

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTE
MAREMOTRIZ

PEDRO BEZERRA LEITE NETO

São Luís

2012

PEDRO BEZERRA LEITE NETO

OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR DE FONTE
MAREMOTRIZ

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFMA como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração de Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez

São Luís

2012

i

Leite Neto, Pedro Bezerra.

Otimização da Geração de Eletricidade a partir de Fonte Maremotriz/
Pedro Bezerra Leite Neto. – São Luís, 2012.

123 f.

Impresso por computador (fotocópia).

Orientador: Osvaldo Ronald Saavedra Mendez.

Monografia (Mestrado) – Universidade Federal do Maranhão, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

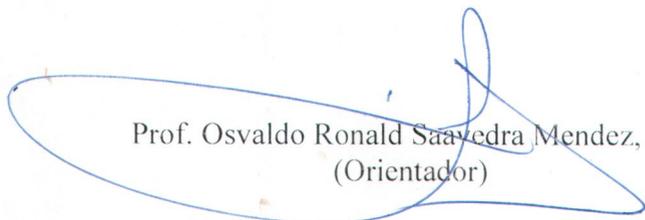
1. Geração de energia - Fonte maremotriz. 2. Ambiente competitivo I. Título.

CDU 537.22

**OTIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE A PARTIR
DE FONTE MAREMOTRIZ**

Pedro Bezerra Leite Neto

Dissertação aprovada em 23 de novembro de 2012.



Prof. Osvaldo Ronald Saavedra Mendez, Dr.
(Orientador)



Prof. Sérgio Luís Haffner, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)



Prof. Luiz Antonio de Souza Ribeiro, Dr.
(Membro da Banca Examinadora)

Aos meus pais, Francisco de Assis Bezerra e
Quelita Souza Bezerra, pelo incansável apoio,
dedicação e compreensão durante estes anos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus. Sem Ele, nada sou.

A meus pais, Assis e Quelita, pelos seus ensinamentos, apoio e incentivo que sempre tem me dado ao longo da minha vida. Sempre serei grato por tudo que vocês tem feito por mim. À minha irmã Queila, ao Luciano Mota e à Priscilla Ingrid: Deus continue abençoando vocês.

À Jerliane Mota pelo enorme incentivo, companheirismo e compreensão em todos esses momentos. Seu apoio foi indispensável.

A minha querida prima Micheline e a todos desta maravilhosa família: Cristóvão, Blenda, Rafael, Douglas, Gabriela, Lêda e Ribamar. Obrigado por terem me acolhido de forma tão carinhosa ao longo de todos esses anos.

A todos os colegas do Instituto de Energia Elétrica da UFMA e aos demais colegas de mestrado pelo apoio mútuo. Ao Eng. Shigeaki Lima, precursor dos estudos sobre energia maremotriz no IEE, e que hoje estou dando continuidade. Ao Eng. Rafael Malheiro por suas importantes contribuições dadas a este trabalho.

Ao professor Osvaldo Saavedra pela enorme dedicação, acompanhamento, apoio e suas importantes observações realizadas ao longo deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro.

A sabedoria é a coisa principal; adquiere, pois, a sabedoria; sim, com tudo o que possuis adquiere o entendimento.

Rei Salomão – Provérbios 4:7

Resumo

Os grandes desafios do setor energético mundial tais como questões ambientais e a crescente demanda por energia, têm estimulado a utilização de diversas fontes alternativas de energia, inclusive as marés. Tais desafios associados ao desenvolvimento das tecnologias utilizadas em dispositivos eletromecânicos tornaram a exploração da energia das marés atrativa sob os aspectos tecnológicos e econômicos. Neste trabalho, é apresentada uma metodologia para a estimação de indicadores energéticos de uma usina maremotriz. Foi desenvolvida uma estratégia de despacho baseada em Algoritmos Genéticos visando-se maximizar a energia total gerada pela usina através do despacho ótimo das turbinas durante o processo de geração. Através da modelagem de componentes e do ciclo de mares, foram simulados e analisados cenários de geração em efeito-simples e efeito-duplo para um ano de operação. Como estudo de caso foi considerado o estuário do Bacanga, localizado na área urbana de São Luís, Maranhão. Dos resultados obtidos pode-se concluir que, embora algumas restrições impeçam o pleno aproveitamento do potencial do estuário, ainda é possível um aproveitamento significativo do mesmo. Isto se deve em grande parte às melhorias, em termos de eficiência, dos equipamentos eletromecânicos disponíveis atualmente, que possibilitam a exploração energética de baixíssimas quedas, como é o caso do Bacanga.

Palavras-chave: Energia Maremotriz, Energias Renováveis, Otimização, Algoritmos Genéticos, Planejamento Energético.

Abstract

The challenges on the world's energy sector, such as environmental questions and the rising on demand, has been stimulated the use of several kind of energy sources, such as tidal energy. These challenges associated to development of the technologies used in electromechanical devices enable the tidal exploitation attractive under technological and economic aspects. In this work, a methodology to estimating the energetic performance of a tidal power plant on the estuary of Bacanga is presented. Moreover, a dispatch strategy based on *Genetic Algorithms* was developed to maximize the total energy generated by the plant through an optimal scheduling of the turbines during the generation process. By modeling components and tidal cycle, several generation scenarios were simulated and analyzed considering *single-effect* and *double-effect* operation over one year of operation. From results obtained, it can be concluded that, although some constraints to the full exploitation of the potential of the estuary, it is still possible to exploit a significant amount of energy. This is due to improvements in efficiency of electromechanical devices currently available that allow the exploitation of energy in very low heads, as is the case of Bacanga.

Keywords: Tidal Energy, Renewable Energies, Optimization, Genetic Algorithms, Energetic Planning.

Lista de Figuras

Figura 1.1. Principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [3].	3
Figura 2.1. Contribuição de diferentes fontes primárias na matriz energética mundial ao longo de vários anos [8].	10
Figura 2.2. Principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [8].	10
Figura 2.3. Oferta interna de energia elétrica por fonte – 2010 [11].	11
Figura 2.4. Números absolutos da exclusão elétrica por estado da Federação [14].	13
Figura 2.5. Exemplos de aproveitamentos da energia das marés. (a) Energia potencial. (b) Energia cinética.	14
Figura 2.6. Representação da maré de sizígia durante lua cheia ou lua nova [19].	18
Figura 2.7. Representação das marés de quadratura durante lua crescente ou minguante [19].	18
Figura 2.8. Esquema ilustrativo dos principais componentes de uma usina maremotriz convencional [22].	20
Figura 2.9. Representação de uma das propostas para a utilização de múltiplos reservatórios no estuário de Severn, Reino Unido [23].	20
Figura 2.10. Vista da turbina <i>Straflo</i> utilizada na usina maremotriz de Annapolis Royal, Canadá [26].	23
Figura 2.11. Vista da turbina tipo <i>bulbo</i> utilizada na usina maremotriz de La Rance, França [27].	23
Figura 2.12. Vista do modelo de turbina <i>VLH</i> instalado em Milau, França [28].	24
Figura 2.13. Vista de um sistema HYDROMATRIX antes de sua instalação em Freudenu, Áustria [26].	25
Figura 2.14. Esquema de geração em maré vazante [25].	26
Figura 2.15. Esquema de geração em <i>efeito-duplo</i> [25].	27
Figura 2.16. Layout geral da usina maremotriz de La Rance [25].	30
Figura 2.17. Corte transversal da seção de turbinas da usina de maremotriz de La Rance [25].	31
Figura 2.18. Vista aérea da usina maremotriz de Annapolis Royal [32].	33
Figura 2.19. Vista da usina maremotriz de Kislaya Guba [33].	34
Figura 2.20. Esquema ilustrativo da usina maremotriz de Sihwa Lake [34].	35
Figura 2.21. Proposta para revitalização da região próxima à usina maremotriz de Sihwa Lake [45].	36
Figura 2.22. Protótipo da turbina <i>SeaGen</i> [50].	37
Figura 2.23. Protótipo da turbina <i>Hammerfest Strom</i> [51].	37
Figura 3.1. Vista aérea do estuário e barragem do Bacanga [55].	40
Figura 3.2. Vista aérea da barragem do Bacanga [56].	41
Figura 4.1. Parâmetros para a modelagem matemática da geração em maré vazante [25].	47
Figura 4.2. Efeitos da variação do número de turbinas e comportas no nível do reservatório [25].	48
Figura 4.3. Semelhança entre a série de marés gerada e os dados da Tábua de Marés.	53
Figura 4.4. Relação entre cota e volume no estuário do Bacanga [3].	54
Figura 4.5. Curva de rendimento do modelo de turbina utilizado.	56
Figura 4.6. Curvas características de geração do modelo de turbina utilizado.	57
Figura 4.7. Fluxograma básico utilizado pelo algoritmo proposto para simulações do <i>caso-base</i> .	59
Figura 4.8. Representação da divisão de um ciclo de maré em estágios de 30 minutos cada.	61
Figura 4.9. Representação de um cromossomo na forma em que este é utilizado no AG proposto.	61
Figura 4.10. Ilustração dos possíveis pontos a partir dos quais é possível a realização da recombinação.	63
Figura 4.11. Representação da <i>Região Válida</i> de um Cromossomo.	64
Figura 4.12. Representação dos possíveis pontos onde é possível realizar a mutação no cromossomo.	65
Figura 4.13. Fluxograma geral do AG proposto.	67
Figura 4.14. Representação de um exemplo de cromossomo criado aleatoriamente e contendo 100 genes.	69
Figura 5.1. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga da usina.	73

Figura 5.2. Efeito da quantidade de turbinas sobre a taxa de variação do reservatório operando em <i>efeito-simples</i>	73
Figura 5.3. Indicativos da operação da usina durante as primeiras horas de 2012.....	74
Figura 5.4. Curva de permanência da potência gerada pela usina durante um ano de operação no cenário 1.....	76
Figura 5.5. Correlação existente entre a amplitude de maré e a máxima potência e energia geradas durante os respectivos ciclos de marés.	76
Figura 5.6. Relação entre a quantidade de turbinas e a energia gerada e fator de carga da usina em operação no cenário 2. ...	79
Figura 5.7. Efeito da quantidade de turbinas sobre o taxa de variação do reservatório da usina operando em <i>efeito-duplo</i>	79
Figura 5.8. Operação da usina no cenário 2 durante as primeiras horas do ano de 2012.	80
Figura 5.9. Curva de Permanência da potência gerada pela usina ao longo de um ano de operação.....	82
Figura 5.10. Principais indicativos da operação em <i>efeito-simples</i> da usina seguindo o esquema de despacho obtido através do método proposto.	83
Figura 5.11. Comparação da potência gerada com e sem a utilização do AG para o caso de geração em <i>efeito-simples</i>	84
Figura 5.12. Evolução da variação percentual da energia gerada, máxima potência gerada e tempo de geração ao longo dos 705 ciclos de marés do ano.....	87
Figura 5.13. Evolução das soluções obtidas pelo AG ao longo das gerações.	87
Figura 5.14. Esquema de despacho obtido a partir do método proposto para a usina operando em <i>efeito-duplo</i>	88
Figura 5.15. Comparação entre as potências geradas sem e com o AG.	89
Figura 5.16. Variação do nível do reservatório resultante da otimização da geração em <i>efeito-duplo</i>	92
Figura 5.17. Evolução das soluções obtidas pelo AG proposto ao longo das gerações.	93

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Expectativa de crescimento global das fontes renováveis de energia [10].....	11
Tabela 2.2. Principais locais da costa maranhense onde aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [17].	15
Tabela 2.3. Duração relativa dos diferentes modos de operação das turbinas da usina maremotriz de La Rance [21]......	32
Tabela 4.1. Relação <i>Cota X Volume</i> do reservatório e o conjunto de parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> resultantes do processo de linearização.	55
Tabela 4.2. Principais parâmetros para diferentes tipos de turbinas [63]......	56
Tabela 5.1. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga da usina.	72
Tabela 5.2. Resultados dos principais indicadores energéticos para o intervalo de um ano de operação no cenário 1.	75
Tabela 5.3. Geração energética anual da usina para diferentes níveis de cota máxima do reservatório.	77
Tabela 5.4. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga global da usina.	78
Tabela 5.5. Principais indicadores de desempenho energético da usina ao longo de sua operação no ano de 2012.	81
Tabela 5.6. Comparativo entre alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com o método proposto.	85
Tabela 5.7. Comparativo dos principais indicadores de desempenho da usina para um ano operando sem e com a utilização de otimização – <i>efeito-simples</i>	86
Tabela 5.8. Comparativo entre alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com otimização....	90
Tabela 5.9. Comparativo dos principais indicadores de desempenho da usina para um ano, operando sem e com a utilização de otimização – <i>efeito-duplo</i>	93
Tabela A.1. Principais componentes harmônicas de marés no terminal Ponta da Madeira.	99

Abreviaturas e Símbolos

AG	- Algoritmo Genético
AGRA	- <i>Algorithme de Gestion de la Rance</i>
CO ₂	- Dióxido de carbono
E	- Energia gerada no intervalo (kWh)
Eletrobrás	- Centrais Elétricas Brasileiras S/A
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
g	- Aceleração gravitacional ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$)
h(t)	- altura da maré no instante t
h ₀	- altura média das marés
H _d	- Queda d'água disponível (m)
H _i	- amplitude da i-ésima componente harmônica i
K _i	- fase da i-ésima componente harmônica i
MME	- Ministério de Minas e Energia
Mt	- Megatonelada
OTEC	- Ocean Thermal Energy Conversion
P	- Potência instantânea gerada (kW)
PCH	- Pequena Central Hidroelétrica
PLPT	- Programa Luz Para Todos
PNE – 2030	- Plano Nacional de Energia Elétrica - 2030
Proinfa	- Plano de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
Q	- Vazão turbinada (m ³ /h)
SIN	- Sistema Interligado Nacional
<i>Straflo</i>	- Straight Flow
V _i	- argumento da i-ésima componente harmônica i
VLH	- Very Low Head

ρ - Densidade da água do mar ($\approx 1029 \text{ kg/m}^3$)

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Abreviaturas e Símbolos.....	xi
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1. Generalidades.....	1
1.2. Formulação do Problema	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo Geral	6
1.3.2. Objetivos Específicos	6
1.4. Motivação e Justificativa	7
1.5. Metodologia.....	7
1.6. Estrutura do Trabalho	8
Capítulo 2	9
Aspectos Sobre a Geração Maremotriz	9
2.1. Contexto Energético Mundial	9
2.2. Contexto Energético Brasileiro.....	11
2.3. A Energia das Marés	14
2.4. Energia Maremotriz no Brasil.....	15
2.5. Fenômenos Associados às Marés	16
2.6. Componentes de uma Usina Maremotriz	19
2.7. Modos de Aproveitamento da Energia Maremotriz.....	24
2.8. Aspectos Ambientais	27
2.9. Aspectos Econômicos	29
2.10. Principais Usinas Maremotrizes em Operação.....	29
2.10.1. Usina Maremotriz de La Rance.....	30
2.10.2. Usina Maremotriz de Annapolis Royal.....	32
2.10.3. Usina Maremotriz de Kislaya Guba, Rússia.....	33
2.10.4. Usina Maremotriz de Sihwa Lake, Coréia do Sul.....	34
2.11. Novos Projetos e Tendências	35
Capítulo 3	39

Barragem do Bacanga: Histórico e Perspectivas	39
3.1. Breve Histórico	39
3.2. Novas Perspectivas	43
Capítulo 4	45
Estratégias de Operação Ótima de uma Usina Maremotriz.....	45
4.1. Introdução	45
4.2. Formulação Geral do Problema.....	45
4.3. Descrição do algoritmo desenvolvido para o <i>caso-base</i>.....	52
4.3.1. Modelagem das Marés.....	52
4.3.2. Modelagem do Estuário	53
4.3.3. Modelagem dos Turbogeneradores.....	55
4.3.4. Fluxograma Utilizado no <i>caso-base</i>	58
4.4. Otimização da geração de uma Usina Maremotriz- Geração em <i>Efeito Simples</i> ...	59
4.4.1. Codificação dos Cromossomos e Criação da População Inicial	60
4.4.2. Cálculo da Aptidão dos Cromossomos e Seleção dos Pais.....	61
4.4.3. Processo de Recombinação.....	62
4.4.4. Processo de Mutação	65
4.4.5. Fluxograma Geral do AG Proposto – Geração em <i>Efeito-Simples</i>	66
4.5. Otimização da Geração de uma Usina Maremotriz – Geração em <i>Efeito Duplo</i>	68
4.5.1. Codificação dos Cromossomos e Criação da População Inicial	68
Capítulo 5	71
Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos	71
5.1. Introdução	71
5.2. Resultados Obtidos a partir do <i>Caso-Base</i>	71
5.2.1. Cenário 1: Geração em <i>Efeito-Simples</i>	71
5.2.2. Cenário 2: Geração em <i>Efeito-Duplo</i>	77
5.3. Cenário 3: Otimização da Geração – Operação em <i>Efeito-Simples</i>	82
5.4. Cenário 4: Otimização da Geração – Operação em <i>Efeito-Duplo</i>	88
Capítulo 6	95
Considerações Finais e Conclusões	95
Apêndice.....	98
Apêndice A – Contribuições Bibliográficas em Anais de Congressos e Periódicos	98

Anexos.....	99
Anexo A - Principais Componentes Harmônicas de Marés no Terminal Ponta da Madeira	99
Referências Bibliográficas	100

Capítulo 1

Introdução

1.1. Generalidades

A crescente demanda por energia elétrica associada ao curto horizonte dos combustíveis fósseis, bem como os aspectos ambientais relacionados ao consumo destes, tem desafiado o setor energético mundial a buscar novas fontes energéticas.

Embora a energia oceânica seja capaz de contribuir de maneira significativa para a redução em longo prazo das emissões de carbono, estas contribuições se tornarão mais expressivas a partir de 2020, pois a maioria das tecnologias utilizadas para a exploração da energia oceânica ainda se encontra em seus estágios iniciais de desenvolvimento [1].

A energia oceânica pode ser explorada a partir de diferentes tecnologias que estão sendo desenvolvidas para explorar basicamente seis diferentes fontes energéticas disponíveis nos oceanos: ondas, amplitude de marés, correntes de marés, correntes oceânicas, conversão da energia térmica do oceano (OTEC) e gradiente de salinidade. Portanto, o potencial teórico global da energia oceânica é estimado em 7400 EJ/ano (10^{18} Joules/ano), ou seja, mais do que o necessário para atender à atual demanda energética em uma escala global [1]. Apesar de ser uma estimativa otimista, o potencial técnico, ou seja, aquele potencial que é de fato explorável, ainda apresenta estimativas bem inferiores a esse valor teórico devido ao estágio inicial em que a maiorias das tecnologias utilizadas para a exploração da energia oceânica ainda se encontram.

A energia das ondas é derivada a partir da transferência da energia cinética dos ventos à superfície do oceano. Até o momento há pouco consenso quanto ao melhor projeto conceitual de dispositivos capazes de explorar a energia das ondas. Existem diversas formas de extrair a energia das ondas, portanto, é improvável que um único conceito tecnológico se torne padrão.

A geração de energia através da amplitude de marés corresponde à única forma de extração da energia oceânica que já apresenta tecnologias suficientemente maduras para a sua utilização em escala comercial. Este conceito utiliza tecnologias semelhantes às utilizadas em hidroelétricas convencionais. A usina maremotriz de La Rance (240 MW) e a recém-construída usina maremotriz de Sihwa – Coréia do Sul, são exemplos da utilização comercial em grande escala dessa forma de geração de energia.

As correntes de mares são resultantes da movimentação horizontal das massas de água durante o processo de variação das marés. As tecnologias utilizadas na exploração das correntes de marés ainda se encontram em uma escala pré-comercial e diferentes conceitos tecnológicos tem sido discutidos.

Além da possibilidade de exploração das correntes de marés, é possível a obtenção de energia a partir das correntes oceânicas. Ao contrário das correntes de marés, as correntes oceânicas acontecem em mar aberto, são unidirecionais e com variações sazonais. Além disso, as correntes oceânicas tendem a ser mais contínuas, entretanto, a uma velocidade menor (cerca de 2 m/s). Utilizando-se a tecnologia atual para a exploração da energia oceânica, já é possível estimar um potencial técnico para diferentes locais do planeta [1].

A conversão da energia térmica do oceano (OTEC) é resultante das diferenças de temperatura entre a energia solar armazenada na forma de calor na superfície oceânica e as baixas temperaturas das águas nas regiões mais profundas do oceano (tipicamente, 1000 m de profundidade). Em seu estágio tecnológico atual, é necessária uma diferença de temperatura da ordem de 20 °C para operar uma usina OTEC. Portanto, de acordo com a tecnologia atual, alguns locais tais como a costa da África e da Índia, e as costas tropicais da América possuem condições adequadas para este tipo de geração energética [1].

O gradiente de salinidade é resultado das diferenças de salinidade entre a água doce e a água do mar, portanto, é possível explorar esta fonte energética na foz de rios, onde a água doce do rio se encontra com a água salgada do mar. Basicamente existem duas formas de tecnologias em desenvolvimento para a exploração desta fonte energética: Osmose Retardada por Pressão e Eletrodialise Reversa. Ambas as tecnologias se encontram em desenvolvimento [2].

Com exceção da geração através das amplitudes de marés, que já apresenta uma tecnologia madura, as tecnologias associadas às demais fontes energéticas dos oceanos ainda se encontram em diferentes estágios de desenvolvimento, desde o estágio conceitual até a criação de protótipos em grande escala. Além disso, para cada uma dessas fontes energéticas existem diversas opções tecnológicas, sendo que ainda não há uma convergência conceitual entre elas [1].

Diante do contexto atual das tecnologias utilizadas nas diferentes formas de aproveitamento da energia oceânica, o presente trabalho está direcionado exclusivamente para a geração através de gradiente de marés por se tratar da única fonte energética oceânica que já possui o *status* de ser comercialmente explorável. Além disso, será utilizado o termo *maremotriz* para designar esta forma de geração de energia oceânica.

Embora a geração maremotriz seja uma das mais promissoras fontes de energia oceânica, apenas alguns poucos lugares do mundo possuem amplitudes de marés significativas, além de outras condições geográficas adequadas a este tipo de exploração.

Na Figura 1 são apresentados os principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais adequados.



Figura 1.1. Principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [3].

O enorme potencial energético global associado aos avanços nas tecnologias de aproveitamentos maremotrizes, tem tornado esta alternativa energética bastante atrativa inclusive sob o ponto de vista econômico.

No Brasil, as maiores amplitudes de marés se encontram na costa norte. Estudos realizados ainda na década de 80 revelaram alguns locais potencialmente favoráveis à exploração da energia maremotriz. Por exemplo, apenas no litoral do estado do Maranhão, estimou-se um potencial energético disponível da ordem de 22 TWh ao ano [4]. Incluído neste contexto, o estuário do Bacanga, em São Luís, representa um caso bastante particular para a exploração da energia maremotriz.

Atualmente existem propostas da criação de uma usina-piloto na barragem do Bacanga para fins de pesquisa, tendo em vista que este conhecimento possa ser revertido para outras regiões do Brasil que possuam potencial significativo. Em [5] é apresentado um estudo bastante detalhado sobre a morfologia do estuário do Bacanga, bem como uma proposta tecnicamente viável de utilização da barragem e comportas já existentes, seguindo também a concepção de uma usina-piloto.

Entre os principais motivos que justificam a implantação da usina-piloto maremotriz do Bacanga, destaca-se a oportunidade de impulsionar o desenvolvimento tecnológico e humano, visando-se também outros projetos maremotrizes no Brasil.

Embora o Brasil apresente um potencial maremotriz bastante significativo, estudos que quantifiquem a viabilidade de exploração comercial desta fonte energética ainda são insuficientes. Além disso, tanto no Brasil quanto no restante do mundo, o conhecimento técnico sobre projetos maremotrizes ainda não está devidamente consolidado.

Algumas usinas maremotrizes tais como a usina maremotriz de La Rance, na França, e a usina maremotriz de Annapolis Royal, no Canadá, são exemplos de projetos bem-sucedidos. Entretanto, estes tem apontado a necessidade de que vários aspectos inerentes a este tipo de projeto precisam ser melhor discutidos e aperfeiçoados. Alguns destes aspectos, tais como estratégias de despacho, otimização da operação e a comercialização da energia gerada, ainda não são devidamente abordados na literatura técnica voltada para o tema.

1.2. Formulação do Problema

Um dos principais problemas na utilização de fontes alternativas de energia está relacionado à sua natureza intermitente. Algumas fontes energéticas tais como solar e eólica necessitam de complexos cálculos probabilísticos para se obter previsões razoáveis de geração, embora ainda assim não sejam possíveis estimativas precisas devido à natureza estocástica destas fontes primárias.

Embora também seja uma fonte intermitente, a energia das marés apresenta uma natureza razoavelmente determinística, em outras palavras, a dinâmica das marés é governada por fenômenos astronômicos amplamente conhecidos e previsíveis. Desta forma, uma usina maremotriz apresenta uma enorme vantagem que é a possibilidade de se prever com precisão aceitável os momentos em que poderá haver geração, bem como o quanto será possível gerar nestes momentos.

Embora apresente vantagens com relação a outras formas de conversão de energia, o projeto de uma usina maremotriz requer uma análise bastante particular de vários fatores relacionados aos seguintes aspectos [6]:

- pesquisa e desenvolvimento;
- análise de viabilidade;
- planejamento;
- projeto;
- instalação;
- operação e manutenção;
- despacho.

Todos estes tópicos ainda apresentam enormes lacunas a serem preenchidas, embora já sejam pesquisados mais intensamente nos últimos anos.

Um dos maiores desafios associados à exploração da energia maremotriz está relacionado à *operação* da usina maremotriz. Este problema é recorrente da característica intermitente da fonte primária. Portanto, é necessária uma estratégia de operação visando o despacho otimizado da usina maremotriz. Em [7] são apresentados alguns dos fatores que

precisam ser considerados para a otimização da operação de uma usina maremotriz, tais como:

- quantidade de turbinas utilizadas em cada ciclo de geração;
- momento inicial e final da operação das turbinas em cada ciclo de geração;
- objetivo da operação: maximizar a energia ou maximizar a potência produzida em cada ciclo.

Além destes aspectos, outro problema recorrente da operação de uma usina maremotriz está relacionado à participação desta como um agente de mercado no setor energético. Embora seja de natureza intermitente, a alta previsibilidade da fonte energética traz vantagens no que tange ao ingresso da usina no mercado energético. Isto ocorre graças à capacidade de se conhecer quando e o quanto será possível fornecer de energia elétrica à rede.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é formular e propor soluções ao problema da operação otimizada de uma usina maremotriz, considerando como estudo de caso o estuário do Bacanga. A proposta visa maximizar a energia gerada pela usina em um dado período de tempo, assim como simular a operação em tempo real da mesma para o intervalo de tempo desejado através de uma modelagem mais precisa dos principais elementos que influenciam a operação da usina.

1.3.2. Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- desenvolver uma ferramenta que possibilite a modelagem dos principais elementos envolvidos na operação de uma usina maremotriz;
- realizar uma análise de desempenho de uma usina maremotriz em diferentes cenários de operação;

- propor estratégias que possibilitem o melhoramento, em termos de eficiência, do desempenho operacional de uma usina maremotriz;
- propor estratégia que estime o número ótimo de unidades a serem instaladas;
- validar as ferramentas desenvolvidas com um estudo-de-caso considerando o estuário do Bacanga.

1.4. Motivação e Justificativa

As possibilidades de aproveitamentos maremotrizes no Brasil demandam a necessidade de estudos que sinalizem um ambiente favorável para a comercialização de energia proveniente desta fonte, ou seja, é necessário um modelo detalhado das estratégias de operação de uma usina maremotriz de maneira a torná-la competitiva no mercado energético.

