulicas. Como referência sobre este assunto tem-se os trabalhos de Gregorig, 1960; Souza, 1978; Macintyre, 1983, Kjolle, 2001 e Pellegrine, 2005.

3.6.1 Turbinas Bulbo

Um grupo bulbo é caracterizado por possuir o conjunto turbina-gerador de eixo horizontal instalado no interior de uma cápsula denominada bulbo que, geralmente, opera submersa. As turbinas bulbo são empregadas, na maioria dos casos, em aproveitamentos de

baixa queda e, quase sempre, a fio d'água. Sua concepção, uma versão compacta de uma turbina Kaplan, reduz consideravelmente o volume das obras civis. Em compensação, o custo do equipamento eletromecânico, turbina e gerador, são maiores que o das turbinas convencionais, pela tecnologia e processos de fabricação aplicados em termos de ajustes e vedações. A Figura 17 mostra o arranjo típico de um grupo bulbo e a Figura 18 apresenta em detalhe o rotor de uma turbina bulbo.

Figura 17: Visão em corte de um grupo bulbo



Fonte: Hitachi, 2006

Figura 18: Rotor de uma turbina Bulbo



Fonte: Alstom Power, 2010

As principais vantagens de um grupo bulbo são:

- Como a disposição do grupo turbo-gerador é horizontal, a descarga é direta permitindo grandes vazões e ótima eficiência, quando comparado às turbinas Kaplan.
- O volume das obras civis para instalação, comparado com o sistema Kaplan, com as mesmas características, é reduzido em aproximadamente 35%. (SOUZA E BORTONI, 2009).

As principais desvantagens de um grupo bulbo são:

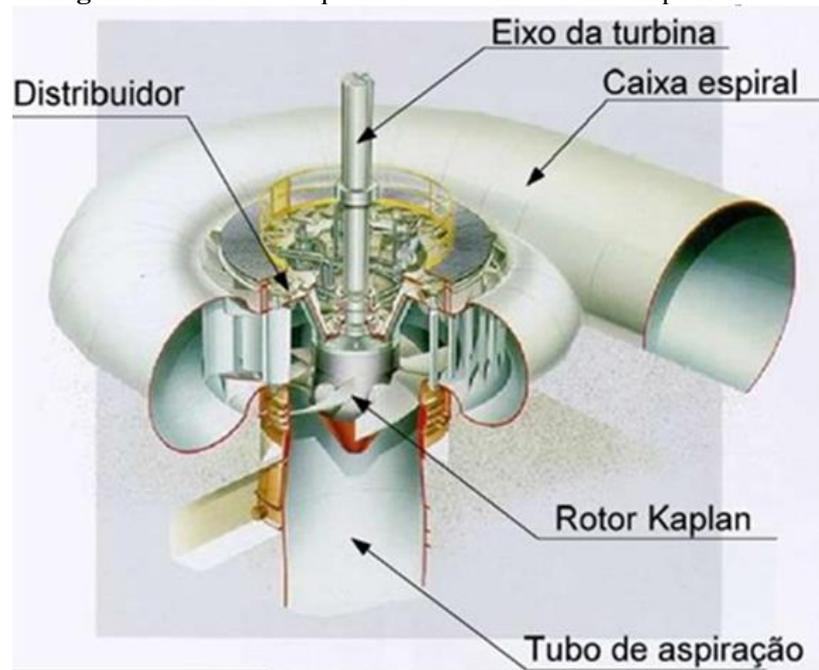
- Há limitação da potência devida ao diâmetro e à ventilação do gerador. Atualmente, as máquinas bulbo mais potentes em operação são da ordem de 60 MW;
- O gerador é especial devido à limitação do diâmetro do estator, o que implica no aumento da sua espessura. Em decorrência disto, há diminuição da inércia das partes rotativas;

3.6.2 Turbinas Kaplan

Desenvolvida pelo engenheiro Austríaco Victor Kaplan em 1913, professor da Universidade Técnica de Brunn na Áustria. As turbinas Kaplan são classificadas como turbinas de reação, geralmente empregadas em aproveitamentos de baixas quedas (entre 10 e 60 metros) e com elevadas vazões.

Essas turbinas são constituídas por uma câmara de entrada que pode ser aberta ou fechada, por um distribuidor, tubo de sucção e rotor que se assemelha a um propulsor de navio, similar a uma hélice (Figura 19). Quando estas pás são fixas, diz-se que a turbina é do tipo hélice, já no caso das pás serem móveis, o que permite variar o ângulo de inclinação das pás, diz-se que a turbina é do tipo Kaplan. A possibilidade de alterar o ângulo das pás do rotor faz com que as turbinas Kaplan tenham uma grande vantagem, sendo possível controlar a vazão (Figura 20). O controle duplo, tanto na abertura do distribuidor como no ângulo das pás do rotor, permite que este tipo de turbina opere de forma satisfatória em uma larga faixa de condições operativas. Para isto, o ângulo das pás do rotor, geralmente é definido a partir da abertura do distribuidor e do nível da água na barragem. Desta forma, mesmo para vazões reduzidas, este tipo de turbina apresenta uma eficiência satisfatória.

Figura 19: Modelo esquemático de uma turbina Kaplan



Fonte: Alstom Power, 2010

Figura 20: Rotor de uma turbina Kaplan

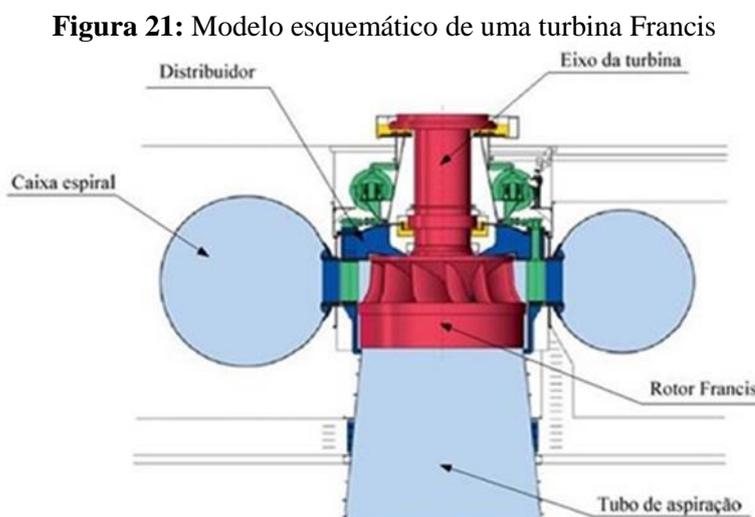


Fonte: Hitachi, 2006

3.6.3 Turbinas Francis

Desenvolvida por James B. Francis em 1849, as turbinas Francis são turbinas de reação, podendo ser utilizadas em quedas que variam de 10 a 500 metros, com potência unitária de até 820 MW, podendo atingir eficiências de até 94%. Atualmente, este é o tipo de turbina mais utilizado na geração de hidroeletricidade no Brasil.

Uma turbina Francis é composta basicamente de caixa espiral, distribuidor, rotor e tubo de aspiração (Figura 21). A água é conduzida da barragem até a caixa espiral pelo conduto forçado. Entre a caixa espiral e o rotor da turbina, tem-se o distribuidor, composto por um conjunto de palhetas móveis. Após passar pelo distribuidor, a água passa pelo rotor, e é conduzida até o canal de fuga pelo tubo de aspiração.



Fonte: Voith Hydro, 2009

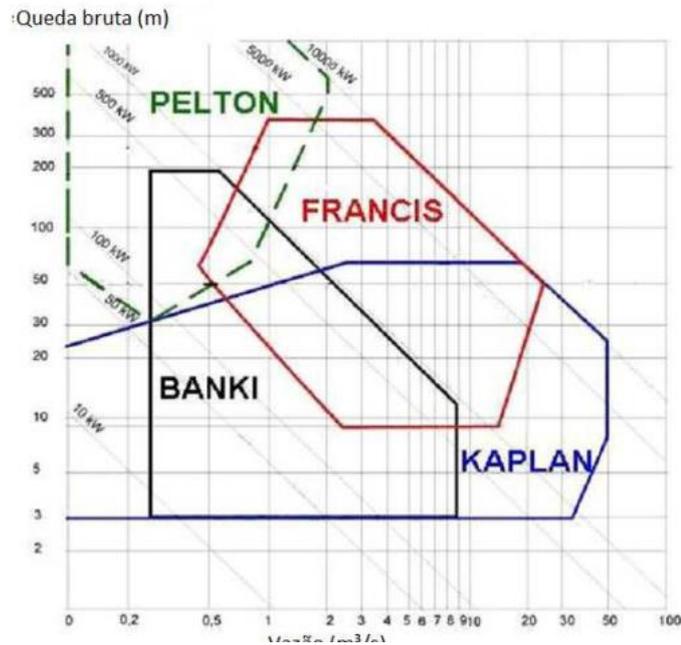
A função da caixa espiral é distribuir a água igualmente na entrada da turbina. O distribuidor é formado por um conjunto de palhetas que têm a função de controlar o fluxo que passa pela turbina, e através do controle do distribuidor, controla-se a vazão, e conseqüentemente, a potência gerada.

O rotor é o elemento mais importante da turbina, cuja função é converter a energia hidráulica em trabalho mecânico. Sua geometria e dimensões são definidas a partir das características do projeto, como vazão e altura nominais. Sua fabricação exige cuidados especiais, pois a eficiência da turbina está diretamente relacionada ao desempenho do seu rotor.

A Figura 22 ilustra um diagrama utilizado na seleção de turbinas para pequenos aproveitamentos hidroelétricos e que tem como função principal auxiliar a pré-selecionar a

turbina mais adequada para cada tipo de situação. Para baixas quedas têm-se turbinas com baixa rotação específica.

Figura 22: Seleção de turbinas



Fonte: Ojsc Power Machines, 2004

3.7 USINAS MAREMOTRIZES NO MUNDO

A Usina Maremotriz de La Rance foi inaugurada em 1966, após 6 anos de construção, e aproveita o potencial do estuário do rio Rance que possui uma das maiores amplitudes de marés do mundo, alcançando 13,5 metros.

A usina é considerada uma das maiores plantas de geração de energia em escala comercial, localizada na região da Bretanha, França (Figura 23).

Figura 23: Barragem da usina maremotriz de La Rance.



Fonte: Sustentabilidade Allianz, 2013.

O modo de operação da usina é em duplo efeito, ou seja, o reservatório enche e esvazia duas vezes ao dia com uma vazão máxima de 18.000 m³/s. É composta por 24 turbinas, cada uma produzindo 10MW de potência, totalizando uma capacidade instalada de 240 MW.

Após a construção dessa usina, outras foram construídas, como a usina de Annapolis Royal, situada na Baía de Fundy, no Canadá (Figura 24). Esta usina foi construída na década de 80, entrando em operação em 1984, com uma capacidade instalada de 20 MW.

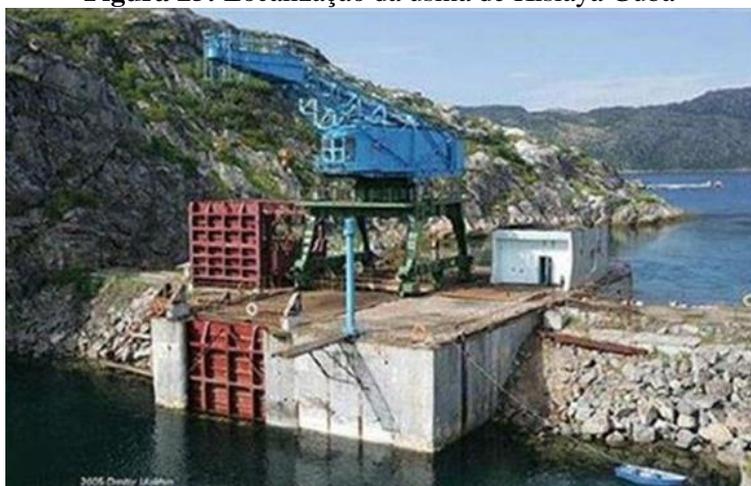
Figura 24: Usina maremotriz Annapolis



Fonte: Ferreira, 2007

A usina maremotriz de Kislaya Guba (Figura 25) foi construída em 1968, como um projeto piloto do governo russo. É considerada a menor usina maremotriz em operação em todo o mundo, com uma capacidade de geração de 0,4 MW.

Figura 25: Localização da usina de Kislaya Guba



Fonte: Wikimapia, 2013

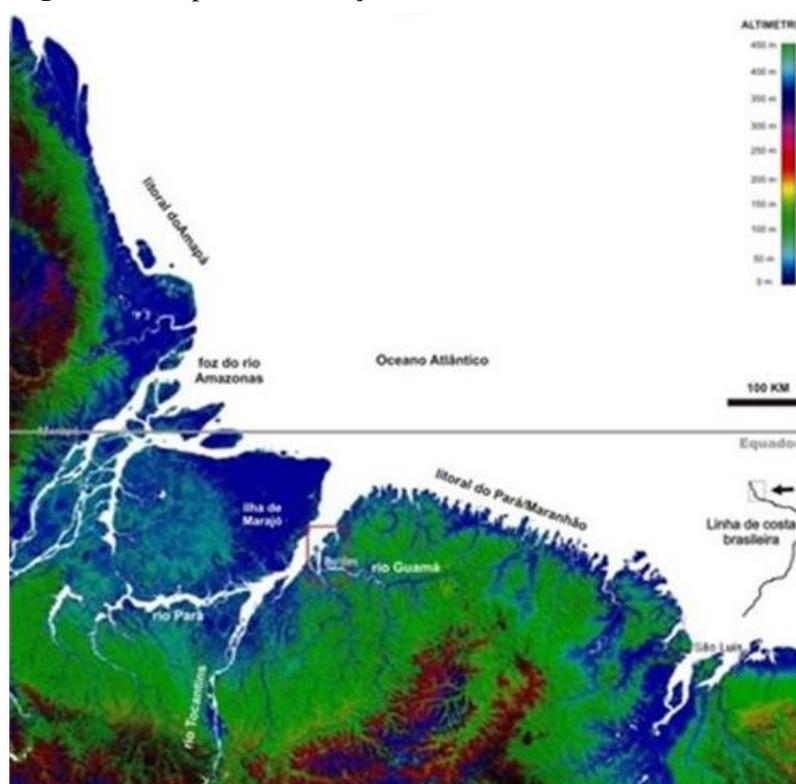
A usina maremotriz de Jiangxia foi construída no sul de Hangzhou na China, com capacidade instalada de 3,2 MW. É a maior usina maremotriz na China e a terceira no mundo. Além disso, mais sete usinas maremotrizes estão sendo implantadas em todo o país.

4 ÁREA DE ESTUDO: COSTA ATLÂNTICA DO PARÁ

4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL

O sistema costeiro Pará-Maranhão (Figura 26) é caracterizado por um ambiente costeiro plano com grandes alturas de maré com um padrão semidiurno, com amplitudes que excedem 6 m de altura, durante a maré de sizígia, em função das mudanças do nível de água do rio e das correntes. A ação da maré influencia a produção primária dos ecossistemas e as atividades de navegação, pesca artesanal e os padrões de sucessão dos manguezais.

Figura 26: Mapa de localização: Costa Atlântica Pará-Maranhão



Fonte: Oliveira, 2013

Esta região é definida como o maior cinturão contínuo de manguezais do planeta, com aproximadamente 7.591 km² de manguezais contínuos, sendo que 2.177 km² encontram-se no Pará e 5.414 km² situam-se no Maranhão. Estes manguezais são característicos de macro marés (até 7,5 m de amplitude), e são denominados de Costa de Manguezais de Macro maré da Amazônia (CMMA), definida por Souza Filho (2005), que se estende desde a Baía de Marajó (PA) até a Ponta do Tubarão, na Baía de São José (MA). Esta região, apesar de ocupar menos de 10% do litoral do país, abriga 56,6% do total de

manguezais, sendo por isso considerada uma região prioritária para conservação (SOUZA FILHO, 2005).

No litoral paraense encontram-se os seguintes municípios: Bragança, Augusto Côrrea, Viseu, Salinópolis, Tracuateua, São João de Pirabas, Primavera, Santarém Novo, Maracanã, Marapanim, Curuçá, Vigia, Colares, Magalhães Barata, São Caetano de Odivelas, São João da Ponta e Quatipuru. Também dentro da Costa Atlântica entre os estados do Pará e Maranhão, estão localizadas as Estações Maregráficas da Marinha do Brasil (Figura 27), que tem por objetivo registrar continuamente a variação dos níveis d'água.

Figura 27: Estações maregráficas dos estados do Pará e Maranhão



Fonte: Autora, 2013

Todas as informações são coletadas e transmitidas para o Banco Nacional de Dados Oceanográficos da Marinha do Brasil, e para diversos centros internacionais. Essas informações contribuem para o monitoramento e as interpretações das variações do nível do mar, onde são utilizadas como referência para previsão de maré e para comparação simultânea com dados de estações próximas. Elas podem ser operadas pela instituição ou país que efetua o levantamento de dados ou podem ser mantidas por outra entidade. A Tabela 1 dá detalhes das estações Maregráficas com sua localização geográfica (Unidade Federativa, latitude e longitude) e classificação de maré.

Tabela 1: Estações maregráficas localizadas entre os estados do Pará e Maranhão

| Nome da estação | UF | Latitude | Longitude | Classificação da Maré | Método de Análise da Maré |
|----------------------------|-----------|-----------------|------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Porto de Belém | PA | 01° 26,6'S | 48° 29,1'W | | Tidal Liverpool Institute |
| Mosqueiro | PA | 01° 09,6'S | 48° 28,6'W | | Almirante Santos Franco |
| Porto de Vila do Conde | PA | 01° 33,9'S | 48° 46,0'W | | Almirante Santos Franco |
| Ilha dos Guarás | PA | 00° 34,5'S | 47° 54,0'W | | Almirante Santos Franco |
| Fundeadoiro de Salinópolis | PA | 00° 37,0'S | 47° 21,0'W | Maré Semidiurna | Tidal Liverpool Institute |
| São Luís | MA | 02° 31,6'S | 44° 18,4'W | | Tidal Liverpool Institute |
| Terminal Ponta da Madeira | MA | 02° 33,9'S | 44° 22,7'W | | Almirante Santos Franco |
| Porto de Itaqui | MA | 02° 34,6'S | 44° 22,2'W | | Almirante Santos Franco |
| Terminal da Alumar | MA | 02° 40,7'S | 44° 21,8'W | | Almirante Santos Franco |

Fonte: Fundação de Estudos do Mar (FEMAR, 2013)

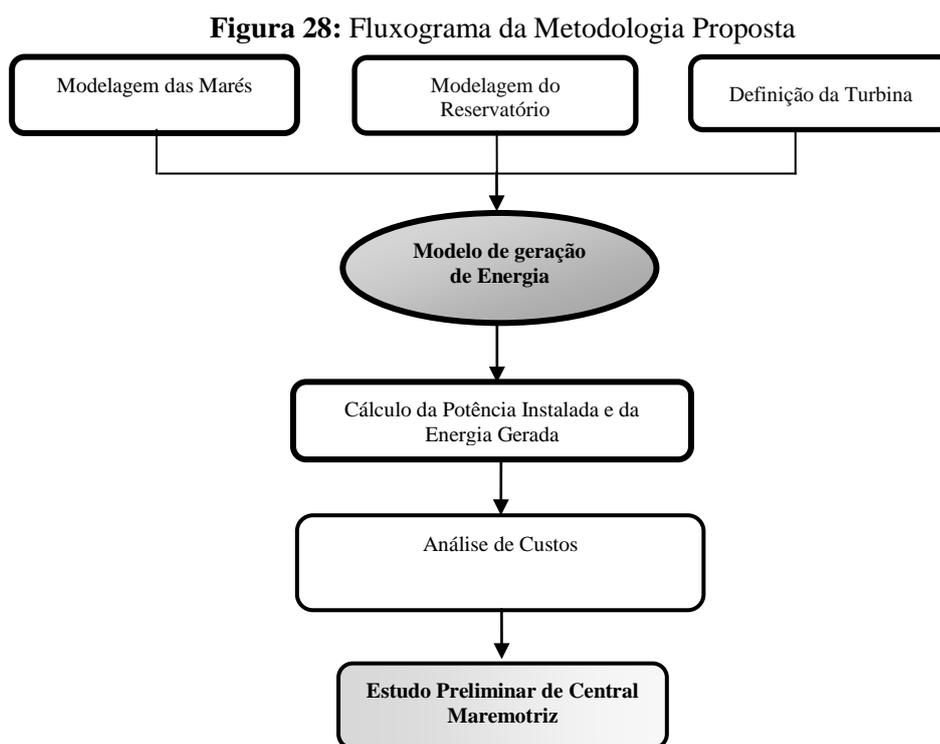
Devido à falta de estações Maregráficas ao longo da costa entre os estados do Pará e Maranhão, os dados para análise de simulação de marés tornam-se mais raros. Para suprir esta necessidade, são utilizados modelos numéricos para previsão de marés, auxiliando na estimativa de informações nos locais onde não existe monitoramento.

5 METODOLOGIA

Qualquer aproveitamento através de centrais maremotrizes deve ser bem planejado e devem estar de acordo com as seguintes considerações (Elliott *et al.*, 2006):

- Ambientalmente sustentável;
- Tecnicamente viável;
- Economicamente viável;
- Socialmente desejável / tolerável;
- Legalmente permitido;
- Administrativamente realizável;

Para o estudo de viabilidade de uma central maremotriz oferecer os melhores resultados para a concepção do projeto, alguns parâmetros devem ser considerados no estudo, como a superfície do reservatório e desnível de água no reservatório formado pela construção da barragem. Esses fatores ajudam também no processo de avaliação da viabilidade econômica, pois avaliar a rentabilidade exige um processo de previsão das condições de operação da planta e os efeitos da barragem na maré existente no local e no próprio reservatório. Assim, no presente trabalho, apresenta-se uma metodologia baseada no fluxograma da Figura 28, identificando a estruturação da pesquisa, para a visualização de todos os itens abordados.



Fonte: Autora, 2014

5.1 MODELAGEM MATEMÁTICA: ESTIMATIVA DE ALTURA DE MARÉ

Quando não se tem dados disponíveis de altura de maré no local pretendido para implantação de uma central maremotriz. O uso de modelagem matemática para estimativa de altura de maré torna-se importante no cálculo da potência da central. O método de estimativa de altura de maré, através do processo de interpolação hermitiana, pode ser utilizado para estimativas de altura de maré. Esse método matemático foi testado com sucesso no cálculo das alturas de maré quando comparado às medidas realizadas diretamente em campo (GOPALAKRISHNAN & RAAD, 1986). A interpolação hermitiana usa o valor da variável η (altura da maré), e de seus gradientes locais, $\eta' = \partial\eta/\partial t$, em valores fornecidos da variável independente tempo(t). Sua representação é dada pela equação 2:

$$\eta = N_1\eta_1 + N_2\eta_1' + N_3\eta_2 + N_4\eta_2' \quad (2)$$

Sendo N_1, N_2, N_3 e N_4 funções de interpolação cúbicas hermitianas, fornecidas por:

$$N_1 = 1 - 3(t/T)^2 + 2(t/T)^3 \quad (3)$$

$$N_2 = t + T[(t/T)^3 - 2(t/T)^2] \quad (4)$$

$$N_3 = 3(t/T)^2 - 2(t/T)^3 \quad (5)$$

$$N_4 = t + T[(t/T)^3 - 2(t/T)^2] \quad (6)$$

Tomando-se η_1 e η_2 , como valores associados nas extremidades de um intervalo de tempo T correspondente à maré alta e baixa respectivamente, suas derivadas η_1' e η_2' são nulas, obtendo-se a equação (7) para estimativa da altura da maré em qualquer instante intermediário:

$$\eta = N_1\eta_1 + N_3\eta_2 \quad (7)$$

Como N_1 e N_3 são funções de interpolação cúbicas hermitianas simples em t e η_1 e η_2 são pontos sucessivos de inflexão conhecidos em T , estima-se η por meio da equação (7). Com o processo descrito, obtém-se um procedimento de interpolação de alturas de maré para a estimativa da evolução da altura de maré, sob a hipótese de que esta função varia de modo aproximado a uma curva cúbica.

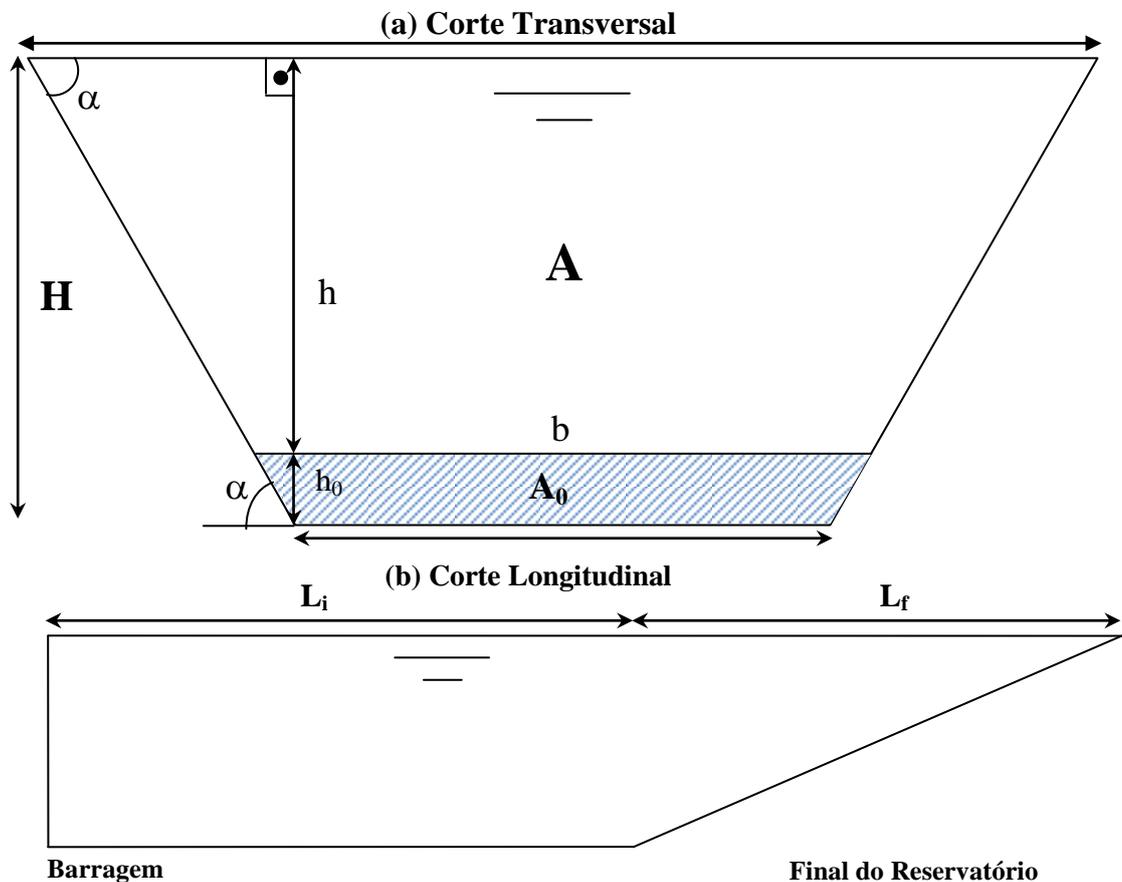
Os dados para desenvolver uma rotina de previsão de maré, programado em linguagem Fortran 4.0 (APÊNDICE A), foram coletados através da tábua de marés,

encontrada no site www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas da Marinha do Brasil, que fornece valores de marés altas (preamar) e marés baixas (baixamar) para cada dia do ano. Para o trabalho, foram escolhidas duas estações Maregráficas, Ilha dos Guarás e Salinópolis. O objetivo da criação desta rotina é realizara estimativa de altura da maré em qualquer instante intermediário através dos dados fornecidos.

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO DE RESERVATÓRIO HIPOTÉTICO

Criou-se um modelo hipotético de reservatório na forma trapezoidal (Figura 29), para gerar um modelo mais realista, com o objetivo de simular a variação do volume do reservatório para cada cota de enchimento e esvaziamento em cada intervalo de tempo. As seções do tipo trapezoidal são vastamente empregadas em diversas aplicações de canais, pois são de fácil execução, podendo ser adaptadas a diversos tipos de solos e a maioria dos revestimentos.

Figura 29: Dimensão do canal trapezoidal: a) Corte transversal. B) Corte longitudinal e suas variáveis.



Fonte: Autora, 2014

Para a execução do modelo, foram fornecidas as variáveis de entrada para cada área específica em estudo, pois cada local representa uma determinada situação. Neste modelo, estas variáveis são listadas na Tabela 2 e indicadas na Figura 31.