Tal modelo deve levar em consideração as particularidades desta forma de geração: intermitência e previsibilidade da fonte primária, além de inúmeros modos de operação da usina.

1.5. Metodologia

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho seguiu a seguinte sequência:

- levantamento bibliográfico para revisão do estado da arte e análise crítica dos trabalhos relacionados ao tema;
- formulação do problema de despacho econômico considerando-se uma usina maremotriz: principais particularidades deste tipo de geração, restrições e modos mais apropriados de operação da usina maremotriz;
- definição da abordagem a ser utilizada para o desenvolvimento da metodologia;
- implementação da metodologia desenvolvida.
- testes e validação de resultados. implementação de uma metodologia computacional capaz de resolver adequadamente o problema formulado;
- melhorias e refinamentos com o objetivo de identificar falhas e realizar refinamentos para melhoria do desempenho da metodologia.

1.6. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos conforme descritos a seguir.

No Capítulo 1 são apresentados alguns aspectos introdutórios relacionados à temática central do trabalho.

No Capítulo 2 é feito um panorama geral sobre o contexto energético mundial e nacional, bem como de que maneira a geração de energia a partir de fonte maremotriz está inserida nestes contextos. Além disso, são descritos os principais aspectos sobre a geração maremotriz e suas principais tendências tecnológicas.

No Capítulo 3 é apresentada uma descrição detalhada do estuário-alvo desse trabalho, o estuário do Bacanga, destacando os principais fenômenos históricos relacionados a este e de que maneira tais fenômenos podem interferir no planejamento de projetos atuais para a criação de uma usina maremotriz neste sítio.

No Capítulo 4 é realizada uma descrição detalhada dos algoritmos desenvolvidos para a simulação da operação anual de uma usina maremotriz no Bacanga. Diferentes cenários de operação são avaliados. Além disso, é apresentado um algoritmo de otimização que visa maximizar a energia produzida pela usina em diferentes modos de operação através da utilização de *Algoritmos Genéticos*.

No Capítulo 5 são apresentados os principais resultados das simulações realizadas a partir dos algoritmos descritos no Capítulo 4. Além disso, algumas considerações pertinentes aos resultados obtidos são realizadas.

No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

Aspectos Sobre a Geração Maremotriz

2.1. Contexto Energético Mundial

No período pré-industrial, a demanda mundial por energia era suprida basicamente pela força humana e animal e pelo emprego da combustão de madeira para obtenção de calor. A descoberta do carvão, bem como o desenvolvimento das tecnologias que possibilitam o seu aproveitamento em grande escala impulsionaram a Revolução Industrial, que por sua vez resultou em um grande aumento do consumo energético mundial. No período entre a primeira e segunda guerra mundial iniciou-se uma crescente exploração do petróleo. A partir de então, a expansão industrial e a sociedade de um modo geral passaram a ser regidas pelo consumo maciço de petróleo.

Uma grande parcela dos combustíveis fósseis é usada atualmente para a geração de eletricidade. A demanda mundial por energia elétrica tem crescido rapidamente devido, principalmente, ao crescimento industrial, à explosão do consumo de produtos eletrônicos, e à expansão do fornecimento de eletricidade em países em desenvolvimento.

Da mesma forma, as principais fontes primárias que compõem a matriz energética mundial são o petróleo e carvão mineral. Na Figura 2.1 observam-se as parcelas de contribuição de diferentes fontes primárias na matriz energética mundial ao longo de 35 anos [8].

Um dos maiores problemas decorrentes da utilização dos combustíveis fósseis para obtenção de energia está no contexto ambiental. Na Figura 2.2 é ilustrado o crescimento das emissões de CO₂ na atmosfera durante um período de 35 anos, onde pode ser observado que tais emissões quase dobraram neste período [8].

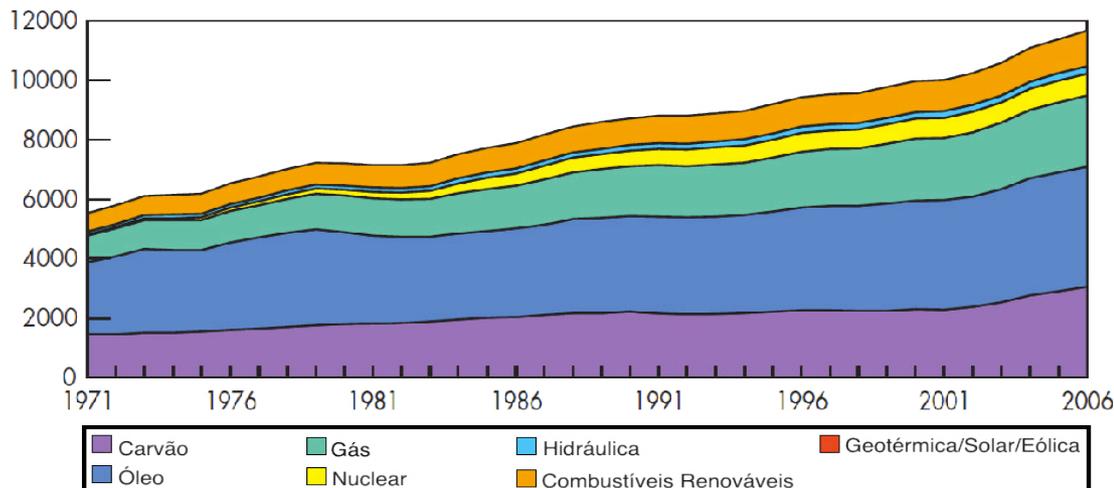


Figura 2.1. Contribuição de diferentes fontes primárias na matriz energética mundial ao longo de vários anos [8].

Devido a estas e outras questões, o Conselho Mundial de Energia estabeleceu os principais desafios para o setor energético global a fim de preservar o dinamismo da economia mundial e melhorar a qualidade de vida em geral [9]:

- permitir o acesso de todos os lares a serviços energéticos modernos e economicamente comportáveis;
- assegurar a sua disponibilidade em face de uma procura de serviços energéticos em grande crescimento;
- limitar as emissões de gases de efeito estufa.

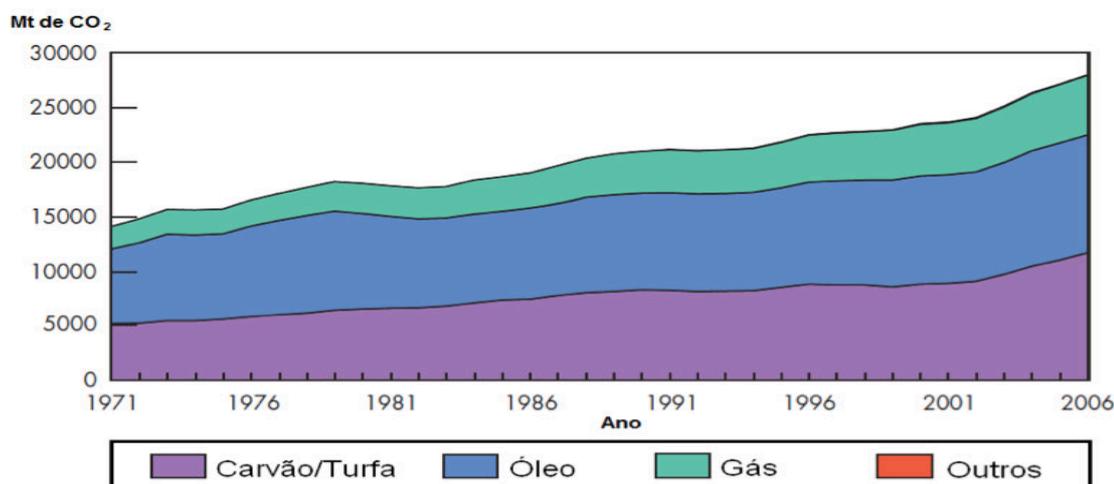


Figura 2.2. Principais locais do planeta onde os aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [8].

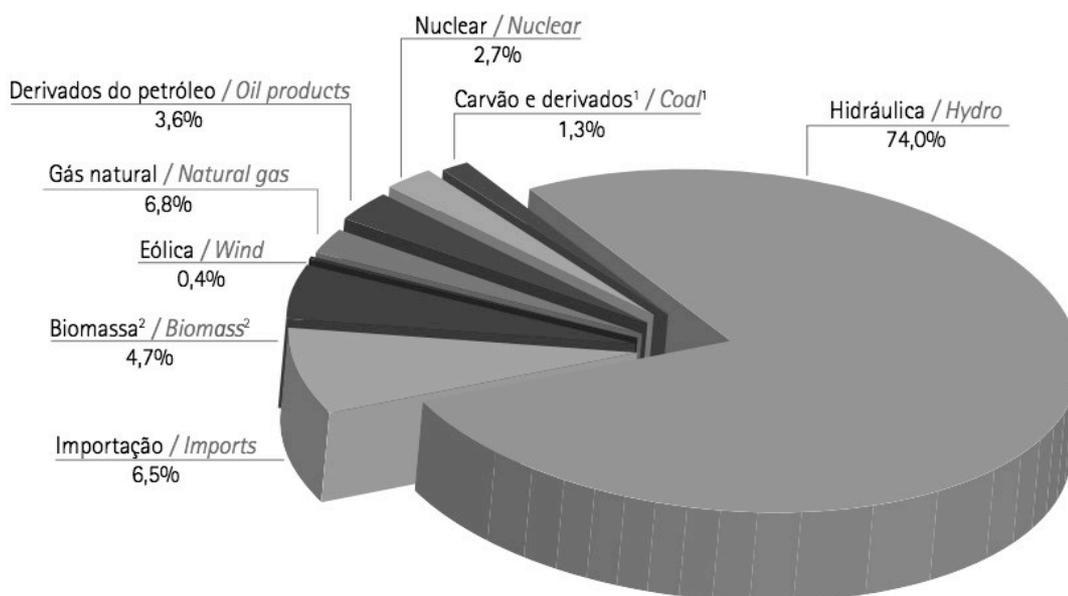
As fontes renováveis de energia contribuirão significativamente para que estes desafios sejam superados. De acordo com a Tabela 2.1, as fontes renováveis de energia apresentam grande estimativa de crescimento em termos energia gerada.

Tabela 2.1. Expectativa de crescimento global das fontes renováveis de energia [10].

	Geração em 2004 (TWh)	Geração em 2030 (TWh)	Crescimento estimado (vezes)
Geração Total	3 179	7 775	>2
Hidráulica	2 810	4 983	<2
Eólica	82	1 440	18
Solar	4	238	60
Geotérmica	56	185	>3
Marés e Ondas	<1	25	46

2.2. Contexto Energético Brasileiro

No Brasil, os resultados preliminares do último Balanço Energético Nacional (2011) revelaram que em 2010, 74 % da matriz de energia elétrica nacional é de natureza hidráulica. Na Figura 2.3 é ilustrada a composição da matriz da produção de eletricidade nacional no ano de 2010.



Notas/ Notes:

¹ Inclui gás de coqueria/ Includes coke gas.

² Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações/ Biomass includes firewood, sugar cane bagasse, black liquor e other wastes.

Figura 2.3. Oferta interna de energia elétrica por fonte – 2010 [11].

Uma das iniciativas adotadas pelo Governo Federal para incentivar a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis foi o *Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa)*.

O Proinfa foi instituído em 2004 com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base em fonte eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) a serem comissionados até o final do ano de 2010. O intuito deste programa consistia em buscar alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais. Desta forma, o Programa previa a implantação de 144 usinas, totalizando 3.299,40 MW de capacidade instalada, sendo 1.191,24 MW provenientes de 63 PCHs, 1.422,92 MW de 54 usinas eólicas, e 685,24 MW de 27 usinas a base de biomassa. Toda essa energia tem garantia de contratação por 20 anos pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás) [12].

Outra ação pioneira do Governo Brasileiro consiste no Plano Nacional de Energia – PNE 2030. Os estudos do PNE 2030 foram conduzidos pela EPE para o Ministério de Minas e Energia – MME onde uma série de estudos de planejamento foi realizada visando a formulação de uma estratégia de expansão da oferta de energia de forma econômica e sustentável com vistas ao atendimento da evolução da demanda, segundo uma perspectiva de longo prazo [13].

O Programa Luz para Todos (PLPT), coordenado pelo Ministério de Minas e Energias do Governo Federal, foi lançado em 2003 com o desafio de acabar com a exclusão elétrica no país até 2010 e posteriormente prorrogado para até 2012. A maioria das famílias que não tem acesso à energia elétrica está no meio rural e, geralmente, em locais de difícil acesso. Na Figura 2.4 são apresentados os números da exclusão elétrica rural em cada estado da Federação. Portanto, o programa contempla o atendimento das demandas destes locais através de uma das seguintes alternativas:

- extensão da rede elétrica convencional;
- sistemas de geração descentralizada com redes isoladas;
- sistemas de geração individuais.

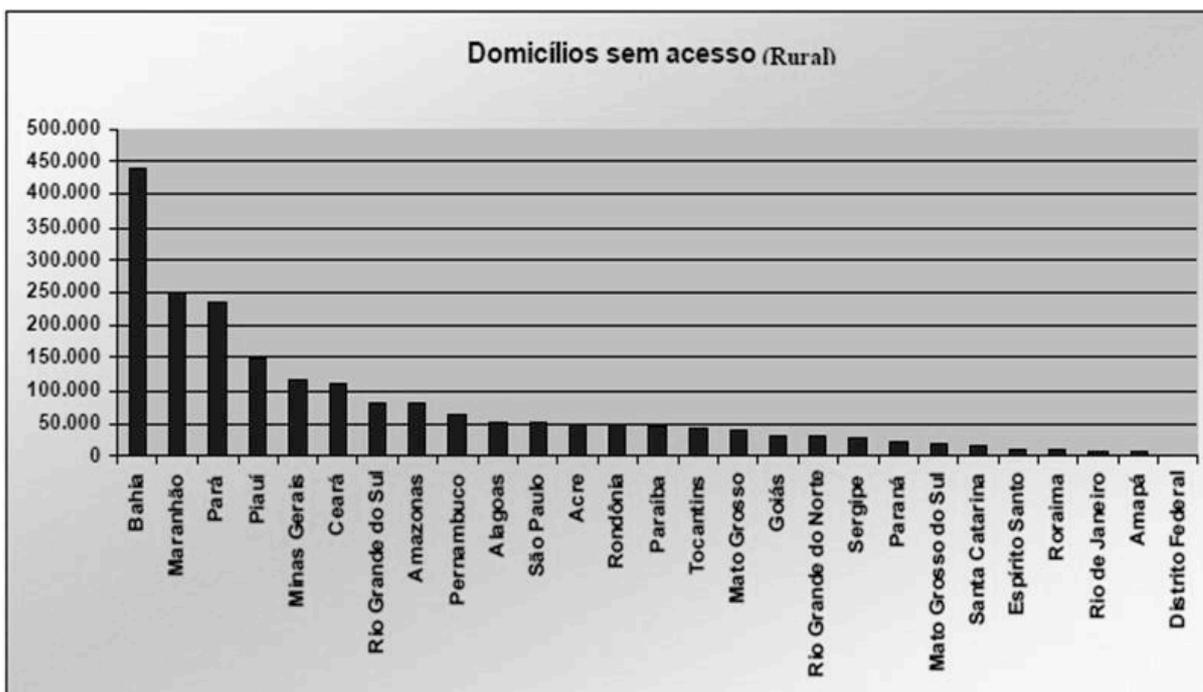


Figura 2.4. Números absolutos da exclusão elétrica por estado da Federação [14].

Alguns fatores adversos tais como os aspectos geográficos do país (dimensões físicas extremamente amplas aliadas às dificuldades de acesso a regiões remotas) tornam muitas vezes inviável a expansão da rede elétrica convencional até algumas comunidades isoladas, restando apenas a opção de sistemas isolados de geração. Nesse contexto, as fontes renováveis de energia apresentam uma possibilidade bastante atrativa, como é o caso do Sistema Híbrido Solar-Eólico de Geração de Energia Elétrica Sustentável da Ilha de Lençóis, município de Cururupu/MA, que vem atendendo de forma ininterrupta quase 100 famílias com energia elétrica desde 2008 [15].

Além das fontes solar e eólica, o Brasil apresenta ainda um potencial maremotriz bastante significativo, entretanto, pouco estudado e ainda não aproveitado de forma satisfatória. Desta forma, o objetivo deste trabalho é realizar uma abordagem ampla sobre diversos aspectos associados a aproveitamentos maremotrizes. Para tanto, é necessário um estudo detalhado dos principais problemas relacionados à operação e despacho de uma usina maremotriz, tendo como estudo-de-caso básico o estuário do Bacanga/MA como um local potencialmente favorável a se tornar a primeira usina maremotriz do Brasil.

2.3. A Energia das Marés

Marés são caracterizadas pelo aumento e diminuição periódicos do nível dos oceanos. Este fenômeno é resultado principalmente da combinação das forças gravitacionais do sistema Terra – Sol – Lua, além dos movimentos de rotação da Terra, podendo haver também eventuais influências de fenômenos meteorológicos.

Atualmente, a exploração da energia maremotriz tem sido voltada exclusivamente para a sua conversão em energia elétrica. Este processo pode acontecer basicamente de dois modos: o primeiro aproveita a energia potencial das marés através do seu represamento e, conseqüentemente, do desnivelamento da água a jusante e a montante da barragem. Tal processo é exemplificado na Figura 2.5a. O segundo modo aproveita a energia cinética existente nas correntes de marés, onde são utilizadas turbinas submersas, conforme ilustradas na Figura 2.5b.



Figura 2.5. Exemplos de aproveitamentos da energia das marés. (a) Energia potencial. (b) Energia cinética.

Atualmente existem diversas usinas maremotrizes em operação em alguns locais, por exemplo, La Rance – França (240 MW), Annapolis – Canadá (17,8 MW), Jiangxia – China (3,2 MW), Kislaya Guba – Rússia (0,4 MW) e a maior usina maremotriz em potência instalada: Sihwa Lake – Coreia do Sul (254 MW). Além de vários outros projetos em fase de planejamento, como por exemplo: estuário de Severn – Reino Unido, Derby – Austrália, além de inúmeros projetos de protótipos para aproveitamentos das correntes das marés [16].

2.4. Energia Maremotriz no Brasil

No Brasil, as maiores amplitudes de marés se encontram na costa norte, especificamente no Maranhão, Pará e Amapá. Estudos encomendados pela ELETROBRÁS na década de 80 revelaram alguns locais potencialmente favoráveis à exploração da energia maremotriz. Na Tabela 2.2, estão relacionados alguns dados específicos da costa maranhense.

Tabela 2.2. Principais locais da costa maranhense onde aproveitamentos maremotrizes são mais adequados [17].

Local	Altura da Maré (m)	Área da Baía (km ²)	Potência Extraível (MW)	Energia (10 ³ MWh)
Baía de Turiçu	4,7	616	3.402	9.114
Baía dos Lençóis	4,7	316	1.745	4.675
Baía de Cumã	4,0	232	928	2.486
Baía de São José	4,3	451	2.084	5.585
Baía do Bacanga	4,0	15	60	160
TOTAL		1.630	8.219	22.020

A baía do Bacanga constitui um caso especial. Em 1973, foi concluída a construção de uma barragem que tinha como um de seus objetivos a diminuição da distância entre a capital São Luís e o porto de Itaqui. Na época, pensou-se também em utilizar a barragem para implementação de um sistema de geração de energia elétrica a partir das marés.

Na época de construção da barragem, diversos estudos foram realizados sobre as possibilidades de aproveitamento desta para geração de eletricidade. Uma das alternativas consistia na utilização de 6 turbogeradores do tipo bulbo de 4500 kW cada, operando em regime de efeito simples. Desta forma, a geração anual da usina seria estimada em 56,3 GWh [18].

Ao longo dos anos, vários fatores, entre eles a ocupação humana desordenada no entorno do reservatório, impuseram uma cota máxima para o lago muito aquém daquela necessária para a exploração comercial da energia das marés na baía. Entretanto, existe a possibilidade da implementação de uma usina maremotriz piloto, tendo em vista as razões a seguir:

- existem no Brasil, diversos locais favoráveis à exploração maremotriz;

- a possibilidade de se replicar o projeto em outras localidades com características semelhantes às da baía do Bacanga;
- a necessidade da criação de memória técnica permanente e formação de recursos humanos, visto que no Brasil não existe experiência com este tipo de geração.

2.5. Fenômenos Associados às Marés

Marés são definidas basicamente como o aumento e diminuição do nível do mar em relação à Terra. Este movimento é produzido pela atração gravitacional do Sol e da Lua, além de ser influenciado pelas estações do ano, fenômenos climáticos e características geomorfológicas.

O efeito gravitacional provocado pela Lua é maior que aquele provocado pelo Sol, pois, mesmo com uma massa menor, a Lua se encontra bem mais próxima da Terra do que esta em relação ao Sol.

Além do movimento vertical provocado pelas marés, existem ainda as correntes de marés, que são o fluxo horizontal de água, ou seja, o aumento e diminuição das marés são acompanhados de um movimento periódico horizontal de água que também pode ser aproveitado para geração de energia elétrica.

Uma das principais características das marés é a previsibilidade, ou seja, a possibilidade de se prever com bastante precisão o comportamento das marés em um determinado local, sendo tal característica uma grande vantagem para o aproveitamento da energia maremotriz. Entretanto, fenômenos climáticos ocasionalmente criam as chamadas *marés meteorológicas*, que são influenciadas principalmente por fortes ventos ou mudanças na pressão atmosférica.

A seguir, alguns termos associados ao estudo das marés:

- maré alta (preamar): nível máximo de uma maré cheia;
- maré baixa (baixa-mar): nível mínimo de uma maré baixa;
- maré vazante: período de tempo compreendido entre a preamar e a baixa-mar seguinte, ou seja, maré secando;

- maré enchente: período de tempo compreendido entre a baixa-mar e a preamar seguinte, ou seja, maré enchendo;
- maré de sizígia: maré de maior amplitude que ocorre na lua cheia e lua nova;
- maré de quadratura: maré de menor amplitude que ocorre na lua crescente e minguante.

Apesar dos fenômenos associados às marés serem causados basicamente por três astros, não se tratam de fenômenos simples. Os movimentos da Terra, Sol e Lua são amplamente conhecidos, entretanto, bastante complexos e com irregularidades. Isto resulta na combinação de diversas configurações das posições relativas destes astros e, conseqüentemente, alguns tipos diferentes de marés.

Em relação aos ciclos lunares, existem basicamente três tipos de marés: as relacionadas ao ciclo sinódico, as relacionadas ao ciclo anomalístico e aquelas relacionadas ao ciclo trópico lunar.

As marés relacionadas ao período sinódico lunar são as mais conhecidas e estão associadas com o mês sinódico da Lua, ou seja, o ciclo completo das suas fases que corresponde a 29 dias 12h 44min 3s. Durante a lua cheia e lua nova, os três astros atuantes estão alinhados entre si e as forças gravitacionais da Lua e do Sol se somam, resultando em marés de grandes amplitudes chamadas de marés de sizígia, conforme mostrado na Figura 2.6. Durante a lua crescente e lua minguante, os três astros atuantes formam um ângulo reto entre si de modo que a força gravitacional do Sol se subtrai à da Lua, resultando em marés de baixas amplitudes chamadas de marés de quadratura, esta situação é ilustrada na Figura 2.7.

Um fato bastante conhecido atualmente é que as órbitas da Lua e da Terra não são coplanares e a inclinação existente entre elas varia de forma cíclica, mais precisamente a cada 27 dias 7hr 43min 5s, que corresponde ao mês trópico lunar. Em alguns locais do planeta, as marés são fortemente influenciadas pela declinação da Lua. Quando a Lua e o Sol estão na altura do equador, as duas marés que ocorrem em um único dia terão exatamente a mesma amplitude.

Em um estuário, muitos outros fatores, tais como a geomorfologia, devem ser considerados na análise das marés. Quando uma onda de maré deixa o mar aberto e entra em

uma baía ou estuário, ela passa a ser governada em maior parte pelas leis da hidráulica em detrimento das leis astronômicas.

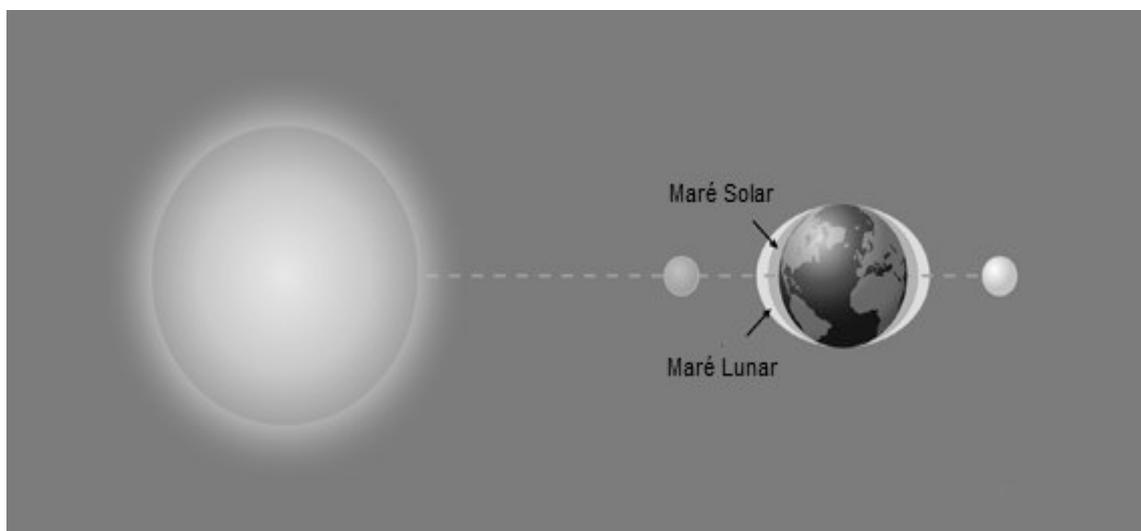


Figura 2.6. Representação da maré de sizígia durante lua cheia ou lua nova [19].

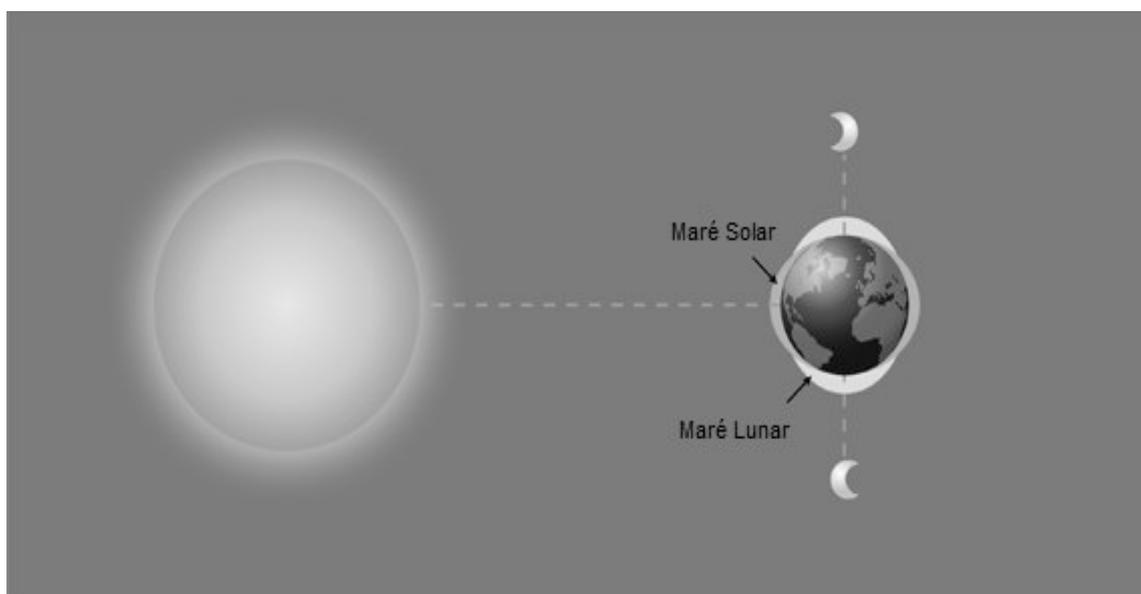


Figura 2.7. Representação das marés de quadratura durante lua crescente ou minguante [19].