Tabela 2 – Especificação das variáveis

| | |
|----------------|--|
| B | Largura superior do reservatório |
| b | Base intermediária |
| b ₀ | Largura inferior do reservatório |
| h ₀ | Altura do nível inicial da água |
| H | Altura total do reservatório |
| L _i | Comprimento do reservatório |
| α | Ângulo de inclinação da área trapezoidal |
| β | Ângulo de inclinação da área triangular |
| A | Área da secção transversal |

Para a realização das simulações, os valores de b₀, h₀, L_i, α e β foram estimados e para cada local de estudo geraram-se diferentes configurações da seção, através das alterações das variáveis de entrada, pois cada bacia tem sua própria forma. Isso determina a mudança da área de superfície do reservatório, influenciando na potência gerada em cada área de estudo em que o modelo foi aplicado. A partir destes dados, os outros parâmetros foram calculados no ambiente Microsoft Office Excel 2010[®], através das equações (8) a (13).

- Cálculo de b (km),

$$b = \frac{2 \cdot h_0}{\tan(\alpha) + b_0} \quad (8)$$

- Cálculo de A₀ (km²),

$$A_0 = h_0 + \frac{b + b_0}{2} \quad (9)$$

- Cálculo de B (km),

$$B = \frac{2 \cdot h}{\tan(\alpha) + b} \quad (10)$$

- Cálculo de A (km²),

$$A = h \times \frac{(B + b)}{2} \quad (11)$$

- Cálculo de L_f (km),

$$L_f = \frac{h}{\tan(\beta)} \quad (12)$$

- Cálculo de V_0 (m³),

$$V_0 = A_0 \cdot L_i \quad (13)$$

A partir dos resultados obtidos das simulações do modelo hipotético, podem ser geradas curvas cota-volume para demonstrar a capacidade do reservatório de cada local. Posteriormente é adicionada uma linha de tendência do tipo potência, de forma a encontrar o melhor ajuste na curva e obter uma função para calcular o nível do reservatório em cada intervalo de tempo. Para a realização das simulações, foi criada uma rotina de cálculo no código computacional desenvolvido em linguagem científica Fortran 4.0 (APÊNDICE A).

5.3 DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DA TURBINA

Para determinação do diâmetro ideal da turbina, foi utilizado como referência o trabalho de Cruz *et al.* (2008), que propõe uma metodologia de projetos de turbinas hidráulicas axiais específicas para baixas quedas na Amazônia. As turbinas hidráulicas axiais têm como característica alta rotação específica, sendo especialmente destinadas a baixas quedas e com altas vazões.

Cada tipo de turbina é selecionado para atender uma determinada faixa de altura de queda e vazão de projeto, que depende das características locais onde a usina será instalada. A seleção depende de outra grandeza, que é a rotação específica. Como são conhecidos os valores da vazão de projeto (Q) e altura de queda (H) é possível estabelecer o valor da rotação específica (Eq. 14).

$$n_q = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{0.75}} \quad (14)$$

Onde n é a rotação em rpm, Q e H são respectivamente, a vazão (m^3/s) e a altura (m) de queda disponível. A especificação adequada da rotação específica da máquina é importante, pois os principais parâmetros dimensionais globais estão diretamente relacionados a ela. O valor da rotação específica define a faixa de aplicabilidade, fornecendo meios de comparação entre todos os tipos de turbinas.

Estudos desenvolvidos por Schweiger e Gregori (1990), propõem correlações com base em dados estatísticos coletados a partir de plantas existentes e de vários fabricantes especializados. Os coeficientes de vazão, pressão e de diâmetro podem ser expressos em função da rotação específica, em que,

$$\Psi = f(n_q) \quad (15)$$

$$\varphi = f(n_q) \quad (16)$$

$$\vartheta = f(n_q) \quad (17)$$

Tais dados foram classificados e analisados estatisticamente, sendo os resultados apresentados em forma de coeficientes adimensionais. Portanto, Schweiger e Gregori (1990), estabeleceram para estes parâmetros adimensionais as seguintes funções,

- Coeficiente de Vazão,

$$\varphi = 0,162 + 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot n_q \quad (18)$$

- Coeficiente de Pressão,

$$\Psi = 26,1 \times n_q^{-0,85} \quad (19)$$

- Diâmetro Específico,

$$\vartheta = 1,636 \cdot v^{-0,5} \quad (20)$$

Conhecendo o diâmetro específico, o diâmetro dimensional do rotor pode ser expresso por:

$$D_e = \frac{2^{0,75} \cdot \vartheta_e \cdot Q^{0,5}}{\pi^{0,5} \cdot E^{0,25}} \quad (21)$$

5.4 MODELO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A quantidade de energia possível de ser aproveitada está diretamente relacionada com a amplitude de maré, mas também é importante a área do reservatório e o número de turbinas que serão utilizadas. A combinação desses três fatores dará uma maior potência instalada à central maremotriz. Para o modelo de geração de energia, primeiramente deve-se estimar a altura da maré (H_M), através do método (5.2) em cada local de estudo. Posteriormente, calcula-se a altura do reservatório (H_R), com a finalidade de registrar as variações que ocorrerão ao longo do reservatório. Esse monitoramento será de vital importância para avaliação dos volumes do reservatório e determinação das possíveis áreas inundadas.

Todo processo criado através da estimativa de altura de maré e nível do reservatório dá suporte para a viabilidade de uma central maremotriz instalada, onde a principal componente para a geração de energia é o desnível (Δh) em cada intervalo de tempo, dado pela equação 22:

$$\Delta h(t) = |H_R(t) - H_M| \quad (22)$$

A variação da altura da maré também implica na variação da vazão. A vazão que flui através da tomada d'água, para geração de energia é uma função da variação de Δh . Nesse caso, foi adotada a equação de Hazen-Williams (23), na qual a vazão Q é explicitada:

$$Q = \left(\frac{\Delta h \cdot C^{1,85} \cdot D^{4,87}}{10,64 \cdot L} \right)^{\frac{1}{1,85}} \quad (23)$$

Em que,

- Q é a vazão (m^3/s);
- Δh é o desnível estabelecido pela barragem em relação ao mar ou ao reservatório (m);
- C é o coeficiente que depende da natureza do material empregado na fabricação dos condutos forçados;
- D é o diâmetro da tubulação(m);
- L é o comprimento da tubulação (m);

Calculada a vazão, calcula-se num determinado tempo Δt , o volume (ΔV) trocado pelo reservatório com o mar (24):

$$\Delta V = Q \cdot \Delta t \quad (24)$$

Posteriormente é calculado o volume total no reservatório, sendo representado pela equação (25).

$$Volume\ Total = Volume\ inicial \pm Q(t) \cdot \Delta t \quad (25)$$

O volume total é representado pelo volume inicial existente no reservatório em cada intervalo de tempo e a vazão turbinada. Se a vazão turbinada for adicionada ao reservatório, adota-se um valor positivo (sentido mar-reservatório). Quando a vazão for extraída, adota-se um valor negativo (sentido reservatório-mar), portanto, para cada intervalo de tempo (t+1) será obtido um novo volume total, utilizado nos cálculos da altura do nível da água no reservatório (H_R), determinado através da equação do tipo potência obtido através do gráfico Cota x Volume no modelo de reservatório hipotético para cada área em estudo.

A potência da central dependerá simultaneamente da altura de queda disponível juntamente com a vazão obtida na equação 23, desprezando-se as perdas. A variável que mais influencia na potência instalada é a vazão, em virtude de ser a que apresenta maior variação. A potência pode ser calculada através da equação (26):

$$P_{ot}(t) = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h \quad (26)$$

Em que,

- P_{ot} é a potência hidráulica da central maremotriz (W);
- η é o rendimento total da central (-);
- ρ é a massa específica da água (kg/m^3);
- g é a aceleração da gravidade (m/s^2);
- Q é a vazão turbinada (m^3/s);
- Δh é a diferença de altura da queda entre o nível do reservatório e o mar (m);
- t representa o tempo;

Como a função de uma central maremotriz é a produzir energia, a capacidade da planta terá que ser determinada a partir do cálculo da energia gerada (Eq. 27). O valor da energia gerada é função do tempo ao longo do qual se consegue mobilizar uma dada potência e pode ser definida, de uma forma mais simplificada, pela equação:

$$Egerada = Pot \times \Delta t \quad (27)$$

Em que Δt representa o período de tempo ao longo do qual se mobiliza a potência disponível.

5.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Para se definir a viabilidade de geração de energia via usinas maremotrizes, deve-se considerar também o aspecto econômico. Nesse caso, foram usados dados disponíveis na literatura (referências). Assim, a análise dos custos vai levar em consideração os custos de:

- Instalação (\$/kW);
- Investimento (\$); e
- Unitário de Energia (CUE).

5.5.1 Custos de Instalação

Com relação ao custo de instalação, eles são mais significativos, pois o custo do kW instalado é muito maior, comparado com outras fontes de energia como a diesel, mas os custos de operação são baixos, pois não há despesas com combustível. De acordo com o Conselho Mundial de Energia, em usinas maremotrizes, custo por kW instalado fica entre €1.200/kW e €1.500/kW. Convertendo para dólares, tem-se US\$2.659,80/kW a US\$3.324,75/kW.

5.5.2 Custos de Investimento

Com o custo de instalação pré-definido, pode-se determinar o custo de investimento total que será aplicado no projeto, o qual é igual à multiplicação do custo de instalação e a potência instalada, expresso em \$ (equação 28):

$$CIP = C_i \times P \quad (28)$$

Em que,

- CIP é o custo de investimento estimado do projeto (\$);
- C_i é o custo de instalação do projeto (\$/kW);
- P é a potência instalada do projeto (kW).

Como se refere Tolmasquim (2003), os custos de investimento do projeto de uma central maremotriz, podem ser divididos como a seguir:

- Obras Cíveis: 52%;
- Mecânica e Elétrica: 18%;

- Instalação: 15%;
- Contingências: 10%;
- Transmissão Elétrica: 5%;

Como as obras de construção civil representam o item mais custoso no orçamento, o que conduz a um relativo aumento do custo unitário do kW instalado.

5.5.3 Custo Unitário de Energia (CUE)

Outro custo a ser analisado considera a amortização dos custos de investimento do sistema para calcular os custos unitários de energia. Um item muito importante nesta análise é o custo dos serviços de operação e manutenção (O&M). Este item é considerado baixo por não estarem relacionados com os preços dos combustíveis fósseis, sendo estimados em 0,5 a 1% dos custos de investimentos. Será adotado o valor de 1% para a estimativa. Entretanto, é difícil estimar o valor real, pois é necessário saber os preços desses serviços para centrais maremotrizes dentro da área da Costa Paraense.

O custo de capital anual C (Equação 29) pode ser determinado considerando-se o valor presente (depreciação) de uma anuidade calculada sobre os custos do investimento.

$$C = \text{Custo do investimento}/a_n \quad (29)$$

Onde a_n é o fator de desconto para as anuidades de C e n é o número de anos durante os quais o valor presente de C é calculado. Assim, o custo unitário de energia (CUE) (\$/kWh)(Equação 30) pode ser calculado de acordo com os períodos de operação.

$$\text{CUE} = (\text{CIP} + \text{COM}) / a_n \cdot t \cdot P \quad (30)$$

Em que,

- CUE é o custo unitário de energia (\$/kWh);
- CIP é o custo de investimento do projeto (\$);
- COM é o custo de operação e manutenção (\$);
- a_n é o fator de desconto (-);
- t é o tempo de operação (h);
- P é a potência (kW);

6 LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA

6.1 MODELO DO RESERVATÓRIO

O modelo de reservatório é limitado pela falta de dados de topografia e batimetria. A disponibilidade dessas informações implicará numa estimativa mais realista e confiável no modelo de geração de energia, considerando os efeitos reais da maré e assim conhecer o verdadeiro potencial energético das centrais maremotrizes.

6.2 SELEÇÃO DA TURBINA

Escolha de um modelo de turbina adequado para a região, possibilitando a exploração energética nos locais com baixas quedas e altas vazões.

6.3 CÁLCULO DA VAZÃO

Para o cálculo da vazão, foi utilizada a equação de Hazen-Williams, no entanto, para uma determinação mais precisa, o cálculo da vazão deve ser realizado através de dados fornecidos de postos fluviométricos presentes na região próxima ao local de estudo ou através de medições por equipamentos. Em seguida pode ser definida a distância entre a tomada d'água e a saída da turbina para calcular a altura líquida e assim obter o potencial energético.

6.4 ANÁLISE DE CUSTO

Os resultados apresentados na análise de custos apresentam limitações, a partir de valores advindos da literatura disponível sobre o assunto. Nesse caso, foi avaliado apenas o custo de instalação, custo de investimento e custo unitário de energia do empreendimento. Para uma análise mais completa, em um processo de comparação econômica com outros projetos de geração de energia, é necessário ter um conjunto dos custos do empreendimento considerado em seu local de implantação, o chamado “custo Amazônia”. Para, então, serem determinados os custos supracitados e outros parâmetros como: payback, fluxo de caixa e tempo de retorno, permitindo estruturar uma decisão a favor de uma alternativa em relação às outras.

7 RESULTADOS

7.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo de reservatório hipotético foi validado com o objetivo de verificar se os resultados fornecem respostas consistentes quando comparados com os resultados encontrados no trabalho realizado por Ferreira (2007) no Estuário do Bacanga, Maranhão. Na simulação da altura de maré, os dados foram obtidos da estação Maregráfica Ponta da Madeira, a mesma utilizada no trabalho de Ferreira (2007), localizada próxima a Baía de São Marcos.

Antes da execução do modelo, os parâmetros b_0 e L_i foram obtidos através das imagens de satélite disponibilizadas pelo *Google Earth* e as variáveis h_0 , α e β foram estimadas conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de entrada para validação do modelo

| | |
|----------|--------|
| b_0 | 0,2 km |
| h_0 | 0,13 m |
| L_i | 3,1 km |
| α | 20° |
| β | 5° |

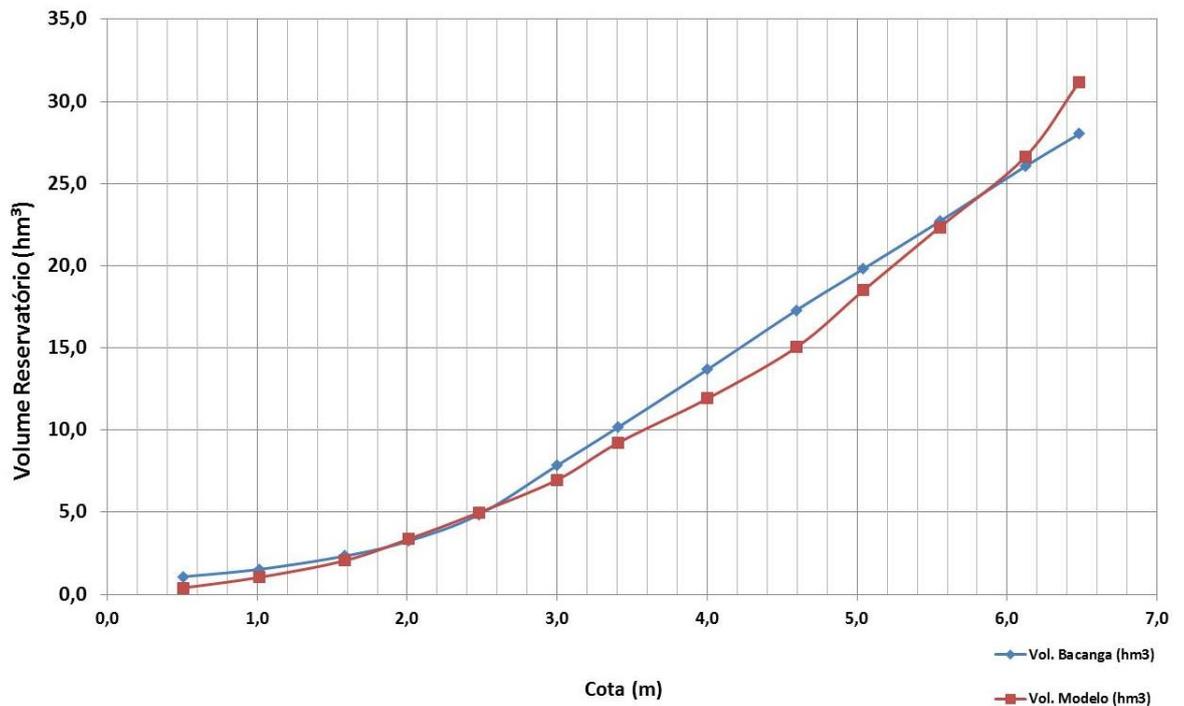
Fonte: Autora, 2014

Após os cálculos gerados, o modelo apresentou os valores de volume para cada cota do reservatório. A comparação entre os valores obtidos no modelo com os valores do sistema real são apresentados na Tabela 4 e em forma gráfica na Figura 30, onde a linha azul representa o volume do Estuário do Bacanga e a linha vermelha representa o volume do reservatório hipotético criado.

Tabela 4: Dados Cota x Volume do Bacanga e do modelo

| COTA (m) | VOLUME BACANGA (hm³) | VOLUME MODELO (hm³) |
|---------------------|--|---|
| 0,508 | 1,081 | 0,400 |
| 1,016 | 1,532 | 1,046 |
| 1,586 | 2,342 | 2,065 |
| 2,007 | 3,243 | 3,366 |
| 2,478 | 4,865 | 4,985 |
| 2,998 | 7,838 | 6,964 |
| 3,407 | 10,180 | 9,231 |
| 4,002 | 13,690 | 11,922 |
| 4,596 | 17,300 | 15,048 |
| 5,042 | 19,820 | 18,504 |
| 5,550 | 22,700 | 22,344 |
| 6,120 | 26,040 | 26,622 |
| 6,480 | 28,020 | 31,181 |

Fonte: Autora, 2014

Figura 30: Curva Cota x Volume do Bacanga e do modelo

Fonte: Autora, 2014

Para representação desta curva, adicionou-se uma linha de tendência do tipo potência, chegando à seguinte expressão:

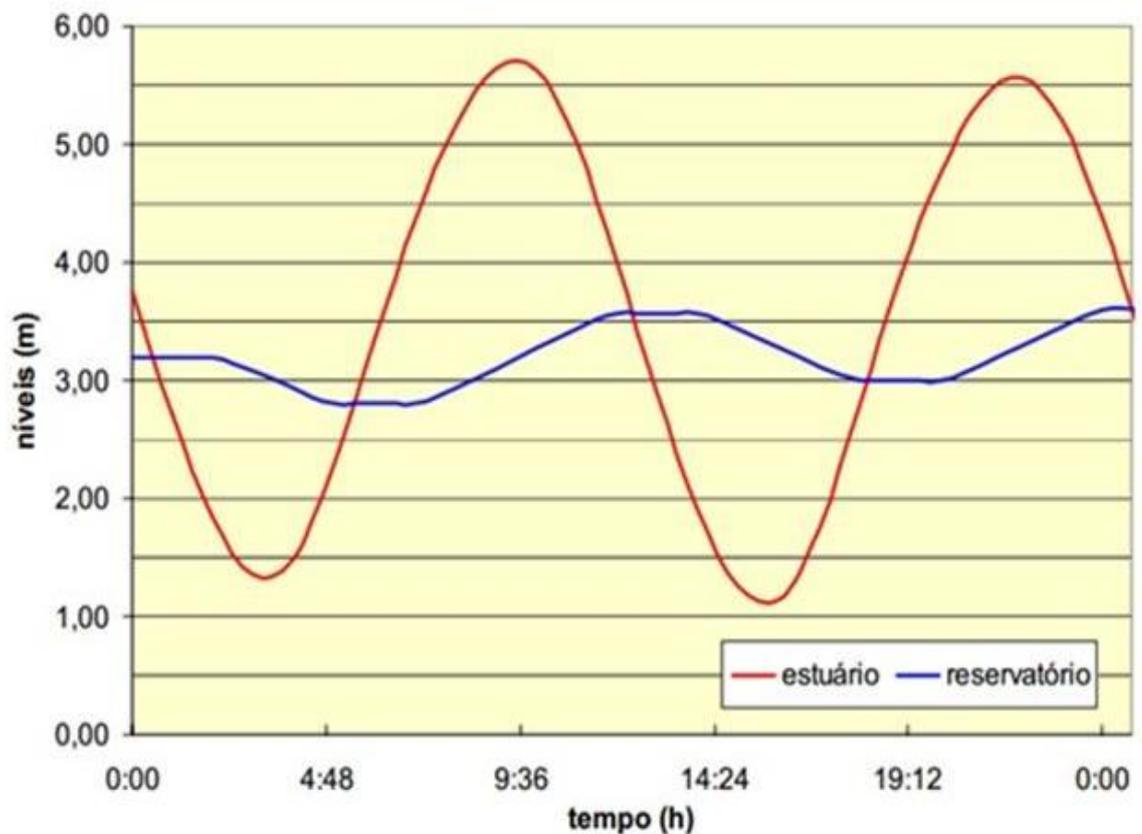
$$H_R = 0,0051 \times VT^{0,4175} \quad (31)$$

Em que,

- Hr: nível do reservatório a ser calculado para cada intervalo de tempo;
- VT: Volume total, que é encontrado através da Equação (25);

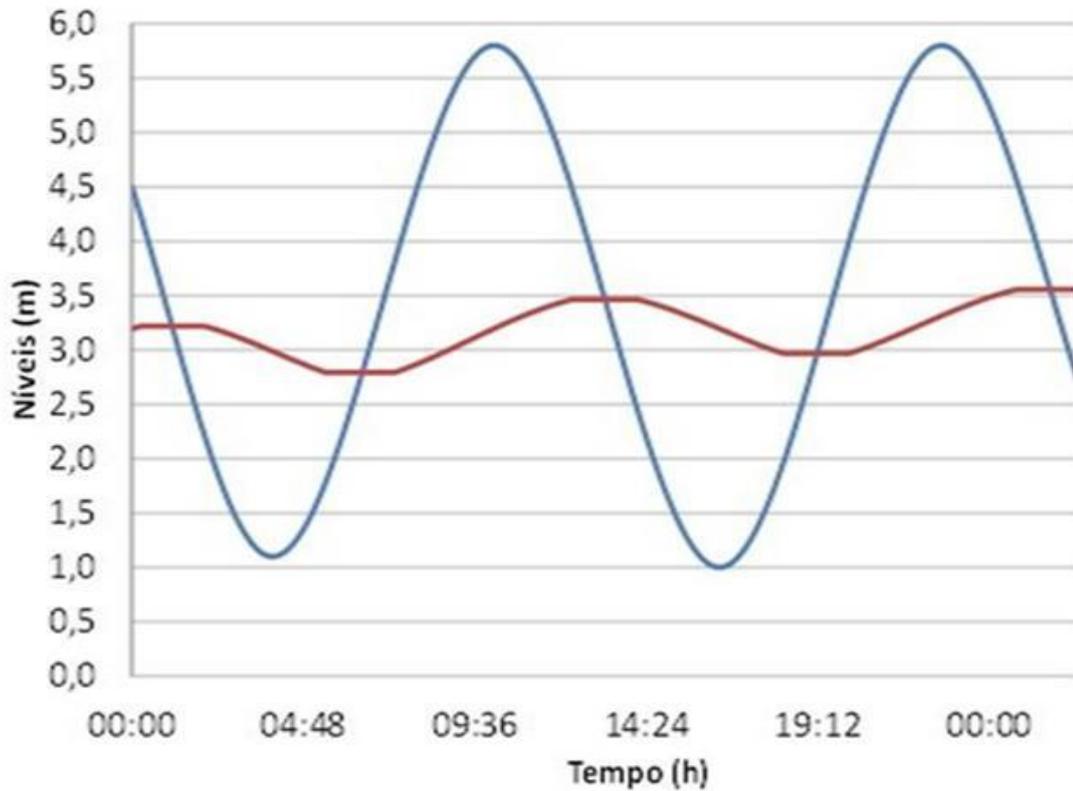
Assim, foram obtidas as Figuras 31 e 32, na qual os dados simulados através do modelo apresentaram resultados próximos quando comparados aos resultados que constam na batimetria realizada no estuário do Bacanga.

Figura 31: Simulações do mar e reservatório do estuário do Bacanga



Fonte: Ferreira, 2007

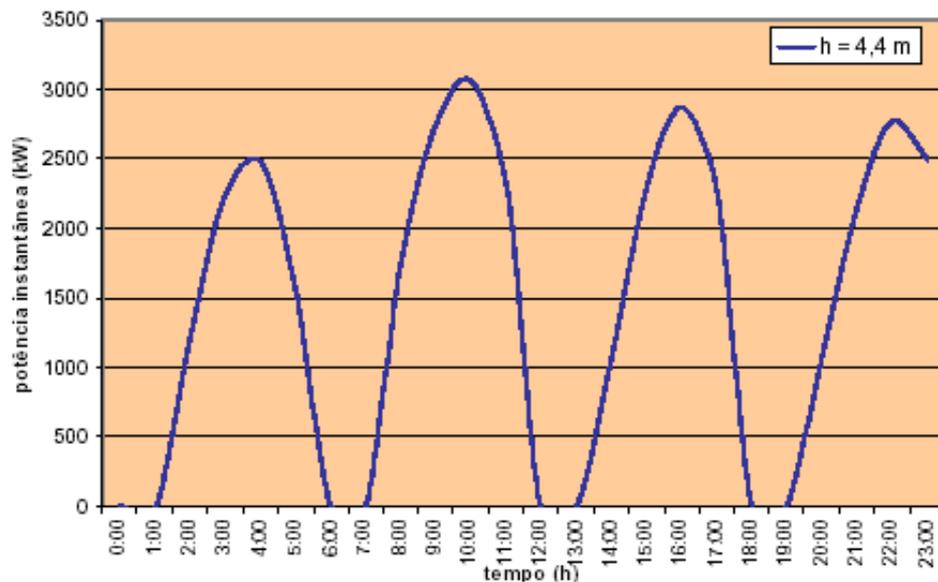
Figura 32: Simulações do mar e reservatório do modelo hipotético



Fonte: Autora, 2014

A potência máxima e a energia gerada por ciclo de maré, encontrados no trabalho de Ferreira 2007, tendo como estudo de caso o Estuário do Bacanga, foram respectivamente $3,14 \cdot 10^3$ kW e $9,5 \cdot 10^3$ kWh/ciclo (Figura 33).

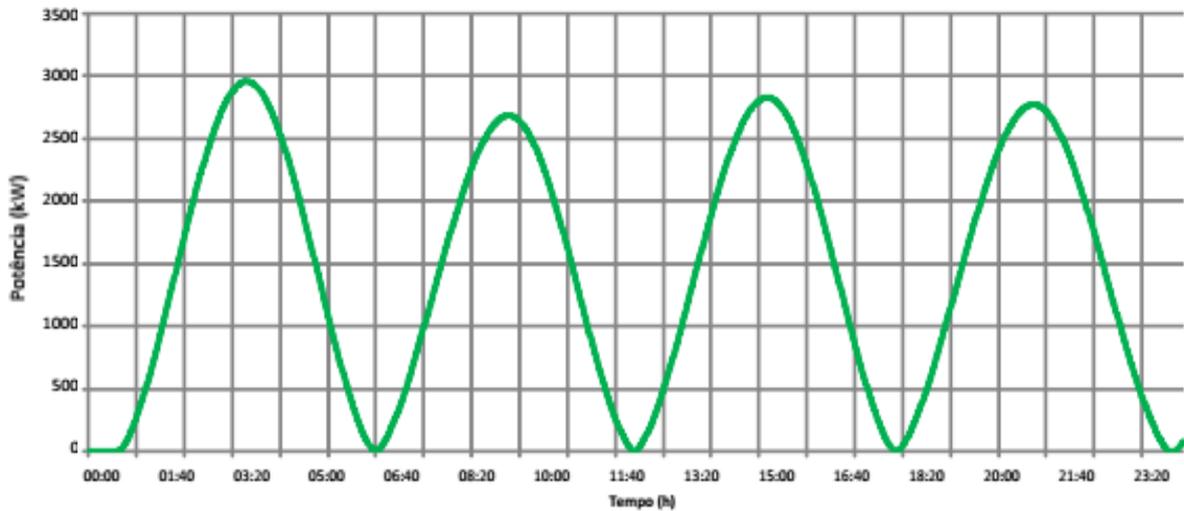
Figura 33: Esquema de geração para o Estuário do Bacanga



Fonte: Ferreira, 2007

Os resultados encontrados no presente trabalho, ficaram bem próximos ao esperado, ficando em torno de $3,1 \cdot 10^3$ kW e $9,3 \cdot 10^3$ kWh/ciclo (Figura 34).

Figura 34: Aplicação do modelo hipotético no Estuário do Bacanga



Fonte: Autora, 2014

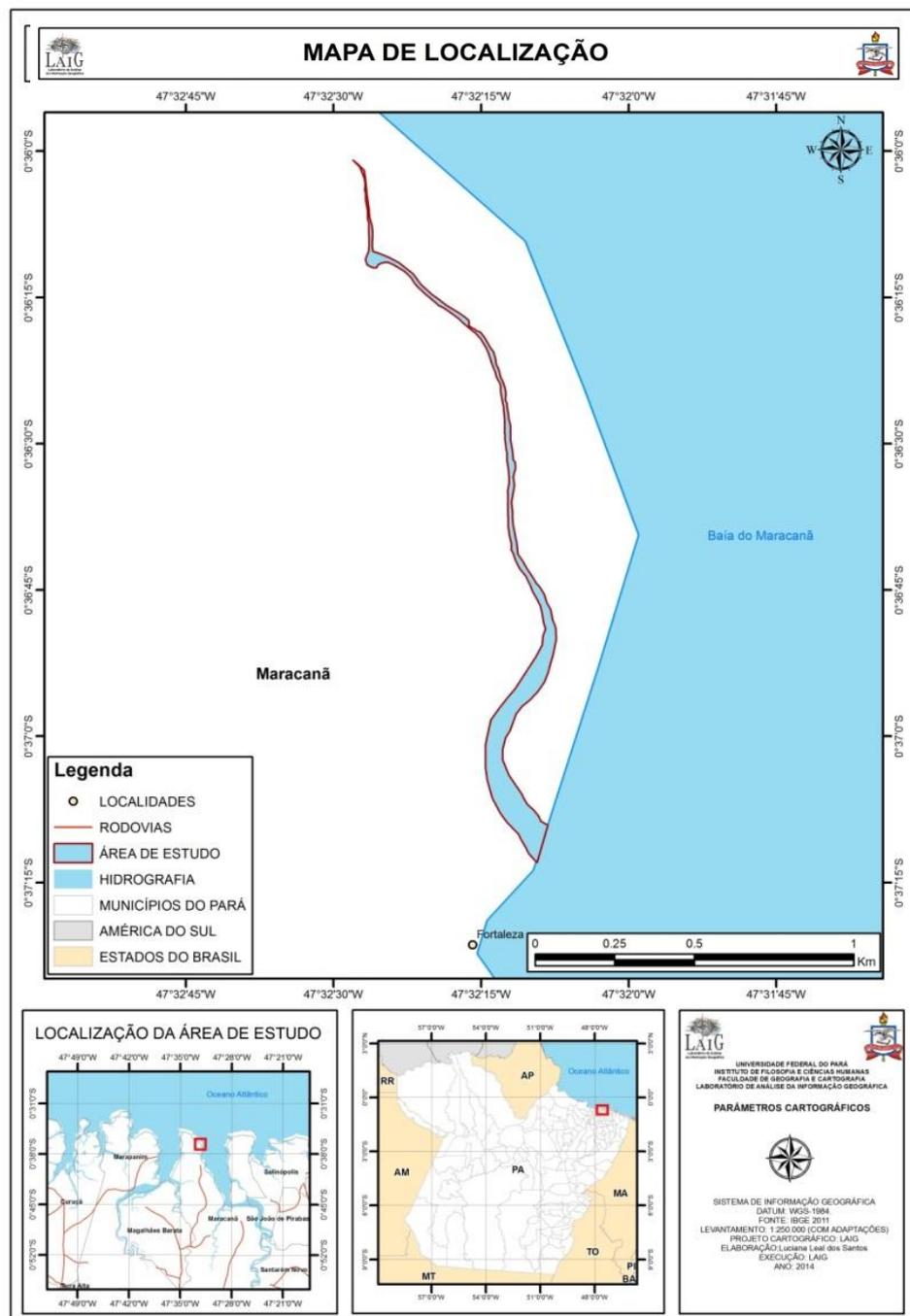
Com o modelo validado, a etapa seguinte teve como objetivo testar a aplicação prática em três diferentes cenários: pequeno, médio e grande, dentro da Costa Paraense, comparando entre diferentes condições de funcionamento, a fim de buscar a melhor maneira de maximizar o potencial energético das marés e aproveitá-la para geração de energia.

7.2 CENTRAL MAREMOTRIZ DE PEQUENO PORTE

7.2.1 Descrição do Local

O primeiro local para análise está localizado na Vila de Fortalezinha (Figuras 35 e 36) com uma área equivalente a 0,08 km², pertencente a uma ilha continental, no município de Maracanã, em frente ao oceano Atlântico, distante 170 km de Belém. Além de Fortalezinha, a ilha possui outras 3 pequenas vilas denominadas: Algodual, principal vila, Camboinha e Mocoóca.

Figura 35: Mapa de localização – Pequeno Porte



Fonte: Autora, 2014

Figura 36: Estuário localizado na Vila de Fortalezinha



Fonte: Google Maps, 2014

Nesta área, assim como nos outros locais de estudo, a vegetação é representada por manguezais com uma grande riqueza em recursos naturais e, conseqüentemente com uma potencialidade aos mais variados usos. Possui uma elevada zona de produtividade biológica uma vez que, pela natureza de seus componentes, são encontrados nesse ecossistema representantes de todos os elos da cadeia alimentar.

Nestas áreas, as atividades econômicas são as seguintes: pesca (artesanal, em maior quantidade), que se evidencia em toda a zona costeira paraense; a pecuária, agricultura (predominantemente de subsistência), coleta de crustáceos (caranguejo), turismo (praias) e o comércio.

7.2.2 Modelagem da Maré

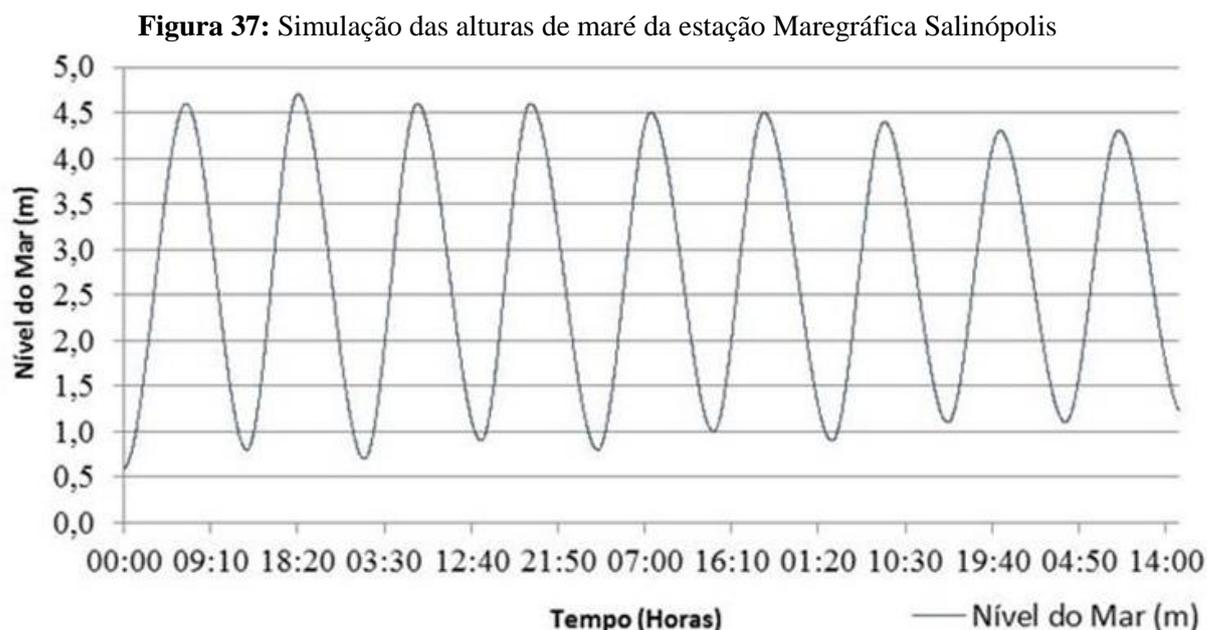
Para o desenvolvimento da metodologia de estimativa da altura de maré proposta no tópico 5.2 deste trabalho, os valores de preamar e baixamar foram coletados através da estação Maregráfica de Salinópolis, durante o mês de Janeiro de 2014. Os dados da estação maregráfica serviram de base para avaliar o comportamento do nível do mar próximo ao local de estudo. Os valores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Dados estação Maregráfica de Salinópolis

| Tempo (hora) | Valores de Preamar e Baixa-mar (m) |
|---------------------|---|
| 0,00 | 0,6 |
| 6,60 | 4,6 |
| 13,0 | 0,8 |
| 18,4 | 4,7 |
| 25,4 | 0,7 |
| 31,0 | 4,6 |
| 37,7 | 0,9 |
| 42,9 | 4,6 |
| 50,0 | 0,8 |
| 55,6 | 4,5 |
| 62,2 | 1,0 |
| 67,5 | 4,5 |
| 74,7 | 0,9 |
| 80,2 | 4,4 |
| 86,9 | 1,1 |
| 92,4 | 4,3 |
| 99,3 | 1,1 |
| 104,9 | 4,3 |
| 111,7 | 1,2 |
| 117,2 | 4,1 |
| 124 | 1,3 |
| 129,8 | 4,2 |
| 136,5 | 1,3 |
| 166,3 | 4,0 |
| 148,9 | 1,4 |
| 154,9 | 4,2 |
| 161,5 | 1,3 |
| 191,4 | 4,0 |
| 173,9 | 1,4 |
| 180,0 | 4,3 |
| 186,7 | 1,2 |
| 192,7 | 4,1 |
| 199,1 | 1,3 |
| 205,1 | 4,5 |
| 211,9 | 1,0 |
| 217,9 | 4,3 |

Fonte: Marinha do Brasil, 2014

Esses valores foram fornecidos como dados de entrada ao código computacional criado em linguagem Fortran 4.0 (APÊNDICE A). Através desse código, foi possível simular o comportamento das marés no período especificado com situações de enchente e vazante (Figura 37) a partir dos pontos de preamar e baixamar da estação maregráfica escolhida.



Fonte: Autora, 2014

A maré neste local é semidiurna, com ciclos de 12h25. Ao longo do período utilizado foi verificada a variação horária das marés, com oscilações máximas que não ultrapassaram 5,0 m e mínimas de 0,6 m.

7.2.3 Aplicação da Modelagem

Com os resultados da modelagem de maré, foi possível aplicar a metodologia aos estudos de caso, com o objetivo de se verificar o comportamento em um estuário numa situação prática dentro da costa paraense. Informações para aplicação do modelo a uma determinada área de estudo, implica na disponibilidade de dados sobre o local, como topografia e batimetria. Considerando que estas informações não estão disponíveis para as áreas em estudo deste trabalho, foram adotados os valores das variáveis de entrada, como condição inicial nos cálculos dos outros parâmetros para a realização das simulações do modelo hipotético. Assim, como na validação do modelo no Estuário do Bacanga, os valores

de b_0 e L_i foram obtidos a partir das imagens de satélites capturadas através do *Google Earth* (Figura 38).

Figura 38: Área de implantação - Pequeno Porte



Fonte: Google Earth, 2014

Além dos parâmetros supracitados, os valores de h_0 , α e β também foram estimados antes das simulações, pois através destes valores é possível calcular os demais parâmetros. Todas as variáveis utilizadas neste local de estudo estão descritas na Tabela 6 e foram adotadas como valores de condição inicial, para os cálculos dos parâmetros adimensionais na área de estudo.

Tabela 6: Parâmetros de entrada para o modelo – Pequeno Porte

| | |
|----------|---------|
| b_0 | 0,04 km |
| h_0 | 0,13 m |
| L_i | 1,3 km |
| α | 30° |
| β | 5° |

Fonte: Autora, 2014

Estes dados foram inseridos em uma planilha eletrônica (Microsoft Excel®), no qual foram realizados todos os cálculos necessários, para estimar os volumes simulados do

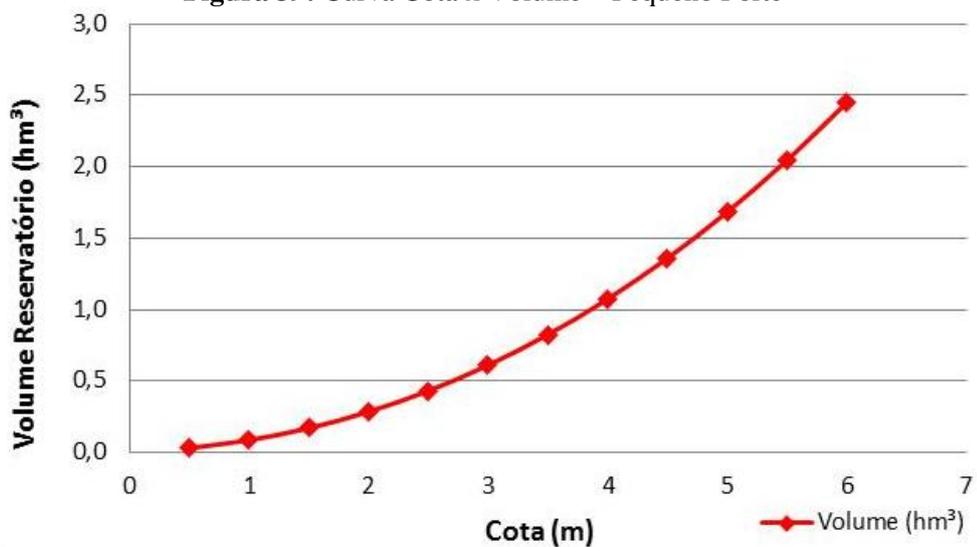
reservatório em qualquer cota especificada. Na Tabela 7, são apresentados os resultados obtidos, e em forma gráfica, a Figura 39, retrata a curva cota-volume da primeira área de estudo, onde o volume mínimo do reservatório é de 32 m³ utilizado nas simulações da etapa seguinte.

Tabela 7: Dados Cota x Volume – Pequeno Porte

| COTA (m) | VOLUME MODELO (hm³) |
|-----------------|---------------------------------------|
| 0,5 | 0,032 |
| 1,0 | 0,087 |
| 1,5 | 0,171 |
| 2,0 | 0,286 |
| 2,5 | 0,432 |
| 3,0 | 0,612 |
| 3,5 | 0,826 |
| 4,0 | 1,075 |
| 4,5 | 1,360 |
| 5,0 | 1,684 |
| 5,5 | 2,047 |
| 6,0 | 2,450 |

Fonte: Autora, 2014

Figura 39: Curva Cota x Volume – Pequeno Porte



Fonte: Autora, 2014

Adicionou-se uma linha de tendência do tipo potência à curva, para obter a equação 32, utilizada nas simulações do nível do reservatório para cada minuto de operação numa planta de pequeno porte:

$$H_R = 0,001 \times VT^{0,5439} \quad (32)$$

Conforme os dados apresentados, o volume inicial calculado para a cota mínima de 0,5 m é 32 m³. Este volume inicial foi inserido na equação supracitada, a ser utilizada nas simulações. Todas as simulações são apresentadas no Apêndice B.

7.2.4 Definição do diâmetro da turbina

A realização do dimensionamento do rotor foi realizada através da metodologia do tópico 5.4. Os dados de vazão (Q) e altura de queda (H) foram obtidos a partir do processo de cálculo do modelo de geração de energia, proposto no tópico 5.5 deste trabalho, que apresenta uma vazão de 30 m³/s, uma altura de queda de 1,5 m. Os valores das variáveis de rotação de entrada e rendimento da turbina foram pré-estabelecidas no valor de 500 rpm e 0,9 respectivamente. Esses valores supracitados são considerados como condições iniciais necessárias para a realização dos cálculos dos parâmetros adimensionais. Todas as componentes envolvidas estão descritas nas Tabelas 8.

Tabela 8: Variáveis de entrada para o dimensionamento do rotor da turbina – Pequeno Porte

| | |
|-----------------------|----------------------|
| Rotação de Entrada | 500 rpm |
| Vazão (Q) | 30 m ³ /s |
| Altura de queda (H) | 1,5 m |
| Rendimento (η) | 0,9 |

Fonte: Autora, 2014

Estes dados são grandezas necessárias para a determinação das variáveis adimensionais no dimensionamento do diâmetro do rotor nas simulações de operação da central maremotriz de pequeno porte. A Tabela 9 apresenta os resultados encontrados de cada parâmetro adimensional, calculados a partir de valores mencionados na Tabela 8.

Tabela 9: Parâmetros adimensionais – Pequeno Porte

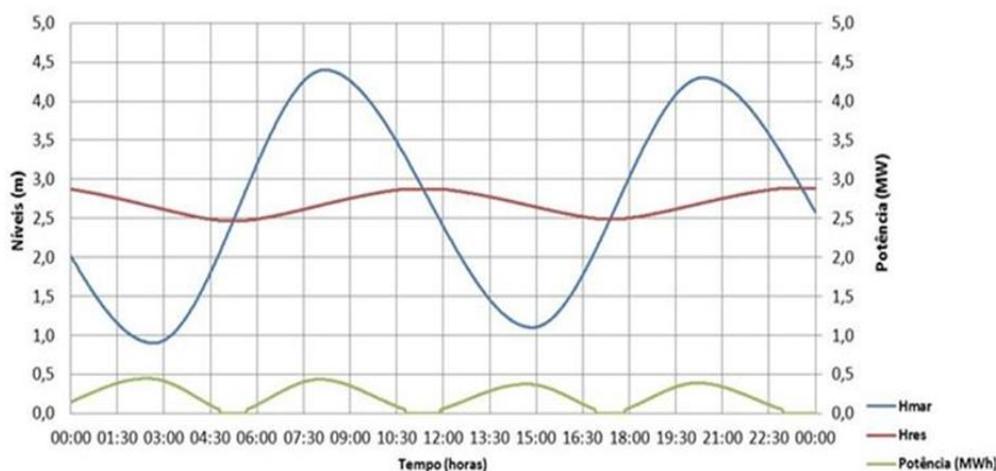
| PARÂMETROS CALCULADOS | Valor |
|-------------------------------------|--------------|
| Rotação Específica (nq) | 2020,52 |
| Coefficiente de pressão (ψ) | 0,04 |
| Coefficiente de vazão (φ) | 1,13 |
| Energia específica | 14,715 |
| Coefficiente de Velocidade (v) | 11,79 |
| Diâmetro específico (ϑ) | 0,476 |
| Diâmetro do rotor (D_e) | 1,25 |
| Velocidade | 23,90 |

Fonte: Autora, 2014

7.2.5 Simulações de Operação

Com o diâmetro definido no valor de 1,25 m, foram realizadas as simulações da central maremotriz de pequeno porte. A Figura 40 apresenta os resultados obtidos na simulação de operação do reservatório em efeito duplo, em dois ciclos de maré, para cada minuto no mês de Janeiro de 2014. O nível d'água do mar é representado pela linha azul, o nível do reservatório pela linha vermelha e a potência disponível representada pela linha verde.

Figura 40: Nível do reservatório, nível do mar e potência num diâmetro de 1,25 m (1 Turbina)

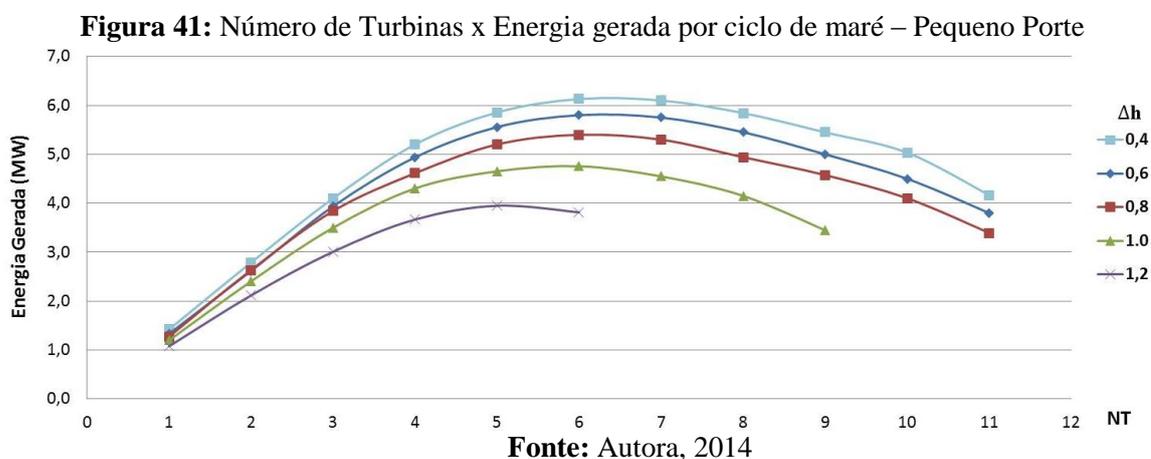


Fonte: Autora, 2014

O cálculo do potencial energético disponível, representado pela linha verde na Figura acima, a ser instalado na central maremotriz de pequeno porte é realizado através da Equação 26, tendo por base a vazão encontrada e a altura de queda mínima de 0,4 m criada entre o nível do mar e o reservatório para a operação da turbina.

A potência máxima encontrada para este caso foi de 0,4 MW e a produção de energia por ciclo, resultado da modelagem das marés e da simulação do nível do reservatório, foi equivalente a 1,5 MWh/ciclo. A energia teórica produzida anualmente, estimada pelo modelo de geração de energia, é equivalente a 0,95 GWh/ano. Outras quedas foram consideradas, tais como, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,2 m, e os resultados podem ser encontrados no Apêndice B.

A Figura 41 mostra a variação do número de turbinas para verificar a máxima produção de energia gerada na área de implantação do estudo. Como pode ser observado, cada curva é função de uma queda mínima.

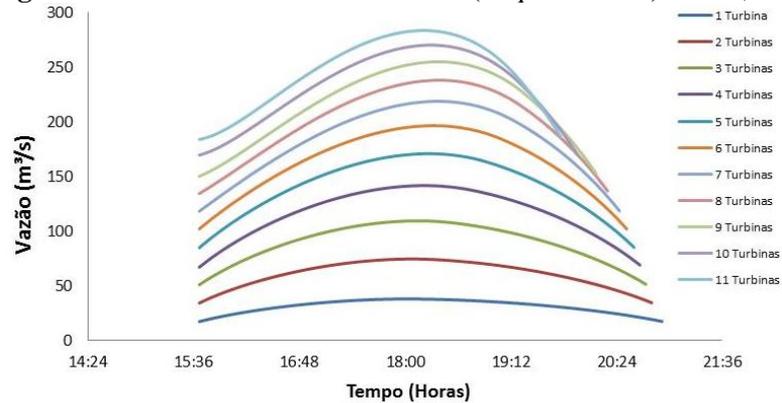


Para qualquer Δh , a energia gerada atinge seu máximo para um número de turbinas igual a 6, exceto para queda igual a 1,2 m, para qual a energia máxima gerada é encontrada com um número de turbinas igual a 5. No entanto, foi possível notar que quanto maior a queda estabelecida para o funcionamento da central, a energia máxima gerada é menor, isso acontece devido ao maior tempo que a central passa em *off*, pois um maior tempo é necessário para atingir o desnível estabelecido para operação da central.

Para uma queda de 0,4 m, o funcionamento da central maremotriz será de 5 horas e 10 minutos por ciclo de maré, alternando em períodos de aproximadamente 50 minutos *off*. Para uma queda de 0,6 m o tempo será de 4 horas e 45 minutos, com períodos de 1 hora e 30 minutos *off*. Para uma queda de 0,8 m o tempo será de 4 horas e 10 minutos, com períodos de 2 horas *off*. Para uma queda de 1,0 m o tempo será de 3 horas e 30 minutos, com períodos de 2 horas e 10 minutos *off*. Para uma queda de 1,2 m, o tempo de funcionamento e parada é igual, aproximadamente 2 horas e 50 minutos.

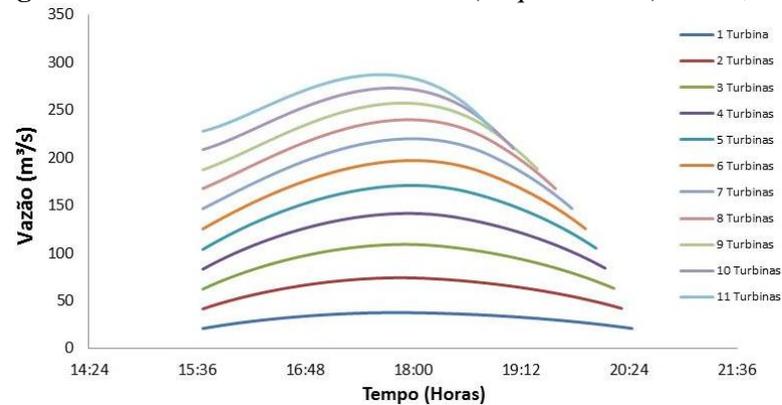
Para representar o tempo de enchimento no reservatório de pequeno porte, nas Figuras de 42 a 46, são apresentadas as curvas que correspondem às vazões máximas atingidas em um ciclo de maré. Esta relação é baseada no número de turbinas e quedas (0,4, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,2 metros).

Figura 42: Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,4 m



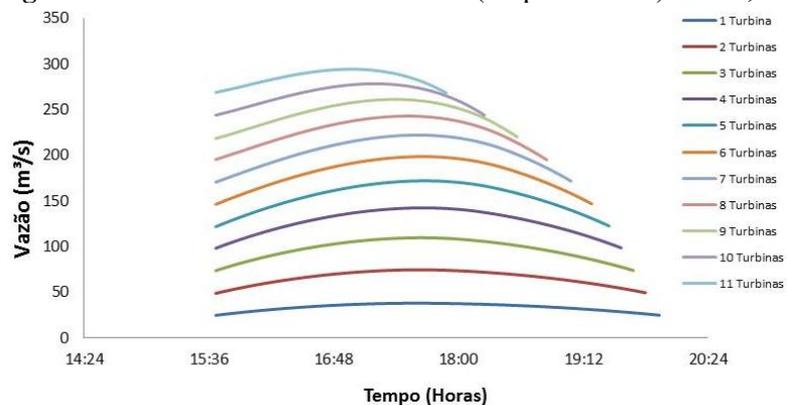
Fonte: Autora, 2014

Figura 43: Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,6 m

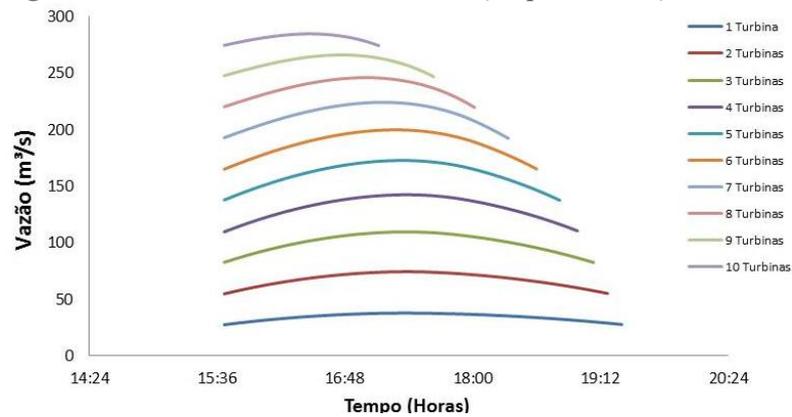


Fonte: Autora, 2014

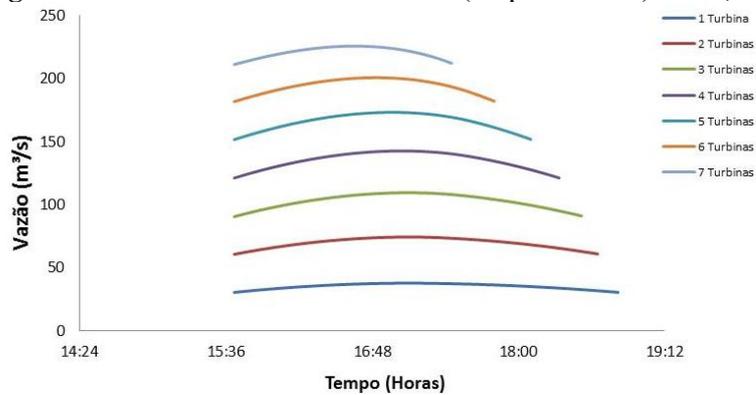
Figura 44: Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - Δh 0,8 m



Fonte: Autora, 2014

Figura 45: Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - $\Delta h 1,0$ m

Fonte: Autora, 2014

Figura 46: Vazão x número de turbinas (Pequeno Porte) - $\Delta h 1,2$ m

Fonte: Autora, 2014

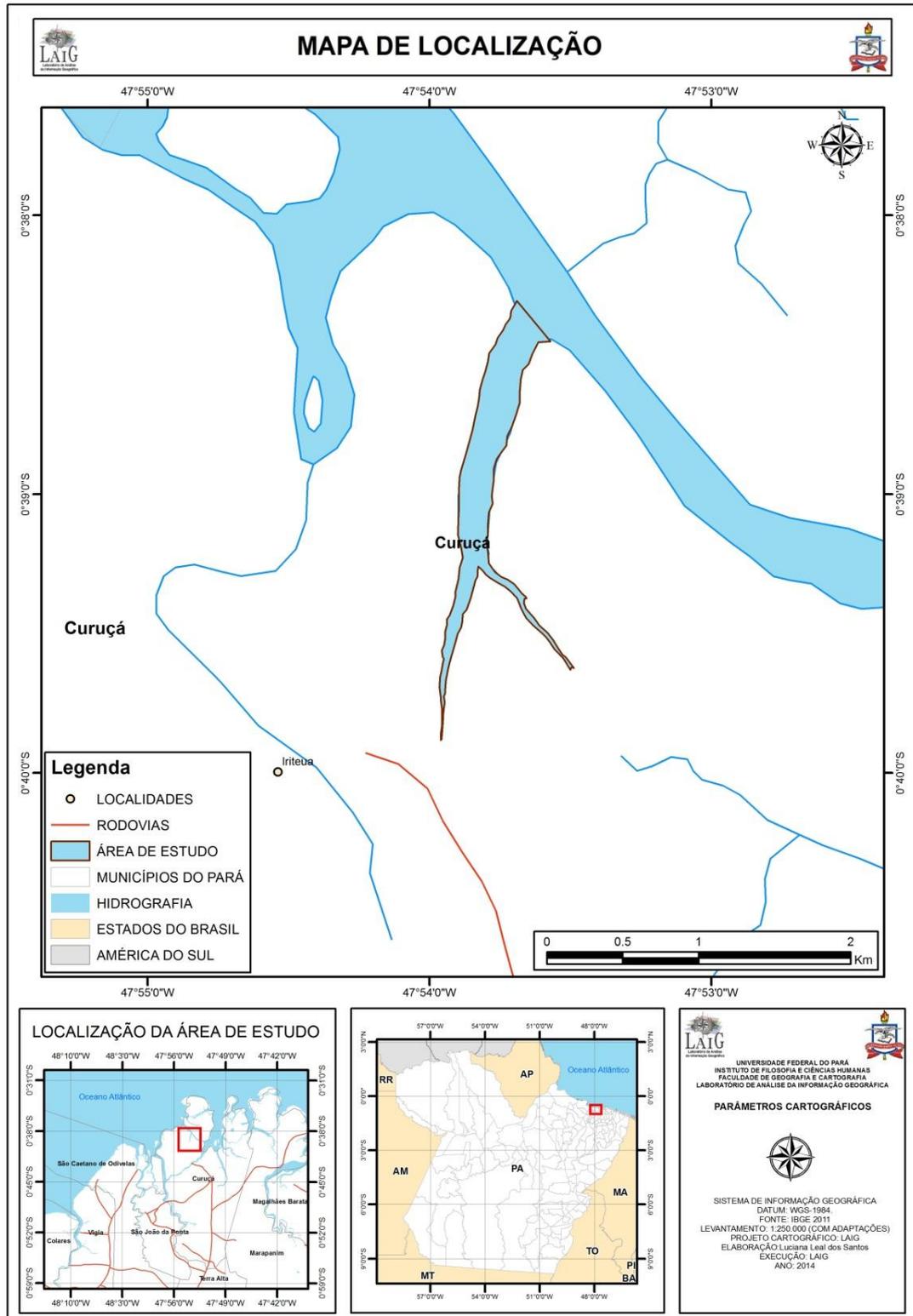
Para as quedas de 0,4 e 0,6 m respectivamente, quase não há alterações com relação ao tempo de operação do reservatório. A partir de quedas de 1,0 m, nota-se uma variação no tempo de operação. Para um reservatório utilizando uma queda de 1,0 m e 7 turbinas o intervalo de tempo vai de 15:36 a 17:00, ou seja, apenas 1:30 de operação da usina. Com um tempo de operação da usina menor, o sistema de geração de energia é penalizado em consequência dos níveis máximos do reservatório serem atingidos em um curto período de tempo. Estas situações devem ser bem avaliadas para se conseguir um número ótimo de turbinas com geração máxima de energia, sem afetar o tempo de funcionamento da central maremotriz.