As configurações da costa ou estuário podem provocar grandes influências nos parâmetros da onda de maré. Entre estes parâmetros estão a velocidade e o período da onda de maré. Estas influências podem resultar em situações de ressonância que provocam amplitudes de marés bem maiores ao longo do estuário.

A partir destas considerações, as marés podem ser representadas matematicamente como sendo uma soma de um número finito de termos harmônicos chamados de *constituintes harmônicas* da maré. Cada constituinte representa um determinado movimento astronômico relacionado com o movimento da Terra – Lua – Sol e que pode ter desde uma periodicidade diária até, por exemplo, um período de 18,6 anos correspondente à regressão dos nodos lunares (pontos onde a Lua cruza o plano da eclíptica [20]).

A amplitude e fase de cada senóide variam de acordo com a localização no planeta. Devido à impossibilidade de se deduzir tais parâmetros teoricamente, é necessária a utilização de séries históricas a partir de medições das marés no local para a sua dedução. A partir das observações dos dados históricos das marés, são determinadas a amplitude e fase de cada constituinte harmônica (senóide) através de uma *análise de Fourier*.

Através da decomposição harmônica de uma série histórica observada da variação de marés em um dado local, é possível recriar uma nova série temporal a partir de uma modelagem matemática representada na Equação 2.1. Desta forma é possível prever a operação de uma usina maremotriz para um longo período de tempo e de forma bastante precisa.

$$h(t) = h_0 + \sum_{i=1}^n H_i \cos(V_i - K_i) \quad (2.1.)$$

onde h_0 representa o valor médio das marés. No caso do estuário do Bacanga, seu valor é igual a 3,17 m.

Através da Equação 2.1 é possível recriar uma série temporal de variações de marés para o período de tempo desejado a partir das constituintes harmônicas das marés. Isto é possível graças ao fato de que as marés apresentam uma variação anual inferior a 5 % [21].

2.6. Componentes de uma Usina Maremotriz

Os principais equipamentos de uma usina maremotriz convencional são: barragem, turbogeradores, comportas, além de um ou mais reservatórios. Na Figura 2.8 são esquematizados os principais componentes de uma usina maremotriz.

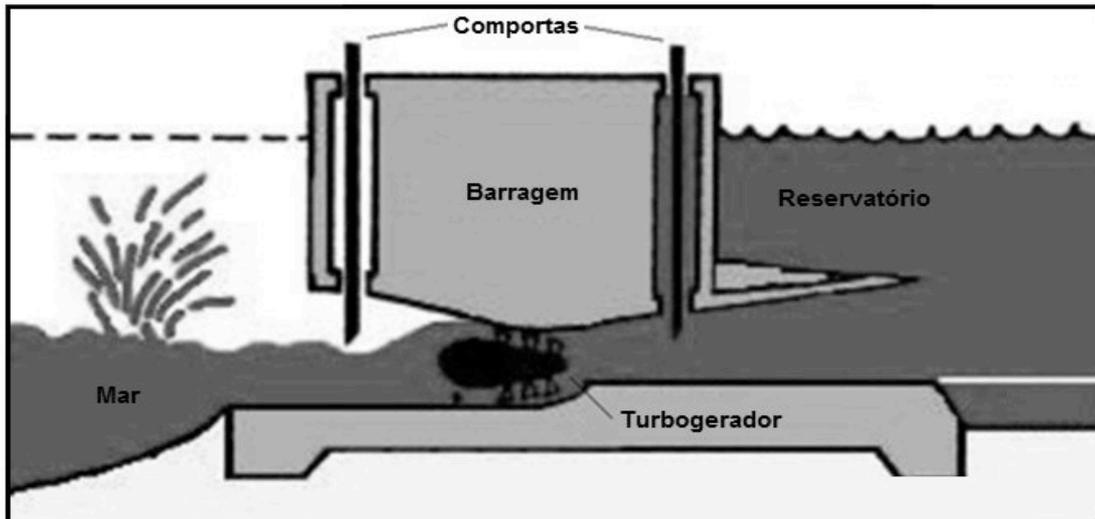


Figura 2.8. Esquema ilustrativo dos principais componentes de uma usina maremotriz convencional [22].

O projeto de uma usina maremotriz pode envolver um ou mais reservatórios, sendo que a primeira alternativa é a mais comum e mais econômica, embora tenha menos flexibilidade. Um dos principais projetos para geração maremotriz em que há propostas de se utilizar múltiplos reservatórios (ou múltiplos lagos) é no estuário de Severn, no Reino Unido. Na Figura 2.9 é apresentada uma destas propostas.

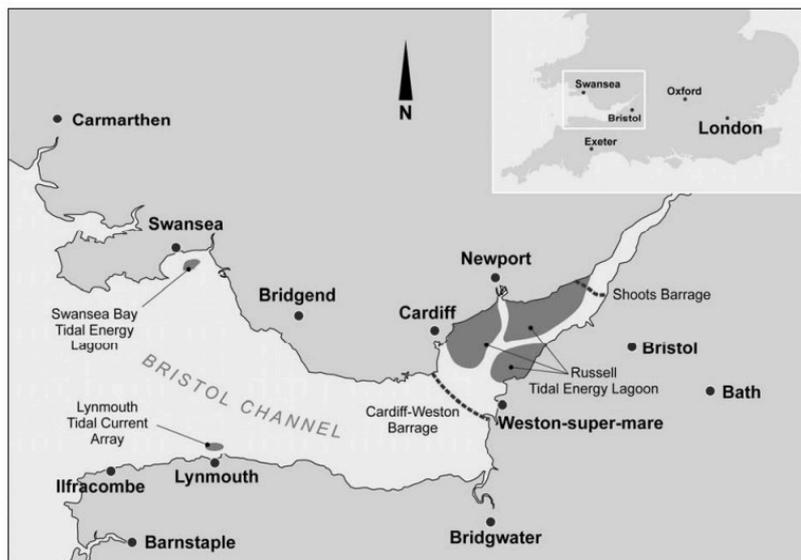


Figura 2.9. Representação de uma das propostas para a utilização de múltiplos reservatórios no estuário de Severn, Reino Unido [23].

A construção da barragem representa uns dos fatores mais relevantes em uma usina maremotriz, principalmente por se relacionar de forma bastante significativa com os custos totais de implantação da usina.

Considerando-se que os custos de implantação de uma usina maremotriz estão diretamente relacionados às dimensões da barragem, a escolha por represamentos menores podem ser mais viáveis mesmo implicando a redução do reservatório [24]. O projeto da barragem em uma usina maremotriz deve prever uma série de condições que são específicas pra este tipo de aproveitamento [25]:

- a barragem deve prever os efeitos das ondas que se chocam contra ela. estes efeitos podem ser bastantes severos devido à variação constante de pressão entre ambos os lados;
- a localização e o formato da barragem podem alterar os fenômenos de ressonância e reflexão que ocorrem dentro de um estuário. desta forma, é possível provocar a elevação ou atenuação da amplitude da maré e, conseqüentemente, a energia produzida pela usina.

As comportas incorporadas à barragem de uma usina maremotriz tem a função principal de controlar o nível de água do reservatório, sendo que a frequência em que estas são abertas está relacionada ao tipo de maré e ao modo de operação da usina.

Outro importante fator que deve ser considerado é o ambiente de operação das comportas. Os constantes impactos das ondas e a corrosão podem resultar em problemas operacionais das comportas e, portanto, devem ser levados em consideração.

A principal função do reservatório em uma usina maremotriz é o armazenamento de água, de modo a gerar a queda necessária para geração de eletricidade através dos turbogeradores. Estes reservatórios podem ser reentrâncias costeiras, enseadas, corpos de águas entre ilhas e continentes, ou estuários [24].

Os componentes eletromecânicos são uma das principais parcelas que compõem os custos totais de implementação de uma usina maremotriz, podendo ser responsável por 45 a 55 % destes custos. Além disso, estes componentes devem levar em consideração os seguintes aspectos [25]:

- a variação contínua da altura da queda d'água requer turbinas que operem de forma relativamente eficiente sob tais condições;
- a baixa queda requer um grande volume de água passando pelas turbinas resultando em grandes dimensões físicas para as passagens da água;
- a operação cíclica (início e parada da geração de acordo com as marés) impõe nos equipamentos geradores, fadigas maiores do que na geração convencional em hidrelétricas;
- as dimensões físicas de cada unidade geradora devem ser as menores possíveis, visto que afetam diretamente os custos das obras civis;
- os materiais são expostos às ações corrosivas da água do mar e, portanto, precisam ser cuidadosamente selecionados e protegidos;
- a eficiência global da geração pode assumir uma prioridade menor devido à ampla fonte de água envolvida no processo.

Os principais modelos de turbogeradores utilizados para conversão da energia maremotriz são as do tipo *STRAFLO* e as do tipo Bulbo. Nas Figuras 2.10 e 2.11 são ilustradas, respectivamente, a turbina *STRAFLO*, empregada na usina maremotriz de Annapolis Royal, no Canadá e a do tipo Bulbo, utilizada na usina maremotriz de La Rance.

Uma enorme parcela do potencial energético maremotriz global ainda se encontra inexplorado, por se tratar de locais com amplitudes de maré relativamente menores. O aproveitamento de lugares com quedas d'água muito baixas é geralmente possível tecnicamente, porém não é viável economicamente devido aos custos de obras civis associados a uma produção energética em menor escala.



Figura 2.10. Vista da turbina *Straflo* utilizada na usina maremotriz de Annapolis Royal, Canadá [26].

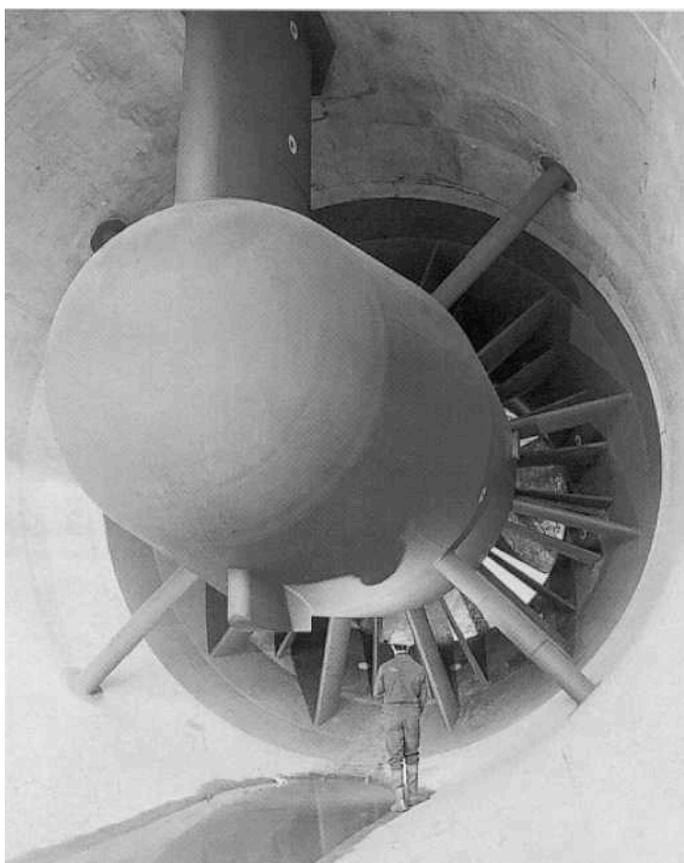


Figura 2.11. Vista da turbina tipo *bulbo* utilizada na usina maremotriz de La Rance, França [27].

O modelo *VLH*, ilustrado na Figura 2.12, foi projetado para aplicações de quedas entre 1,4 e 3,2 m. O modelo possui uma turbina Kaplan e pode produzir uma potência entre 100 kW e 500 kW [28].

O sistema HYDROMATRIX[®] é composto de pequenas unidades geradoras dispostas da forma de uma *matriz*, conforme ilustrado na Figura 2.13, sendo facilmente integrado a uma barragem já existente, e projetada para quedas entre 3 a 30 m. A potência gerada por cada unidade vai de 200 kW até 700 kW [26].

2.7. Modos de Aproveitamento da Energia Maremotriz

O método mais comum de aproveitamentos maremotrizes é através da utilização de barragens em estuários. Desta forma, graças às variações do nível do mar provocadas pelas marés, é possível criar um desnível de água suficientemente grande entre os lados da barragem para que as turbinas sejam acionadas. Este é o princípio utilizado pelas principais plantas maremotrizes em operação, como por exemplo, as usinas de La Rance, Annapolis Royal e Sihwa.



Figura 2.12. Vista do modelo de turbina *VLH* instalado em Milau, França [28].



Figura 2.13. Vista de um sistema HYDROMATRIX antes de sua instalação em Freudenu, Áustria [26].

Além da preferência por locais com grandes amplitudes de marés, esse modelo de geração maremotriz requer a necessidade de condições geográficas favoráveis para o represamento da água para a formação de um reservatório. Estas características são bastante comuns na costa norte brasileira.

Existem duas formas principais de aproveitamento da energia potencial das marés: geração em maré vazante e geração em maré enchente. Além disso, é possível combinar ambas as formas de aproveitamento, resultando no modelo de geração em *efeito-duplo*, ou seja, o processo de geração ocorre tanto na marés enchente quanto na maré vazante.

A geração em maré vazante é a mais simples estratégia de operação de uma usina maremotriz. Logo após a maré cheia, as comportas de enchimento do reservatório são fechadas. O processo de geração de energia é iniciado durante a maré vazante, quando a queda d'água é suficiente para o início do funcionamento das turbinas. Esta operação é mantida até que a altura da queda d'água se torne a mínima possível para a geração de energia. Neste ponto, bloqueiam-se as passagens de água através das turbinas, cessando-se a geração de energia até que a altura da queda d'água torne-se novamente suficiente para o funcionamento das turbinas, isto após a maré alta seguinte.

O processo de geração em maré enchente é análogo ao processo de geração em maré vazante, com a diferença que nesse caso a geração ocorre no sentido mar - reservatório. Além disso, é possível usar bombeamento de água para elevar a produção energética da usina através de um incremento do desnível da água entre ambos os lados da barragem. Nas Figuras 2.14 e 2.15 são apresentados os esquemas de geração em maré vazante (efeito-simples) e em efeito-duplo, respectivamente.

Em [29] é desenvolvida uma modelagem matemática para a potência e energia extraíveis em uma usina maremotriz. Através das Equações 2.2 e 2.3 podem ser estimadas a potência e energia extraíveis.

$$P = \rho g H_d Q \quad (2.2)$$

$$E = \rho g \int_{T_1}^{T_2} H_d Q dt \quad (2.3)$$

onde T_1 e T_2 são os limites de um dado intervalo de tempo.

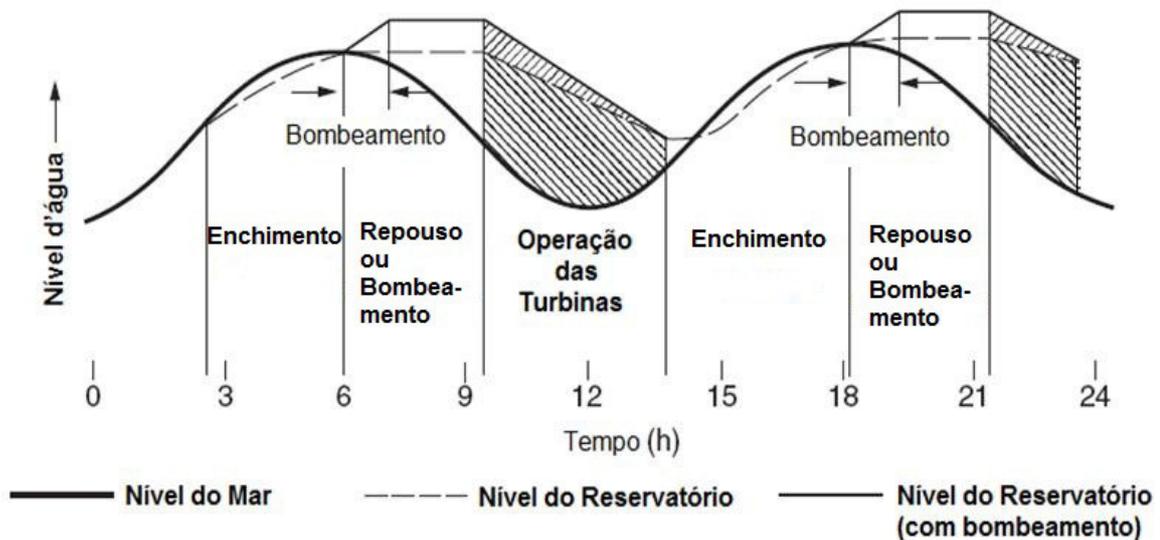


Figura 2.14. Esquema de geração em maré vazante [25].

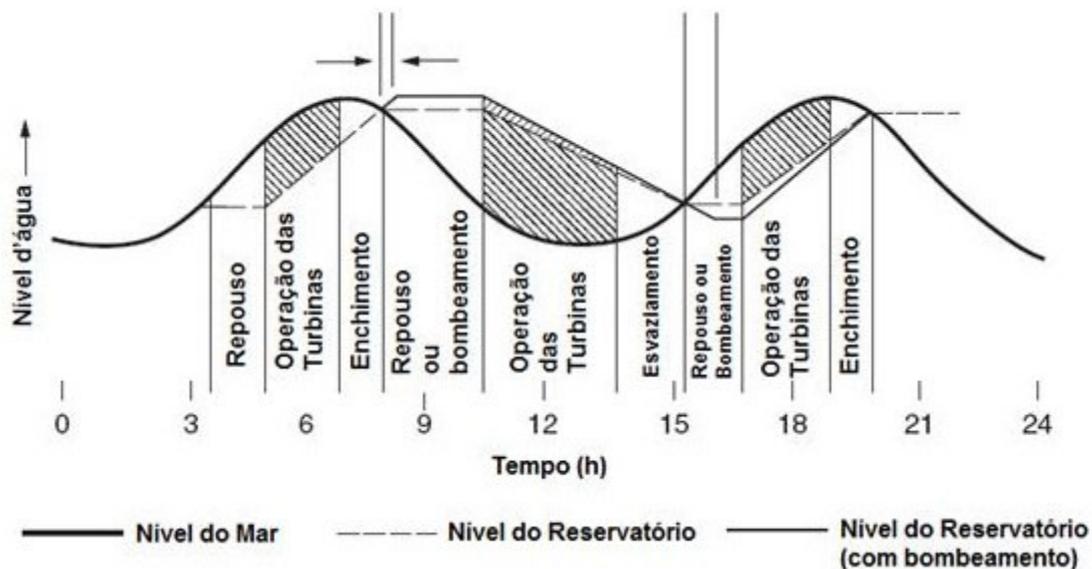


Figura 2.15. Esquema de geração em *efeito-duplo* [25].

Os períodos de bombeamento ilustrados nas Figuras 2.14 e 2.15 são uma estratégia utilizada para elevar a produção da usina maremotriz através do incremento da altura da queda d'água. Além disso, esta técnica torna-se bastante útil para aumentar a flexibilidade da operação da usina.

2.8. Aspectos Ambientais

Embora a exploração da energia maremotriz para geração de eletricidade não produza nenhuma poluição direta ao meio-ambiente, é importante ressaltar que os efeitos da construção e operação de uma usina maremotriz em um estuário devem ser cuidadosamente avaliados, pois a sua instalação e operação pode modificar significativamente as características naturais do local. Além disso, as possíveis alterações nas atividades humanas locais também devem ser avaliadas.

A construção de uma barragem em um estuário pode resultar em efeitos diretos sobre o ecossistema local. Portanto, é importante ressaltar que tais efeitos devem ser considerados tanto no projeto e construção, quanto na operação da usina.

Alguns dos aspectos que devem ser analisados são as possíveis alterações na qualidade da água, ou seja, alterações nas características químicas da água, tais como oxigenação e

salinização; além da própria morfologia do estuário, que pode ser alterada devido às possíveis modificações nos regimes de sedimentação e erosão [30].

Um dos principais aspectos ambientais que devem ser verificados está relacionado às alterações no ecossistema do estuário. Estas alterações variam de acordo com o local, entretanto, podem ser formuladas levando-se em consideração os seguintes aspectos [25]:

- alterações na distribuição das espécies dentro do estuário;
- alterações na composição do grupo de espécies: algumas podem deixar de existir, enquanto novas espécies podem surgir;
- alterações nos ciclos de vida de algumas espécies: taxas de crescimento e reprodução, por exemplo.

Embora estes aspectos devam ser cuidadosamente verificados, vale destacar que a intensidade em que estes podem ocorrer, varia de um local para outro. Tomando-se como referência a usina maremotriz de La Rance, observou-se que os impactos mais significativos aconteceram apenas durante a fase de construção da barragem, onde o fluxo natural do estuário foi interrompido através de ensecadeiras, para a construção a seco da barragem. Após esta etapa, o próprio regime operacional da usina resultou na redução substancial destes impactos. Com relação ao ecossistema do estuário de La Rance, foram observadas algumas modificações ao longo dos anos até que um novo equilíbrio ecológico foi sendo alcançado [31]. Entretanto, estas modificações não causaram prejuízos às atividades pesqueiras na região [21].

Algumas soluções podem ser adotadas no sentido de amenizar os impactos socioambientais causados pela construção e operação de uma usina maremotriz. A exemplo da construção da usina de *Kislaya Guba* - Rússia, a utilização de elementos pré-fabricados em terra firme para a construção da barragem torna-se uma solução menos ofensiva ao meio-ambiente do que a utilização de ensecadeiras, tal qual utilizadas em La Rance. Além disso, a exemplo de La Rance, a utilização de eclusas pode conciliar a barragem ao tráfego de embarcações através do estuário [30].

2.9. Aspectos Econômicos

A avaliação econômica de um projeto de usina maremotriz deve ponderar tantos aspectos diretos quanto indiretos. Entre os aspectos diretos estão os custos de construção, operação e manutenção da usina, além dos benefícios promovidos pela própria geração de eletricidade. Os aspectos indiretos estão relacionados aos impactos ambientais e socioeconômicos associados à usina [25]. O desenvolvimento de atividades turísticas no entorno da usina e a utilização da barragem como via de acesso rodoviário são exemplos de benefícios indiretos.

Além da fonte primária ser virtualmente inesgotável, os custos associados à operação da usina são mínimos, portanto, os investimentos em construção e operação podem ser mais facilmente recuperados através de *economia de combustíveis* [30].

Ao contrário de outras fontes energéticas, a geração maremotriz está livre de alguns problemas tais como: emissões de gases poluidores, poluição da água, derramamentos de óleo, produção de resíduos. Embora sejam primordialmente ambientais, estes aspectos também devem ser observados sob o ponto de vista econômico em quaisquer projetos de geração de energia. Além disso, a vida útil de uma usina maremotriz pode chegar de duas a três vezes a de uma térmica ou nuclear [21].

A viabilidade econômica de uma planta maremotriz está bastante atrelada às demais fontes energéticas disponíveis. A energia maremotriz pode ser bastante competitiva se compara àquela proveniente de usinas a carvão, entretanto, esta competitividade é reduzida se compara às hidrelétricas convencionais. Portanto, o custo da geração maremotriz e consequentemente a sua viabilidade, varia de um país para outro, de acordo com as diversas condições energéticas, sociais e ambientais [30].

2.10. Principais Usinas Maremotrizes em Operação

A seguir é apresentada uma breve descrição das principais usinas maremotrizes atualmente em operação.

2.10.1. Usina Maremotriz de La Rance

Segundo [21]- [24], os custos de implantação da usina maremotriz de La Rance corresponderam a 100 milhões de dólares divididos em 14 % em custos excedentes, 55 % em equipamentos, 13 % em enscadeiras e 28 % em obras civis. A barragem foi construída no local mais estreito do estuário e possui uma extensão aproximada de 910 m e uma largura de 53 m. Além disso, a barragem é utilizada como elo rodoviário entre as cidades de Dinard e St. Malo, reduzindo a distância entre elas para 35 km. Na Figura 2.16 é mostrado um layout geral da barragem da usina.

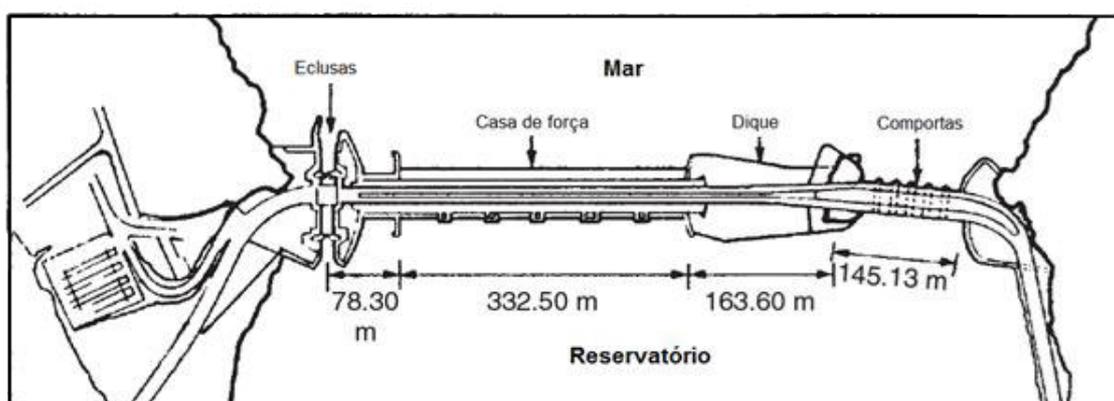


Figura 2.16. Layout geral da usina maremotriz de La Rance [25].

No interior da usina estão 24 unidades turbogeradoras do tipo bulbo de 10 MW cada uma, totalizando 240 MW de capacidade instalada. Cada unidade contém um alternador de 5 m de diâmetro diretamente acoplado a uma turbina do tipo KAPLAN, sendo que esta pode funcionar tanto como turbina quanto como bomba. A turbina KAPLAN possui em diâmetro de 5,35 m e rotação nominal de 94 rpm. Na Figura 11 é representado o corte transversal da seção de turbinas da usina. Três transformadores de 80 MVA elevam a tensão para 225 kV e entregam a energia produzida a uma subestação localizada a 300 m do lado oeste da usina. Três linhas transmitem a energia produzida a Paris, Aube, Rennes, Landeneau e Brest [21].