7.3 CENTRAL MAREMOTRIZ DE MÉDIO PORTE

7.3.1 Descrição do Local

O segundo caso de estudo está localizado próximo à Vila de Irriteua, localizada no município de Curuçá (Figuras 47 e 48). O local possui uma área equivalente a 0,5 km².

Figura 47: Mapa de localização – Médio Porte



Fonte: Autora, 2014

A vegetação é caracterizada por florestas de mangues que ocupam as porções litorâneas e semi-litorâneas, onde existe a influência da salinidade do mar e também são encontradas vegetação por florestas secundárias. A geologia do município é, em grande parte, formada pelos sedimentos da formação Barreiras de idade terciária, principalmente constituindo as partes mais internas do seu território.

Figura 48: Imagem da Vila de Iriteua



Fonte: Google Earth, 2014

7.3.2 Modelagem da Maré

Analogamente a primeira área de estudo, utilizou-se a metodologia de estimativa de altura de maré do tópico 5.2, usando valores de preamar e baixamar da estação maregráfica Ilha dos Guarás, obtidos durante o mês de janeiro de 2014 (Tabela 10). Esses dados serviram de base para avaliar o comportamento do nível do mar próximo à segunda área de estudo.

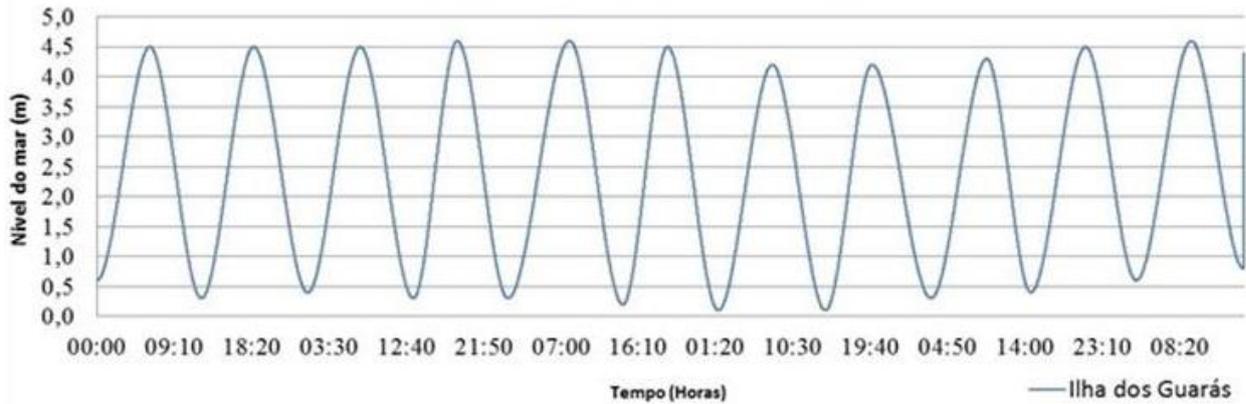
Tabela 10: Dados estação Maregráfica Ilha dos Guarás

| Hora | Valores de Preamar e Baixa-mar (m) |
|-------------|---|
| 0,00 | 0,6 |
| 6,30 | 4,5 |
| 12,4 | 0,3 |
| 18,6 | 4,5 |
| 25,0 | 0,4 |
| 31,2 | 4,5 |
| 37,5 | 0,3 |
| 42,7 | 4,6 |
| 48,7 | 0,3 |
| 56,0 | 4,6 |
| 62,3 | 0,2 |
| 67,6 | 4,5 |
| 73,6 | 0,1 |
| 80,0 | 4,2 |
| 86,3 | 0,1 |
| 91,8 | 4,2 |
| 98,8 | 0,3 |
| 105,4 | 4,3 |
| 110,6 | 0,4 |
| 117,1 | 4,5 |
| 123,1 | 0,6 |
| 129,6 | 4,6 |
| 135,8 | 0,8 |
| 142,2 | 4,4 |
| 148,2 | 1,0 |
| 153,6 | 4,3 |
| 159,7 | 1,1 |
| 166,0 | 4,1 |
| 172,1 | 1,3 |
| 178,4 | 4,0 |

Fonte: Marinha do Brasil, 2014

Foi possível ilustrar através da Figura 49, as situações de enchente e vazante a partir da estação Maregráfica Ilha dos Guarás. Os resultados mostraram um comportamento idêntico ao primeiro caso (Figura 37), ou seja, características de maré semidiurna com alturas máximas e mínimas semelhantes.

Figura 49: Altura de maré da Estação Maregráfica Ilha dos Guarás

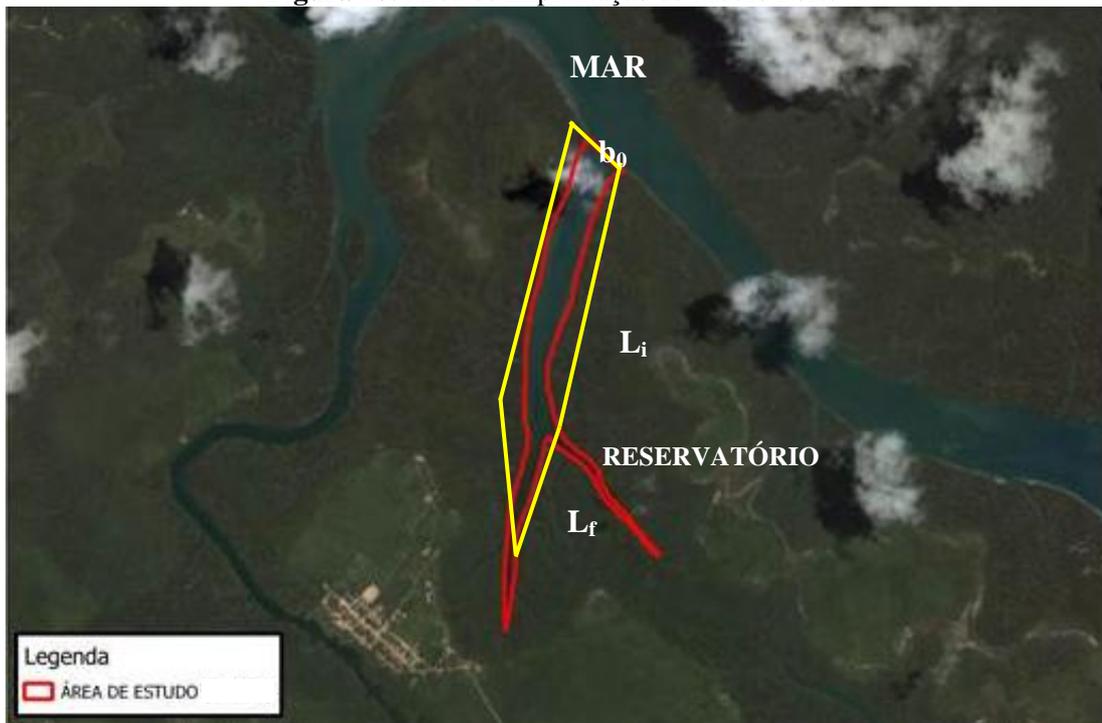


Fonte: Autora, 2014

7.3.3 Aplicação do Modelo hipotético

Aplicou-se ao local (Figura 50) a mesma metodologia utilizada na central de pequeno porte.

Figura 50: Área de implantação de Médio Porte



Fonte: Google Earth, 2014

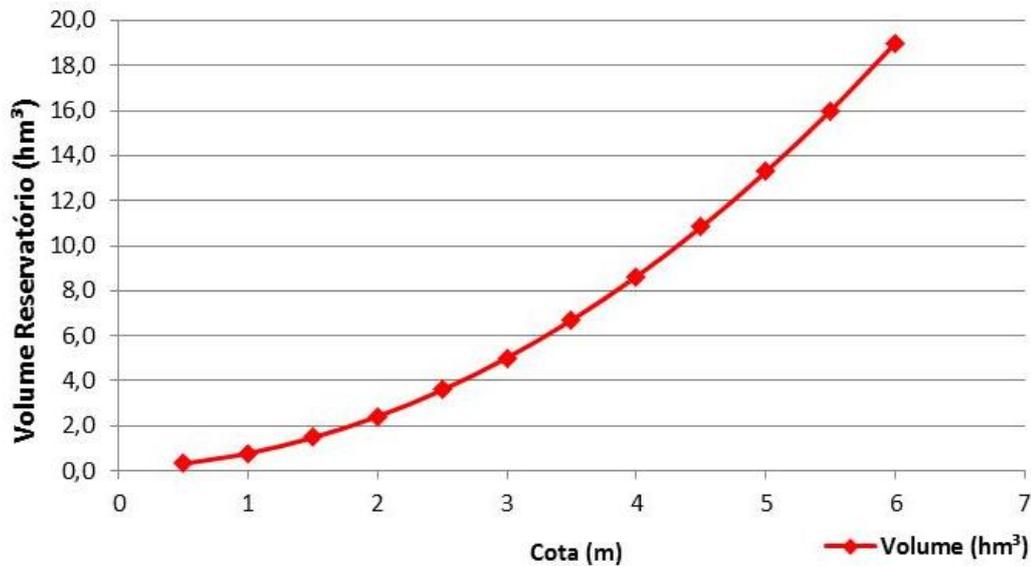
Assim, os valores de b_0 e L_i foram obtidos a partir das imagens pelo *Google Earth* (Figura 50), que apresenta um valor de 0,25 km e 1,8 km respectivamente. As variáveis h_0 , α , B foram estimadas, com valores iguais a 0,2 m, 15° e 5° respectivamente. Esses valores servem como condição inicial na determinação dos outros parâmetros para a realização das simulações do modelo hipotético. Com estes dados, foi possível estimar os volumes simulados do reservatório para qualquer cota especificada (Tabela 11) e em forma gráfica na Figura 51.

Tabela 11:Dados Cota x Volume do modelo – Médio Porte

| COTA (m) | VOLUME MODELO (hm ³) |
|----------|----------------------------------|
| 0,5 | 0,319 |
| 1,0 | 0,779 |
| 1,5 | 1,475 |
| 2,0 | 2,411 |
| 2,5 | 3,591 |
| 3,0 | 5,019 |
| 3,5 | 6,698 |
| 4,0 | 8,632 |
| 4,5 | 10,826 |
| 5,0 | 13,283 |
| 5,5 | 16,008 |
| 6,0 | 19,003 |

Fonte: Autora, 2014

A partir desses valores foi elaborado o gráfico (Figura 53), o qual mostra o comportamento do volume do reservatório hipotético para diferentes cotas em uma planta de médio porte.

Figura 51: Curva Cota x Volume na planta de Médio Porte

Fonte: Autora, 2014

Analogamente ao caso anterior, foi adicionada uma linha de tendência do tipo potência, e obteve-se a equação (33), em uma planta de médio porte.

$$H_R = 0,0001x VT^{0,6454} \quad (33)$$

Semelhante ao estudo anterior, com a equação 33 definida, foi possível calcular a variação do nível d'água no reservatório do local.

7.3.4 Definição do diâmetro da turbina

A partir do modelo de geração de energia, do tópico 5.5, foram calculados os valores da altura de queda (H) e sua respectiva vazão (Q) em cada intervalo de tempo, assim como a rotação de entrada e o rendimento pré-estabelecidos da turbina (Tabela 12).

Tabela 12: Parâmetros de entrada no dimensionamento do rotor da turbina – Médio Porte

| | |
|-----------------------|----------|
| Rotação de Entrada | 400 rpm |
| Vazão (Q) | 115 m³/s |
| Altura de queda (H) | 1,7 m |
| Rendimento (η) | 0,9 |

Fonte: Autora, 2014

Conhecidos esses valores, foram realizados os cálculos dos parâmetros adimensionais (Tabela 13), para o dimensionamento do diâmetro do rotor a ser.

Tabela 13: Parâmetros calculados no dimensionamento do rotor da turbina – Médio Porte

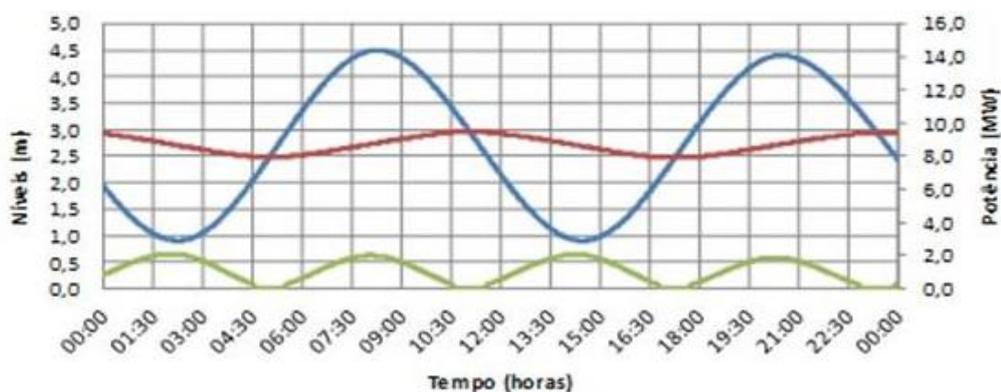
| PARÂMETROS CALCULADOS | VALOR |
|-------------------------------------|---------|
| Rotação Específica (nq) | 2881,19 |
| Coefficiente de pressão (ψ) | 0,03 |
| Coefficiente de vazão (φ) | 1,54 |
| Energia específica | 16,677 |
| Coefficiente de Velocidade (v) | 17,276 |
| Diâmetro específico (ϑ) | 0,393 |
| Diâmetro rotor (D_e) | 2,0 |
| Velocidade | 37,28 |

Fonte: Autora, 2014

7.3.5 Simulações de Operação

Foi definido um diâmetro de 2,0 m, para a realização das simulações da central maremotriz de médio porte. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 52, com o objetivo de conhecer o comportamento do sistema frente às variações do nível do mar para cada minuto em dois ciclos de maré no mês de Janeiro de 2014. É mostrada a diferença do nível do mar, representada pela linha azul, e o nível de água no reservatório, representada pela linha vermelha.

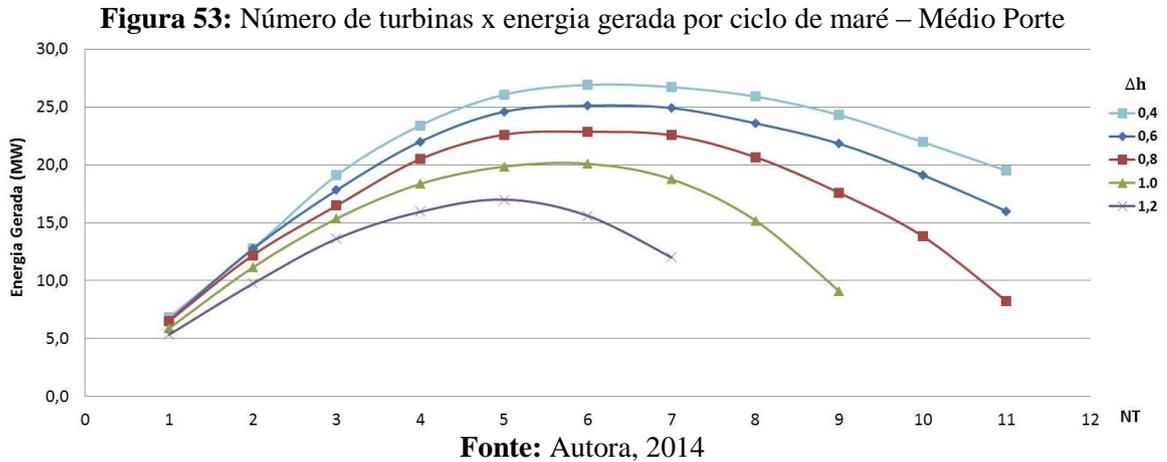
Figura 52: Nível do reservatório, nível do mar e potência para um diâmetro de 2,0 m (1 turbina)



Fonte: Autora, 2014

Semelhante ao caso anterior, para o cálculo da potência disponível nesta área de estudo foi considerado uma altura de queda entre o mar e o reservatório de 0,4 m para a operação da turbina. A potência máxima encontrada foi de 1,7 MW e a produção de energia foi de 13,23 MWh/ciclo. A energia teórica produzida anualmente foi de 10 GWh/ano.

A Figura 53 analisa a variação do número de turbinas que podem ser utilizadas para a geração da energia máxima do sistema para diferentes alturas de queda disponíveis (Δh).



Analogamente ao primeiro caso, a energia gerada atinge seu máximo para um número de turbinas igual a 6. Com relação ao funcionamento da central, sua operação para uma queda de 0,4 m foi aproximadamente de 5 horas e 10 minutos por ciclo de maré, alternando em períodos de aproximadamente 50 minutos *off*. Para uma queda de 0,6 m, o tempo será de 4 horas e 45 minutos, com períodos de 1 hora e 15 minutos *off*. Para uma queda de 0,8 m, o tempo será de 4 horas e 10 minutos, com períodos de 1 hora e 45 minutos *off*. Para uma queda de 1,0 m, o tempo será de 3 horas e 50 minutos, com períodos de 2 horas e 10 minutos *off*. Para uma queda de 1,2 m, o tempo será de 3 horas e 20 minutos, com períodos de 2 horas e 50 minutos *off*.

Para representar o tempo de enchimento no reservatório de médio porte, nas Figuras de 54 a 58, são apresentadas as curvas que correspondem às vazões máximas atingidas em um ciclo de maré. Esta relação é baseada no número de turbinas e quedas (0,4, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,2 metros).

Figura 54: Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,4 m

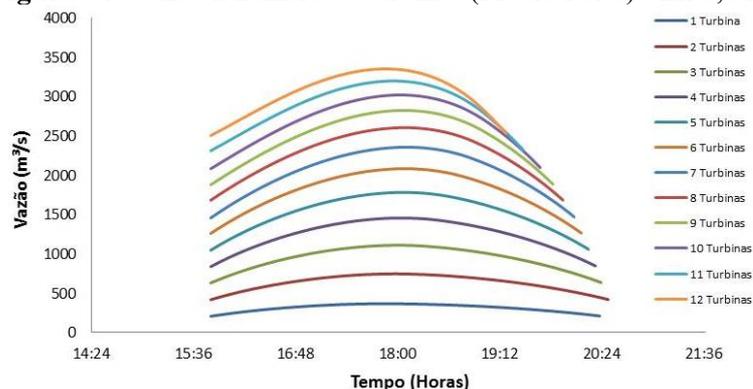
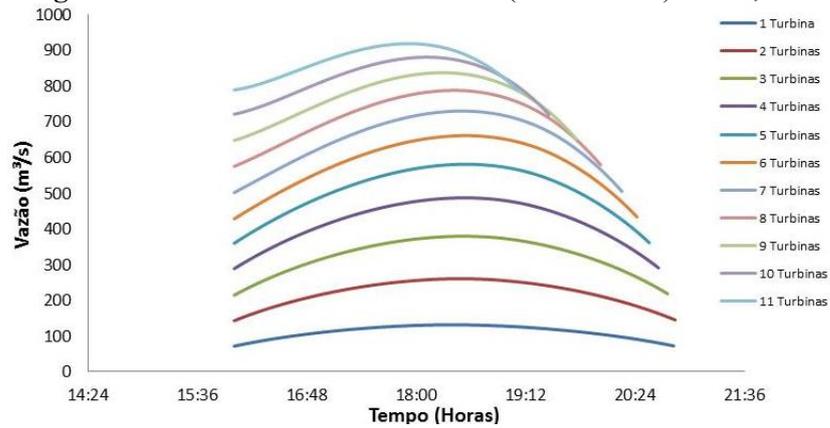
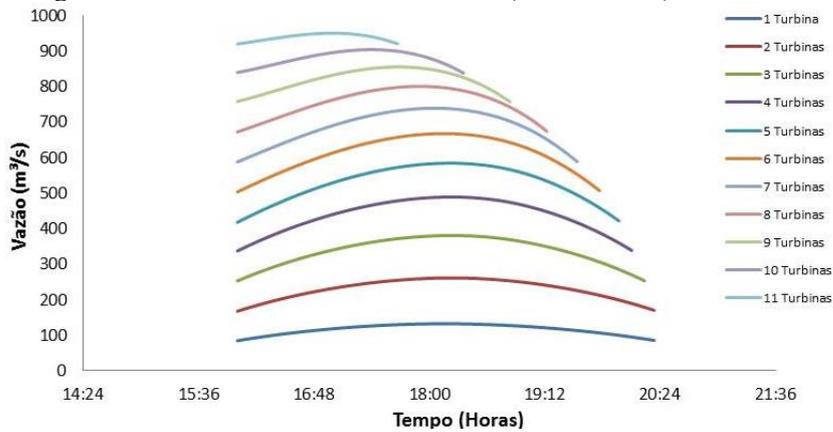


Figura 55: Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,6 m



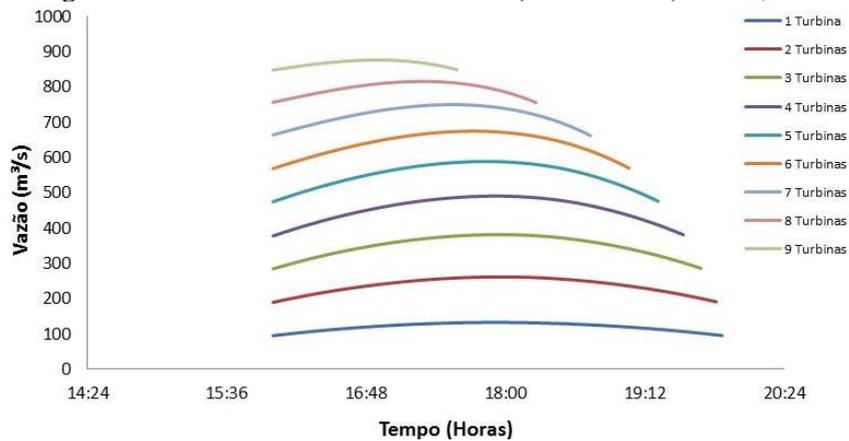
Fonte: Autora, 2014

Figura 56: Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 0,8 m



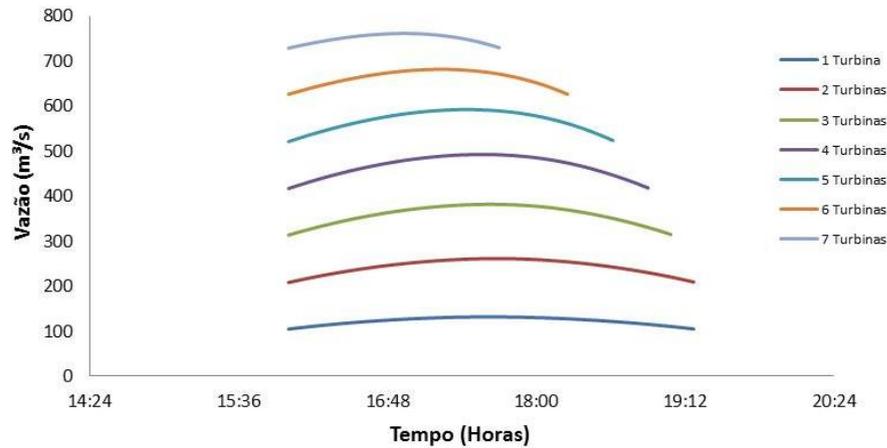
Fonte: Autora, 2014

Figura 57: Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - Δh 1,0 m



Fonte: Autora, 2014

Figura 58: Vazão x número de turbinas (Médio Porte) - $\Delta h 1,2$ m



Fonte: Autora, 2014

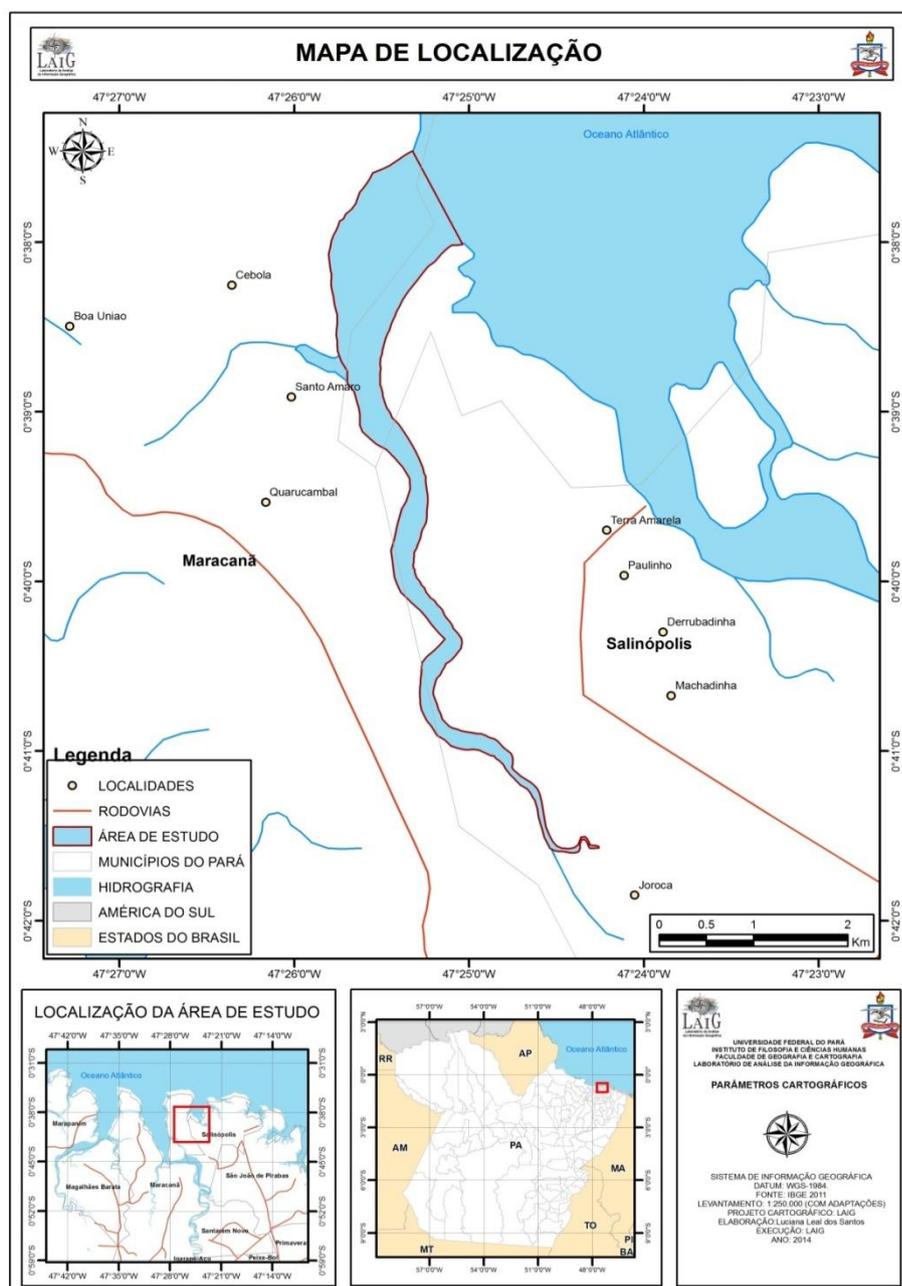
De forma análoga ao primeiro caso, para as quedas de 0,4 e 0,6 m respectivamente, quase não há alterações com relação ao tempo de operação do reservatório. Considerando queda de 1,0 m e a partir de 7 turbinas, o tempo de funcionamento da central maremotriz diminui, operado aproximadamente 3 horas, no intervalo de 15:36 as 18:30. Também conclui-se que com um tempo de operação da usina menor, o sistema de geração de energia também é penalizado em consequência dos níveis máximos do reservatório serem atingidos em um curto período de tempo.

7.4 CENTRAL MAREMOTRIZ DE GRANDE PORTE

7.4.1 Descrição do Local

A área de estudo localiza-se no município de Maracanã com uma área equivalente a 2,62 km² (Figura 59). A vegetação do local é constituída por matas de terra firme, várzeas estuarinas, restingas e manguezais. A estrutura geológica é constituída pelos sedimentos do terciário que constituem a Formação Barreiras, ocupando a maior distribuição espacial de seu território. Suas formas de relevo são representadas pelas planícies litorâneas, onde aparecem formas específicas, como as praias, dunas e falésias, sendo estas últimas esculpidas sobre rochas da Formação Barreiras.

Figura 59: Mapa de localização – Grande Porte



Fonte: Autora, 2014

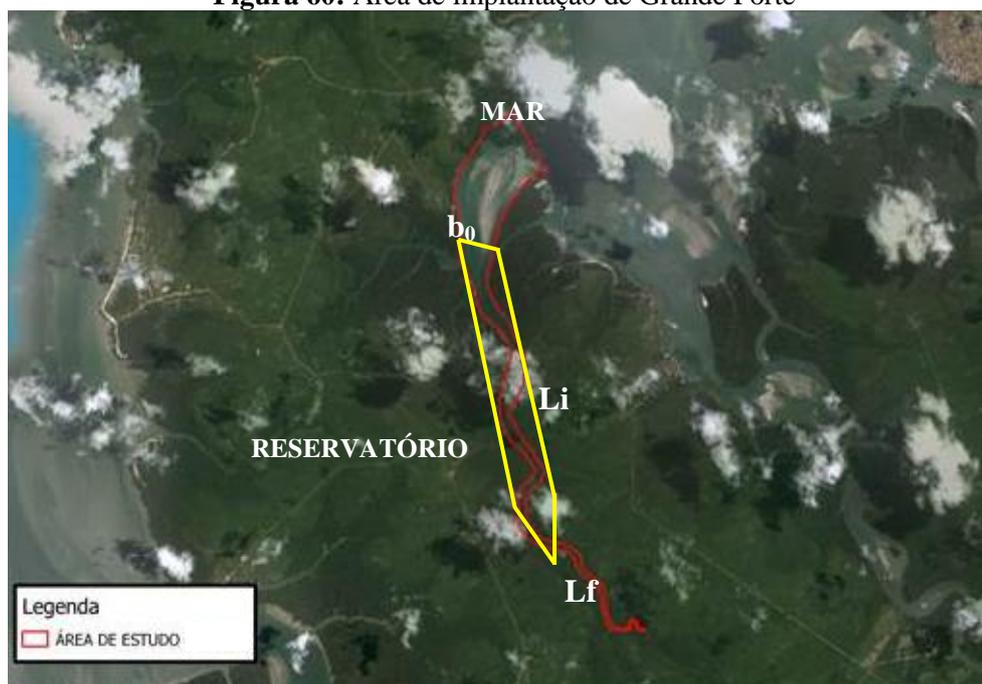
7.4.2 Modelagem das Marés

Para a simulação das estimativas de altura de maré, foram utilizados os mesmos dados de amplitude de maré do primeiro caso. Isso se deveu à proximidade da estação ao local em estudo. Os valores de preamar e baixamar foram coletados através da Estação Maregráfica de Salinópolis, durante o mês de Janeiro de 2014.

7.4.3 Aplicação do Modelo hipotético

Antes da execução do modelo, assim como na primeira e segunda área de estudo, aplicou-se a mesma metodologia, fornecendo os valores das variáveis de entrada b_0 e L_i , a partir das imagens de satélite do *Google Earth*, conforme Figura 60, apresentando valores de 0,5 km e 2,8 km respectivamente.

Figura 60: Área de implantação de Grande Porte



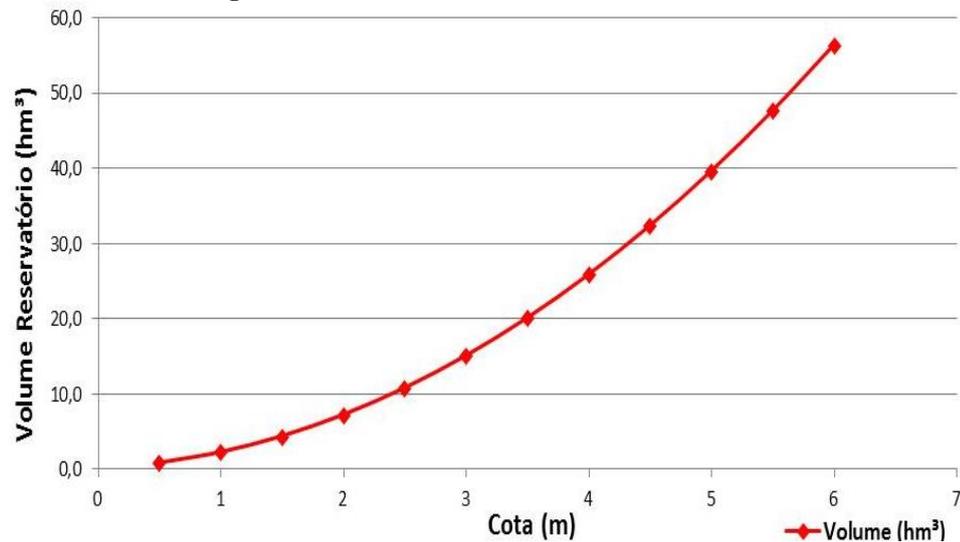
Fonte: Google Earth, 2014

Os valores de h_0 , α e β também foram estimados, com valores de 0,15 m, 20° e 5° respectivamente. Através destes valores foi possível calcular os demais parâmetros que definem o modelo hipotético do canal para a realização das simulações. Ao final dos cálculos, o modelo também apresentará os resultados de cota-volume da área de estudo, observados na Tabela 14 e representados pela Figura 61, apresentando um volume mínimo do reservatório de 925 m³ utilizado nas simulações na etapa seguinte.

Tabela 14: Dados Cota x Volume do modelo – Grande Porte

| COTA (m) | VOLUME MODELO (hm³) |
|-----------------|---------------------------------------|
| 0,5 | 0,925 |
| 1,0 | 2,337 |
| 1,5 | 4,462 |
| 2,0 | 7,305 |
| 2,5 | 10,871 |
| 3,0 | 15,165 |
| 3,5 | 20,191 |
| 4,0 | 25,954 |
| 4,5 | 32,460 |
| 5,0 | 39,713 |
| 5,5 | 47,718 |
| 6,0 | 56,480 |

Fonte: Autora, 2014

Figura 61: Curva Cota x Volume Grande Porte

Igualmente aos casos anteriores, adicionou-se a linha de tendência do tipo potência e se obteve a equação 34, para uma planta de grande porte.

$$H_R = 0,00004 \times VT^{0,6552} \quad (34)$$

7.4.4 Definição do diâmetro da turbina

A realização do dimensionamento do rotor foi realizada através da metodologia do tópico 5.4, onde os dados de vazão (Q) e altura de queda (H), apresentam valores de 340 m³/s, e altura de queda de 1,8 m respectivamente com uma rotação de entrada de 300 rpm,

com um rendimento da turbina de 0,9 para a central maremotriz de médio porte, sendo estes dois últimos valores pré-estabelecidos. Esses valores foram utilizados como condições iniciais necessárias para a realização dos cálculos dos parâmetros adimensionais. Os valores são encontrados na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros adimensionais para o caso de estudo de Grande Porte

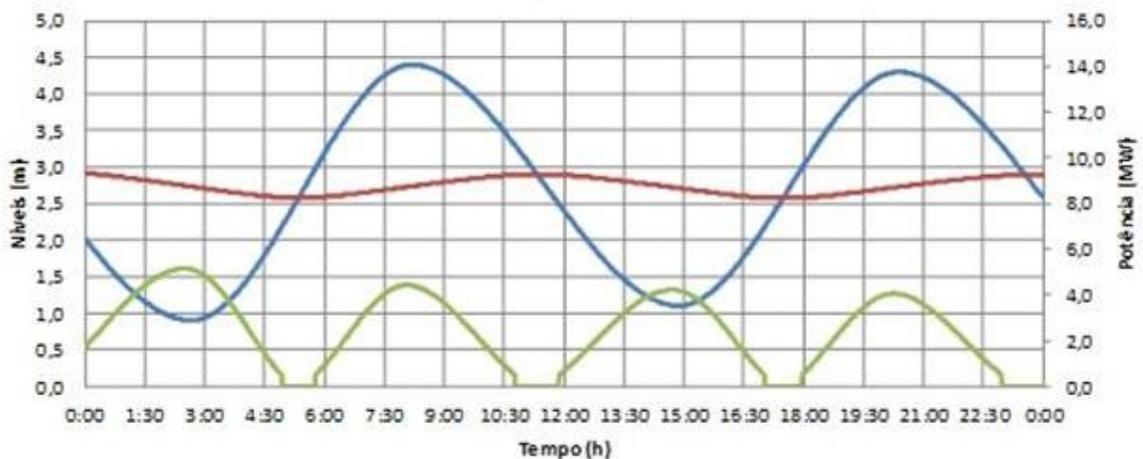
| PARÂMETROS CALCULADOS | Valor |
|-------------------------------------|--------------|
| Rotação Específica (nq) | 3559,64 |
| Coefficiente de pressão (ψ) | 0,025 |
| Coefficiente de vazão (φ) | 1,87 |
| Energia específica | 17,658 |
| Coefficiente de Velocidade (v) | 21753 |
| Diâmetro específico (ϑ) | 0,35 |
| Diâmetro rotor (D_e) | 3,0 |
| Velocidade | 43,30 |

Fonte: Autora, 2014

7.4.5 Simulações de Operação

Considerando uma turbina com diâmetro de 3,0 m, foram simulados os níveis do mar, do reservatório e as potências instaladas para o caso analisado. A Figura 62 mostra a variação do nível do mar, representada pela linha azul, o nível do reservatório, linha vermelha, e as variações de potência disponível, criadas através dos desníveis entre o mar e o reservatório, representados pela linha verde.

Figura 62: Variações do nível do reservatório, mar e potência.

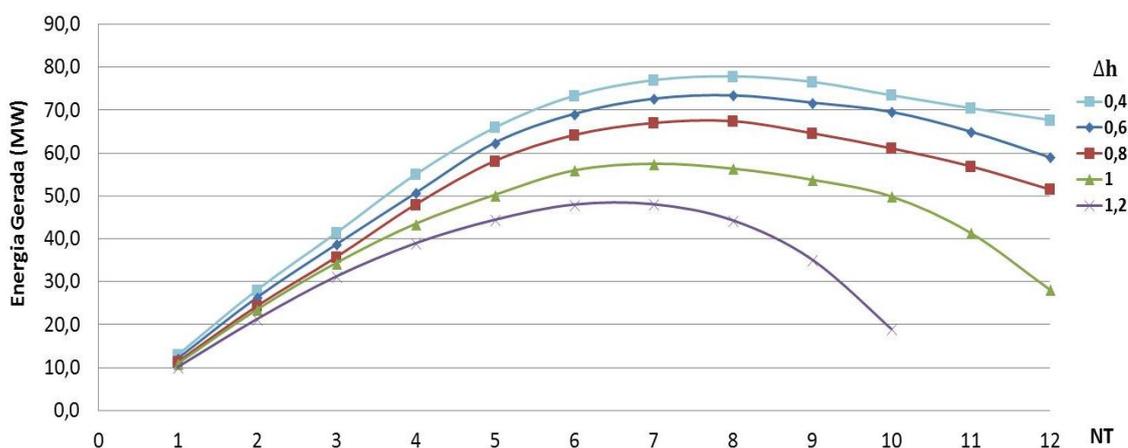


Fonte: Autora, 2014

A potência máxima foi de 5,1 MW, considerando uma altura de queda mínima de 0,4 m (semelhante aos casos anteriores) e a produção de energia por ciclo, equivalente a 26,04

MWh. A energia teórica produzida anualmente estimada pelo modelo de geração de energia, é aproximadamente igual a 19 GWh/ano. Com base na equação 27 para o cálculo da energia gerada, o sistema foi simulado, variando-se o número de turbinas em função da queda disponível. Na Figura 63 podem ser observados os resultados da produção de energia gerada.

Figura 63: Número de turbinas x energia gerada por ciclo de maré - Grande Porte



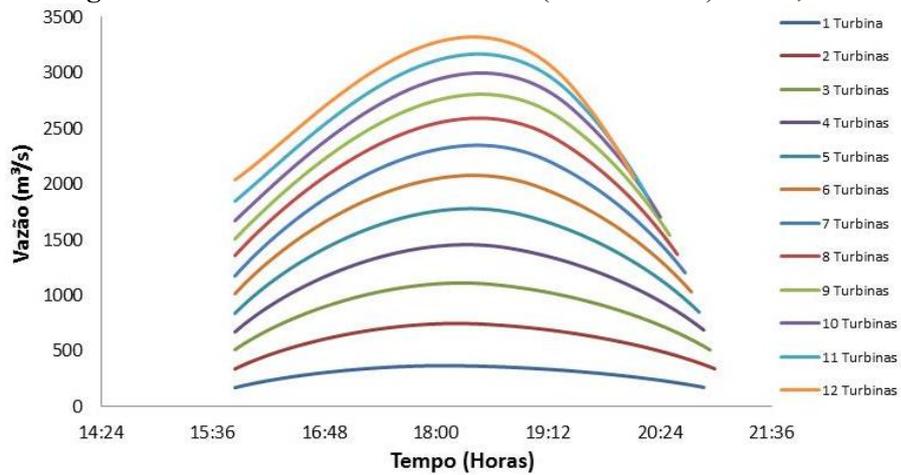
Fonte: Autora, 2014

A energia máxima gerada chega a um valor de 77,87 MW para um número de turbinas igual a 8. Com relação ao funcionamento da central, sua operação será em intervalos de aproximadamente 5 horas por ciclo de maré, alternando em períodos de 50 minutos *off* para uma altura de queda mínima de 0,4 m. Para uma queda de 0,6 m, o tempo será de 4 horas e 40 minutos, com períodos de 1 hora e 15 minutos *off*. Para uma queda de 0,8 m, o tempo será de 4 horas, com períodos de 2 horas *off*. Para uma queda de 1,0 m, o tempo será de 3 horas e 30 minutos, com períodos de 2 horas *off*. Para uma queda de 1,2 m, o tempo será de 3 horas tanto para funcionamento, como para o período *off*.

Semelhante à primeira e segunda área de estudo, as Figuras de 64 a 68 também mostram as curvas da vazão máxima para cada número de turbinas com sua determinada altura de queda disponível na central maremotriz de grande porte. As figuras mostram quanto maior o número de turbinas utilizadas para adicionar ou extrair volume do reservatório, o tempo de operação nas simulações é reduzido.

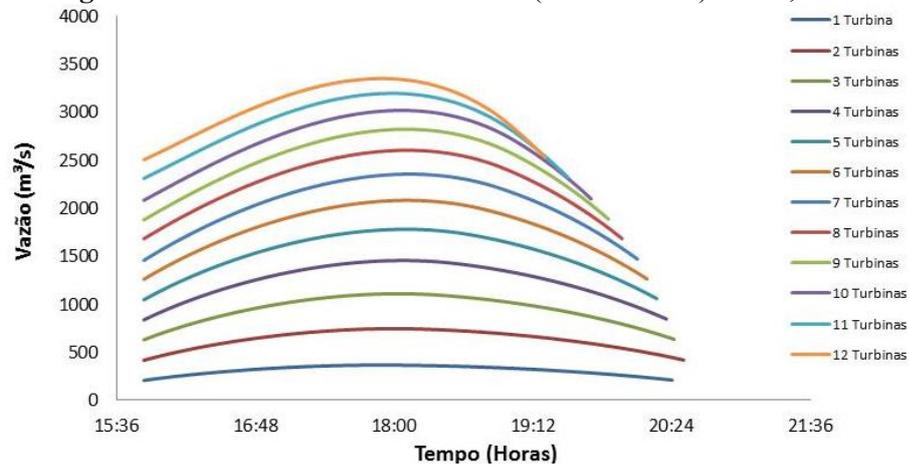
Para representar o tempo de enchimento no reservatório de pequeno porte, nas Figuras de 64 a 68, são apresentadas as curvas que correspondem às vazões máximas atingidas em um ciclo de maré. Esta relação é baseada no número de turbinas e quedas (0,4, 0,6, 0,8, 1,0 e 1,2 metros).

Figura 64: Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,4 m



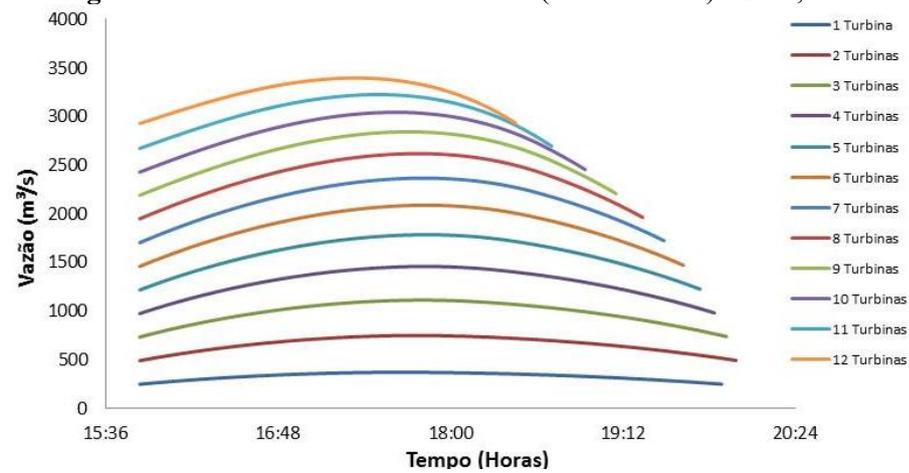
Fonte: Autora, 2014

Figura 65: Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,6 m.

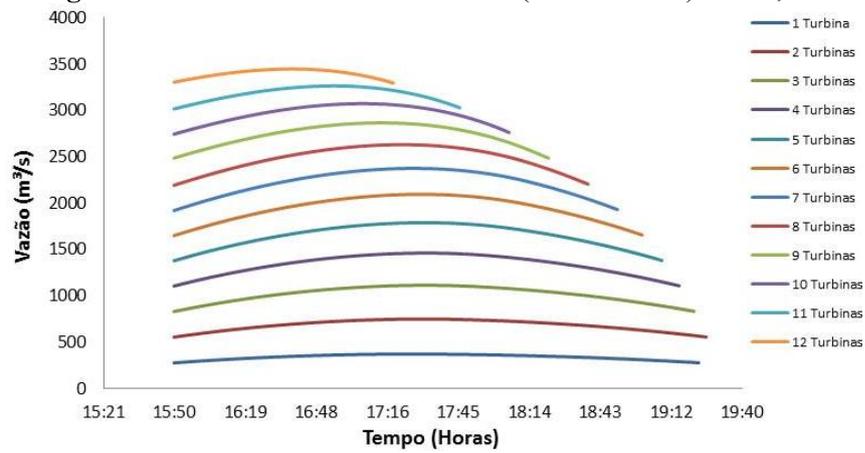


Fonte: Autora, 2014

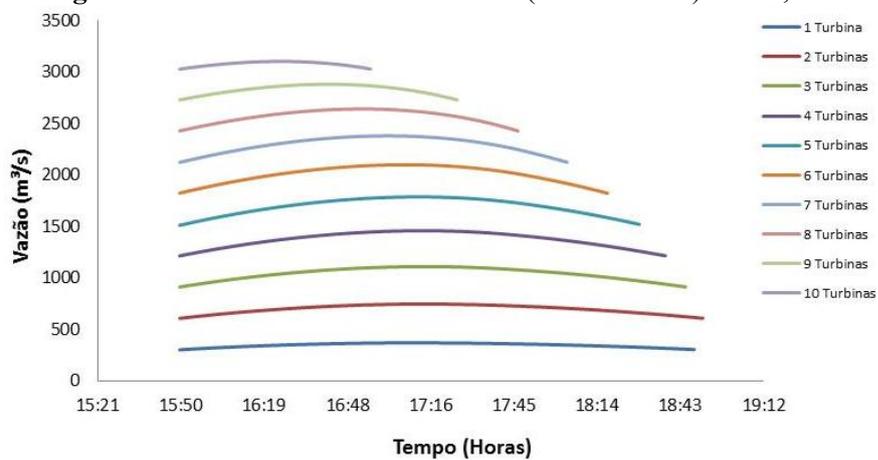
Figura 66: Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 0,8 m



Fonte: Autora, 2014

Figura 67: Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 1,0 m

Fonte: Autora, 2014

Figura 68: Vazão x número de turbinas (Grande Porte) - Δh 1,2 m

Fonte: Autora, 2014

Para as quedas de 0,4 e 0,6, 0,8 m respectivamente, independente do número de turbinas, o tempo de operação da usina atinge seu nível máximo, sofrendo variações mínimas. A partir de quedas de 1,0 m e com número superior a 9 turbinas, nota-se uma alteração no tempo de operação da usina de 1:30.

7.5 ANÁLISE DE CUSTOS

Após a realização das simulações para definição do potencial energético, foi realizada a análise de custos para cada área em estudo. Para o cálculo dos custos de investimento e o cálculo do custo unitário de energia, foram simulados dois diferentes cenários, um otimista, com o custo de implantação igual a \$2,659,80/kW e outro pessimista, com custo de implantação igual a \$3,324,75/kW (APENDICE C). A Tabela 16 mostra os valores do custo total de investimento de projeto de acordo com a potência instalada para cada área de estudo.

Tabela 16: Investimento para implantação das centrais maremotrizes

| Central Maremotriz | Potência Instalada (kW) | Investimento (\$/kW) |
|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Pequeno Porte | 400 | \$ 1.063.920,00 - \$ 1.329.900,00 |
| Médio Porte | 1.700 | \$ 4.521.660,00 - \$ 5.652.075,00 |
| Grande Porte | 5.400 | \$ 14.362.920,00 - \$ 17.953.650,00 |

Fonte: Autora, 2014

A Tabela 17 apresenta o valor do custo total de investimento subdividido nas etapas necessárias para implantação da central maremotriz, considerando todos os cenários e os locais de implantação dentro da Costa Paraense.

Tabela 17: Composição dos Custos (US\$)

| | Pequeno Porte | | Médio Porte | | Grande Porte | |
|----------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | Cenários | | Cenários | | Cenários | |
| | Otimista | Pessimista | Otimista | Pessimista | Otimista | Pessimista |
| Obras civis | 553.238,40 | 691.548,00 | 2.351.263,20 | 2.939.079,00 | 7.468.718,40 | 9.335.898,00 |
| Mecânica e Elétrica | 191.505,60 | 239.382,00 | 813.898,80 | 1.017.373,50 | 2.585.325,60 | 3.231.657,00 |
| Instalação | 159.588,00 | 199.485,00 | 678.249,00 | 847.811,25 | 2.154.438,00 | 2.693.047,50 |
| Contingências | 106.392,00 | 132.990,00 | 452.166,00 | 565.207,50 | 1.436.292,00 | 1.795.365,00 |
| Transmissão Elétrica | 53.196,00 | 66.495,00 | 226.083,00 | 282.603,75 | 718.146,00 | 897.682,50 |
| Total (US\$) | 1.063.920,00 | 1.329.900,00 | 4.521.660,00 | 5.652.075,00 | 14.362.920,00 | 17.953.650,00 |

Fonte: Autora, 2014

Esses valores quando comparados com outras fontes de energia, influenciam diretamente no custo do investimento do projeto. Por outro lado, os custos operacionais e de

manutenção são muito baixos, resultando em baixos custos de eletricidade, o que poderia tornar a energia maremotriz mais atraente. Este último é o parâmetro mais importante para a viabilidade econômica, uma vez que descreve os custos totais ao longo da vida útil do projeto, em vez de apenas os custos iniciais. Os resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Custo unitário de Energia

| Central Maremotriz | CUE (\$/kWh) |
|---------------------------|---------------------------|
| Pequeno Porte | 0,06 \$/kWh - 0,07 \$/kWh |
| Médio Porte | 0,06 \$/kWh - 0,07 \$/kWh |
| Grande Porte | 0,06 \$/kWh - 0,07 \$/kWh |

Fonte: Autora, 2014

Fazendo-se uma comparação da energia maremotriz no cenário otimista com a geração de energia a diesel realizado por Quintas *et al.* 2012, observou-se que os resultados apresentados na Tabela 19, mostram que para os três estudos de caso os custos unitários de energia é 5 vezes menor que o custo unitário de energia do gerador a diesel.

Tabela 19: Custo dos empreendimentos de geração de energia

| Plantas | Pequeno Porte | Médio Porte | Grande Porte | Gerador Diesel |
|-------------------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|
| Custo de Instalação (US\$/kW) | 2.659,80 | 2.659,80 | 2.659,80 | 44.141,52 |
| Custo de Investimento (US\$) | 1.063.920,00 | 4.521.660,00 | 14.362.920,00 | 490,46 |
| O&M (1% do total) | 10.639,20 | 45.216,60 | 143.629,20 | 212.000,40 |
| CUE (US\$) | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,30 |

Fonte: Autora, 2014

Isto comprova que a energia maremotriz tem o potencial para competir com outras fontes de energia e isso também pode ser confirmado pela usina maremotriz La Rance na França. No entanto, deve-se fazer um levantamento mais detalhado destes custos para a região Amazônica, como o levantamento das taxas de juros, tempo de vida do projeto, definição dos custos de turbinas e geradores, comparando com diferentes fornecedores, pois a logística para implantação de uma central maremotriz varia de um local para outro, mediante suas características específicas.

8. DISCUSSÃO

Em todos os cenários estudados, foram realizadas as modelagens de maré, identificando sua maior amplitude. A modelagem do nível do reservatório foi realizada através de equações com o objetivo de estimar o enchimento do reservatório em cada minuto durante um dia. De posse destes parâmetros foram realizadas as simulações do nível do reservatório, utilizando apenas uma turbina. Na central maremotriz de pequeno porte, foi utilizado o valor de 1,25 m, para de médio porte e grande porte foi utilizado valor de 2,0 m e 3,0 m respectivamente.

Considerando a geração de energia em efeito duplo, foi possível encontrar a quantidade máxima de potência disponível em cada área de estudo, e assim obter o máximo de energia gerada por ciclo de maré. Para o caso de estudo de pequeno porte, a potência ficou em torno de 0,4 MW. Na segunda área de estudo, a potência ficou em torno de 1,7 MW; e para o terceiro local o valor foi de 5,1 MW. Para a energia gerada, foram encontrados os seguintes resultados: 1,5 MWh/ciclo para a área de pequeno porte; em torno de 13,23 MWh/ciclo para o médio porte; e o valor de 26,04 MWh/ ciclo para o caso de uma usina maremotriz de grande porte.

A análise dos custos gerados, nas três áreas de estudo, teve o objetivo de identificar o custo de geração de energia considerando hipóteses, como por exemplo, a vida útil de operação de 30 anos, semelhantes com as usinas hidrelétricas. Os resultados mostraram custos altos de investimento, com base nas referências encontradas de valores de custo de instalação e o custo unitário de energia para este tipo de empreendimento ficou em torno de \$ 0,06 a \$ 0,07 dólares por kWh, considerado baixo quando relacionados com outras fontes de energia principalmente o diesel, principal concorrente em áreas isoladas.