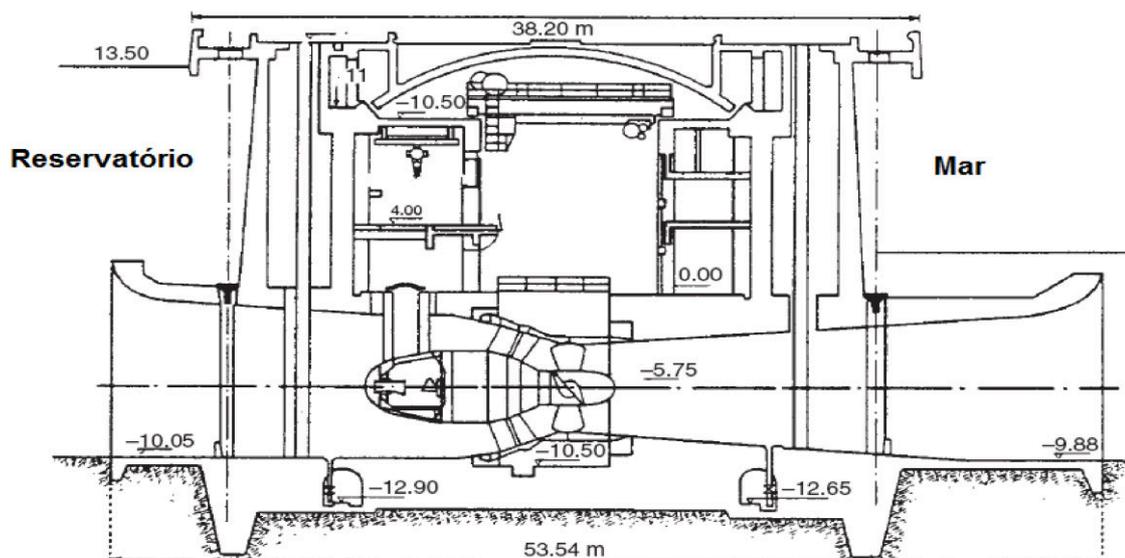


Figura 2.17. Corte transversal da seção de turbinas da usina de maremotriz de La Rance [25].

A geração de eletricidade ocorre em ambos os sentidos (operação em *duplo – efeito*). Além disso, a energia produzida obtida é acrescida utilizando bombeamento.

A utilização das turbinas para fins de bombeamento pode acontecer em ambos os sentidos, sendo que a potência máxima consumida por cada unidade é de 6 MW. A produção total da usina pode chegar a 604 GWh ao ano, sendo que 60 GWh são usados para fins de bombeamento. Portanto, a produção líquida corresponde a 544 GWh ao ano [24].

Ao longo dos anos de operação da usina, diversas melhorias em equipamentos e estratégias de operação foram implementadas. Além das manutenções nos geradores e turbinas bulbo (desgastes ao longo dos anos devido às constantes partidas tornaram necessárias algumas ações de reparos), sistemas de controle automáticos foram agregados de modo a garantir um maior grau de confiabilidade de operação da usina e uma resposta mais sensível às condições externas [21].

Em 1970 o programa AGRA (*Algorithme de Gestion de la Rance*) foi colocado em operação, sendo que o seu mais novo modelo operacional foi introduzido em 1982. As principais características do programa incluem otimização por programação dinâmica, modularidade e interface gráfica [21]. Na Tabela 2 é mostrada a duração relativa dos diferentes modos de operação das turbinas da usina de La Rance.

Tabela 2.3. Duração relativa dos diferentes modos de operação das turbinas da usina maremotriz de La Rance [21].

Modo de Operação	%
Geração Direta	56,00
Geração Reversa	11,70
Bombeamento Direto	14,70
Bombeamento Reverso	1,40
Escoamento (direto ou reverso)	16,20
Total	100,00

Durante as marés de maiores amplitudes – maiores que 9 m ou 10 m – o bombeamento torna-se dispensável, pois o volume e queda d’água disponíveis possibilitam a operação da usina em sua capacidade nominal. Ainda nestas condições de marés, a geração reversa pode ou não acontecer, dependendo das necessidades de despacho. Durante as marés de quadratura, a geração torna-se do tipo *duplo-efeito*. Neste caso, o bombeamento ocorre em ambos os modos de operação [24].

2.10.2. Usina Maremotriz de Annapolis Royal

A usina maremotriz de Annapolis Royal foi construída na década de 80 utilizando-se uma barragem já existente no rio Annapolis, Canadá. Ao contrário de La Rance e Kislaya Guba, o modelo de turbogerador utilizado é *STRAFLO* e não bulbo. A potência instalada da usina é de 17, 8 MW [25].

Devido a questões ambientais, o nível do reservatório deve ser mantido a níveis abaixo do que foi inicialmente planejado. Desta forma, a produção anual da usina é menor do que os 50 GWh estimados inicialmente. Apesar desta restrição operacional, a usina é despachada comercialmente e sendo, portanto, considerada um projeto bem sucedido [25]. Na Figura 2.18 é ilustrada a usina maremotriz de Annapolis Royal.



Figura 2.18. Vista aérea da usina maremotriz de Annapolis Royal [32].

2.10.3. Usina Maremotriz de Kislaya Guba, Rússia

A usina maremotriz de Kislaya Guba é considerada um caso especial de exploração da energia maremotriz. Construída na década de 60 no mar de Barents, a usina possui apenas 400 kW de potência instalada e foi idealizada para fins experimentais apenas: condições climáticas bastante severas e pequenas amplitudes de marés (1,3 a 3,9 m) tornaram a usina inviável para fins comerciais. Além disso, a usina permaneceu quase uma década fora de operação. Isto fez com que as características ambientais do estuário fossem profundamente alteradas durante aquele período. Na Figura 2.20 é apresentada uma ilustração da usina.



Figura 2.19. Vista da usina maremotriz de Kislaya Guba [33].

2.10.4. Usina Maremotriz de Sihwa Lake, Coréia do Sul

A usina maremotriz de Sihwa Lake – Figura 2.21 – foi comissionada em 2011, tornando-se a maior usina maremotriz do mundo. As principais características dessa nova planta maremotriz são as seguintes:

- potência instalada: 254 MW;
- 10 turbinas do tipo bulbo sendo que cada uma tem 25,4 MW de potência nominal;
- estimativa de geração anual: 552,7 GWh;
- período de construção entre 2003 e 2010;
- custo de construção: US\$ 355,1 mi (US\$ 1,4mi/MW).



Figura 2.20. Esquema ilustrativo da usina maremotriz de Sihwa Lake [34].

O projeto da usina contou com a existência de uma barragem construída em 1994 para fins agrícolas e de saneamento. Após a construção da barragem e formação do lago Sihwa, foram constatadas profundas alterações nas características físico-químicas da água devido a poluição industrial. Portanto, além de geração de eletricidade, a usina serviria para dar suporte à melhoria da qualidade da água do lago, além de proporcionar uma revitalização no local, conforme propostas apresentadas na Figura 2.21. Outra característica importante desse projeto é o fato de que a geração da usina ocorre durante a maré enchente apenas. Embora seja uma estratégia operacional menos eficiente, essa escolha foi feita a fim de adequar a operação da usina às demais funções da barragem [35].

2.11. Novos Projetos e Tendências

Embora existam relativamente poucos projetos de usinas maremotrizes implementados em todo o mundo, diversos países tem se despertado para a possibilidade de exploração desta fonte energética em seus litorais. Alguns países tais como Egito [36], Índia [37], Rússia [38], Malásia [39], Colômbia [40], Austrália [41], Reino Unido [42] e Brasil [5] [43] [44] já apresentam estudos e propostas sobre as possibilidades de exploração da energia maremotriz em seus mares.

Um dos principais projetos de geração maremotriz atualmente em andamento é no estuário de Severn, no Reino Unido. Além da possibilidade de utilização de múltiplos reservatórios, estima-se uma geração na ordem de 8.640 MW de potência [42].

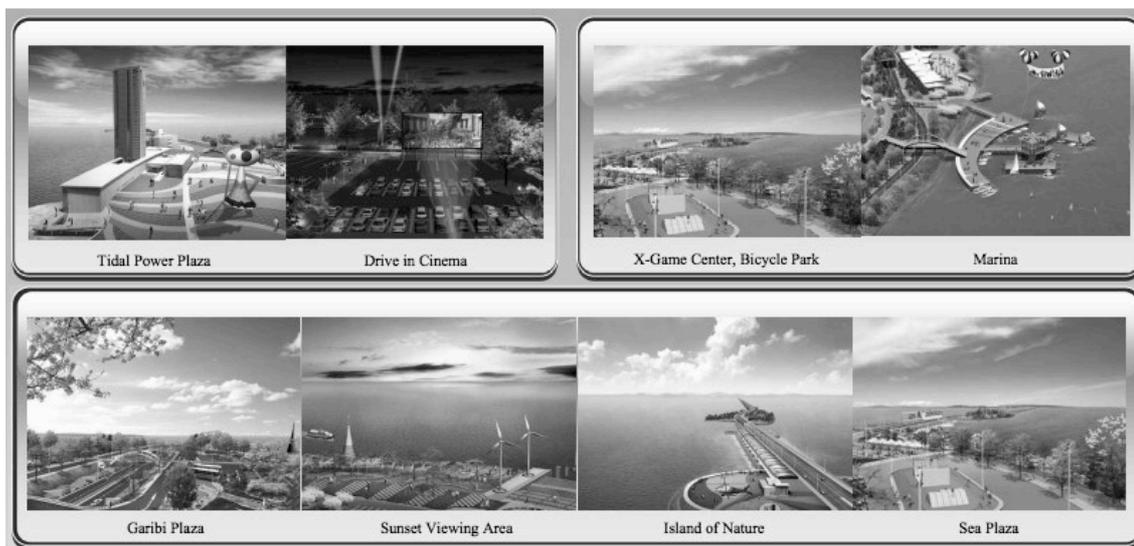


Figura 2.21. Proposta para revitalização da região próxima à usina maremotriz de Sihwa Lake [45].

Outra vertente bastante pesquisada atualmente e que mostra-se bastante promissora é a utilização as correntes de marés para a geração de eletricidade. Este processo acontece através de sistemas modulares de turbinas colocadas diretamente sobre o leito do mar.

Possivelmente uma das principais desvantagens do aproveitamento das correntes de marés para geração de eletricidade é a limitação da energia disponível, pois neste caso as marés apresentam uma densidade energética menor do que no caso da utilização de gradiente. Entretanto, alguns aspectos tais como o menor custo de instalação e os baixos impactos ambientais tem tornado essa opção tecnológica bastante atrativa sob vários aspectos.

Embora a exploração comercial das correntes de marés está em desvantagem com relação à exploração através de barragens [46], esta alternativa tecnológica também apresenta uma tendência bastante promissora e tem sido bastante pesquisada e também considerada uma nova alternativa para novos possíveis projetos [47] [48] [49].

O Projeto *SeaGen* é um dos exemplos de aproveitamentos da correntes de marés para geração de eletricidade. Em 2008, um protótipo de 1,2 MW foi instalado em Stranford Lough, Reino Unido. O diâmetro do rotor é de 16 m, sendo capaz de gerar anualmente cerca de 3800 MWh [50]. Na Figura 2.22 é ilustrado o protótipo *SeaGen*.



Figura 2.22. Protótipo da turbina *SeaGen* [50].

A companhia *Hammerfest Strom* desenvolveu o projeto chamado *Blue Concept*, apresentado na Figura 2.23, que consiste em um protótipo pré-comercial de turbinas de até 1 MW de potência nominal para o aproveitamento das correntes de marés. Com o objetivo de reduzir os custos da geração maremotriz, a companhia pretende testar seus protótipos em Islay e Ducany, Escócia, através de *arrays* de turbinas com potências nominais de 10 MW e 95 MW, respectivamente [51].



Figura 2.23. Protótipo da turbina *Hammerfest Strom* [51].

Atualmente, novos estudos tem proposto a integração entre geração maremotriz e geradores eólicos *off-shore*. Modelos destes sistemas híbridos tem sido simulados de modo a se prever a interação dinâmica entre ambas as fontes, bem como o sistema elétrico em que estão conectadas [52] [53] [54].

Um dos principais fatores que tem impulsionado a exploração maremotriz são os avanços alcançados por parte dos equipamentos eletromecânicos usados na conversão da energia das marés. Esta situação permite a exploração até mesmo em situações de baixa queda, o que constitui um ponto bastante favorável para esta forma de geração de energia.

Capítulo 3

Barragem do Bacanga: Histórico e Perspectivas

3.1. Breve Histórico

As obras de construção da barragem do Bacanga iniciaram-se no final da década de 60 e foram concluídas no início da década de 70. Os principais motivos que justificaram a construção da barragem são listados a seguir:

- reduzir a distância até o Porto de Itaqui de 36 km para apenas 9 km. Isto era um aspecto significativo para proporcionar o desenvolvimento do Porto;
- formação de um lago artificial para fins de saneamento e urbanização da cidade;
- geração de eletricidade.

Embora a principal motivação para a construção da barragem tenha sido a redução a distância até o Porto de Itaqui, já se pensava também em utilizar a barragem para a geração de eletricidade como uma usina maremotriz. Possivelmente esta forma alternativa de utilização da barragem foi motivada na época pela recém construída usina maremotriz de La Rance. Em 1968 começou a ser discutida a possibilidade da construção da usina maremotriz anexa à barragem, o que justifica as dimensões do vertedouro existente na barragem [18]. Na Figura 3.1 é apresentada uma vista aérea do estuário [55] e na Figura 3.2 observa-se com mais detalhes a barragem do Bacanga.

O projeto executivo da barragem foi elaborado entre os anos de 1966 e 1967 e previa a implantação de uma eclusa junto ao vertedouro, que teria a função de manter a navegabilidade entre o mar e o reservatório [18]. No entanto, esta obra não foi realizada.

O projeto de elaboração da barragem compreendeu as seguintes características principais [18]:

- barragem parcialmente construída com aterro hidráulico até a cota +6,0 m, complementado com solo lançado até a cota +8,4 m;
- em uma das extremidades, um vertedouro de concreto de 42,5 m de largura, com três vãos de 12,5 m e munidos de comportas de setor de 6,0 x 12,5 m, permitindo escoamento dirigido e controlado. As comportas são acionadas por um mecanismo de levantamento elétrico preferencialmente quando o nível do reservatório está em sua cota máxima;
- a construção de um aterro para possibilitar a acumulação da água até a cota 6,5 m, definida como sendo a cota máxima da preamar.
- construção de uma ponte em concreto armado sobre o vertedouro para assegurar o acesso rodoviário através a barragem.



Figura 3.1. Vista aérea do estuário e barragem do Bacanga [55].

Entre os anos 1977 e 1978, algumas empresas foram mobilizadas para estudar diferentes aspectos relacionados ao aproveitamento energético do estuário. Após a visita de técnicos brasileiros às usinas maremotrizes em operação e em construção na Europa e no Canadá, foram consideradas duas alternativas de aproveitamento [18]:

- geração através de turbogeradores do tipo bulbo;
- geração através de turbogeradores do tipo *Straflo*.

O principal objetivo destes estudos era o aproveitamento da barragem existente no estuário para instalar a usina maremotriz e, conseqüentemente, familiarizar engenheiros e técnicos brasileiros com a utilização da energia das marés em águas equatoriais e proporcionar à indústria nacional a experiência na fabricação de equipamentos para usinas maremotrizes [18].



Figura 3.2. Vista aérea da barragem do Bacanga [56].

A possibilidade de se utilizar turbogeradores do tipo *Straflo* se deveu principalmente ao fato de que as características encontradas na usina de *Annapolis Royal* são semelhantes às aquelas encontradas na barragem do Bacanga e, conforme mencionado na Seção 2.10.2, a usina canadense utiliza turbogeradores do tipo *Straflo*. Além disso, os custos associados aos turbogeradores *Straflo* são inferiores aos do tipo bulbo [18].

Inicialmente o anteprojeto definia para a primeira alternativa de aproveitamento o uso de 6 turbogeradores do tipo *bulbo* de 4500 kW cada e funcionando em regime de *efeito-simples*. Neste caso, as estimativas de geração seriam da ordem de 56300 MWh/ano. Para a segunda alternativa de aproveitamento, foi definida a utilização de três turbogeradores do tipo *Straflo* de 11340 kW cada e funcionando em regime de *efeito-simples*. Neste caso, as estimativas de geração seriam da ordem de 59600 MWh/ano [18].

Estudos realizados na década de 80 em que foram levados em consideração alguns parâmetros tais como a cota máxima do reservatório e as características das marés da baía de São Marcos, levaram a concluir que [57]:

- não seria tecnicamente viável a operação da usina em cotas máximas inferiores a 4,5 m;
- a geração da usina poderia ser consideravelmente elevada caso o regime de operação fosse tipo efeito-duplo integrado a um sistema de comportas e/ou bombeamento. Isto possibilitaria um incremento em energia gerada na ordem de 60 %. Além disso, a elevação da cota máxima utilizável do reservatório de 4,5 m para 5,5 m representaria um ganho de energia na ordem de 15000 MWh/ano.

Após a conclusão do planejamento da usina, foram observados alguns aspectos físicos que ocorreram ao longo dos anos 70 que comprometeriam a execução do projeto em sua forma original [18]:

- a Avenida Médici, inaugurada em 1973 e que margeia o reservatório, apresenta trechos em cotas inferiores à cota máxima da preamar. Isto obrigou que o reservatório fosse mantido em cotas bastante abaixo dos valores inicialmente esperados;
- consequentemente, a ocorrência de ocupação urbana desordenada em áreas do reservatório que anteriormente eram alagadas pela preamar agravaram o problema;
- carência de manutenção nos equipamentos e o uso irregular das comportas contribuíram para um acidente envolvendo a comporta de vão central em 1976. Isto ocasionou a entrada e saída desordenada de água do reservatório;

- desde a década de 80, ainda em decorrência do acidente na comporta, as cotas da barragem fixaram-se em valores muito abaixo dos valores inicialmente esperados, causando eventuais alagamentos nas áreas ocupadas.

A implantação da usina em seu projeto inicial deveria considerar a cota máxima utilizável próxima à de preamar (6,5 m). Isto se fazia necessário para que fosse possível alcançar uma boa relação entre a potência instalada, energia gerada e custos associados. Entretanto, diante do novo cenário físico em que se encontrava a barragem, seria necessária a execução de obras de proteção tanto para a Avenida quanto para os bairros marginais.

Estudos realizados posteriormente para avaliar este novo cenário revelaram que, se a cota máxima do reservatório for mantida nos valores atuais (aproximadamente 4,5 m) a energia gerada será pouco significativa, o que tornaria o projeto economicamente inviável. No entanto, caso estes níveis fossem elevados aos valores originais (6,5 m), haveria um ganho de energia gerada bastante significativo (embora fossem necessárias proteções contra alagamentos tanto para a Avenida quanto para os bairros).

3.2. Novas Perspectivas

Embora as perspectivas atuais quanto ao aproveitamento do estuário do Bacanga para geração de eletricidade não sejam tão otimistas quanto na época da construção da barragem, existe atualmente o interesse estratégico da implantação de uma usina-piloto para fins de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. A motivação está baseada na existência de novas tecnologias para exploração de baixas quedas, a falta de conhecimento no Brasil sobre o tema e a escassez de recursos humanos. Isto contrasta com o potencial maremotriz disponível na região norte e com a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira para as próximas décadas.

A usina-piloto maremotriz do Bacanga permitirá gerar subsídios para futuros projetos de implementação de aproveitamentos de baixas quedas. Outro benefício será a formação de recursos humanos especializados no estado do Maranhão, além de contar com o apoio de instituições de pesquisa envolvidas com este tema.

Além disso, a instalação do laboratório maremotriz e da usina piloto provocará uma revitalização da área, através da recuperação ambiental e paisagística, transformando-a em

atrativo turístico que resultaria na inserção da população local, criação de empregos e geração de renda [18].

Iniciativas práticas têm sido tomadas pelo MCTI/CNPq, com o lançamento em 2010 de um edital específico para exploração de energias do mar. Em 2005, o MME/PNUD encomendou à UFMA estudos específicos na região de Turiaçu.

Em decorrência deste fomento à pesquisa e desenvolvimento em energias do mar, a UFMA junto com a UFRJ e UNIFEI propuseram um projeto focalizando estudos com vistas à instalação de um usina piloto do Bacanga, atividades que estão em andamento, com previsão de conclusão em outubro de 2013.

Capítulo 4

Estratégias de Operação Ótima de uma Usina Maremotriz

4.1. Introdução

Embora a geração maremotriz apresente algumas vantagens em relação a outras fontes renováveis de energia, tais como a alta previsibilidade da fonte primária, a estratégia de despacho de uma usina maremotriz torna-se complexa devido alguns fatores:

- intermitência da fonte primária acontece a cada ciclo de poucas horas, seguindo o ciclo natural das marés;
- reservatório reduzido implica a necessidade de gerenciamento do seu nível em uma escala de tempo bem menor do que em uma hidroelétrica convencional;

Uma usina maremotriz precisa determinar sua estratégia de oferta para o mercado de eletricidade a curto-prazo. Para isso, é necessário primeiro determinar sua própria estratégia de operação de tal forma que se possam criar ofertas apropriadas e assim alcançar sua produção ótima dentro do Mercado [58]. Desta forma, o foco deste trabalho consiste em propor estratégias alternativas de despacho de uma usina maremotriz, adotando como estudo-de-caso o estuário do Bacanga, em São Luís.

4.2. Formulação Geral do Problema

Um dos principais aspectos que podem definir a viabilidade de um projeto de usina maremotriz são as estimativas anuais de geração de eletricidade. No entanto, estimativas precisas da geração anual devem considerar que a geração energética da usina varia de acordo com os níveis do mar e do reservatório. Além disso, as características operacionais dos turbogeradores também exercem forte influência no processo de geração [25].

Os principais aspectos relacionados à otimização da geração maremotriz consiste basicamente em três, sendo que os dois primeiros fazem parte do planejamento da usina: (1) dimensionar e estipular as características dos turbogeradores de acordo com as condições do local; (2) determinar a quantidade de comportas e unidades turbogeradoras que devem ser instaladas visando-se a máxima geração energética pela usina maremotriz; (3) a terceira etapa corresponde à operação otimizada no tempo das unidades instaladas.

Nas etapas de dimensionamento da usina, para cada local específico, as principais variáveis a serem analisadas podem ser divididas em dois grupos: aquelas que estão diretamente relacionadas aos custos da usina e aquelas que estão diretamente relacionadas à operação da usina, conforme descritas a seguir [25]:

- variáveis diretamente relacionadas aos custos da usina:
 - projetos de diques e comportas;
 - projeto de turbogeradores;
 - quantidade de turbinas e comportas.

- variáveis diretamente relacionadas à operação das usinas:
 - instante inicial da geração;
 - instante final da geração;
 - instantes de realização de bombeamento, caso seja considerado;

Com base nestes aspectos, a metodologia básica para a determinação da operação otimizada de uma usina maremotriz consiste em: (1) Modelagem matemática dos principais elementos da usina de modo a determinar a geração máxima da usina dados diferentes dimensionamentos de comportas e turbogeradores; (2) Utilização do modelo obtido a partir do item 1 para obter estimativas de geração sob diferentes condições operacionais [25].

As variações dos níveis de água durante um ciclo de geração em maré vazante é ilustrado na Figura 4.1. Nota-se que o início do processo de geração acontece no ponto A, quando a queda d'água disponível é H_S , e continua até o ponto B, quando a queda d'água é igual a H_F . Neste ponto a passagem de água através da turbina é interrompida, o nível do reservatório permanece constante e o nível do mar continua a aumentar. No ponto C, os níveis do mar e do reservatório tornam-se iguais e as comportas são abertas para permitir o

reenchimento do reservatório. Dependendo do projeto das turbinas, estas podem ser utilizadas para ajudar no processo de reenchimento do reservatório. Este processo prossegue até que os níveis se tornem iguais novamente, no ponto D, quando as comportas são fechadas e o nível do reservatório permanece em seu nível máximo até que o processo de geração se inicie novamente. Vale destacar que, para se obter a máxima geração de energia, a operação das turbinas além dos limites indicados em H_S e H_F não é necessária. Portanto, existem infinitos modos de operação da usina, cada modo com seus respectivos instantes inicial e final de geração, no entanto, apenas um modo resultará na máxima geração de energia [25].

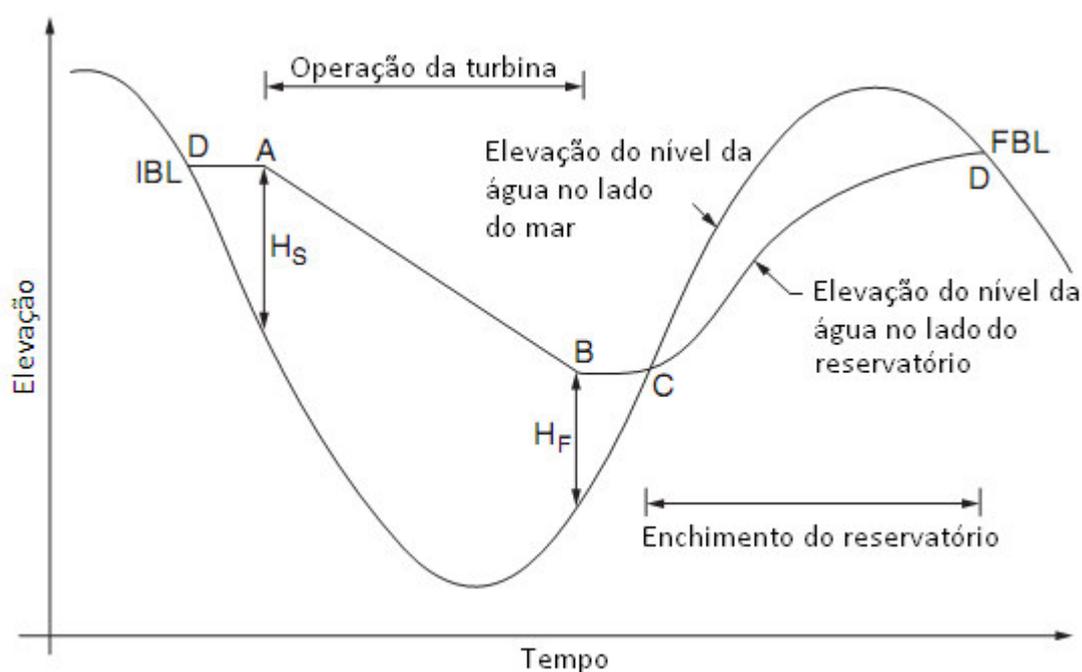


Figura 4.1. Parâmetros para a modelagem matemática da geração em maré vazante [25].

A partir de observações feitas na Figura 4.1, é possível deduzir que, se uma pequena quantidade de turbinas for utilizada, apenas uma pequena quantidade de água será retirada do reservatório e, portanto, o nível do reservatório irá permanecer relativamente alto. Conforme pode ser observado na Figura 4.2, se uma quantidade maior de turbinas for utilizada, uma quantidade maior de água será retirada do reservatório e, portanto, o nível do reservatório irá decair a uma taxa maior.

Através de um modelo matemático computacional, é possível produzir estimativas de produção energética a partir de diversas combinações de dimensionamento de turbinas e de

comportas. Dessa forma é possível definir a configuração que melhor se adapta às características do local em termos de eficiência operacional.