9. CONCLUSÃO

A análise demonstra que no Pará, especificamente na Costa Atlântica, há uma boa disponibilidade de energia proveniente da maré a ser explorada em diferentes escalas, podendo atingir famílias individuais ou comunidades isoladas localizadas próximas aos locais de estudo. Contudo um dos principais obstáculos encontrados neste tipo de aproveitamento é a dificuldade de se investir neste novo tipo de fonte alternativa devido à tecnologia ainda estar em fase de desenvolvimento. Com relação à análise de custos, existem algumas incertezas quanto aos custos e benefícios que esta energia pode proporcionar, pois a economia de uma central maremotriz está intrinsicamente relacionada a cada local de implantação, e dependem essencialmente da topografia, geologia, clima para que seja um recurso viável. A disponibilidade dessas informações levará a uma melhor avaliação dos custos das estruturas e equipamentos a serem utilizados na produção de energia e estes fatores determinam o tamanho da planta e os custos de desenvolvimento do projeto, os quais se diferenciam de cada local. Em termos de custos em longo prazo, uma vez que a central maremotriz é implantada, os custos de operação e manutenção são bem inferiores, comparadas com outras fontes de energia. Assim, a metodologia apresentada e aplicada à locais de pequeno, médio e grande porte; e seus resultados de energia gerada e custos, demonstram que a tecnologia maremotriz para produção de energia, tem potencial para ser explorada na Costa Atlântica do Pará.

10. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos adicionais deverão contribuir para melhor avaliação da metodologia proposta neste trabalho. Sugere-se então:

- Elaboração de um sistema gerador de custo para se chegar ao custo real do projeto, permitindo a obtenção de custos de construção ajustados ao mercado; e
- Quantificação dos impactos ambientais causados pela implantação de centrais maremotrizes, como: alteração do regime de vazão, análise de sedimentos, parâmetros de qualidade da água, fauna e flora, entre outros.

11 REFERÊNCIAS

INVENTÁRIO DA OFERTA E INFRAESTRUTURA TURÍSTICA DO MUNICÍPIO DE CURUÇÁ – PA FEVEREIRO/2012 (Ministério do Turismo, Paratur, Prefeitura de Curuça, Semtur (secretaria municipal de turismo – Curuça).

ABREU, A. L. (2010). **Avaliação do Potencial Energético das Marés no Estuário do Rio Douro**. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto.

ALFREDINI, P. (2009). **Obras e gestão de portos e costa: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher.

AHMADIAN, R., FALCONER, R. A., LIN, B., BOCKELMANN-EVANS, B.N. **Modelling of the hydro-environmental impact of tidal stream turbines**, Renew. Energy, in press: (<http://www.engin.cf.ac.uk/whoswho/pubs.asp?StaffNo=782>)

AHMADIAN, R., FALCONER, R.A, LIN,B. **Hydro-environmental modelling of proposed Severn barrage, UK**. Proc ICE, Energy 2010; 163:107–17.

AHMADIAN, R, FALCONER, R.A, LIN B. **Hydro-environmental modelling of proposed Severn barrage, UK**. Proc ICE, Energy 2010; 163:107–17.

ALSTOM. Disponível em: <http://www.alstom.com.br>. Acesso em: 06 de Dezembro de 2013.

ANEEL, 2008. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap3.pdf. Acesso em: 26 de abril de 2012.

ARAQUISTAIN, T. M. (2010). **Tidal Power: Economic and Technological assessment**. Department of Thermal Engineering Tsinghua University.

BARROS, M. L.C., Sena, M. J. S., Mesquita, A.L. A., Blanco, C.J C., Secretan, Y., (2011). **A water flow pattern analysis of Guajará Bay: Amazon Estuary – Brazil**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 33, pp. 79-85.

BERELSON, W.M., HEGGIE, D.T., LONGMORE, A.R., KILGORE, T., NICKOLSON, G., SKYRING, G.W. **Benthic nutrient recycling in Port Phillip Bay, Australia**. Estuar Coast Shelf Sci 1998;56:917–34.

BEZERRA, F. V. V., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A. (2001). **Micro Hydroelectric Power Plants (MHP) and sustainable development in the Amazon: the Irmã Dorothy power plant project**. In: Oliver Hensel; Jeferson Francisco Selbach; Carolina Bilibio (org.). Sustainable water management in the tropics and subtropics and case

studies in Brazil. 1 ed. São Luiz: Edufma - editora da universidade federal do Maranhão, vol. 2, pp. 51-78.

BLANCO, C. J. C., Secretan, Y., Mesquita, A. L. A. (2008). **Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective**. Energy for sustainable development, vol. 12, pp. 25- CV 33.

BRAGA JR, R. A; SALECKER, J. C. (1999). **Mini e Micro centrais hidroelétricas**. Londrina: UEL.

CALLIARI, L. J *et al*, (2003). **Morfodinâmica praias: uma breve revisão**. Revista Brasileira, oceanografia 51(único):63-78. 2003

CAMERON, W. M.; PRITCHARD, D. W. Estuaries. In: Hill, M. N. (Ed.).(1963). **The sea. Ideas and observations on Progress in the Study of the seas**. New York. Interscience, pp. 306-324.

CARNEIRO, D. A. **Portal PCH – Pequenas Centrais Hidroelétricas**. Disponível em (www.portalpch.com.br). Acessado em Janeiro de 2013.

COLOMBI, R. M. (2011). **Análise da eficiência do canal extravasor no Rio Itajaí Açu sugerido pela Jica (Japan International Cooperation Agency)**. Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Curso de Oceanografia.

CONNELL, D.W. **Basic Concepts of Environmental Chemistry**. Boca Raton, FL: CRC Press; 2005.

CRABILL, C., DONALD, R., SNELLING, J., FOUST, R., SOUTHAM, G. **The impact of sediment faecal coliform reservoirs on seasonal water quality in Oak Creek, Arizona**. Water Res 1999;33:2163–71.

CROWTHER, J., KAY, D., WYER, M.D. **Relationships between microbial water quality and environmental conditions in coastal recreational waters; the Fylde Coast, UK**. Water Res 2001; 35:4029–38.

DAVIS, J. H. (1964). **A Morphogenic Approach of World Shoreline**. Geomorfology, 8: 127-142.

DÍEZ, P. F. **Turbinas Hidráulicas**. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Catarina, Espanha, 1996. 141p. Disponível em <http://libros.redsauce.net/>. Acesso em: 06 de Dezembro de 2013.

DYER, K. R. (1997). **Estuaries: A Physical Introduction**. 2. Ed. Chichester, Willey. p.195.

EVANS, D.M., ROGERS, A.P. **The effect of the Tawe Barrage on estuarine water quality.**In: Burt N, Watts J, editors. Barrages: Engineering Design and Environmental Impacts. UK: John Wiley and Sons Ltd; 1996. p. 301–14.

FALCONER, R.A, XIA, J.Q, LIN B, AHMADIAN, R.**The Severn Barrage and other tidal energy options: hydrodynamic and power output modelling.** Sci China Ser E: Tech Sci 2009; 52:3413–24.

FERNANDES, M.E.B. (2003).**Os manguezais da costa norte brasileira.** Vol. II Maranhão: Fundação RioBacanga, São Luís-MA. 165 p.

FERREIRA, R.M. (2007)**Aproveitamento da energia das marés: estudo de caso Estuário do Bacanga, MA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia naval e oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

FERREIRA, R. M. e ESTEFEN, S. F. (2009).**Alternative concept for tidal power plant with reservoir restrictions. Renewable Energy** 1151–1157. Department of Ocean Engineering, COPPE/Federal University of Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FILHO, G. L. T. (2007).**Série Energia Renováveis. ENERGIA RENOVÁVEIS. 1º Edição.** Itajubá. Obra publicada com o apoio do Ministério de Minas e Energia e da Fundação de Apoio ao Ensino Pesquisa e Extensão de Itajubá. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétrica.

GOPALAKRISHNAN, T. C. e RAAD, L. (1986). Computation of Intermediate Water Levels Between High and Low Tides, Envirosoft 86, Computational Mechanics, 445 – 455p.

GOULDING, K.W.T. **Nitrogen deposition to land from the atmosphere.** Soil Use Manage 1990; 6:61–6.

HAMMONS, T. J. Proceedings of the IEE. Vol.8 N° 3, March, 1993.

HARDISTY, J, (2009). **The Analysis of Tidal Stream Power.**

HILL, M.I., CARR, O.J., BIRCH, S.P., PARKER, D.M. **Cardiff Bay Barrage: environmental assessment and impacts the natural environment.** In: Burt N, Watts J, editors. Barrages: Engineering Design and Environmental Impacts. UK: John Wiley and Sons Ltd; 1996. p. 209–18.

HINGA, K.R. **Effects of pH on coastal marine phytoplankton.**Mar EcolProgSer 2002; 238:281–300.

KAPUSTKA, L.A., CLEMENTS, W.H., ZICCARDI, L., PAQUIM, P.R., SPRENGER, M., WALL, D. **Ecological Effect of Metals. United States Environmental Protection Agency Risk;** 2004.Assessment Forum: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm> (Acessado em 12.02.14).

KHALIGH, A. (2008). **Energy Harvesting**. Illinois Institute of Technology 2008.

KIMURA, N. (2005). **Modelagem do Comportamento Térmico dos Anéis de desgaste de uma Turbina Francis operando em compensador síncrono**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná.

KIRBY, R. **Distribution, transport and exchanges of fine sediment, with tidal power implications: Severn Estuary, UK**. Mar Polluted Bull 2010; 61:21–36.

KNOX, G.A. (2000). **The ecology of seashores**. Boca Raton, Florida: CRC Press. 557p. (Marine Science series).

HAMMONS, T. J. **Tidal Power**. Proceeding of the IEE, Vol. 8.Nº3. Março de 1993.

HWANG, Ned H. (1984). **Fundamentos de Sistemas de Engenharia Hidráulica**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 315p.

JONAS, P.J.C., MILLWARD, G.E. **Metals and nutrients in the Severn Estuary and Bristol Channel: contemporary inputs and distributions**. Mar Pollut Bull 2010;61:52–67.

LORA, E. E. S. (2000). **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**. Brasília, ANEEL.

LAMPERT, W. E SOMMER, U. 1997. **Limnoecology: the ecology of lakes and streams**. New York, 382p.

LORIGGIO, D. D. (2003). **Análise crítica dos critérios de projeto da laje de concreto em barragens de enrocamento com face de concreto**. Anais... do II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica.

MARENGO, J. A. & VALVERDE, M. C. **Caracterização do clima no século XX e cenário de mudanças de clima para o Brasil no século XXI usando os modelos do IPCC-AR4**. In: Revista Multiciência, Edição nº 8, Campinas, 2007.

McLusky, D.S. **The Estuarine Ecosystem**. second ed. Glasgow: Blackie and Sons Ltda; 1989.

MELLO, A (1999). **Tipos de turbinas hidráulicas aplicadas às pequenas, mini e microcentrais hidráulicas**. Disponível em <<http://meusite.mackenzie.com.br/mellojr/Turbinas%20Hidr%20E1ulicas/CAP%20TULO%203REV.htm>> Acesso em 10/09/2013.

MESQUITA, A.L, BLANCO, C.J.C. Minimum pressure coefficient criterion applied in axial-flow hydraulic turbines. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v. 30, p. 30-38, 2008.

MIGUENS, A. P. (1996). **Navegação: A ciência e a arte**. Disponível em <https://www.mar.mil.br/dhn/bhmn/publica_manualnav3.html> Acesso em 11.09.2013.

MINGHELLI-ROMAN, A.; Polidori, L.; Mathieu, S.; Loubersac, L.; Cauneau, F. (2007). **Bathymetric Estimation Using MERIS Images in Coastal Sea Waters**. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, v.4, n.2, p.274 -277.

MORRIS, J.T., SUNDARESHWAR, P.V, FORNWALT, B. **Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes**. *Science* 2003; 299:563–5.

NETO, P. B. L *et al*, (2011). **Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências**. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 19 Nº 2, pp. 219-232.

ODUM, E.P., (1988). **Ecologia**. Rio de Janeiro, RJ, Ed. Guanabara, 434p.

OLIVEIRA, P. A. (2013). **Proposta de Projeto Conceitual do Canal de Acesso Quiriri no Rio Pará**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará.

PAGLIARI Patrick Cenci. **Energia do Mar**. Disponível em <http://energiarenovavel.org/index.php/Energia-do-Mar>. Acesso em 28 de Janeiro, 2013.

Praticagem da Barra do Pará. **Tábua de Marés do mês de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.pratbel.com.br/meteorologia/mares.php>. Acesso em: 27 de abril de 2012.

PUGH, D.T. (1987). **Tides, surges and mean sea level, a handbook for engineers and scientists**. New York, John Wiley and Sons, 472pp.

QUINTAS, M. C., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A. (2011). **Projetos sustentáveis de CGH para pequenas comunidades isoladas da Amazônia**. *PCH notícias & SHP news*, vol. 51, p. 52-57.

QUINTAS, M. C., Blanco, C. J. C., Mesquita, A. L. A. (2012). **Analysis of two schemes using micro hydroelectric power (MHPs) in the amazon with environmental sustainability and energy and economic feasibility**. *Environment, Development and Sustainability*, vol. 14, p. 283-295.

RADFORD, P.J. **The impact of a barrage on water quality and ecosystem performance**. In: Proc. on Conference on Barrages and Coastal Technology. 1987. p. 18–33.

RADFORD, P.J, RAURDIJ, P. **The validation of ecosystem models of turbid estuaries**. *Cont Shelf Res* 1987; 7:1483–7.

ROURKE, F., O., BOYLE, F., REYNOLDS, A. (2009). **Tidal energy update 2009**, *Applied Energy*, Department of Mechanical Engineering, Dublin Institute of Technology, Bolton Street, Dublin 1, Ireland.

RYSGAARD, S, THASTUM, P., DALSGAARD, T., CHRISTENSEN, P.B., SLOTH, N.P. **Effects of salinity on ammonium adsorption capacity, nitrification and Danish estuarine sediments**. *Estuaries* 1999; 22:21–30.

SANTOS, M. G. R. S.; MOTHÉ, C. G. (2008). **Fontes alternativas de energia**. Revista Analytica. Rio de Janeiro.

SILVEIRA, L. B. R. S. (2000). **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Edusp.

SIMIONI, C. A. (2006). **O USO DE ENERGIA RENOVÁVEL SUSTENTÁVEL NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis**.

SOUZA FILHO, P.W.M. (2005). **Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos**. *Revista Brasileira de Geofísica*.

SPENCER, K.L. **Spatial variability of metals in the inter-tidal sediments of the Medway Estuary, Kent, UK**. *Mar Pollut Bull* 2002; 44:933–44.

SQUARE, L., HERMAN, G. (1979). **Análise Econômica de Projetos**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 149 p, Rio de Janeiro.

Teodolini Alezi. DataGeosis Office 2008 Demonstração. Disponível em: <http://www.datageosis.com>. Acesso em 26 de abril de 2012.

Tidal Energy (World Ocean Observatory ed.). Available: http://www.thew2o.net/events/oceanenergy/images/tidal_energy.pdf Acesso em 11.09.2013.

TRUSSART, S. *et. al.* (2002). **Hidropower Projects: a Review of Most Effective Mitigation Measures**. *Energy Policy*. v 30, p. 1251-1259.

TURNER, A. **Trace-metal partitioning in estuaries: importance of salinity and particle concentration**. *Mar Chem* 1996; 54:27–39.

TURNER, A., MILLWARD, G.E. **Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles**. *Estuar Coast Shelf Sci* 2002; 55:857–83.

VANZIN, E.; PANDOLFO, A.; LUBLO, R.; STEFFENON, B. & PANDOLFO, L. M. (2005). **Uso do biogás em aterro sanitário como fonte de energia alternativa: aplicação de procedimento para análise da viabilidade econômica no aterro sanitário metropolitano Santa Tecla.** UNIFAE, São Paulo.

VOITH HYDRO. Disponível em: <<http://www.voithhydro.com>>. Acesso em: 06 de Dezembro de 2013.

XIA, J.Q, FALCONER, R.A, LIN, B. **Impact of different tidal renewable energy projects on the hydrodynamic processes in the Severn Estuary, UK.** Ocean Modell 2010;32:86–104.

YOSHINARI, T. **Emissions of N₂O from various environments – the use of stable isotope composition of N₂O as a tracer for the studies of N₂O biogeochemical cycling.** In: Revsbech NPS, editor. Denitrification in Soil and Sediment. New York: Plenum Press; 1990. p. 129–50.

<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>. Acesso em 13/06/2013

<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp> Acesso em 17/06/2013

http://www.enr.fr/docs/2012140716_SEREnergiesMarines20121206b.pdf. Acesso em 06/12/2013

<http://orbitalvector.com/Power/Tidal%20Power/TIDAL%20POWER.htm>. Acesso em 06/12/2013

<http://sustentabilidade.allianz.com.br/?676/Perfil-da-energia-hidrica>. Acesso em 06/12/2013

<http://www.global-greenhouse-warming.com/Annapolis-tidal-power.html>. Acesso em 06/12/2013

<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=100445136>. Acesso em 06/12/2013

APÊNDICE A

Código computacional em linguagem FORTRAN[®] elaborado para a estimativa de altura de maré e cálculo do nível do reservatório usado nas simulações.

```

*****
Declaração das variáveis
*****
implicit none
integer nmax, i, j, k, n
parameter (nmax=1000000)
real*8 am(1:nmax), Hmar(0:nmax), t(0:nmax), tm(1:nmax), Hres(0:nmax),
deltah(0:nmax), q(0:nmax), vq(0:nmax), vt(0:nmax)
real*8 c1, c3, aux1, der, c, D, L, aux2, aux3
character*30 Nome1, Nome2

*****
Entrada de dados
*****
write(*,*) 'Nome do arquivo de entrada1 (dados PM,BM e Hora) '
read(*,*) Nome1
write(*,*) 'Nome do arquivo de saída'
read(*,*) Nome2
write(*,*) 'Numero de componentes do vetor de altura de mare, n='
read(*,*) n
write(*,*) 'Valor do c, c='
c = 130.0d0
read(*,*) c
write(*,*) 'Valor do diâmetro da tubulação (m), D='
D = 2.5d0
read(*,*) D
write(*,*) 'Valor do comprimento da tubulação (m), L='
L = 5.0d0
read(*,*) L

*****
Leitura do arquivo com os dados de preamar e baixa-mar em metros
*****
open(unit=1, file=Nome1)

do i=1, n
read(1,*) am(i), tm(i)
end do

close(1)

*****
Calculo da Altura de mare
*****
i=1

Hmar(0) = 0.6d0

do j=1, n-2, 2
der = 1.0d0
t(i) = 2.0d0/60.0d0

```

```

        k = j
    if (mod(k,2) >= 0) then
    dowhile (der > 0.0d0)
    aux1 = (t(i)/(tm(k+1)-tm(k)))
    C1   = 1.0d0-(3.0d0*(aux1**2.0d0))+(2.0d0*(aux1**3.0d0))
    C3   = (3.0d0*(aux1**2.0d0))-(2.0d0*(aux1**3.0d0))
    Hmar(i) = am(k)*C1 + am(k+1)*C3
    der = Hmar(i)-Hmar(i-1)
    t(i+1) = t(i) + (1.0d0/60.0d0)
    i = i + 1

```

```

end do
k = k +1
end if

```

```

if(mod(k,2) == 0) then
der = -1.0d0
t(i) = 2.0d0/60.0d0
do while (der < 0.0d0)
aux1 = (t(i)/(tm(k+1)-tm(k)))
C1   = 1.0d0-(3.0d0*(aux1**2.0d0))+(2.0d0*(aux1**3.0d0))
C3   = (3.0d0*(aux1**2.0d0))-(2.0d0*(aux1**3.0d0))
Hmar(i) = am(k)*C1 + am(k+1)*C3
der = Hmar(i)-Hmar(i-1)
t(i+1) = t(i) + (1.0d0/60.0d0)
    i = i + 1

```

```

end do
k = k +1
endif
end do

```

```

*****

```

*Calculo do Nível do Reservatório

```

*****

```

```

*
```

```

Hres(0) = 0.6d0
vt(0) = 59945.07d0
deltah(0) = Hmar(0) - Hres(0)
    k=1

```

```

doj=1,20
print*, j
dowhile(deltah(k-1) < 0.4d0)
    aux2 = deltah(k-1)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
    aux3 = 10.64d0*L
    q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
    vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
    vt(k) = vq(k) + vt(k-1)
    Hres(k) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k) = Hmar(k) - Hres(k)
    k=k+1

```

```

enddo
k=k-1

```

```

dowhile(deltah(k) >= 0.4d0 .and. Hmar(k) > Hres(k))
    aux2 = deltah(k)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
    aux3 = 10.64d0*L
    q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
    vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
    vt(k) = vq(k) + vt(k-1)

```

```

Hres(k+1) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k+1) = Hmar(k+1) - Hres(k+1)

k=k+1
enddo
k=k-1

dowhile(deltah(k+1) < 0.4d0 .and. Hmar(k) > Hres(k))
  aux2 = deltah(k)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
  aux3 = 10.64d0*L
  q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
  vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
  vt(k) = vq(k) + vt(k-1)
Hres(k+1) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k) = Hmar(k) - Hres(k)

  k=k+1

enddo
k=k-1

dowhile(deltah(k) < 0.4d0 .and. Hres(k) > Hmar(k+1))
  aux2 = deltah(k)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
  aux3 = 10.64d0*L
  q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
  vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
  vt(k) = vt(k-1) - vq(k)
Hres(k+1) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k+1) = Hres(k+1) - Hmar(k+1)

  k=k+1

enddo
k=k-1

dowhile(deltah(k) >= 0.4d0 .and. Hres(k) > Hmar(k))
  aux2 = deltah(k)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
  aux3 = 10.64d0*L
  q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
  vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
  vt(k) = vt(k-1) - vq(k)
Hres(k+1) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k+1) = Hres(k+1) - Hmar(k+1)

  k=k+1

enddo

dowhile(deltah(k) < 0.4d0 .and. Hres(k) > Hmar(k))
  aux2 = deltah(k)*(c**1.85d0)*(D**4.87d0)
  aux3 = 10.64d0*L
  q(k) = (aux2/aux3)**0.54054054d0
  vq(k) = q(k)*1.0d0*60.0d0
  vt(k) = vt(k-1) - vq(k)
Hres(k+1) = 0.0051d0*(vt(k)**0.4175d0)
deltah(k+1) = Hres(k+1) - Hmar(k+1)

  k=k+1
enddo
enddo
print*, k

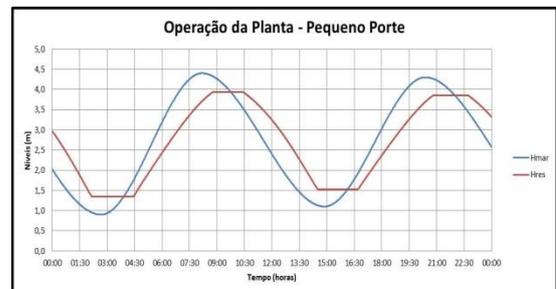
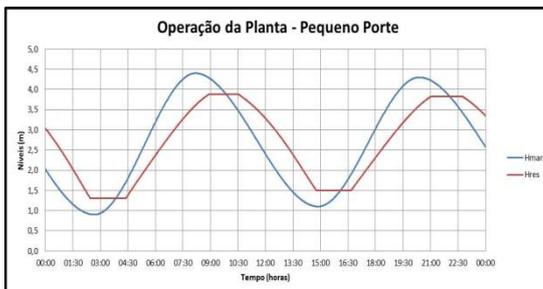
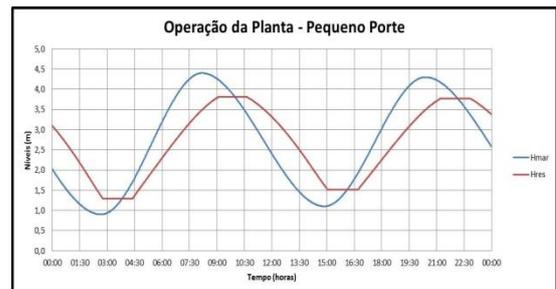
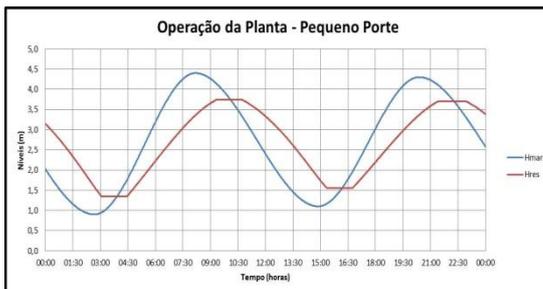
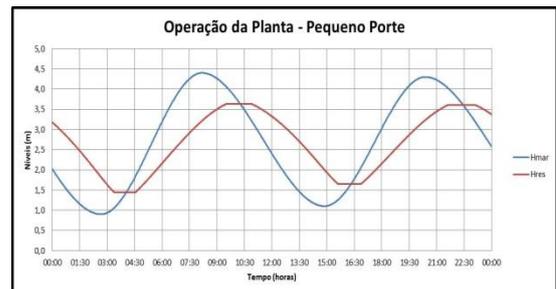
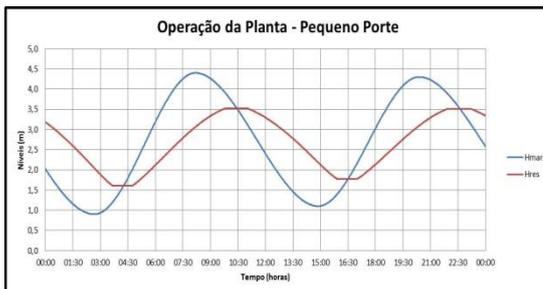
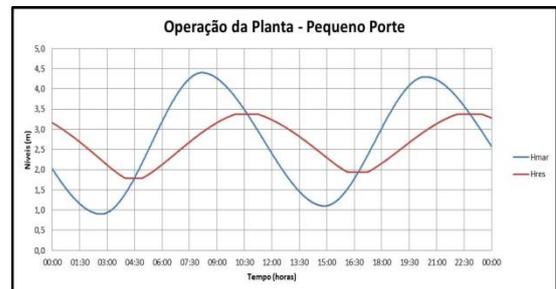
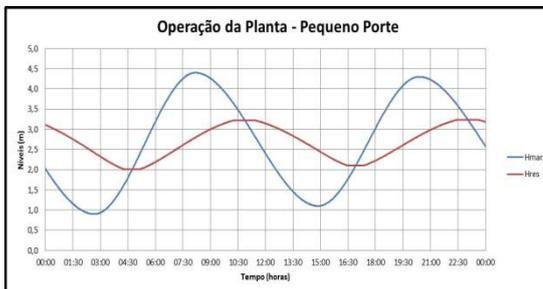
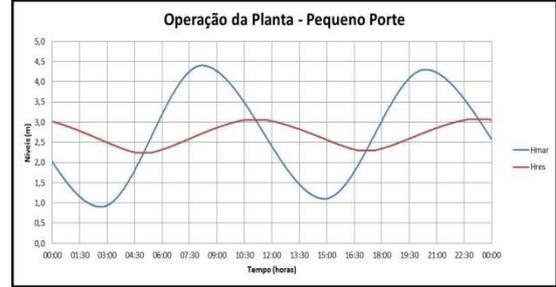
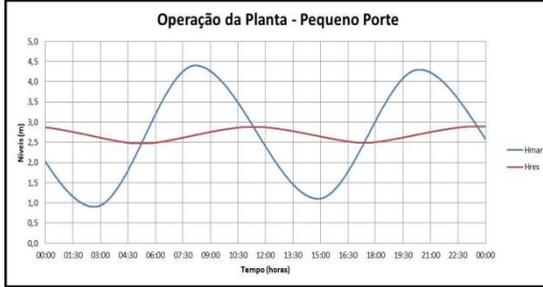
```

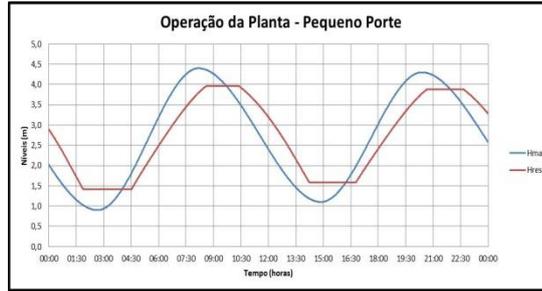
```
*****  
Impressão dos resultados no arquivo de saída  
*****  
open (unit=2, file=Nome2)  
  
    do j=1, k  
        write (2, 15) Hmar (j), Hres (j)  
15 format (2 (1PE19.10))  
        enddo  
  
close (2)  
  
end
```

APÊNDICE B

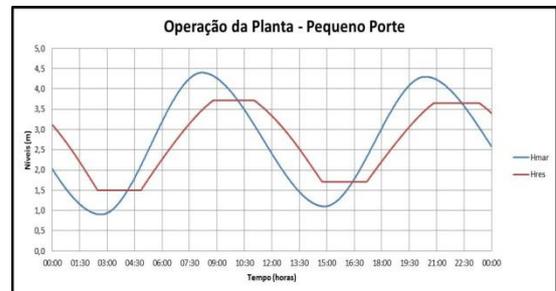
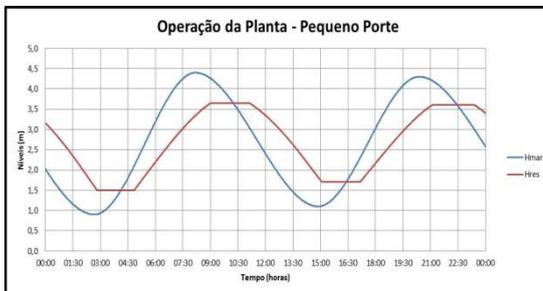
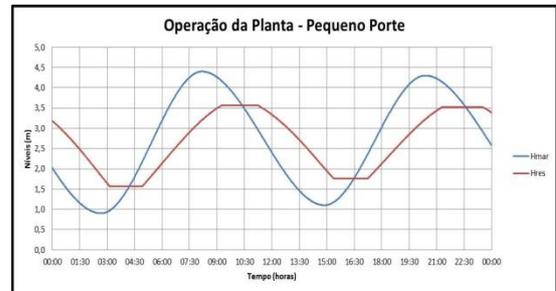
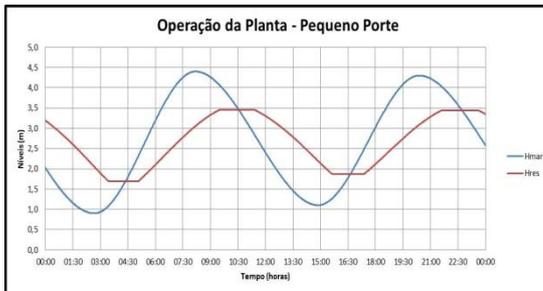
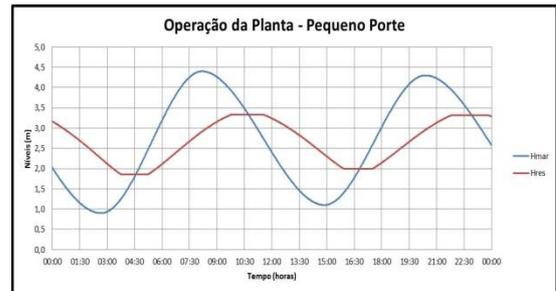
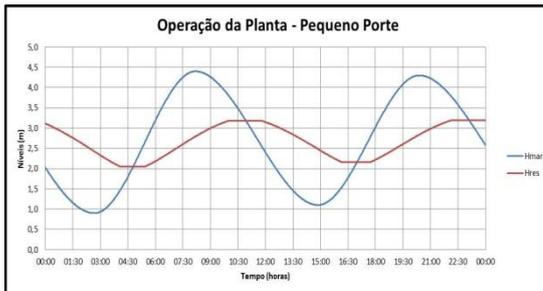
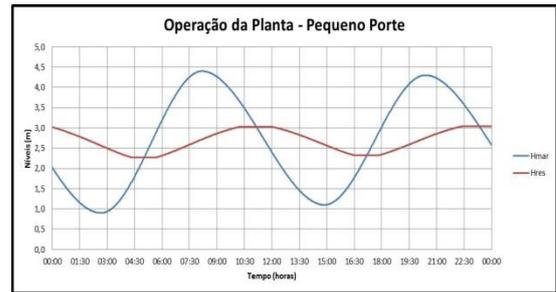
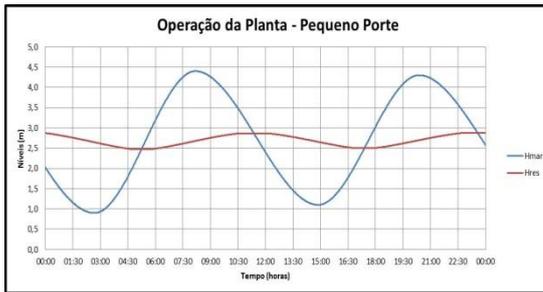
Gráficos Simulações

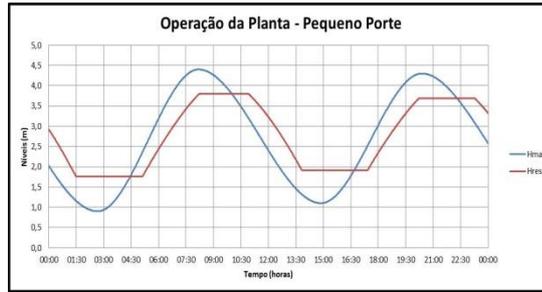
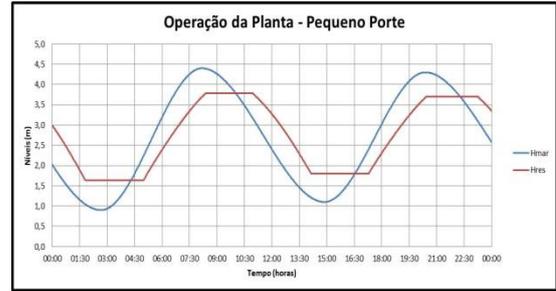
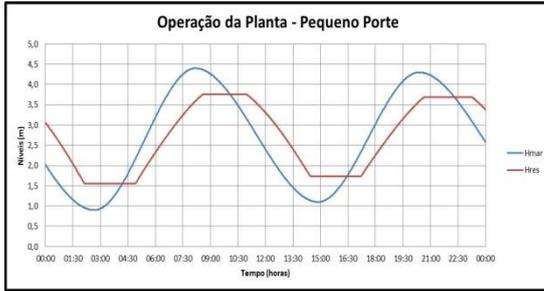
Estudo de Caso: Pequeno Porte - $\Delta h:0.4$



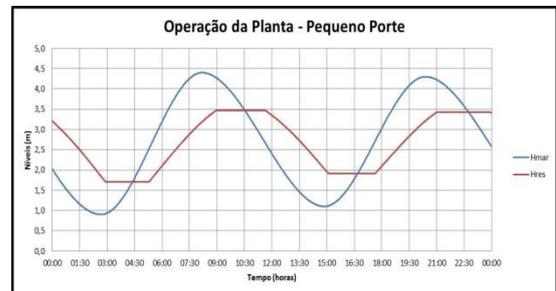
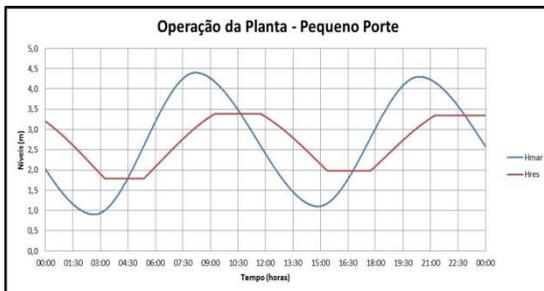
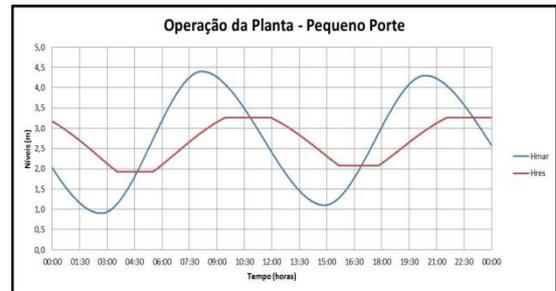
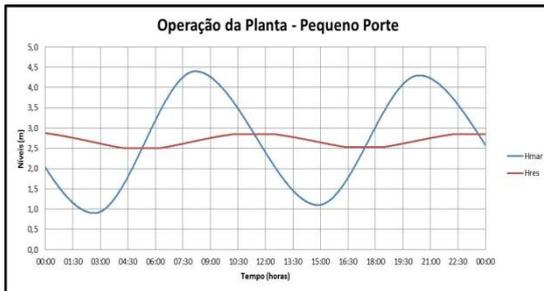


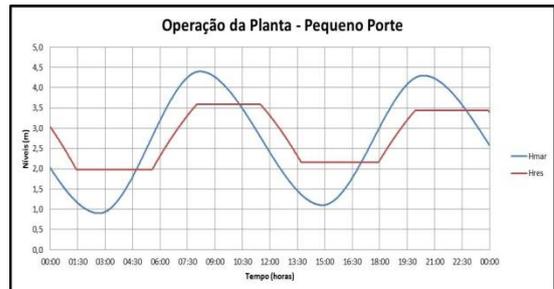
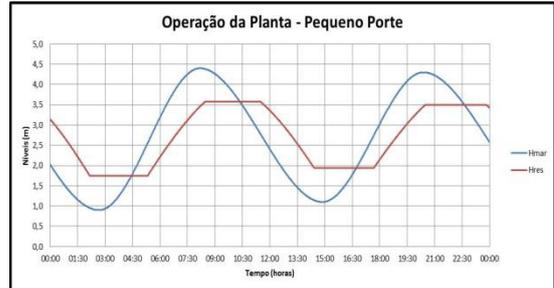
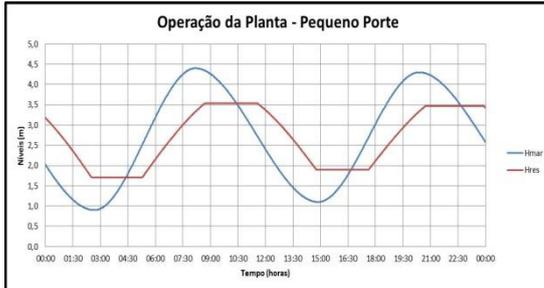
Estudo de Caso: Pequeno Porte - $\Delta h:0.6$



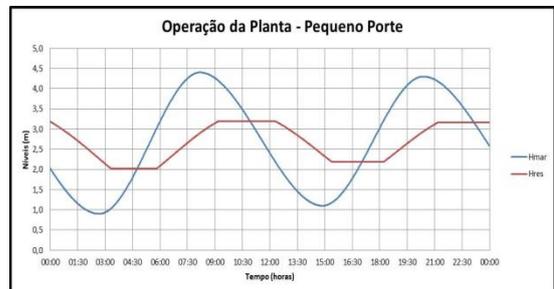
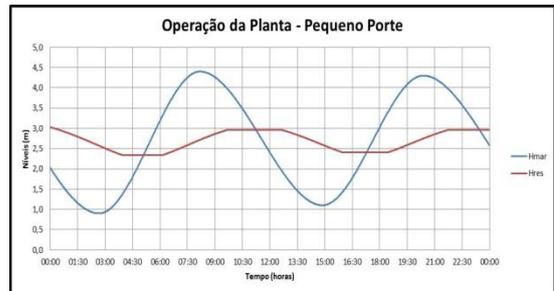
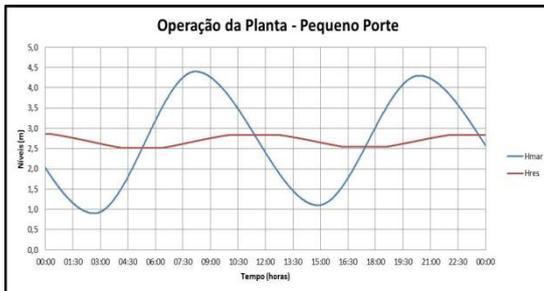


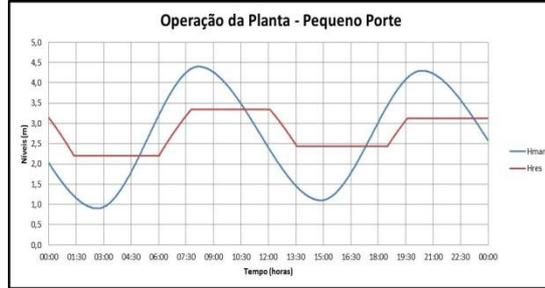
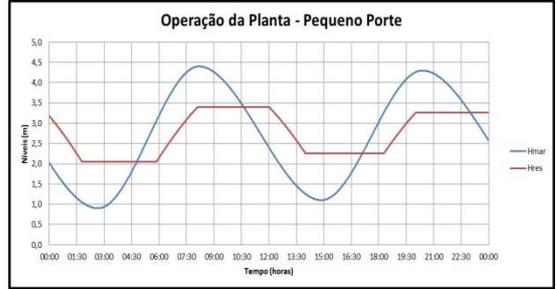
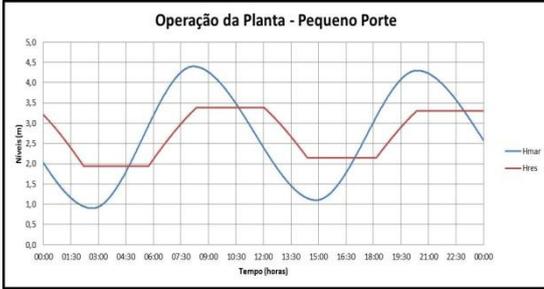
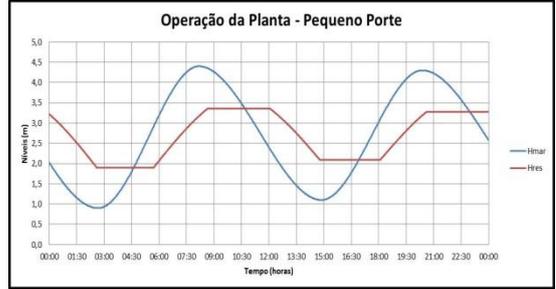
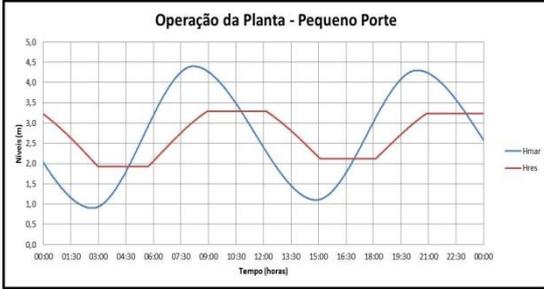
Estudo de Caso: Pequeno Porte - $\Delta h: 0.8$



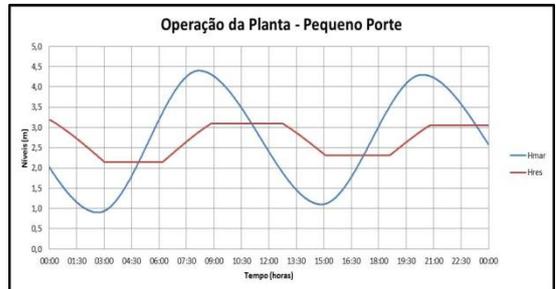
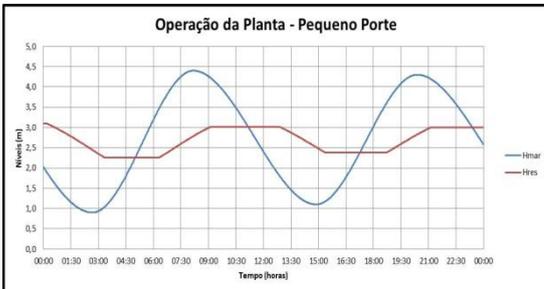
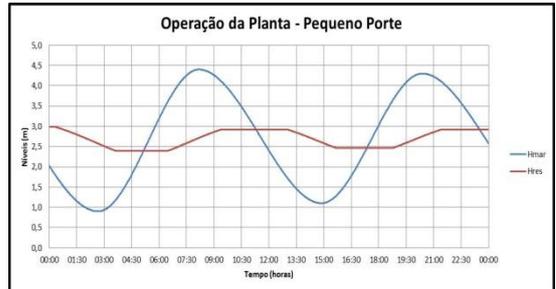


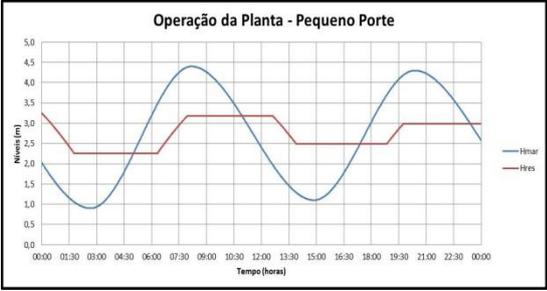
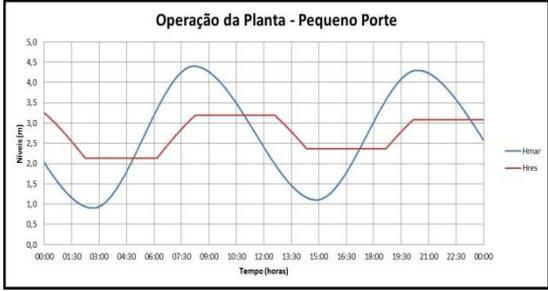
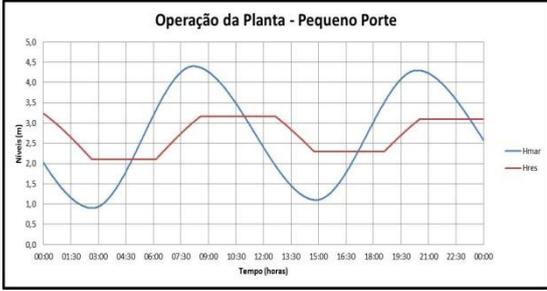
Estudo de Caso: Pequeno Porte - $\Delta h: 1.0$



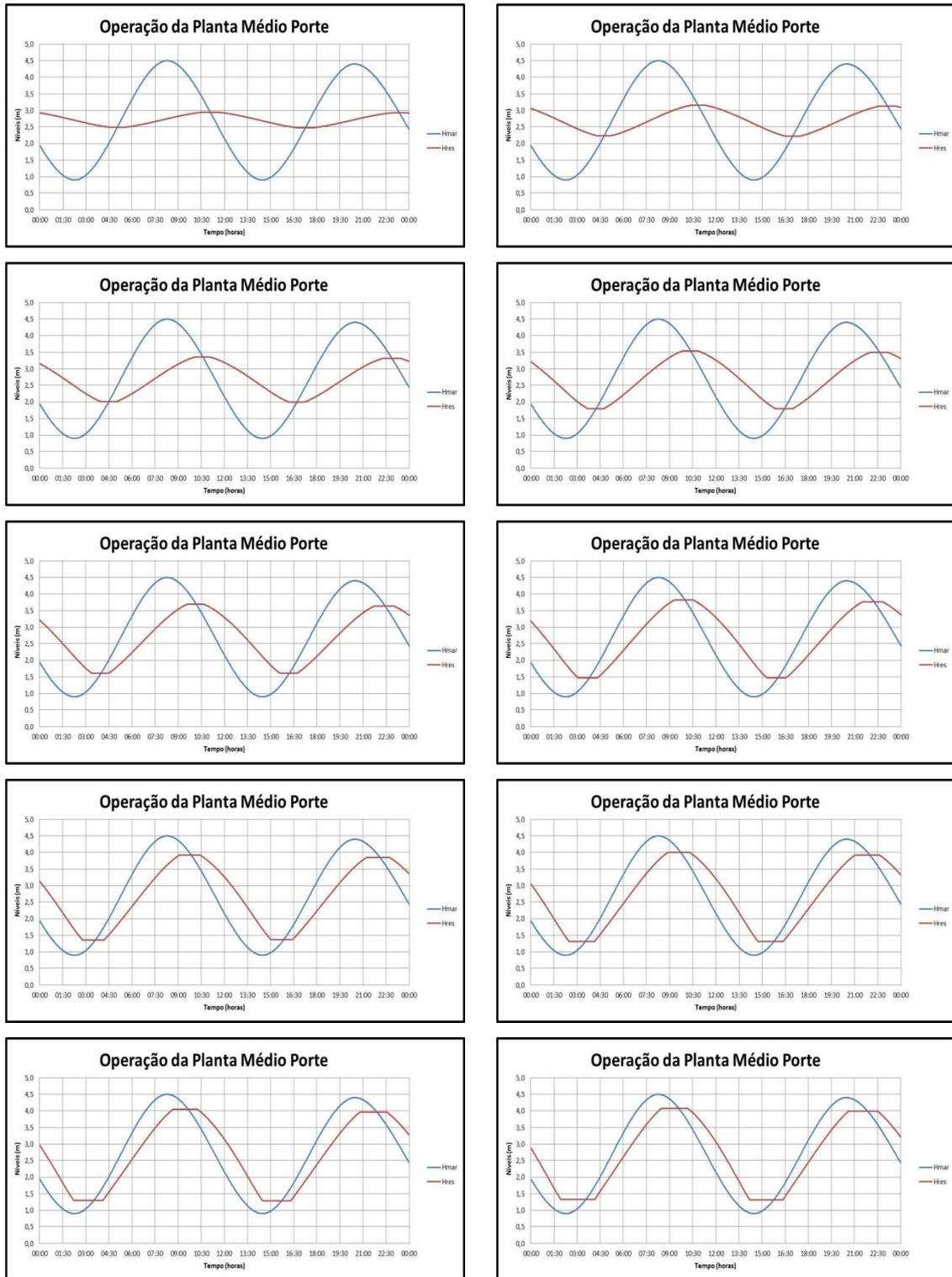


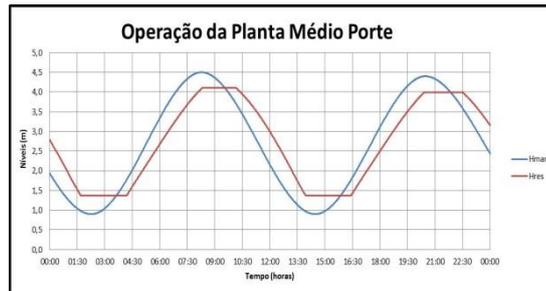
Estudo de Caso: Pequeno Porte - $\Delta h: 1.2$



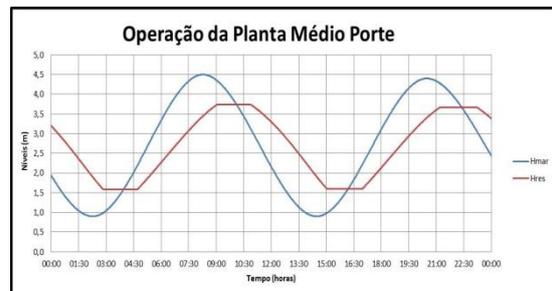
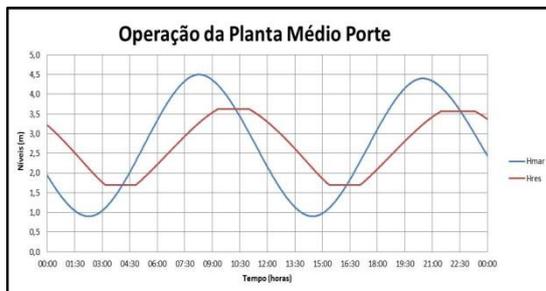
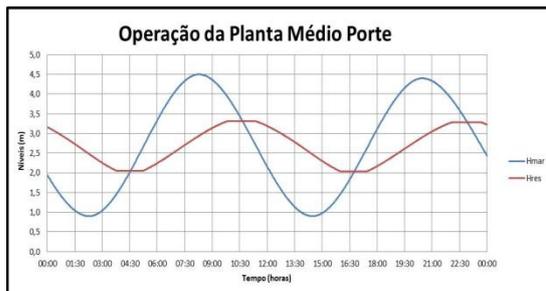
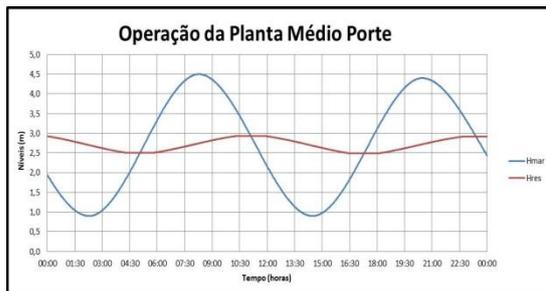


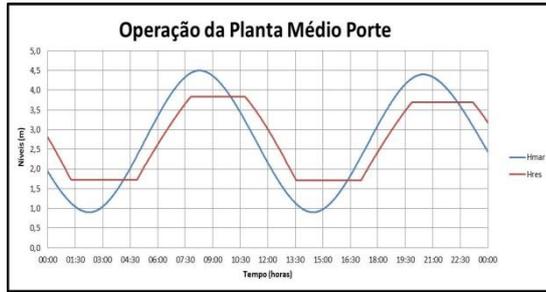
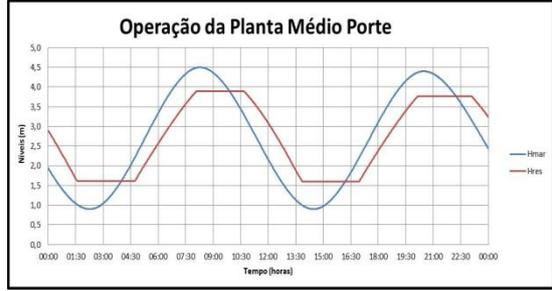
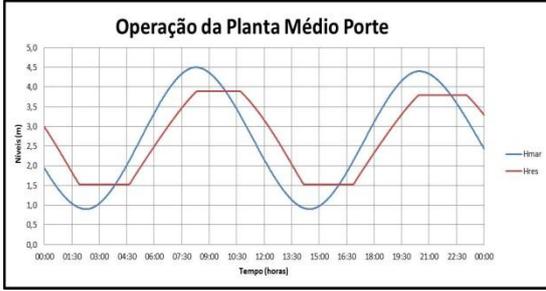
Estudo de Caso: Médio Porte - $\Delta h:0.4$



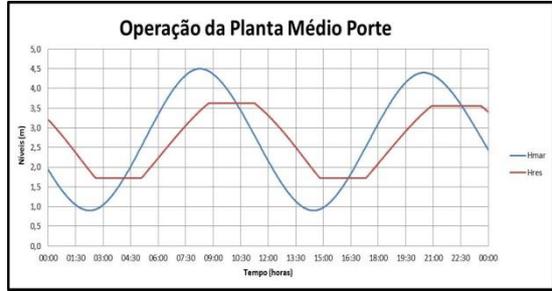
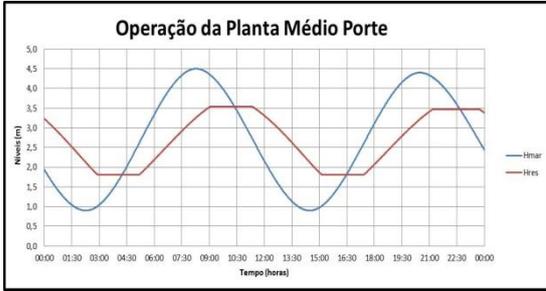
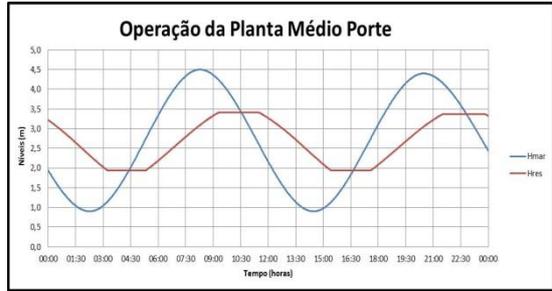
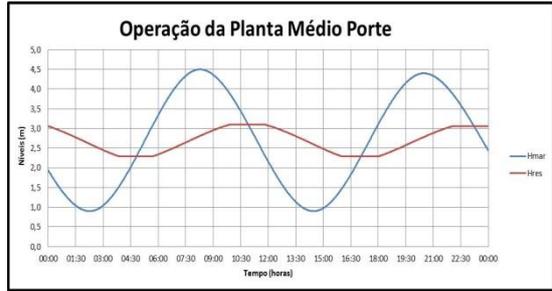


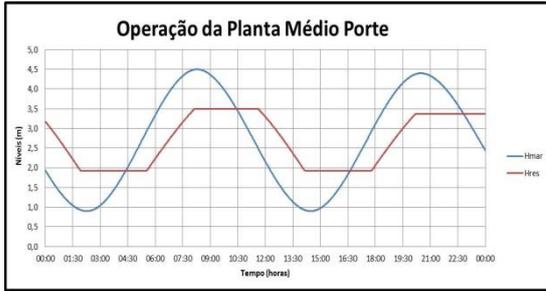
Estudo de Caso: Médio Porte - $\Delta h:0.6$



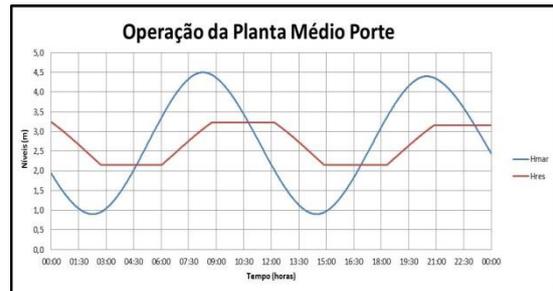
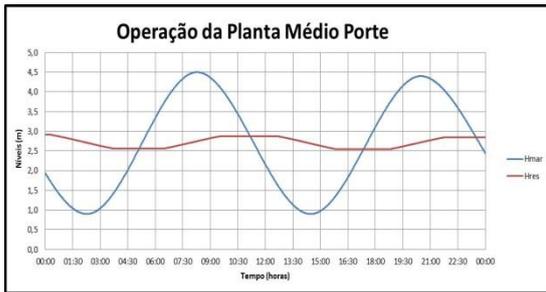