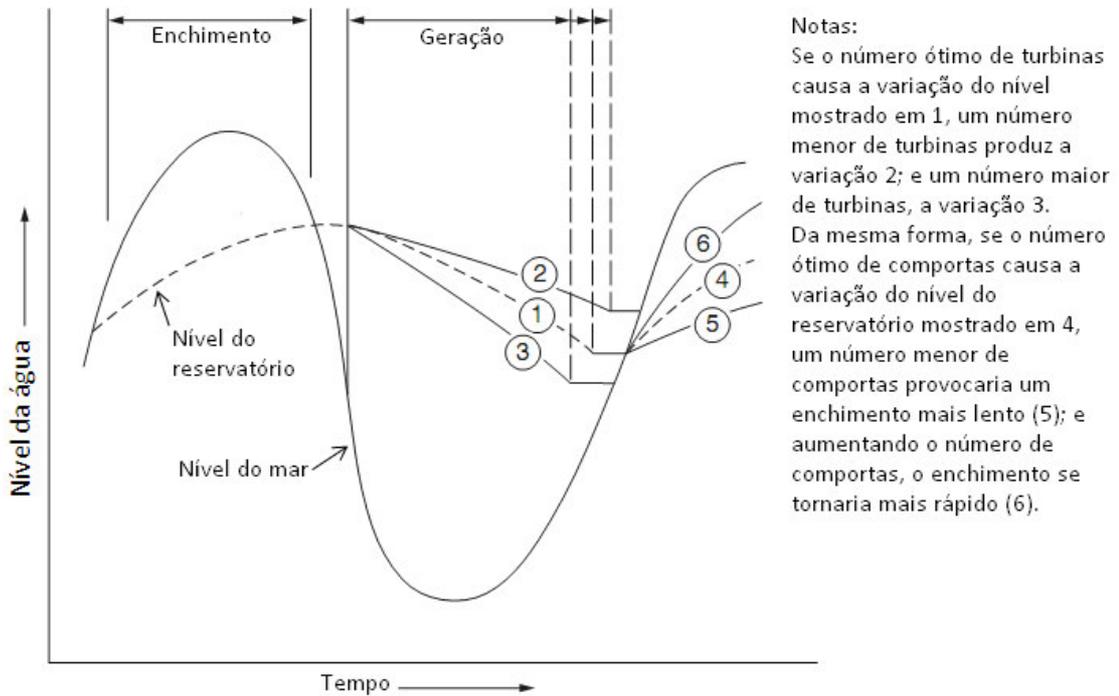


Figura 4.2. Efeitos da variação do número de turbinas e comportas no nível do reservatório [25].

Em [58] é proposto um modelo de otimização que visa encontrar o ponto de operação ótima de uma usina maremotriz. Diferentes modos de operação da usina são levados em consideração. Além disso, a metodologia apresentada fornece uma ferramenta para o despacho da usina maremotriz de modo que o máximo lucro é obtido através da venda de eletricidade, além de atender às restrições operacionais de uma usina maremotriz. Este problema de otimização, que é modelado como sendo do tipo inteiro e linear, é resolvido através de *softwares* de otimização comercialmente disponíveis.

A usina maremotriz de La Rance, em operação desde 1967, necessita de sofisticados modelos computacionais para gerenciar a operação ótima de suas 24 turbinas e 6 comportas. Em 1970 o programa AGRA (*Algorithme de Gestion de la Rance*) foi colocado em operação, sendo que o seu mais novo modelo operacional foi introduzido em 1982. Para este novo modelo do AGRA, foram levados em consideração os seguintes aspectos [59]:

- o algoritmo deve levar à solução ótima independentemente da situação;

- o algoritmo deve usar programação moderna (Programação Dinâmica) e que leve aos resultados finais em um menor tempo possível;
- o programa deve ser particularmente “legível” e, portanto, facilmente acessível para novos usuários. Esta característica possibilita futuros desenvolvimentos ao programa;

Em [60] é proposto um algoritmo baseado em Programação Dinâmica cujo objetivo é determinar o esquema de operação ótima de uma usina maremotriz de tal maneira que seja possível maximizar a geração energética da usina em cada ciclo de maré. A partir da modelagem de consecutivas marés, o algoritmo é usado para calcular a energia anual gerada pela usina em diferentes configurações operacionais. Deste modo, é possível determinar a configuração operacional que resultaria em um menor custo da energia produzida pela usina. A maximização da energia gerada em um ciclo de maré é feita a partir da escolha do tempo ótimo da operação das turbinas e das comportas.

Diferentemente da maioria das abordagens existentes na literatura, nesta dissertação de mestrado é apresentada uma metodologia de despacho de uma usina maremotriz, que além de buscar maximizar a energia gerada pela usina em um dado período de tempo, busca simular a operação temporal da usina para o intervalo de tempo desejado através de uma modelagem mais detalhada dos principais elementos que influenciam na operação da usina, conforme serão descritos na Seção 4.3. Esta simulação em tempo real da usina traz vantagens no que tange ao ingresso da usina como um agente no mercado de energia elétrica. Utilizou-se como estudo-de-caso o estuário do Bacanga para validação da metodologia apresentada.

A técnica computacional selecionada para resolver este problema de otimização é o *Algoritmo Genético* devido a sua versatilidade e ampla capacidade de resolução de problemas de otimização diversos. O ambiente computacional utilizado é o MatLab.

A partir das características físicas do estuário do Bacanga descritas no Capítulo 3 e das características dos principais elementos que compõem uma usina maremotriz, conforme serão descritos na Seção 4.3, o problema em questão pode ser formulado matematicamente da seguinte maneira:

$$\mathbf{max} E_T \tag{4.1}$$

sujeito a:

$$h_{min} \leq res \leq h_{max} \quad (4.2)$$

$$Q \leq Q_{max} \quad (4.3)$$

$$h \geq 1 \quad (4.4)$$

$$nt_i \leq nt_{i+1} \quad (4.5)$$

$$T_s = 30 \text{ min} \quad (4.6)$$

sendo:

E_T : Energia gerada pela usina em um intervalo de tempo T ;

h_{min} : altura mínima que pode ser alcançada no reservatório (2,5 m);

h_{max} : altura máxima que pode ser alcançada no reservatório (4,5 m);

res : nível do reservatório, em metros;

Q : vazão instantânea através da turbina;

Q_{max} : vazão máxima através da turbina;

h : altura da queda d'água disponível, em metros;

nt_i : número de turbinas em operação no estágio i ;

T_s : tempo mínimo de atuação de cada estágio do esquema de despacho durante o período de geração.

A restrição descrita na Equação 4.2 está relacionada às limitações operacionais do reservatório descritas no Capítulo 3, ou seja, os limites inferior e superior da cota do reservatório devem ser considerados como critérios de parada na geração em maré vazante e em maré enchente, respectivamente.

As restrições descritas nas Equações 4.3 e 4.4 estão relacionadas às características operacionais dos turbogeradores conforme modeladas na Seção 4.3.3, ou seja, além dos critérios de parada do ciclo de geração definido através da restrição descrita na Equação 4.2, torna-se também necessário considerar que, quando a altura da queda d'água for menor do que 1 m, a geração deve ser finalizada.

As restrições descritas nas Equações 4.5 e 4.6 dizem respeito às características operacionais impostas à usina durante a execução do esquema de despacho. Em outras palavras, a restrição descrita na Equação 4.5 garante que o esquema de despacho de turbinas sempre seguirá uma quantidade crescente de turbinas comissionadas durante o período de geração, ou seja, durante um ciclo de geração sempre será permitido comissionar turbinas, e nunca decomissioná-las. Conforme mencionado na Seção 2.6, a operação cíclica dos turbogeradores impõe a estas fadigas maiores do que na geração hidroelétrica convencional, portanto, a restrição descrita na Equação 4.5 evita a possibilidade de que alguns turbogeradores operem ciclicamente por mais de uma vez durante um único ciclo de geração.

A restrição descrita na Equação 4.6 diz ao algoritmo que, durante o processo de geração, o esquema de despacho somente poderá ser alterado em intervalos mínimos de 30 minutos, ou seja, cada estágio do algoritmo tem a duração de 30 minutos. Essa restrição é importante para garantir que a usina não seja submetida a frequentes alterações em seu estado operativo durante o ciclo de geração.

O objetivo do algoritmo elaborado é maximizar a energia gerada através de um esquema de despacho sequencial de cada uma das turbinas que compõem a usina ao longo do processo de geração. Este processo é possível graças ao fato de que a potência gerada pelas turbinas é, entre outros fatores, proporcional à altura da queda d'água disponível. Portanto, seguindo-se um esquema de despacho sequencial das turbinas durante o processo de geração é possível utilizar de forma mais eficiente a altura da queda d'água disponível durante o processo de geração e conseqüentemente maximizar a energia gerada pela usina em um dado período. Além disso, as comportas utilizadas devem ser dimensionadas de tal modo que possam proporcionar uma vazão suficientemente grande para que se obtenha um rápido reenchimento do reservatório na geração em maré vazante.

Inicialmente foi elaborado um algoritmo para simulação da operação anual de uma usina sem a utilização de qualquer técnica de otimização, ou seja, trata-se de um *caso-base* que serviu como referência para os casos em que foi utilizada técnica de otimização. Para todos os casos, foram utilizados dados referentes ao estuário do Bacanga, o que torna o estudo-de-caso deste trabalho.

Na Seção 4.3 seguinte será feita uma descrição do algoritmo utilizado nas simulações do *caso-base*.

4.3. Descrição do algoritmo desenvolvido para o *caso-base*

Diversas metodologias têm sido apresentadas para a realização de estimativas de geração maremotriz. Geralmente tais métodos utilizam modelos bastante simplificados tanto da modelagem das marés quanto da modelagem do estuário [60] [61].

A metodologia desenvolvida neste trabalho utilizou modelos mais precisos tanto das marés quanto das características do estuário, em outras palavras, foi considerada uma série temporal que representa a variação das marés em sincroniza com a hora local e também uma relação entre o volume do reservatório e a sua cota.

4.3.1. Modelagem das Marés

Uma das principais vantagens da geração maremotriz é a alta previsibilidade da fonte primária. Isto se deve ao fato de que as marés estão relacionadas principalmente aos fenômenos astronômicos bastante conhecidos e previsíveis. Esta característica é uma das principais diferenças entre a geração maremotriz e outras fontes renováveis de energia e, portanto, deve ser utilizada da melhor forma possível.

Conforme mostrado na Seção 2.5, a principal técnica utilizada na modelagem matemática das marés é a *decomposição harmônica*. Embora não existam dados históricos de marés dentro do estuário do Bacanga, em [3] é apresentado um estudo detalhado das marés no terminal Ponta da Madeira, próximo ao estuário do Bacanga. Além disso, são apresentadas as principais componentes harmônicas que constituem as marés da Ponta da Madeira, conforme apresentadas no Anexo A - Principais Componentes Harmônicas de Marés no Terminal Ponta da Madeira. O valor médio das marés no terminal Ponta da Madeira é 3,17 m.

A partir das constituintes harmônicas apresentadas no Anexo A e utilizando-se a Equação 2.1, é possível recriar uma série temporal de variações de marés para qualquer período de tempo desejado. Através de um simples processo iterativo e manual, a série criada foi sincronizada com os dados de marés previstas para o ano de 2012 disponíveis nas Tábuas de Marés [62]. Desta forma, foi possível realizar as simulações de operação da usina de forma sincronizada com a hora local e com um grau de resolução escolhido para ser de 1 minuto.

Na Figura 4.3 observa-se o grau de semelhança entre a série gerada a partir da Equação 2.1 e os pontos preamar e baixa-mar disponibilizados pela Tábua de Marés [62] durante as primeiras horas do mês de Janeiro de 2012.

O uso da modelagem das marés da Ponta da Madeira para simulações no estuário do Bacanga se justifica pelo fato de que a mesma onda de maré se propaga por toda a baía de São Marcos, com poucas perdas de amplitude, apresentando pouca defasagem [3].

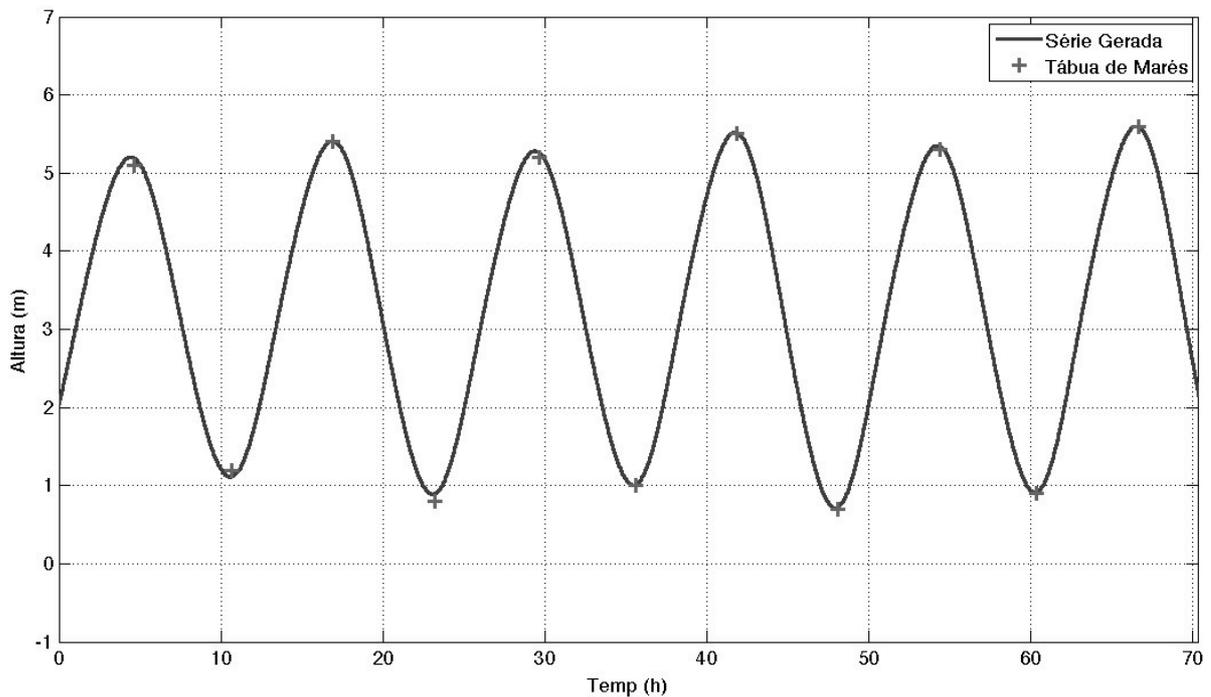


Figura 4.3. Semelhança entre a série de marés gerada e os dados da Tábua de Marés.

4.3.2. Modelagem do Estuário

Uma das principais diferenças entre aproveitamentos maremotrizes e as centrais hidroelétricas convencionais é o fato de que no primeiro caso o reservatório apresenta grandes variações de nível e volume d'água durante o processo de geração. Este regime de operação requer um modelo bastante preciso quanto a geografia do estuário. Portanto, estudos de batimetria se tornam de grande importância.

Ainda em [3] são também apresentados dados de batimetria realizada a montante e a jusante da barragem do Bacanga. Na Figura 4.4 é apresentada a relação *Cota X Volume* do estuário.

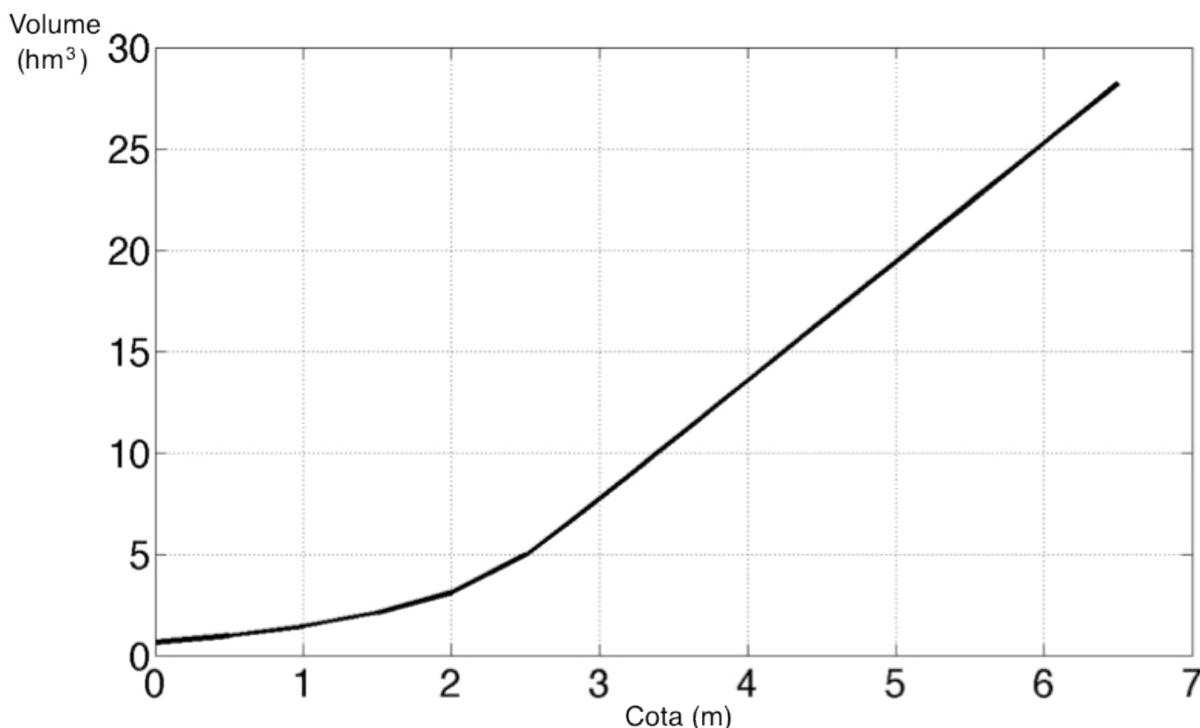


Figura 4.4. Relação entre cota e volume no estuário do Bacanga [3].

Conforme justificado no Capítulo 3, uma importante característica do estuário do Bacanga são as restrições de cotas mínima e máxima. Devido às ocupações urbanas no entorno do estuário, e também as atividades socioeconômicas existentes no local, tais como atividades pesqueiras, o reservatório não deve ser completamente cheio até a cota máxima de preamar, bem como não deve ser completamente seco até a cota mínima da baixa-mar. Estima-se que as cotas mínima e máxima do estuário devem permanecer entre 2,5 m e 4,5 m [3]. Portanto esta é uma importante restrição a ser considerada pelo algoritmo.

Nas colunas 1 e 2 da Tabela 4.1 são apresentados os mesmos dados da Figura 4.4. No entanto, para que estes dados possam ser devidamente utilizados no algoritmo, realizou-se a linearização desta relação em intervalos de 0,5 m, o que corresponde a cada uma das linhas da Tabela 4.1. Para cada intervalo são calculados os parâmetros a e b de uma equação da reta que melhor se ajusta aos pontos nas extremidades de cada intervalo.

Destaca-se que esta linearização é um processo nativo do algoritmo. Isto torna-se útil em situações em que seja necessária a utilização de novos dados referentes à relação *Cota X Volume* do estuário, inserindo-se apenas os dados nas colunas 1 e 2 da Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Relação *Cota X Volume* do reservatório e o conjunto de parâmetros *a* e *b* resultantes do processo de linearização.

Cota (m)	Volume (m³)	Parâmetro a	Parâmetro b
0	640000	-	-
0,5	990000	700000	640000
1	1460000	940000	520000
1,5	2100000	1280000	180000
2	3100000	2000000	-900000
2,5	4950000	3700000	-4300000
3	7720000	5540000	-8900000
3,5	10650000	5860000	-9860000
4	13580000	5860000	-9860000
4,5	16500000	5840000	-9780000
5	19430000	5860000	-9870000
5,5	22360000	5860000	-9870000
6	25280000	5840000	-9760000
6,5	28210000	5860000	-9880000

4.3.3. Modelagem dos Turbogeneradores

Neste estudo energético foram considerados alguns parâmetros típicos de turbinas do tipo Kaplan, com eficiência operacional da ordem de 90 %, vazão nominal de 70 m³/s e potência nominal de 2,1 MW [63]. A queda mínima de operação da turbina é de 1 m.

Na Figura 4.5 é apresentada a curva típica de rendimento do modelo de turbina utilizado.

Na Equação 4.7 é apresentado um modelo matemático utilizado para determinar a curva de rendimento η_t da turbina utilizada [63].

$$\eta_t = \left\{ 1 - \left[\alpha \left| 1 - \beta \frac{q}{q_n} \right|^x \right] \right\} \delta \quad (4.7)$$

Os parâmetros α , β , χ e δ são obtidos a partir da Tabela 4.2 [63] e Q e Q_n são as vazão instantânea e a vazão nominal da turbina, respectivamente.

Tabela 4.2. Principais parâmetros para diferentes tipos de turbinas [63].

	Hélice	Kaplan	Francis	Pelton
α	1,25	3,5	1,25	$1,31+0,025j$
β	1	1,333	$1,1173h^{\prime}u^{0,025}$	$(0,662+0,001j)^{-1}$
χ	1,13	6	$3,94-11,7h^{\prime}u^{-0,5}$	$5,6+0,4j$
δ	0,905	0,905	0,919	0,864

Portanto, os valores para tais parâmetros serão: $\alpha = 3,5$; $\beta = 1,333$; $\chi = 6$ e $\delta = 0,905$.

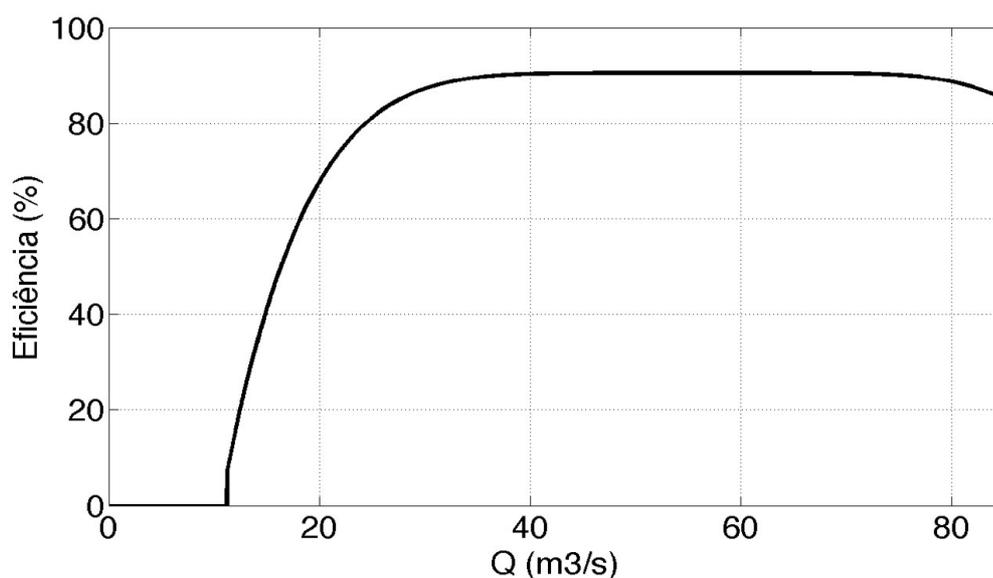


Figura 4.5. Curva de rendimento do modelo de turbina utilizado.

Observa-se na Figura 4.5 que as turbinas *Kaplan* tipicamente apresentam uma eficiência operacional elevada para uma ampla faixa de operação. Esta particularidade a torna a melhor opção para aproveitamentos de baixas quedas, como é o caso de usinas maremotrizes. Mais especificamente, uma turbina do tipo *Kaplan* pode operar de forma satisfatória em valores de vazão que podem variar desde $0,15 \times Q_n$ (Q_{\min}) até $1,1 \times Q_n$ (Q_{\max}) [63].

Na Figura 4.6 são apresentadas algumas curvas características de geração do modelo de turbina utilizado. As curvas características relacionam entre si os principais parâmetros envolvidos na operação de turbinas hidráulicas: Vazão (Q), Potência (P) e altura da queda d'água (h)

A potência P , em kW, gerada por cada uma dos turbogeradores é dado pela Equação 4.8.

$$\begin{cases} P = \eta_t ghQ & \forall Q \leq Q_{max} \\ P = \eta_t ghQ_{max} & \forall Q > Q_{max} \end{cases} \quad (4.8)$$

onde g é a aceleração gravitacional ($9,81 \text{ m/s}^2$).

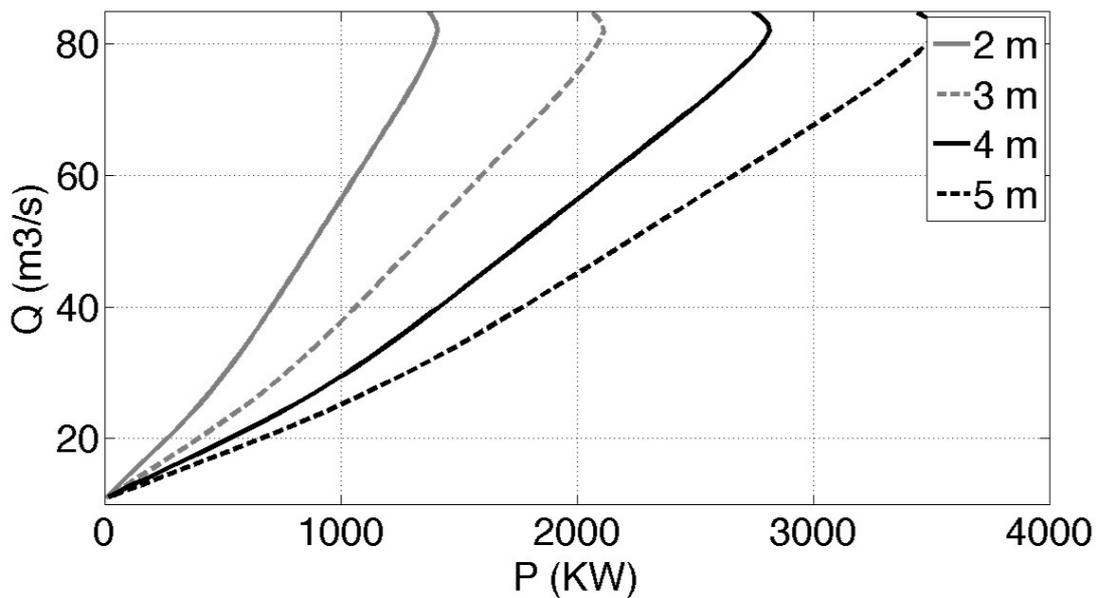


Figura 4.6. Curvas características de geração do modelo de turbina utilizado.

Os valores estimados para a vazão através das turbinas pode ser obtidos a partir da Equação 4.2.

A vazão instantânea através das turbinas é dada através da Equação 4.9.

$$Q = A_t * \sqrt{2gh} \quad (4.9)$$

em que h corresponde à altura em metros de queda d'água disponível e A_t corresponde a área em m^2 utilizável de cada turbina ($10,85 m^2$).

Finalmente, além da modelagem dos elementos mencionados anteriormente, a Equação 4.10 é usada para calcular a vazão através das comportas da usina durante o reenchimento do reservatório na operação em *efeito-simples*.

$$q = h_2 * b * \sqrt{\frac{2 * g * (h_1 - h_2)}{1 - \frac{h_2}{h_1}}} \quad (4.10)$$

onde:

q é a vazão instantânea através da comporta, em m^3/s ;

h_2 é a cota a montante da barragem, em metros;

b é o comprimento da comporta ($12,5 m$);

h_1 é a cota a jusante da barragem, em metros.

4.3.4. Fluxograma Utilizado no *caso-base*

Com base nos modelos descritos nas sessões anteriores e através do algoritmo representado no fluxograma da Figura 4.7, é possível estimar a potência gerada pela usina em intervalos discretos de um minuto durante cada ciclo de maré e por um período de um ano. A partir do perfil anual de potência gerada, estima-se outras grandezas elétricas e indicadores de desempenho da usina, como por exemplo a energia anual gerada e fator de carga da usina.

A partir do fluxograma básico apresentado na Figura 4.7, foram simuladas a operação da usina maremotriz no Bacanga durante um ano de operação tanto em *efeito-simples* quanto em *efeito-duplo*. No Capítulo seguinte serão apresentados os resultados destas simulações bem como algumas considerações necessárias.

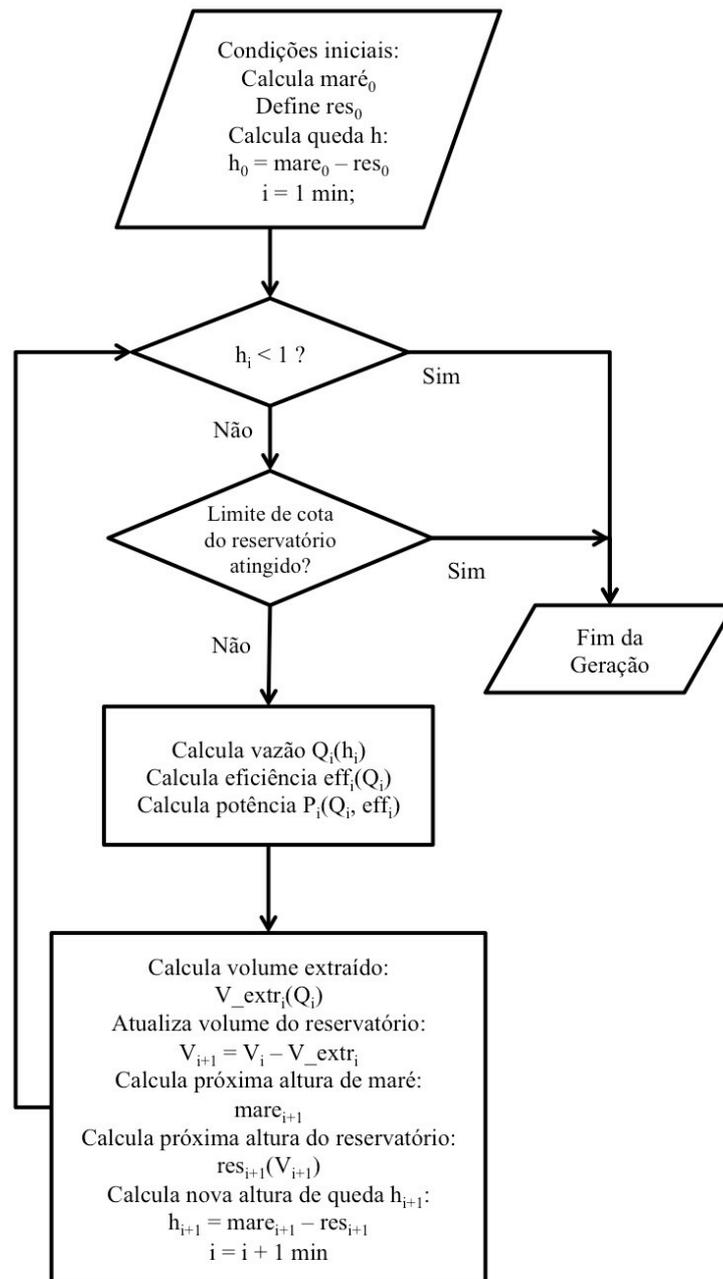


Figura 4.7. Fluxograma básico utilizado pelo algoritmo proposto para simulações do *caso-base*.

4.4. Otimização da geração de uma Usina Maremotriz– Geração em *Efeito Simples*

Nesta seção serão descritos os principais aspectos relacionados ao processo de despacho de uma usina maremotriz utilizando-se Algoritmo Genético (AG). O objetivo neste

caso consiste em maximizar a energia gerada pela usina durante um dado intervalo de tempo. Para tanto, o algoritmo deve buscar criar um esquema de despacho sequencial das turbinas que compõem a usina de tal maneira que haja o melhor uso possível do reservatório da usina. Nesses estudos, algumas considerações devem ser assumidas:

- assume-se que toda a energia gerada pela usina poderá ser absorvida pelo sistema elétrico ao qual está conectada;
- alguns aspectos de Engenharia Civil relacionados à construção e operação da usina que podem resultar em perdas hidráulicas, por exemplo, não são considerados, pois estes aspectos estão fora do escopo deste trabalho.

Nas sessões seguintes será descrita a modelagem do problema formulado para resolução via AG.

4.4.1. Codificação dos Cromossomos e Criação da População Inicial

Embora a forma mais comum de codificação dos cromossomos em um AG seja a codificação binária, neste caso específico tal codificação não seria capaz de criar uma modelagem suficientemente adequada ao problema. Portanto, optou-se pela codificação através de *numeração inteira*, nesse caso os alelos representam a quantidade de turbinas comissionadas durante um dado estágio. Cada estágio é representado por um gene no cromossomo.

Na Figura 4.8 é representada a divisão de um ciclo de maré em estágios de 30 minutos cada. Para tanto, são necessários 25 estágios de modo que seja possível assegurar que todo o intervalo do ciclo de maré estará incluído nos estágios.

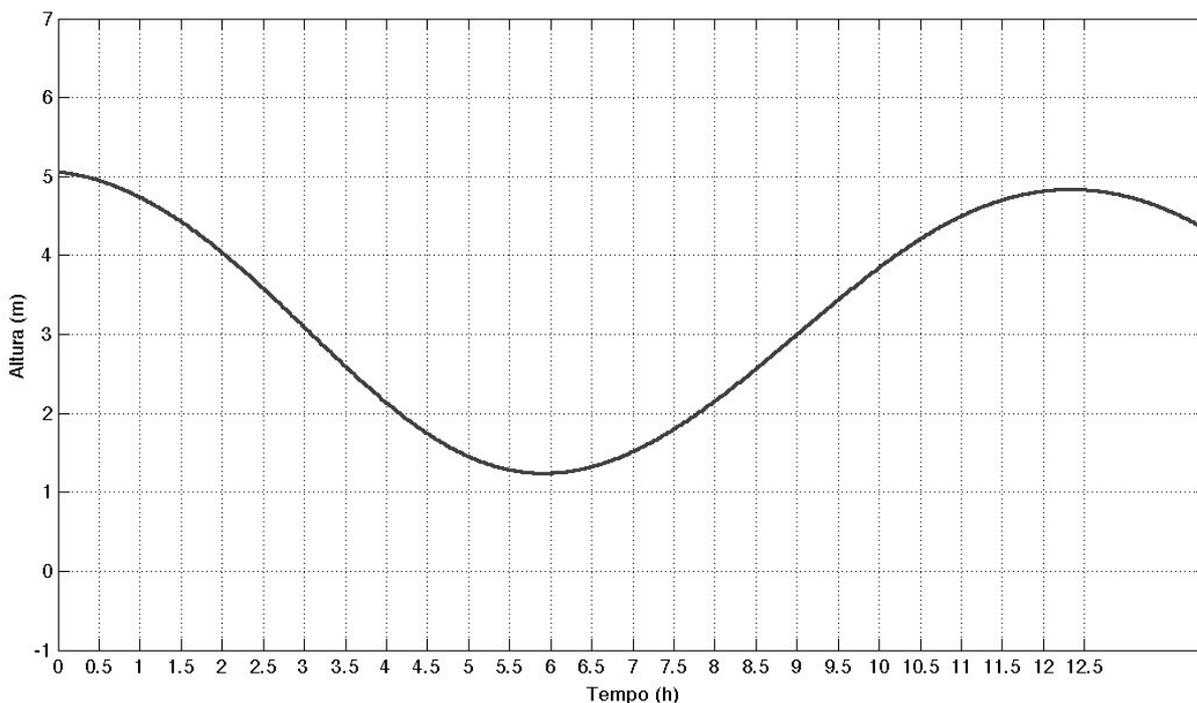


Figura 4.8. Representação da divisão de um ciclo de maré em estágios de 30 minutos cada.

Na Figura 4.9 é representado um cromossomo contendo 25 genes (estágios) onde cada gene é preenchido com um alelo que informa a quantidade de turbinas que estão operando durante aquele respectivo estágio. Para as simulações em efeito-simples foram consideradas 10 turbinas. Optou-se pela criação aleatória da população inicial e sendo composta por 270 cromossomos.

0	0	0	1	1	2	3	5	5	5	6	6	7	8	8	9	9	9	10	10	10	10	10	10	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----

Figura 4.9. Representação de um cromossomo na forma em que este é utilizado no AG proposto.

4.4.2. Cálculo da Aptidão dos Cromossomos e Seleção dos Pais

A aptidão dos cromossomos é, nesse caso, a energia gerada pela usina seguindo a sequência de despacho indicada na sequência de genes do cromossomo, portanto, quanto

maior a energia gerada por um cromossomo, maior a sua aptidão e conseqüentemente maiores serão suas chances de ser escolhido para compor a próxima geração do AG.

A forma de calcular a energia gerada segue as mesmas modelagens e também o mesmo fluxograma indicado na Seção 4.3.4 para o caso-base, com a diferença de que a quantidade de turbinas não é fixa como no caso-base, mas varia de acordo com os alelos nos genes dos cromossomos.

A fim de facilitar a programação do algoritmo, as informações sobre a aptidão são colocadas no próprio *string* dos respectivos cromossomos. Portanto, as posições 1 a 25 correspondem aos genes do cromossomo e a posição 26 do *string* corresponde ao valor da aptidão do respectivo cromossomo.

Um importante aspecto que foi considerado é a necessidade em assegurar que a população inicial não contenha indivíduos duplicados. A forma utilizada para detecção destes indivíduos é através de seus valores de aptidão. Indivíduos cujas aptidões sejam iguais devem ser descartados e novos indivíduos são criados pelo mesmo processo aleatório para que, finalmente, suas aptidões sejam calculadas e comparadas novamente aos indivíduos já existentes.

A técnica de seleção dos pais empregada no AG proposto é a seleção por *roleta*. Embora a técnica de seleção por *competição*, sendo que dois indivíduos foram considerados no torneio, também tenha sido verificada para este problema, observou-se que a primeira técnica foi mais eficiente neste caso. Isso mostra que a escolha da técnica de seleção em um AG está bastante relacionada ao desempenho do mesmo.

4.4.3. Processo de Recombinação

O processo de recombinação no AG proposto ocorre através de uma simples permutação entre intervalos de genes dos cromossomos pais. No entanto, para que a restrição descrita na Equação 4.5 não seja infringida, o ponto de recombinação deve ser cuidadosamente selecionado. A permutação entre os cromossomos deve acontecer de tal forma que o cromossomo resultante atenda à esta restrição.

Na Figura 4.10 são exemplificado os possíveis pontos de recombinação entre 2 cromossomos pais para que a restrição descrita na Equação 4.5 seja atendida. A linha tracejada indica um exemplo de escolha aleatória de um dos pontos de recombinação.

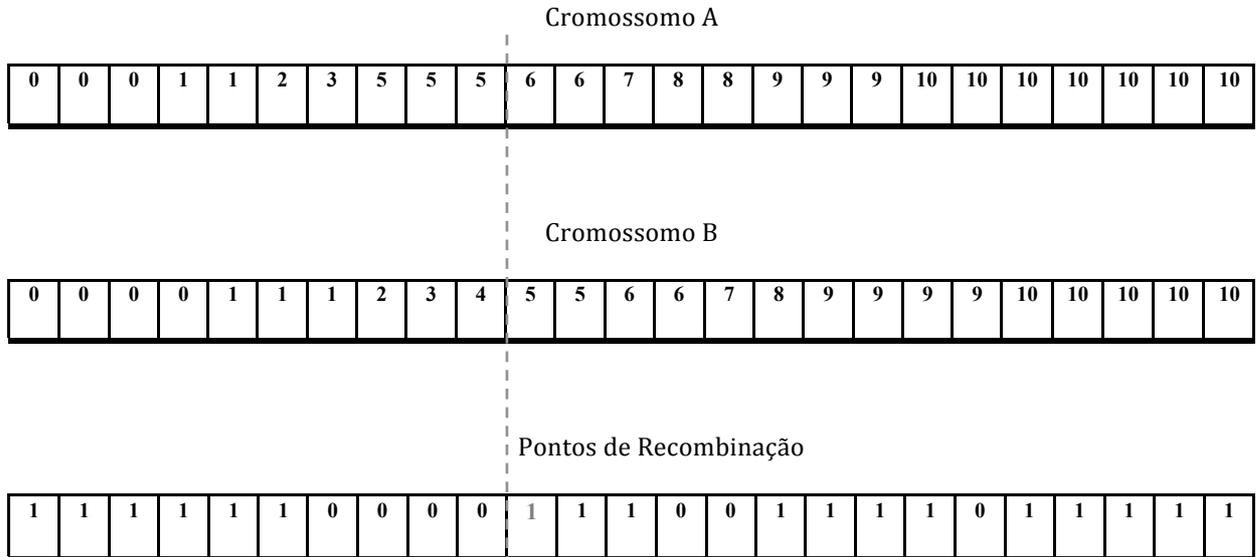


Figura 4.10. Ilustração dos possíveis pontos a partir dos quais é possível a realização da recombinação.

Na Figura 4.10, os possíveis pontos de a partir dos quais é possível permutar as informações dos cromossomos pais satisfazendo-se a restrição descrita na Equação 4.5 são marcados com um *bit* 1. Para que um dado ponto no cromossomo seja definido como possível de recombinação, deve-se atender simultaneamente às restrições apresentadas nas Equações 4.11 e 4.12.

$$nt_{i+1 \text{ cromossomo } A} \geq nt_{i \text{ cromossomo } B} \quad (4.11)$$

$$nt_{i+1 \text{ cromossomo } B} \geq nt_{i \text{ cromossomo } A} \quad (4.12)$$

onde $nt_{i \text{ cromossomo } B}$ representa o número de turbinas (alelo) indicado na posição do gene i no cromossomo B .

Finalmente, um dos possíveis pontos de recombinação é escolhido aleatoriamente e a recombinação é realizada. Um dos filhos é utilizado para compor a nova geração. A probabilidade de recombinação é de 96 %. Caso não hajam pontos em que sejam possíveis a

realização da recombinação, novos pais são escolhidos pelo processo de seleção apresentado na Seção anterior e uma nova tentativa é realizada.

Dois dos melhores indivíduos de cada geração são integralmente copiados para a nova geração (*Elitismo*). Isso garante que a geração seguinte incluirá a melhor solução já obtida pelo AG.

Embora o cromossomo seja composto por 25 genes, nem todos esses genes são necessários para que seja realizada a simulação de geração energética (aptdão) do referido cromossomo. Os 25 genes que compõem um cromossomo correspondem aos 25 estágios que cobrem todo o ciclo de maré. Portanto, apenas os genes que correspondem aos estágios em que ocorrem a geração propriamente dita é que são válidos. Estes genes são chamados de *região válida* do cromossomo. Na Figura 4.11 é representada essa situação.

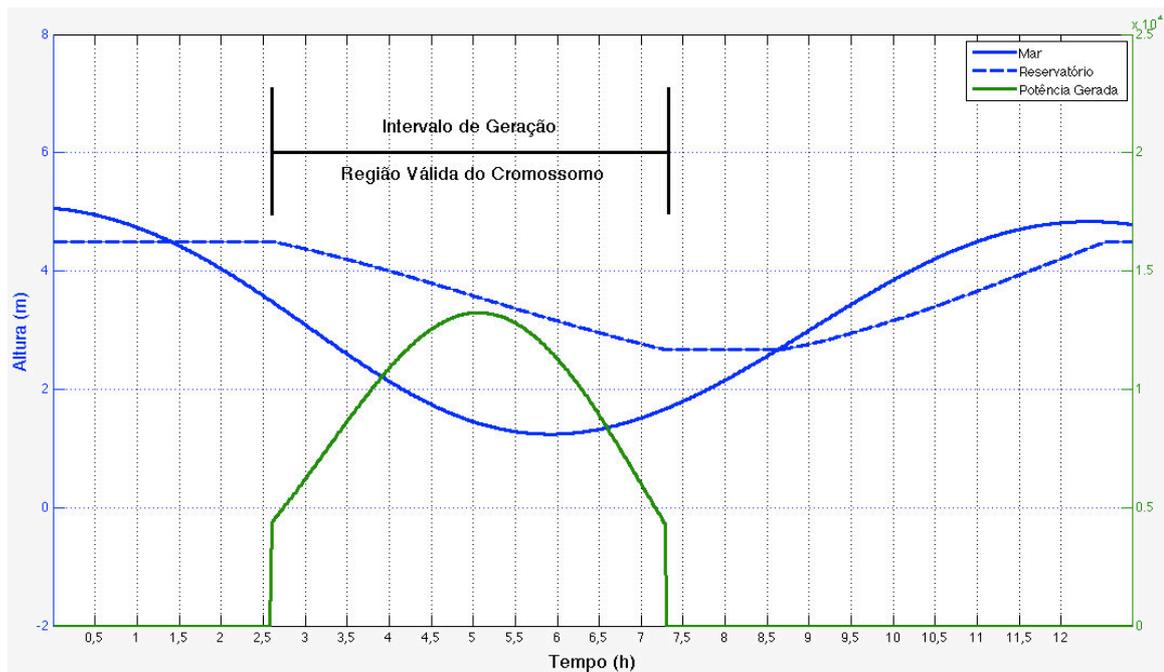


Figura 4.11. Representação da Região Válida de um Cromossomo.

Observa-se na Figura 4.11 que todo o processo de geração aconteceu, nesse exemplo, na região correspondente entre os estágios (genes) 6 a 15. Portanto, a região válida nesse exemplo está entre os genes 6 a 15. Os genes que estão de fora dessa região são irrelevantes para o processo de geração. Desta forma, todo o processo de recombinação deve acontecer exclusivamente na região válida do cromossomo.

A identificação dos genes inicial e final da região válida é feita durante a etapa do cálculo da aptidão do cromossomo através da identificação dos instantes inicial e final da geração. Estas informações são salvas nas posições 27 e 28 do *string* do respectivo cromossomo.

4.4.4. Processo de Mutação

O processo de mutação no AG proposto consiste basicamente em alterar o alelo em um determinado gene do cromossomo. De maneira análoga ao processo de recombinação, a etapa de mutação deve garantir que a restrição descrita na Equação 4.5 seja atendida. Na Figura 4.12 são exemplificados os possíveis pontos de mutação em um cromossomo para que esta restrição seja atendida.



Figura 4.12. Representação dos possíveis pontos onde é possível realizar a mutação no cromossomo.

Para que um dado gene i possa ser determinado como possível de mutação, este deve satisfazer a restrição apresentada na Equação 4.13.

$$nt_{i+1} - nt_{i-1} > 0 \quad (4.13)$$

Após a determinação de quais genes podem sofrer mutação, um destes genes é escolhido aleatoriamente para ser mutado a uma probabilidade de mutação de 75 %. Seja um gene i escolhido para sofrer a mutação, o novo valor nt_i para seu alelo é escolhido aleatoriamente devendo satisfazer a restrição apresentada na Equação 4.14.

$$nt_{i-1} \leq nt_i \leq nt_{i+1} \quad (4.14)$$

De maneira análoga ao que acontece durante a etapa de recombinação, o processo de mutação deve acontecer exclusivamente em genes da região válida do cromossomo. Isso garante que o AG proposto aplicará seus operadores apenas nos genes que influenciam diretamente na aptidão do cromossomo.

Os operadores de seleção, recombinação e mutação são realizados de maneira análoga ao caso de geração em *efeito-simples*, sendo que a recombinação e a mutação são realizados em cada um dos subgrupos de genes. Após várias simulações, constatou-se que a melhor configuração para os demais parâmetros do AG é a seguinte:

- tamanho da população: 100 indivíduos;
- quantidade máxima de gerações: 350 gerações;
- probabilidade de recombinação: 96 %;
- probabilidade de mutação: 75 %.

4.4.5. Fluxograma Geral do AG Proposto – Geração em *Efeito-Simples*

A partir da descrição das etapas e dos operadores utilizados, é apresentado na Figura 4.13 o fluxograma geral do AG proposto.

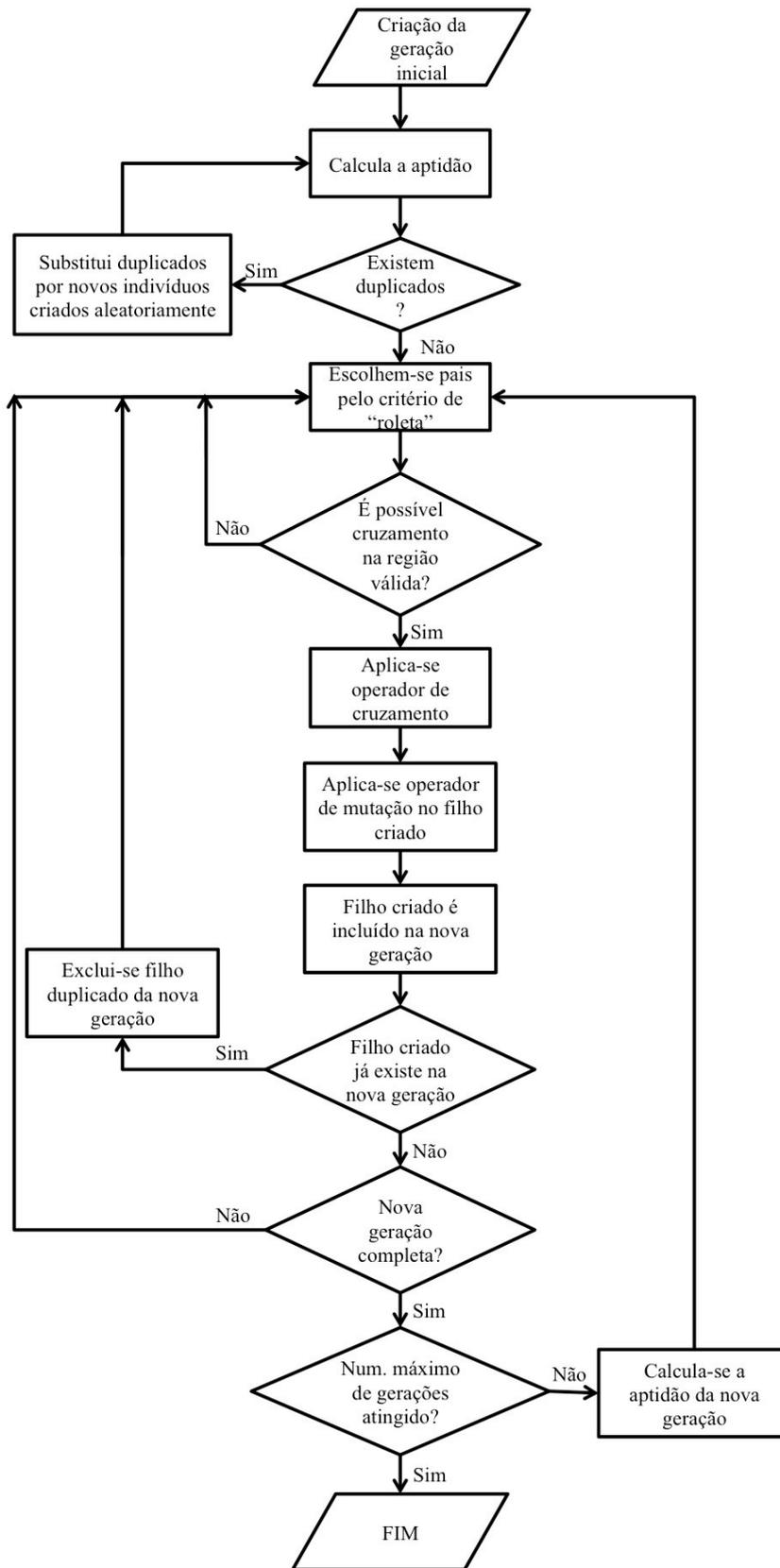


Figura 4.13. Fluxograma geral do AG proposto.

4.5. Otimização da Geração de uma Usina Maremotriz – Geração em *Efeito Duplo*

A otimização da estratégia de despacho de uma usina maremotriz operando em *efeito-duplo* se torna mais crítica do que na operação em *efeito-simples*, pois, dependendo das configurações da usina, existe a possibilidade de acoplamento hidráulico entre os semi-ciclos de geração. Portanto, a estratégia de despacho utilizada na geração em maré vazante pode influenciar nas condições de despacho na geração em maré enchente seguinte, por exemplo.

As restrições descritas na Seção 4.2 continuam válidas para o caso da geração em *efeito-duplo*. Como será descrito na Seção seguinte, a principal diferença entre este e o AG utilizado para o caso de geração em *efeito-simples* está nos *strings* que representam os cromossomos.

4.5.1. Codificação dos Cromossomos e Criação da População Inicial

Devido a possibilidade de acoplamento hidráulico entre os semi-ciclos de geração, o método proposto deve buscar a melhor solução de despacho para todo o período de tempo a ser simulado. Valores típicos para este intervalo de tempo podem ser de poucos dias a uma semana, por exemplo.

Ao contrário do método proposto para o caso de *efeito-simples*, nesse novo cenário o tamanho dos *strings* dos cromossomos varia proporcionalmente ao período de tempo a ser simulado. Portanto, dado um intervalo de tempo, o algoritmo automaticamente computa a quantidade de semi-ciclos de geração existentes no referido intervalo de tempo. Portanto, o tamanho do *string* correspondente aos genes de cada cromossomo é definido através da Equação 4.15.

$$S_G = S_M * 25 \quad (4.15)$$

sendo que S_G representa o tamanho do *string* de genes no cromossomo e S_M representa a quantidade de semi-ciclos de geração em um dado intervalo de tempo. Portanto, cada

cromossomo é composto por S_M subgrupos de genes, sendo que cada subgrupo possui 25 genes e representa um semi-ciclo de geração.

De maneira análoga a caso de geração em *efeito-simples* os subgrupos de 25 genes que compõem os cromossomos neste caso também seguem uma ordem crescente de seus alelos de modo a garantir que a restrição descrita na Equação 4.5 será satisfeita. Na Figura 4.14 é apresentado um exemplo de um cromossomo criado aleatoriamente e contendo 100 genes, o que de acordo com a Equação 4.9, representa 4 semi-ciclos de geração. Observa-se que os quatro subgrupos de genes obedecem a uma ordem crescente de seus alelos.

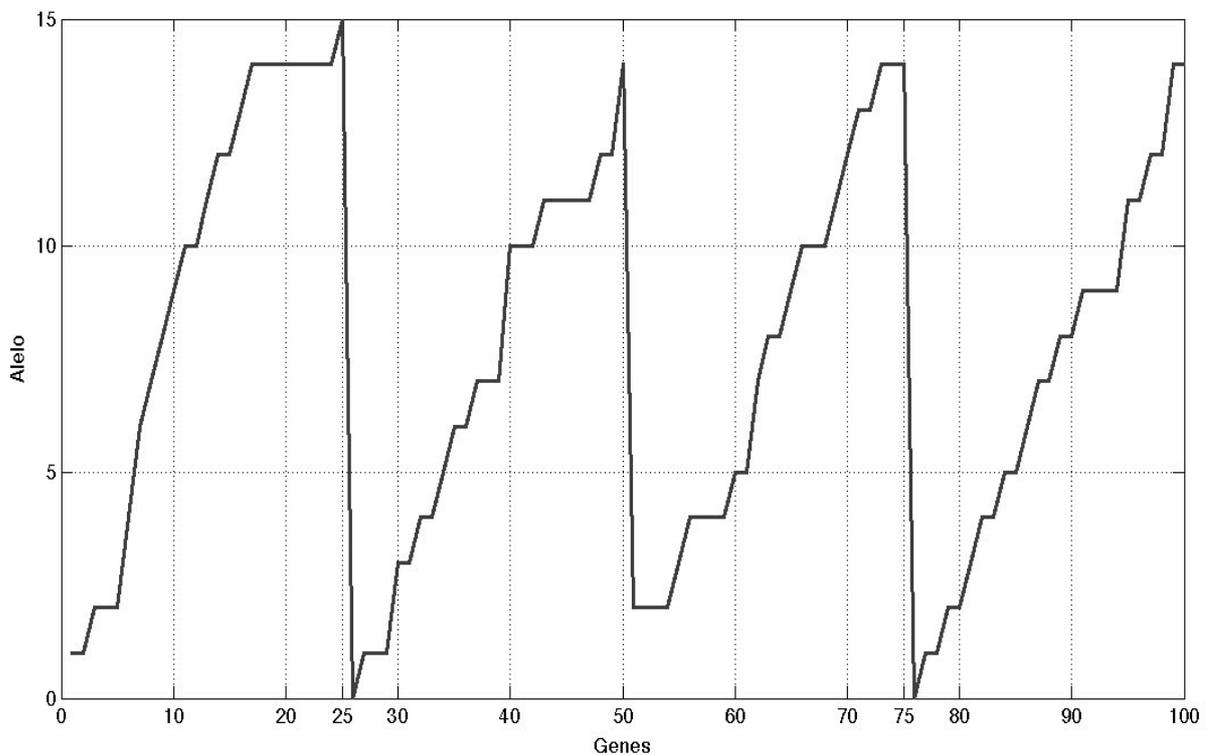


Figura 4.14. Representação de um exemplo de cromossomo criado aleatoriamente e contendo 100 genes.