Estudo de Caso: Médio Porte - $\Delta h:0.8$

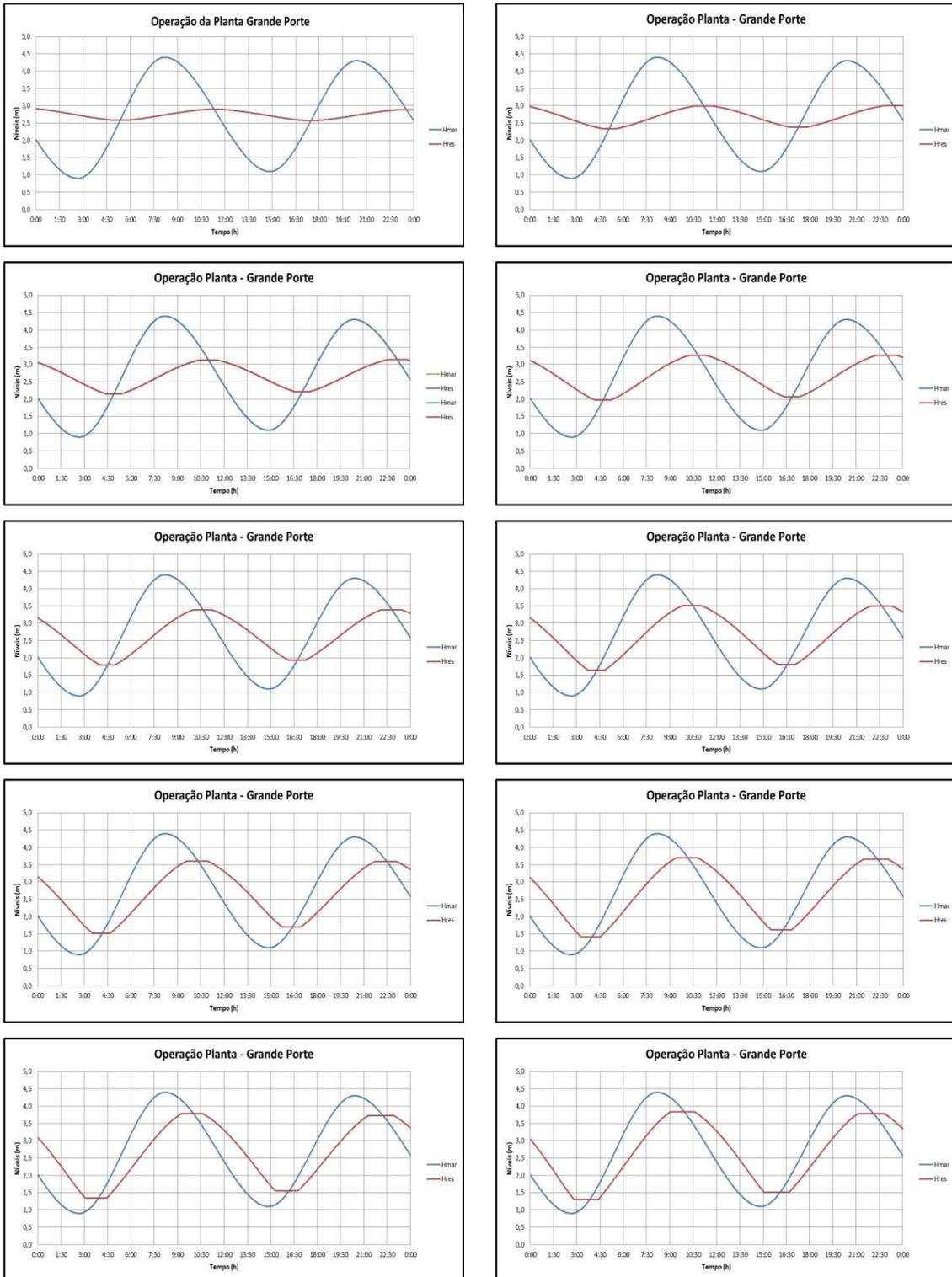


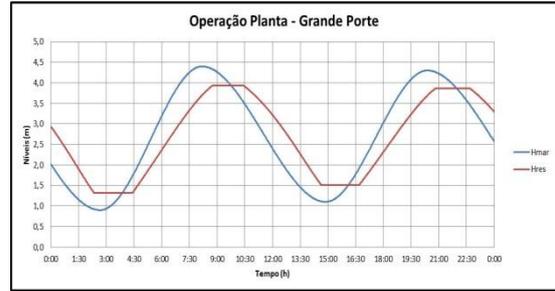
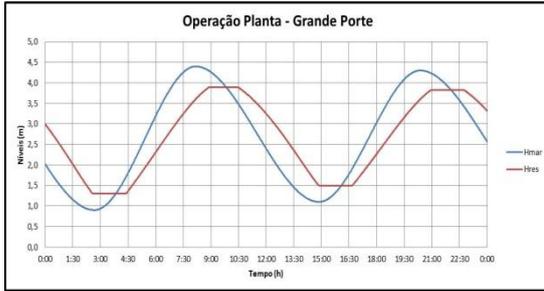


Estudo de Caso: Médio Porte - $\Delta h: 1.2$

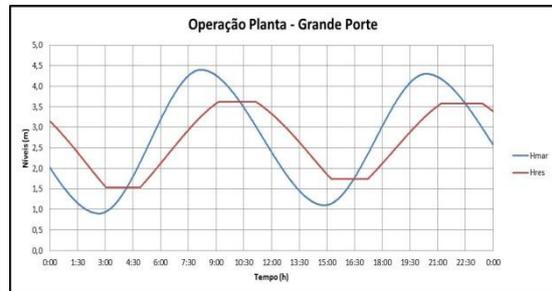
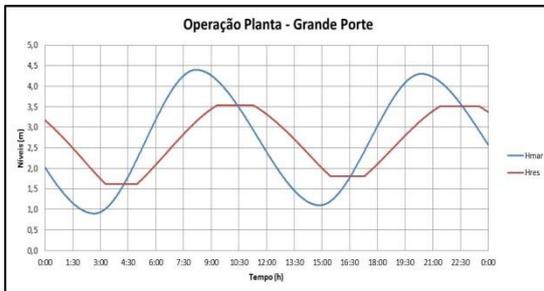
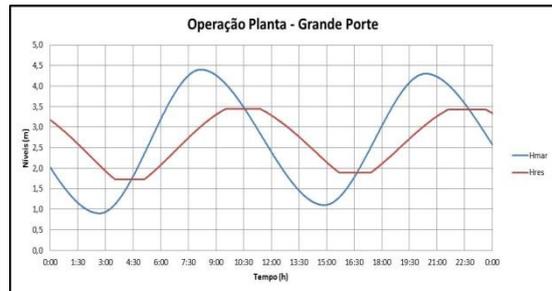
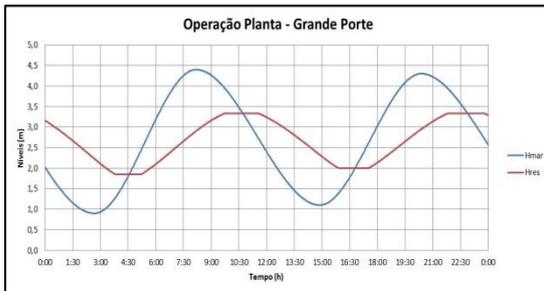
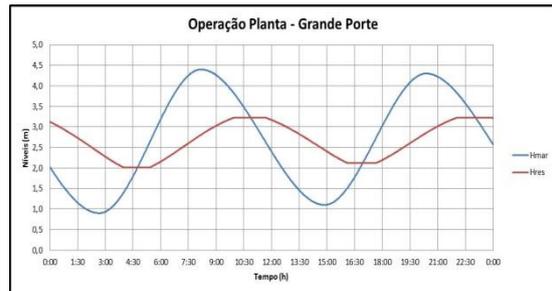
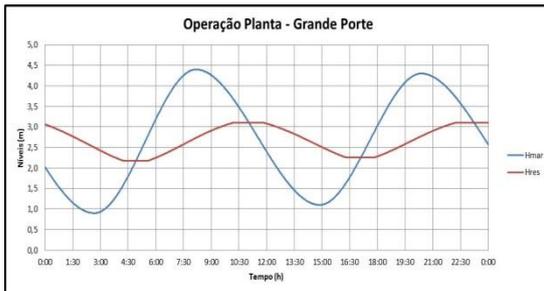
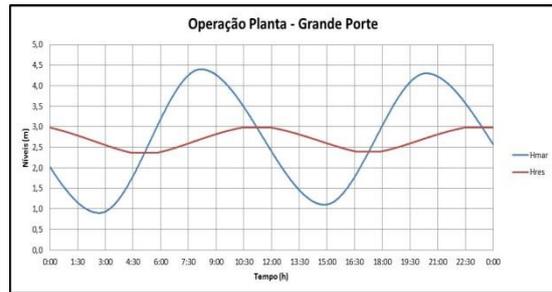
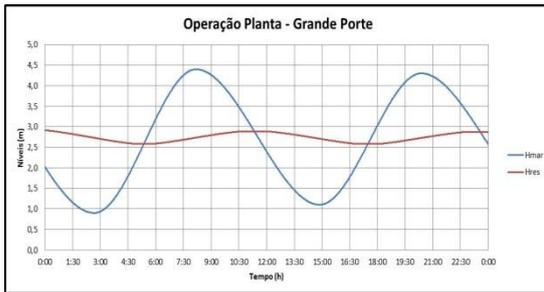


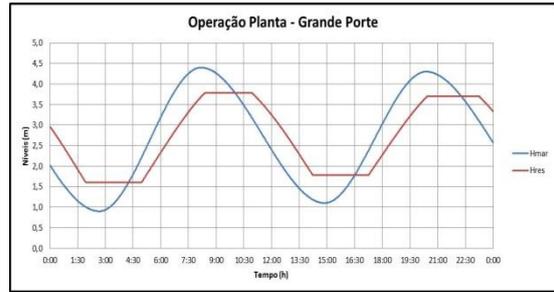
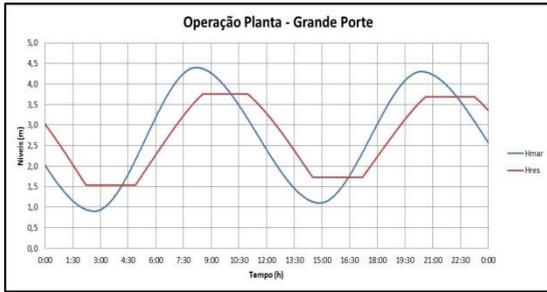
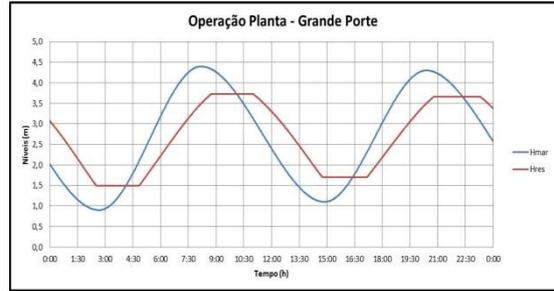
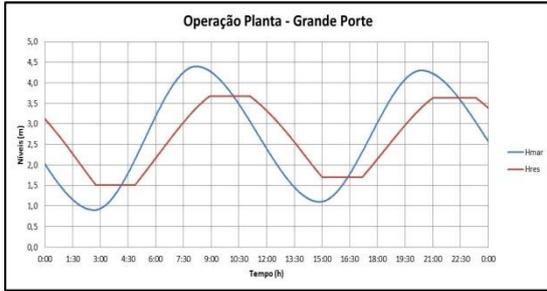
Estudo de Caso: Grande Porte - $\Delta h: 0.4$



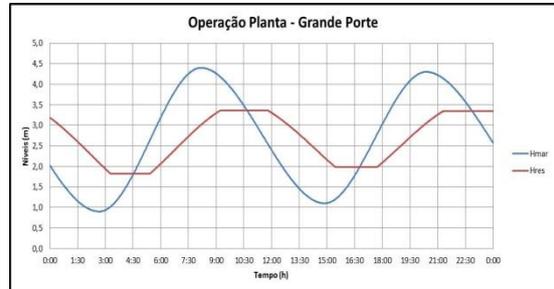
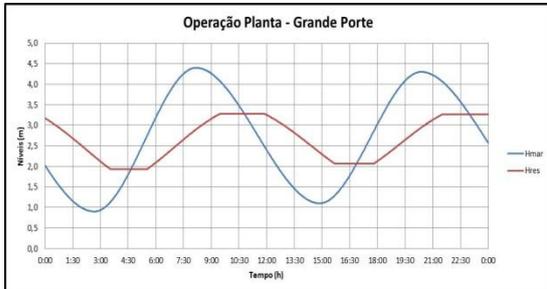
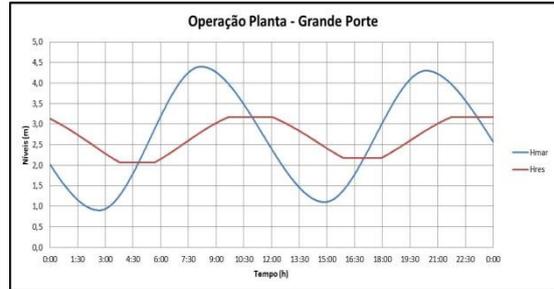
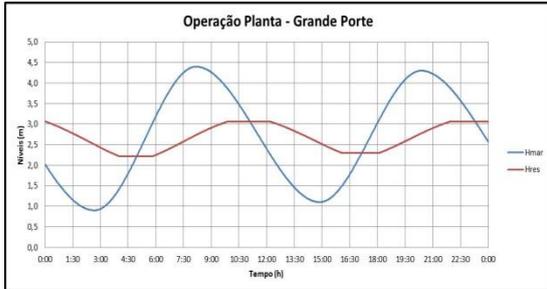
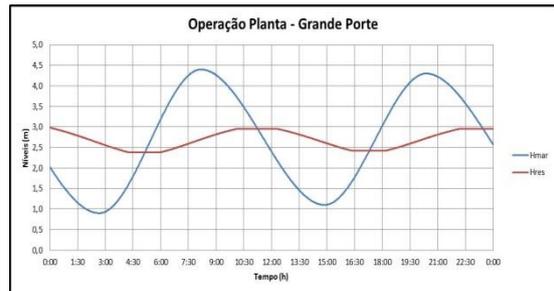
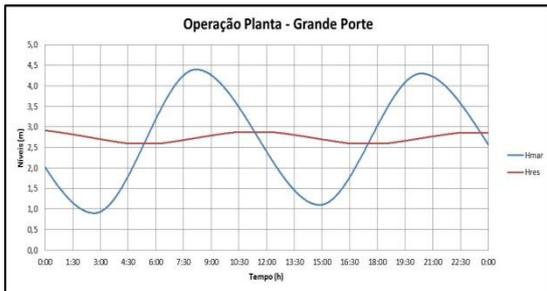


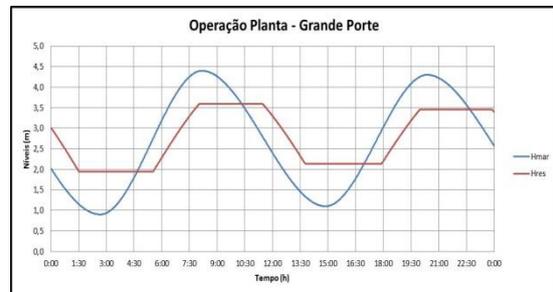
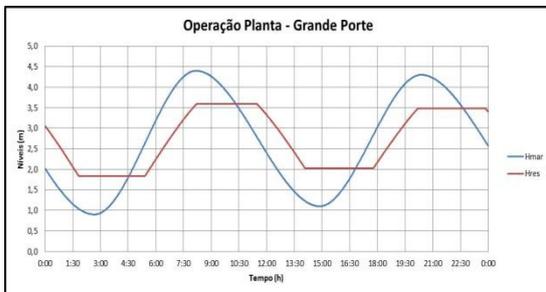
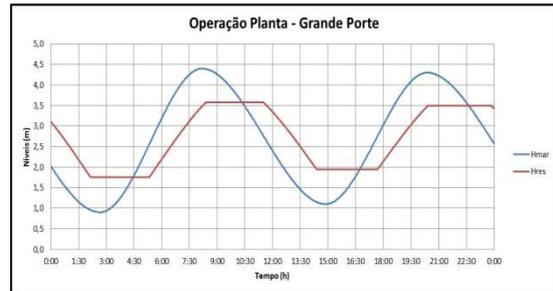
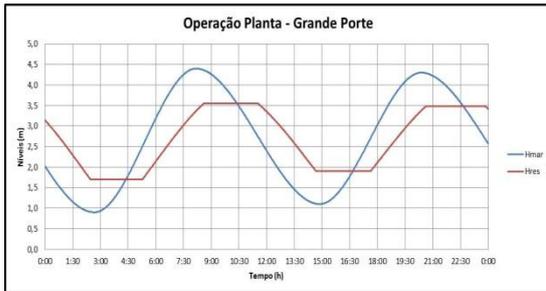
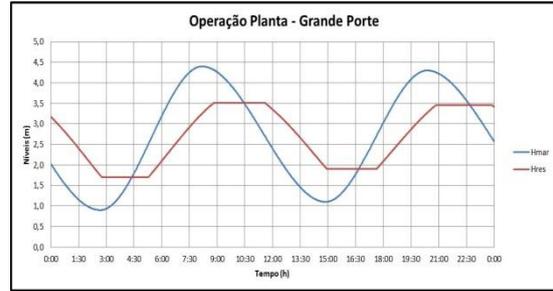
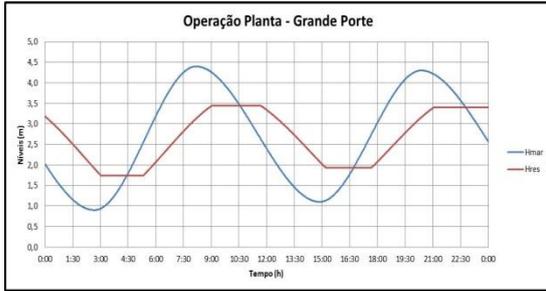
Estudo de Caso: Grande Porte - $\Delta h:0.6$



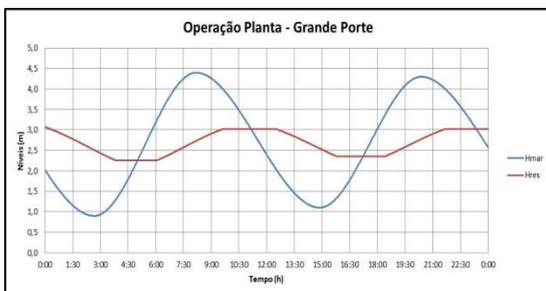
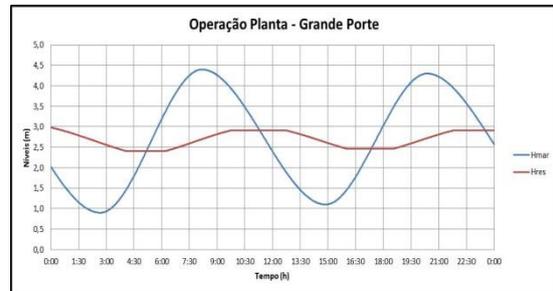
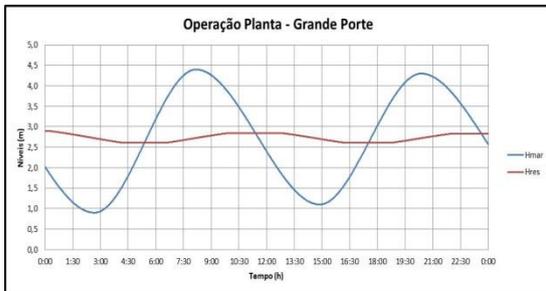


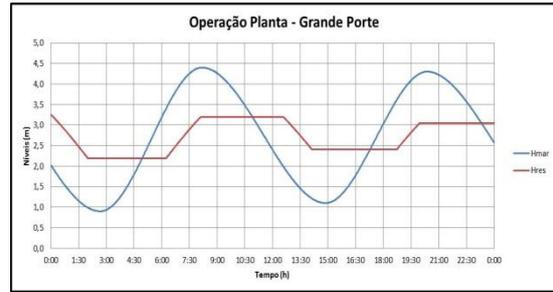
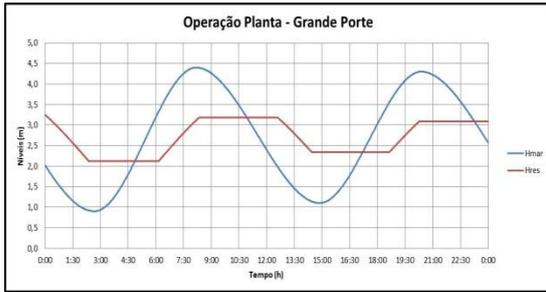
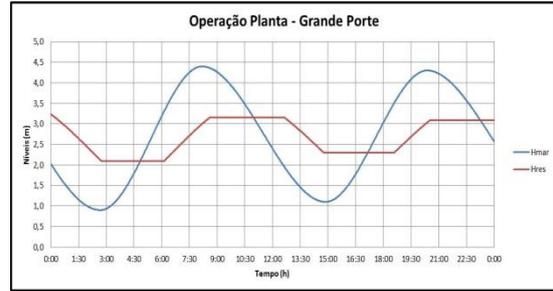
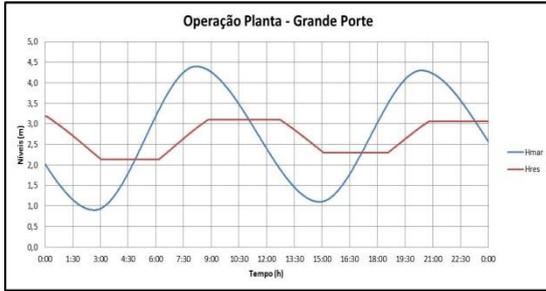
Estudo de Caso: Grande Porte - $\Delta h:0.8$





Estudo de Caso: Grande Porte - $\Delta h: 1.0$





APÊNDICE C

Cálculo dos custos da central maremotriz para os casos de pequeno, médio e grande porte.

- Custo de Instalação de uma central maremotriz:

Valor adotado: capital investido é estimado em US\$2,659,80/kW a US\$3,324,75/kW,

$$CIP = C_i \times P$$

PEQUENO PORTE

Dados: Potência Instalada: 400kW

Cenário Otimista

- Cálculo do custo de Investimento total do Projeto

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = US\$2,659,80 \times 400 \text{ kW}$$

$$CIP = US\$ 1,063,920,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário otimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civis} = US\$ 1,063,920,00 \times 52\% = US\$ 553,238,40$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = US\$ 1,063,920,00 \times 18\% = US\$ 191,505,60$$

$$\text{Instalação} = US\$ 1,063,920,00 \times 15\% = US\$ 159,588,00$$

$$\text{Contingências} = US\$ 1,063,920,00 \times 10\% = US\$ 106,392,00$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = US\$ 1,063,920,00 \times 5\% = US\$ 53,196,00$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

$$\text{CIP: } US\$ 1,063,920,00$$

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

Fator de desconto: $a_{30} = 6,566$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 10,639,20 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P} \quad (30)$$

$$CUE = \frac{(US\$ 1,063,920,00 + US\$ 10,639,20)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 400 \text{ kW}}$$

$$CUE = \frac{(US\$ 1,063,920,00 + US\$ 10,639,20)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 400 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0568 \text{ \$/kWh} \approx 0,06 \text{ \$/kWh}$$

Cenário Pessimista

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = US\$3,324,75 \times 400 \text{ kW}$$

$$CIP = US\$ 1,329,900,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário pessimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civis} = US\$ 1,329,900,00 \times 52\% = US\$ 691,548,00$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = US\$ 1,329,900,00 \times 18\% = US\$ 239,382,00$$

$$\text{Instalação} = US\$ 1,329,900,00 \times 15\% = US\$ 199,485,00$$

$$\text{Contingências} = US\$ 1,329,900,00 \times 10\% = US\$ 132,990,00$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = US\$ 1,329,900,00 \times 5\% = US\$ 66,495,00$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

$$CIP: US\$ 1,329,900,00$$

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

$$\text{Fator de desconto: } a_{30} = 6,566$$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 13,299,00 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P} \quad (30)$$

$$CUE = \frac{(US\$ 1,329,900,00 + US\$ 13,299,00)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 400 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0710 \text{ \$/kWh} \approx 0,07 \text{ \$/kWh}$$

MÉDIO PORTE

Dados: Potência Instalada: 1,700 kW

Cenário Otimista

- Cálculo do custo de Investimento total do Projeto

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = US\$ 2,659,80 \times 1,700 \text{ kW}$$

$$CIP = US\$ 4,521,660,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário otimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civis} = US\$ 4,521,660,00 \times 52\% = US\$ 2,351,263,20$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = US\$ 4,521,660,00 \times 18\% = US\$ 813,898,80$$

$$\text{Instalação} = US\$ 4,521,660,00 \times 15\% = US\$ 678,249,00$$

$$\text{Contingências} = US\$ 4,521,660,00 \times 10\% = US\$ 452,166,00$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = US\$ 4,521,660,00 \times 5\% = US\$ 226,083,00$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

CIP: US\$ 4,521,660,00

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

Fator de desconto: $a_{30} = 6,566$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 45,216,60 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P}$$

$$CUE = \frac{(US\$ 4,521,660,00 + US\$ 45,216,00)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 1700 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0568 \text{ \$/kWh} \approx 0,06 \text{ \$/kWh}$$

Cenário Pessimista

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = US\$3,324,75 \times 1700 \text{ kW}$$

$$CIP = US\$ 5,652,075,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário pessimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civas} = US\$ 5,652,075,00 \times 52\% = US\$ 2,939,079,00$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = US\$ 5,652,075,00 \times 18\% = US\$ 1,017,373,50$$

$$\text{Instalação} = US\$ 5,652,075,00 \times 15\% = US\$ 847,811,25$$

$$\text{Contingências} = US\$ 5,652,075,00 \times 10\% = US\$ 565,207,50$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = US\$ 5,652,075,00 \times 5\% = US\$ 282,603,75$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

$$CIP: US\$ 5,652,075,00$$

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

$$\text{Fator de desconto: } a_{30} = 6,566$$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 56,520,75 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P} \tag{30}$$

$$CUE = \frac{(US\$ 5,652,075,00 + US\$ 56,520,75)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 1700 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0710 \text{ \$/kWh} \approx 0,07 \text{ \$/kWh}$$

GRANDE PORTE

Dados: Potência Instalada: 5, 400 kW

Cenário Otimista

- Cálculo do custo de Investimento total do Projeto

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = \text{US\$}2,659,80 \times 5,400 \text{ kW}$$

$$CIP = \text{US\$} 14,362,920,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário otimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civas} = \text{US\$} 14,362,920,00 \times 52\% = \text{US\$} 7,468,718,40$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = \text{US\$} 14,362,920,00 \times 18\% = 2,585,325,60$$

$$\text{Instalação} = \text{US\$} 14,362,920,00 \times 15\% = 2,154,438,00$$

$$\text{Contingências} = \text{US\$} 14,362,920,00 \times 10\% = \text{US\$} 1,436,292,00$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = \text{US\$} 14,362,920,00 \times 5\% = \text{US\$} 718,146,00$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

CIP: US\$ 14,362,920,00

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

Fator de desconto: $a_{30} = 6,566$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 143,629,20 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P}$$

$$CUE = \frac{(\text{US\$} 14,362,920,00 + \text{US\$} 143,629,20)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 5400 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0568 \text{ \$/kWh} \approx 0,06 \text{ \$/kWh}$$

Cenário Pessimista

$$CIP = C_i \times P$$

$$CIP = \text{US\$}3,324,75 \times 5400 \text{ kW}$$

$$CIP = \text{US\$} 17,953,650,00$$

Esses valores de investimento total do projeto do cenário pessimista são divididos nos seguintes itens:

$$\text{Obras Civis} = \text{US\$} 17,953,650,00 \times 52\% = \text{US\$} 9,335,898,00$$

$$\text{Mecânica e Elétrica} = \text{US\$} 17,953,650,00 \times 18\% = \text{US\$} 3,231,657,00$$

$$\text{Instalação} = \text{US\$} 17,953,650,00 \times 15\% = \text{US\$} 2,693,047,50$$

$$\text{Contingências} = \text{US\$} 17,953,650,00 \times 10\% = \text{US\$} 1,795,365,00$$

$$\text{Transmissão Elétrica} = \text{US\$} 17,953,650,00 \times 5\% = \text{US\$} 897,682,50$$

- Cálculo Custo Unitário de Energia:

Dados:

CIP: US\$ 17,953,650,00

Período de vigência do projeto (Tempo de vida útil): 30 anos

Fator de desconto: $a_{30} = 6,566$

Custo de Operação e Manutenção: US\$ 179,536,50 (1% do CIP)

Tempo de operação: 10 meses

$$CUE = \frac{(CIP + COM)}{a_n \times t \times P}$$

$$CUE = \frac{(\text{US\$} 17.953,650,00 + \text{US\$} 179.536,50)}{6,566 \times 7,200 \text{ h} \times 5400 \text{ kW}}$$

$$CUE = 0,0710 \text{ \$/kWh} \approx 0,07 \text{ \$/kWh}$$