Conforme já mencionado, cada gene do cromossomo representa um estágio do esquema de despacho, sendo que cada estágio possui a duração de 30 min. Portanto, é importante frisar que o início da sequência de estágios deve estar referenciado a algum parâmetro temporal conhecido.

Tomando-se novamente a Figura 4.14 como exemplo e considerando-se que o primeiro semi-ciclo de geração seja em uma maré vazante, então o estágio 1 (gene 1) está

sincronizado com instante em que ocorreu a preamar anterior a esta maré vazante. De maneira análoga, o estágio (gene) 26 está sincronizado com o instante em que ocorreu a baixa-mar anterior a geração em maré enchente, e assim por diante. Desta forma, embora os subgrupos de genes estejam guardados de forma sequencial em uma única *string* do algoritmo, caso estes fossem guardados de forma sincronizada no tempo, haveria uma sobreposição entre eles e, portanto, informações seriam perdidas. Portanto, um processo de indexação adequado a esta característica precisa ser utilizado para que o algoritmo possa reconhecer corretamente dentro do cromossomo qual o gene correspondente a cada estágio do esquema de despacho.

O cálculo da aptidão de cada cromossomo é realizado através do algoritmo representado no fluxograma da Figura 4.7 e seus respectivos valores são guardados no próprio *string* dos cromossomos em uma posição imediatamente à frente dos genes.

Da mesma forma que no caso de geração em *efeito-simples*, alguns genes são irrelevantes para o cálculo da aptidão, por razões já ilustradas na Figura 4.11. Neste caso de geração em *efeito-duplo*, cada subgrupo de genes possui uma *região válida*, portanto, para cada subgrupo é necessário que se conheça entre quais genes ocorre a geração propriamente dita. As posições destes genes dentro do cromossomo são computadas durante o cálculo da aptidão e são guardadas na própria *string* do cromossomo nas posições imediatamente à frente da posição da aptidão.

O AG proposto para o caso de geração em efeito-duplo segue o mesmo fluxograma geral apresentado na Figura 4.13.

Capítulo 5

Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos

5.1. Introdução

Neste Capítulo serão apresentados os principais resultados obtidos a partir de simulações utilizando-se os algoritmos apresentados no Capítulo 4. Inicialmente serão apresentados alguns resultados relacionados ao *caso-base*. Estes resultados servirão como referências para as simulações de despacho otimizado da usina.

5.2. Resultados Obtidos a partir do *Caso-Base*

A principal característica das simulações do *caso-base* é a utilização constante de todas as turbinas durante a operação da usina. As simulações do *caso-base* foram divididas em dois cenários: geração em *efeito-simples* no sentido reservatório-mar, e a geração em *efeito-duplo*. Vale destacar que, neste trabalho, o objetivo das simulações apresentadas a seguir consiste em verificar o desempenho operacional da usina maremotriz sob diferentes cenários de operação, ou seja, é realizada uma abordagem exclusivamente sob o ponto de vista operacional da usina. Aspectos econômicos, por exemplo, não são considerados.

5.2.1. Cenário 1: Geração em *Efeito-Simples*

Inicialmente foram realizadas simulações da operação da usina durante um período de tempo que corresponde a todo o ano de 2012. Variando-se a quantidade de turbinas da usina, é possível determinar o dimensionamento ótimo da usina para este cenário de geração. Na Tabela 5.1 estão relacionadas as quantidades de turbinas simuladas e os respectivos valores de geração energética anual da usina.

Tabela 5.1. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga da usina.

Quantidade de Turbinas	Energia Gerada (GWh/a)	Fator de Carga (%)
5	27,742	22,54
6	30,845	21,62
7	33,354	20,75
8	35,340	20,75
9	36,777	19,10
10	37,402	18,11
11	37,299	17,01
12	36,723	15,90
13	35,892	14,85
14	34,940	13,93
15	33,929	13,17

Graficamente, os resultados apresentados na Tabela 5.1 podem ser melhor observados na Figura 5.1.

Ao contrário do que se possa imaginar, quantidades elevadas de turbinas em operação na usina implicam uma redução da energia gerada pela mesma. Isso se deve ao fato de que o reservatório utilizado pela usina é relativamente pequeno e, portanto, a utilização de grandes quantidades de turbinas em um ciclo de geração resulta em um secamento muito rápido do mesmo. Em termos de parâmetros energéticos, esta situação implica um aumento no pico de potência instantânea em um certo momento da geração, no entanto, o rápido secamento do reservatório impede que a geração se prolongue por mais tempo, o que resulta em uma redução na energia gerada durante o ciclo de geração. Esta situação é refletida no *fator de carga* global da usina.

A redução do tempo de geração em cada ciclo resulta no aumento na quantidade de horas em que a usina se encontra em um estado não operativo e, portanto, contribui para a redução do fator de carga da usina, conforme observado na Figura 5.1.

Por outro lado, quantidades pequenas de turbinas em operação implica a impossibilidade de aproveitamento da capacidade plena do reservatório. Isso justifica a geração reduzida apresentada na região a esquerda da Figura 5.1.

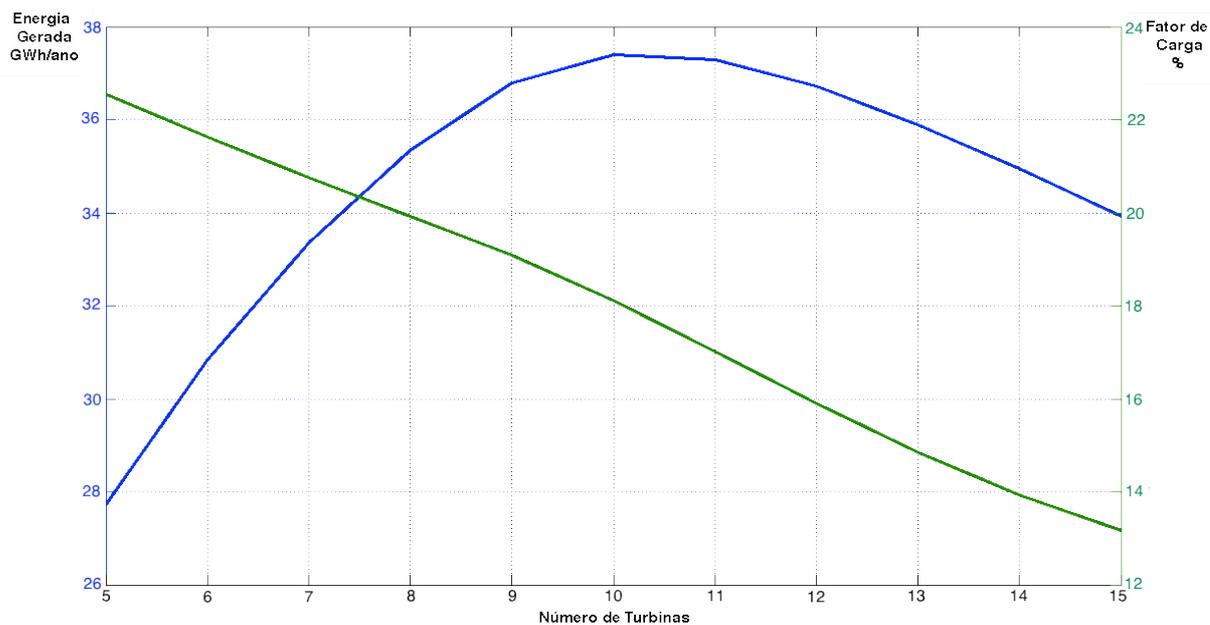


Figura 5.1. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga da usina.

Através da Figura 5.2 é possível observar o efeito da quantidade de turbinas sobre a taxa de variação do nível do reservatório durante os dois primeiros ciclos de geração do ano de 2012 e, conseqüentemente, na energia gerada durante cada ciclo.

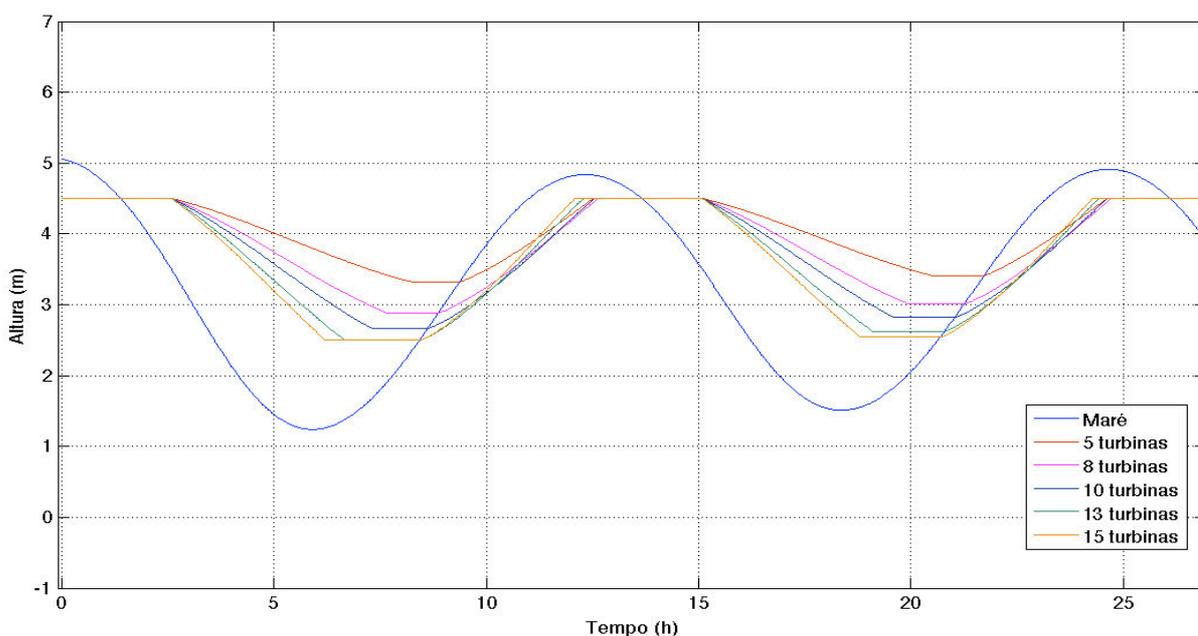


Figura 5.2. Efeito da quantidade de turbinas sobre a taxa de variação do reservatório operando em *efeito-simples*.

Diante de tal situação, observa-se que há um dimensionamento ótimo da usina que resulta em uma máxima geração anual da mesma. De acordo com a Figura 5.1, corresponde ao melhor cenário sob o aspecto de energia gerada. Resultados mais detalhados deste cenário de geração serão apresentados a seguir.

Na Figura 5.3 são apresentados alguns indicativos da operação da usina durante as primeiras horas do ano de 2012.

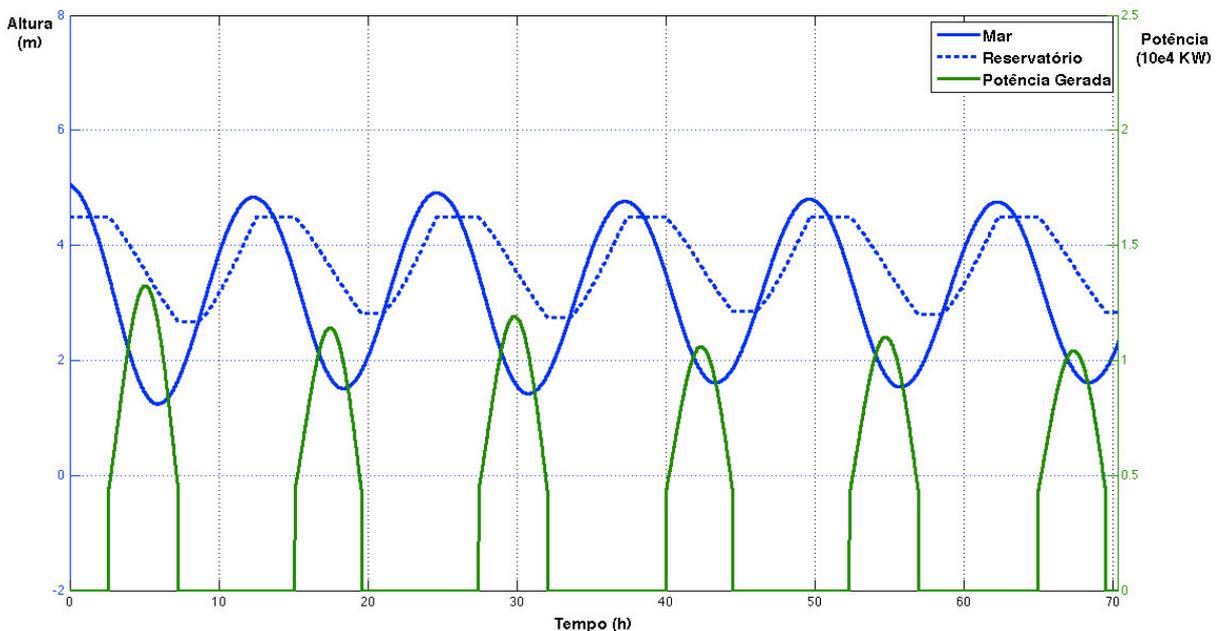


Figura 5.3. Indicativos da operação da usina durante as primeiras horas de 2012.

Observa-se na Figura 5.3 que, embora seja intermitente, a potência gerada pela usina apresenta um certo grau de uniformidade que é inexistente em outras fontes de geração como a eólica ou solar, por exemplo. Observa-se ainda que os níveis operacionais do reservatório satisfazem às suas restrições de cota máxima e mínima – 4,5 m e 2,5 m, respectivamente.

Os instantes de reenchimento do reservatório mostrados na Figura 5.3 foram simulados a partir da utilização de uma comporta de 12,5 m e cuja modelagem foi apresentada na Equação 4.4. Observou-se que a utilização unicamente da comporta é insuficiente para o reenchimento rápido do reservatório até a sua cota máxima novamente. Portanto, o reenchimento do reservatório é realizado através da comporta e também através das próprias turbinas que nesses instantes são utilizadas apenas para dar vazão à água.

As simulações realizadas para o intervalo de tempos correspondente a todo o ano de 2012 (705 marés) resultaram nos indicadores energéticos apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Resultados dos principais indicadores energéticos para o intervalo de um ano de operação no cenário 1.

Quantidade de turbinas	10
Energia Gerada (GWh/a)	37,402
Potência Máxima (MW)	23,511
Potência Média (MW)	4,258
Fator de Carga (%)	18,111
Tempo de Operação (%)	37,48

Através da Tabela 5.2 observa-se que há uma grande discrepância entre os valores da potência máxima gerada pela usina e a sua potência média anual. Isto se justifica principalmente devido a característica intermitente da geração. Em outras palavras, a usina encontra-se em estado operativo apenas em 37,48 % das horas do ano. Esta característica da potência gerada também pode ser observada através da sua *curva de permanência* apresentada na Figura 5.4. Observa-se que a usina encontra-se não operativa durante mais de 60 % do tempo.

A partir da simulação da operação da usina durante os 705 ciclos de marés que correspondem a um ano, é possível observar a existência de um certo grau de correlação entre alguns dos principais parâmetros envolvidos no processo de geração. Nota-se por exemplo, na Figura 5.5 que existe uma relação próxima à linearidade entre a amplitude de maré em um dado ciclo e a máxima potência gerada no respectivo ciclo. O mesmo também ocorre entre a amplitude de maré e a energia gerada no respectivo ciclo de maré.

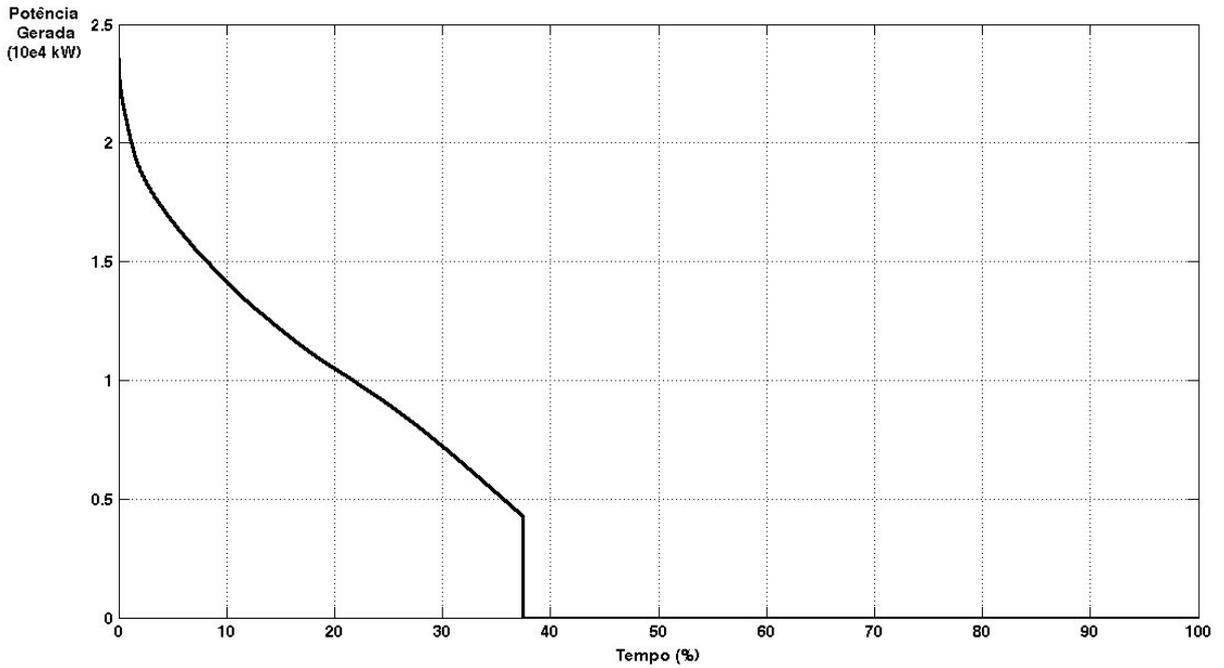


Figura 5.4. Curva de permanência da potência gerada pela usina durante um ano de operação no cenário 1.

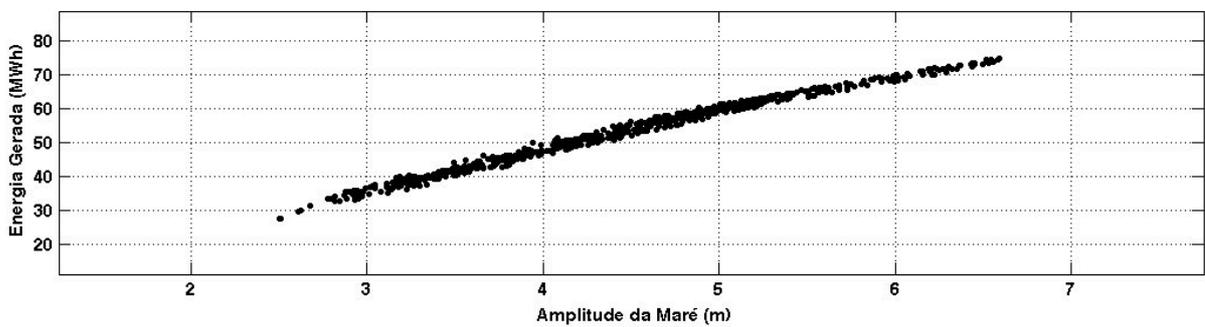
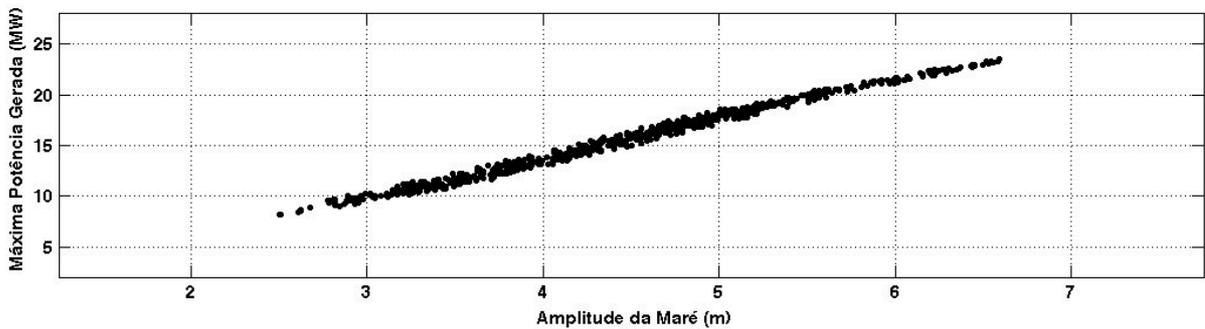


Figura 5.5. Correlação existente entre a amplitude de maré e a máxima potência e energia geradas durante os respectivos ciclos de marés.

Embora existam restrições físicas quanto ao uso da capacidade plena do reservatório conforme justificado no Capítulo 3, na Tabela 5.3 são apresentados alguns resultados de simulações caso fosse possível estender o limite de cota máxima do reservatório.

Tabela 5.3. Geração energética anual da usina para diferentes níveis de cota máxima do reservatório.

	5,0 m	5,5 m	6,0 m
10 turbinas	47,078	50,972	51,367
11 turbinas	47,773	52,326	52,766
12 turbinas	47,630	53,037	53,687
13 turbinas	46,874	52,924	53,872
14 turbinas	45,809	52,260	53,490

Observa-se na Tabela 5.3 que o incremento da cota máxima do reservatório resultaria em um ganho bastante significativo na energia anual gerada pela usina. Além disso, observa-se que o incremento da cota máxima do reservatório resultaria na necessidade de redimensionar a quantidade de turbinas da usina para que seja possível realizar o aproveitamento pleno do potencial do reservatório.

Em termos de desempenho computacional, a simulação cujos resultados foram apresentados na Tabela 5.2 foi realizada em uma plataforma MAC OS com processador de 2,4 GHz Intel i5. O tempo de execução da simulação foi de 12,06 segundos.

5.2.2. Cenário 2: Geração em *Efeito-Duplo*

De maneira análoga ao que foi realizado no *cenário 1*, neste novo cenário também torna-se necessária a busca pela quantidade ótima de turbinas em operação conjunta na usina. É interessante frisar que a quantidade ótima de turbinas para o *cenário 2* seja necessariamente a mesma para o *cenário 12*. Na Tabela 5.4 estão relacionadas a quantidade de turbinas em operação com a energia total gerada ao longo de um ano e com o fator de carga global da usina.

Tabela 5.4. Relação entre a quantidade de turbinas em operação e a energia gerada e fator de carga global da usina.

Quantidade de Turbinas	Energia Gerada (GWh/a)	Fator de Carga (%)
5	30,466	33,03
6	35,955	32,49
7	41,037	31,78
8	45,264	30,67
9	48,553	29,25
10	51,005	27,65
11	52,738	25,99
12	53,648	24,24
13	53,920	22,48
14	53,682	20,79
15	53,014	19,16

Graficamente, os resultados apresentados na Tabela 5.4 podem ser melhor analisados na Figura 5.6.

Observa-se que neste novo contexto, 13 turbinas correspondem ao melhor cenário sob o aspecto de geração de energia. Este novo ponto ótimo é maior do que no *cenário 1* por causa da existência de acoplamento hidráulico entre os semi-ciclos de geração em *efeito-duplo*. Isso requer que as turbinas, além de gerarem eletricidade, possam ser capazes de dar vazão a uma quantidade maior de água de tal forma que o nível do reservatório seja reestabelecido o mais rápido possível para que seja iniciada a geração no semi-ciclo seguinte. Além disso, observa-se que, embora tenha sido significativamente acrescido, o fator de carga da usina não corresponde ao dobro de seu respectivo valor obtido no *cenário 1*.

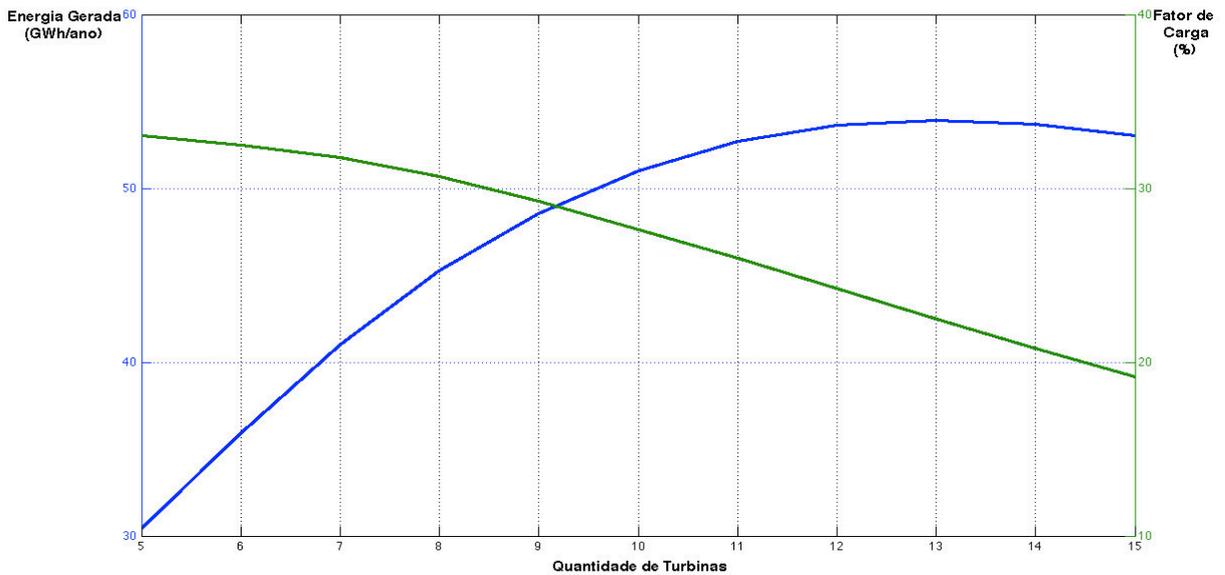


Figura 5.6. Relação entre a quantidade de turbinas e a energia gerada e fator de carga da usina em operação no cenário 2.

Através da Figura 5.7 se observa o efeito da quantidade de turbinas sobre a taxa de variação do nível do reservatório durante os dois primeiros ciclos de geração do ano de 2012 e, conseqüentemente, na energia gerada durante cada ciclo. Neste caso, a usina operando em *efeito-duplo*.

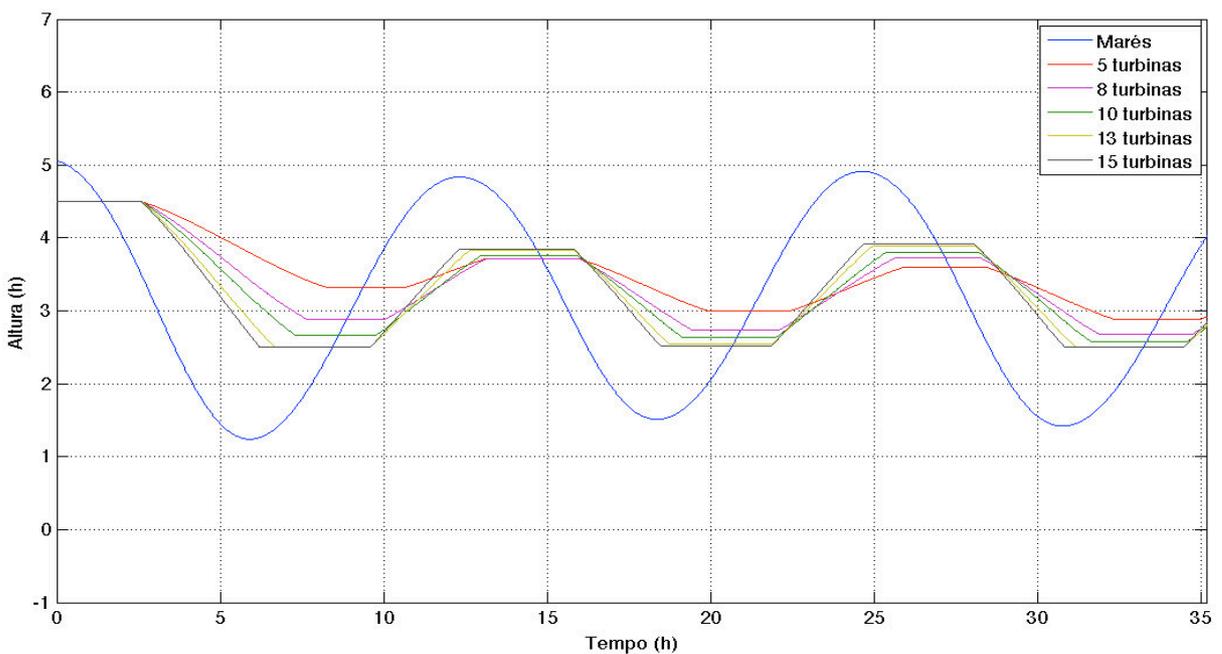


Figura 5.7. Efeito da quantidade de turbinas sobre o taxa de variação do reservatório da usina operando em efeito-duplo.

Na Figura 5.8 são observados alguns indicativos da operação da usina com 13 turbinas durante as primeiras horas do ano de 2012.

Através da Figura 5.8 é possível observar que o pico de potência gerado durante uma maré enchente não corresponde em valor ao pico de potência gerado durante a maré vazante anterior, ou seja, não existe uma relação entre a potência gerada durante uma maré vazante e a potência gerada durante uma maré enchente imediatamente anterior. Na verdade, conforme será discutido adiante, para uma mesma amplitude de maré, a geração em maré enchente é menor do que a geração em maré vazante.

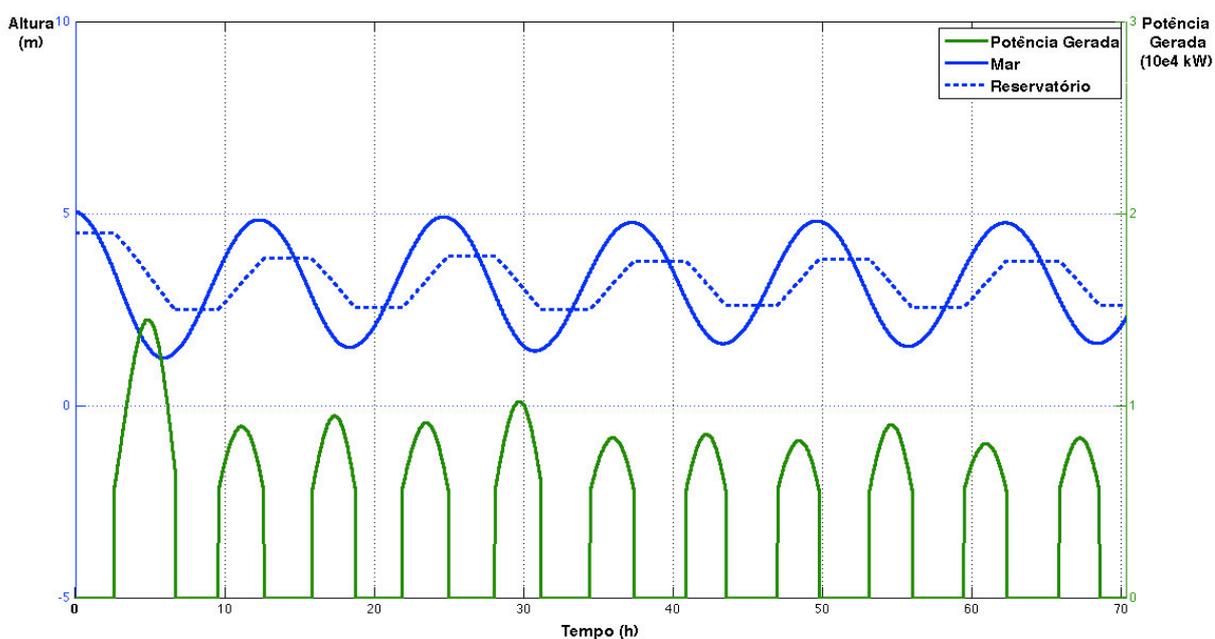


Figura 5.8. Operação da usina no cenário 2 durante as primeiras horas do ano de 2012.

Na Tabela 5.5 são apresentados os principais indicadores de desempenho energético da usina ao longo de sua operação durante o ano de 2012.

Tabela 5.5. Principais indicadores de desempenho energético da usina ao longo de sua operação no ano de 2012.

Quantidade de turbinas	13
Energia Gerada (GWh/a)	53,920
Potência Máxima (MW)	27,509
Potência Média (MW)	6,138
Fator de Carga (%)	22,485
Tempo de Operação (%)	54,30

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.5, destaca-se uma importante característica da geração em *efeito-duplo*: alguns indicadores energéticos tais como energia gerada, potência média, fator de carga e tempo de operação da usina não correspondem ao dobro dos seus respectivos valores na geração em *efeito-simples*, ou seja, a geração em maré enchente apresenta um menor desempenho do que a geração em maré vazante. Isso se justifica da seguinte forma: devido ao fato de que as paredes do reservatório não são paralelas, mas possuem uma forma de “V”, as cotas inferiores do reservatório possuem uma capacidade volumétrica bem menor do que as cotas superiores, portanto, logo que é iniciada a geração em maré enchente (quando o reservatório se encontra em suas cotas mais baixas) a cota do reservatório começa a subir a uma taxa de variação bem mais elevada e, conseqüentemente, a queda d’água disponível será reduzida mais rapidamente, o que resultará em uma geração menor de energia.

Na Figura 5.9 é apresentada a *curva de permanência* da potência gerada pela usina ao longo do período de simulação onde também é possível observar o acréscimo no tempo de operação da usina para 54,3 %.

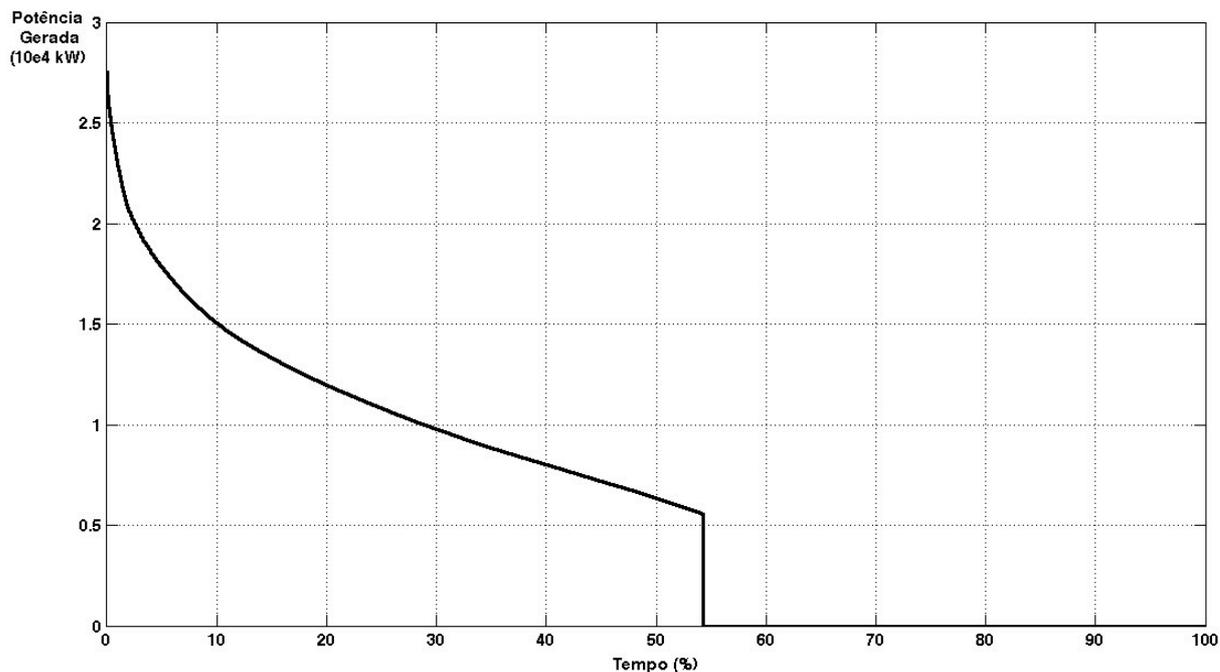


Figura 5.9. Curva de Permanência da potência gerada pela usina ao longo de um ano de operação.

Em termos de desempenho computacional, a simulação cujos resultados foram apresentados na Tabela 5.5 foi realizada em uma plataforma MAC OS com processador de 2,4 GHz Intel i5. O tempo de execução da simulação foi de 18,66 segundos.

5.3. Cenário 3: Otimização da Geração – Operação em *Efeito-Simples*

Neste novo cenário de operação foram realizadas simulações da operação em *efeito-simples* da usina maremotriz visando-se a maximização da energia gerada através da utilização do AG proposto e descrito na Seção 4.3. As simulações foram realizadas utilizando-se 10 turbinas, ou seja, a mesma quantidade de turbinas utilizada no *cenário 1*, cujo resultados já foram apresentados na Seção 5.2.1.

Na Figura 5.10 são apresentados os principais indicativos da operação da usina seguindo-se o esquema de despacho sequencial das turbinas obtido através do método proposto para a operação hipotética da usina durante os dias 01 e 02 de Janeiro de 2012.

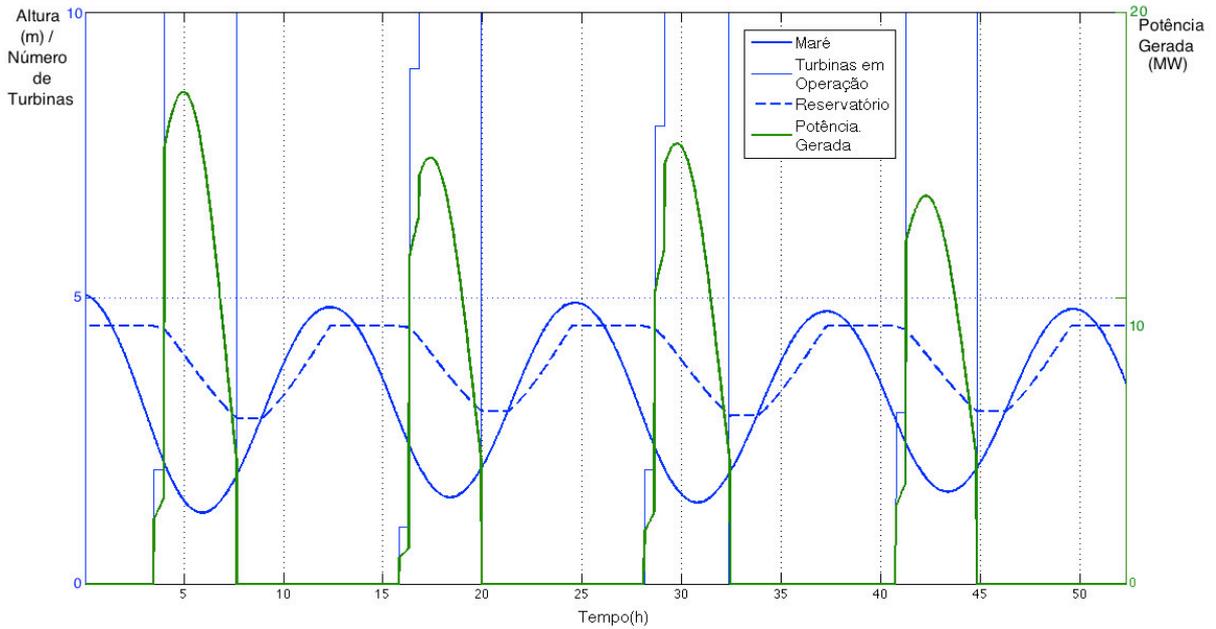


Figura 5.10. Principais indicadores da operação em *efeito-simples* da usina seguindo o esquema de despacho obtido através do método proposto.

Através da Figura 5.10 observa-se que cada ciclo de geração pode possuir seu próprio esquema de despacho. Isto ocorre devido ao fato de que a amplitude de um ciclo de maré não é exatamente igual ao seu anterior, portanto, cada ciclo de maré deve possuir seu próprio esquema de despacho. Observa-se ainda que, por razões já apresentadas na Seção 4.2, o esquema de despacho é sempre crescente, ou seja, de acordo com a restrição descrita na Equação 4.5, é permitido ao algoritmo buscar uma solução em que seja realizado apenas o despacho de novas turbinas, nunca o contrário. Finalmente o tempo mínimo de cada estágio da operação da usina é, de acordo com a *restrição* descrita na Equação 4.6, de 30 minutos, ou seja, os esquemas de despacho apresentados na Figura 5.10 apresentam intervalos discretos de no mínimo 30 minutos.

Na Figura 5.11 é feita uma comparação da potência gerada durante cada ciclo no *cenário 1* e no *cenário 3*, ou seja, sem e com o esquema de despacho.

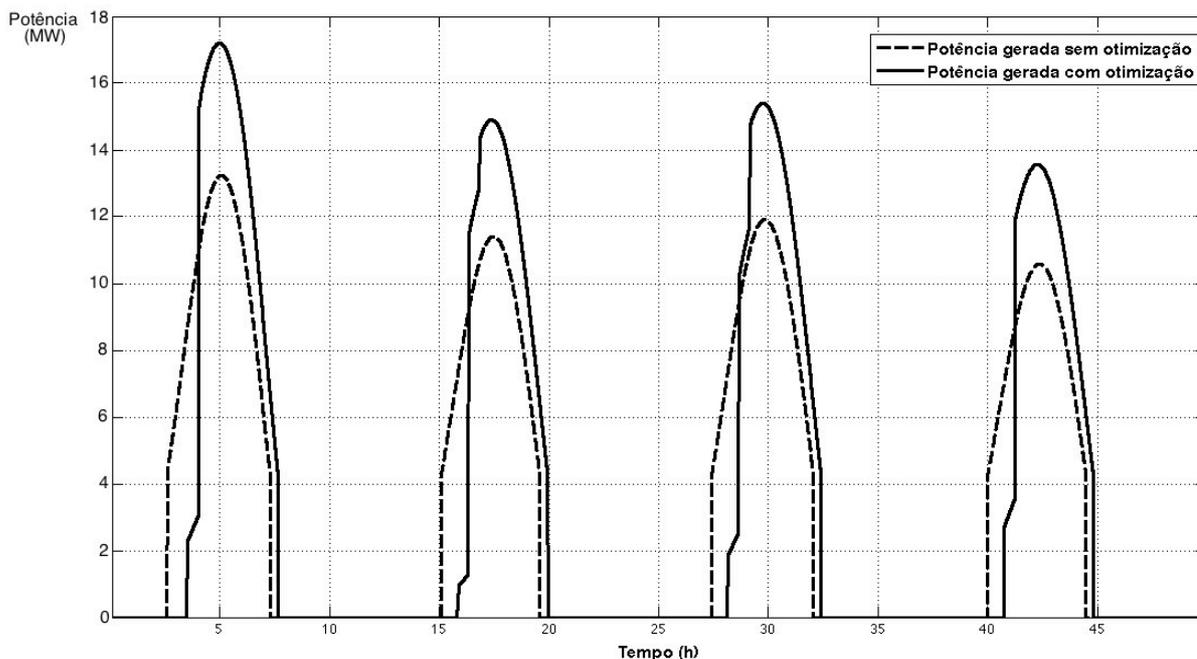


Figura 5.11. Comparação da potência gerada com e sem a utilização do AG para o caso de geração em *efeito-simples*.

Através da Figura 5.11 é possível observar que, além de proporcionar um incremento na energia gerada durante cada ciclo, houve também um acréscimo significativo na potência máxima gerada em cada ciclo. No entanto, como é de se esperar, houve uma redução no tempo de geração em cada ciclo.

Ainda com relação à Figura 5.11, observa-se um fenômeno interessante: o início do processo de geração utilizando-se o método proposto acontece posteriormente ao início da geração sem o método. Esta situação indica que o início precoce do processo de geração, quando a queda d'água ainda é pequena, pode implicar na redução da energia total gerada durante o ciclo de maré. Portanto, através da Figura 5.11 é possível constatar que, retardando-se um pouco o início do processo de geração, é possível tornar o processo de geração mais eficiente.

Na Tabela 5.6 é feito um comparativo de alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com a otimização obtida através do método proposto durante a operação hipotética da usina entre os dias 01 e 07 de Janeiro de 2012.

Tabela 5.6. Comparativo entre alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com o método proposto.

	Energia gerada sem otimização (MWh)	Energia gerada com otimização (MWh)	Δ (%)	Potência máxima sem otimização (MW)	Potência máxima com otimização (MW)	Δ (%)	Tempo de geração sem otimização (h)	Tempo de geração com otimização (h)	Δ (%)
Ciclo 1	46,051	50,125	8,85	13,24	17,01	28,50	4,7	4,13	-12,41
Ciclo 2	39,029	42,844	9,77	11,41	14,88	30,41	4,5	4,12	-8,52
Ciclo 3	41,713	45,882	10,00	11,907	15,359	28,99	4,6	4,3	-7,25
Ciclo 4	36,820	40,540	10,10	10,588	14,086	33,04	4,5	4,1	-8,89
Ciclo 5	38,856	42,940	10,51	11,003	14,482	31,62	4,6	4,2	-9,42
Ciclo 6	36,867	40,736	10,49	10,402	13,935	33,96	4,5	4,2	-7,78
Ciclo 7	38,160	42,277	10,79	10,719	14,522	35,48	4,6	3,7	-20,65
Ciclo 8	39,247	43,516	10,88	10,865	14,391	32,45	4,7	3,8	-20,21
Ciclo 9	39,513	43,582	10,30	11,033	14,808	34,22	4,6	4,1	-10,14
Ciclo 10	43,718	48,134	10,10	11,989	15,452	28,89	4,8	4,3	-10,07
Ciclo 11	42,305	46,327	9,51	11,832	16,144	36,45	4,7	3,7	-21,99
Ciclo 12	49,250	53,953	9,55	13,488	17,286	28,16	4,9	4,4	-9,86
Total	491,529	540,857	10,04	138,470	182,351	31,69	55,700	49,050	-11,94

Na Tabela 5.6 são mostradas com maior riqueza de detalhes as mesmas conclusões obtidas a partir da Figura 5.11. Observa-se que a utilização do método proposto para a maximização da energia gerada pela usina também resultou em um ganho percentual bastante significativo da potência máxima gerada em cada ciclo – em média, 31,69 %. Por outro lado, observa-se que a otimização através do método proposto resultou na redução considerável no tempo de geração em cada ciclo – -11,94 %, em média.

Finalmente, o objetivo principal do método proposto foi alcançado: houve um incremento significativo na energia gerada pela usina durante cada ciclo de geração.

Embora esta situação de incremento simultâneo de energia e potência máxima geradas seja bastante promissora, vale destacar que, dependendo das condições de marés, esta situação nem sempre será válida. Dependendo das condições de marés, é possível que o incremento da energia gerada ocorra sob circunstâncias em que há também um aumento do tempo de geração.

Na Figura 5.12 constam a evolução da variação percentual da energia gerada, máxima potência gerada e do tempo de geração ao longo de todos os 705 ciclos de marés existentes em um ano.

Embora as variações percentuais do tempo de geração possam eventualmente alternar entre valores positivos e negativos, vale destacar que a variação percentual da energia gerada e a variação percentual da potência máxima é sempre positiva, ou seja, para todos os ciclos de geração há um acréscimo da energia gerada em relação ao *cenário 1*.

Para fins de comparação, na Tabela 5.7 são apresentados os principais indicadores de desempenho da usina durante um ano de operação sem e com a otimização obtida através do método proposto. Nota-se que, ao longo de um ano de operação da usina seguindo-se o esquema de despacho obtido através do método proposto, um acréscimo significativo na energia gerada é obtido (8,57 %). Embora haja uma redução do pico de potência gerada pela usina por razões já apresentadas na Figura 5.12, há uma elevação na potência média anual produzida pela usina. Esta situação justifica a considerável elevação percentual do Fator de Carga da usina. Como na maioria dos ciclos de geração há uma redução no tempo de geração, o tempo de operação global da usina também é reduzido, conforme observado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Comparativo dos principais indicadores de desempenho da usina para um ano operando sem e com a utilização de otimização – efeito-simples.

	Sem Otimização	Com Otimização	Δ (%)
Quantidade de turbinas	10 (fixo)	10 (variável)	-
Energia Gerada (GWh/a)	37,402	40,606	8,57
Potência Máxima (MW)	23,511	21,793	-7,30
Potência Média (MW)	4,258	4,630	8,71
Fator de Carga (%)	18,111	21,24	17,23
Tempo de Operação (%)	37,48	34,45	-8,79

Quanto ao desempenho do método proposto, na Figura 5.13 é apresentada a evolução das soluções obtidas pelo AG ao longo das gerações para as simulações dos ciclos apresentadas na Tabela 5.6. As simulações foram realizadas em plataforma MAC OS com processador de 2,4 GHz Intel i5. O tempo de execução da simulação foi de 18,27 minutos.

Através da Figura 5.13 é possível observar a evolução sempre crescente das soluções obtidas pelo AG. Esta característica acontece devido à utilização da técnica de *Elitismo* descrita na Seção 4.3.3 que garante que a melhor solução já obtida pelo AG será automaticamente incluída na geração seguinte, ou seja, garante que a solução da geração atual não seja pior do que a solução da geração anterior.

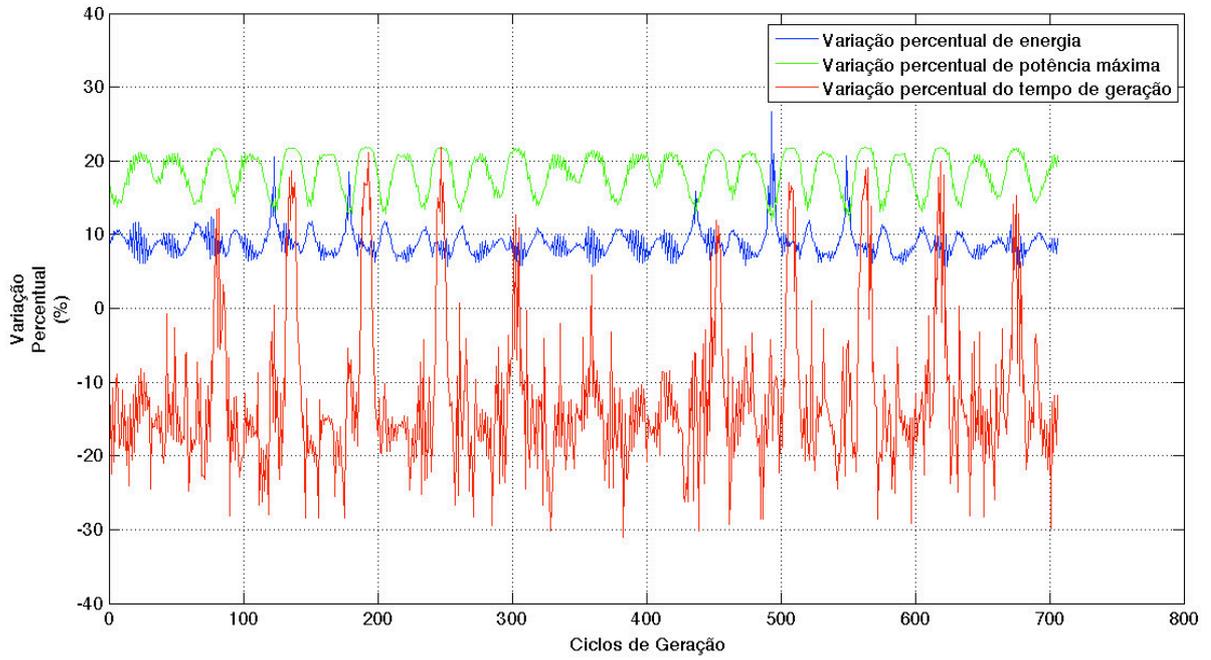


Figura 5.12. Evolução da variação percentual da energia gerada, máxima potência gerada e tempo de geração ao longo dos 705 ciclos de marés do ano.

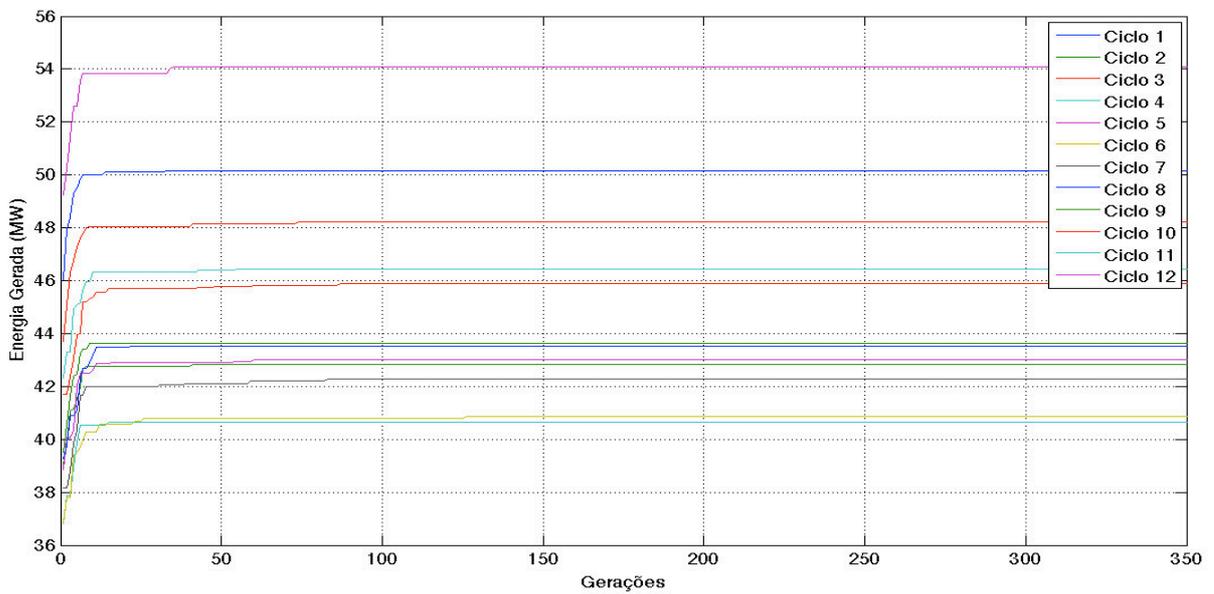


Figura 5.13. Evolução das soluções obtidas pelo AG ao longo das gerações.

5.4. Cenário 4: Otimização da Geração – Operação em *Efeito-Duplo*

Neste cenário de operação foram realizadas simulações da operação em *efeito-duplo* da usina maremotriz visando-se a maximização da energia gerada através do método proposto e descrito na Seção 4.5. Da mesma forma que no *cenário 2*, as simulações foram realizadas utilizando-se 13 turbinas. Na Figura 5.14 são apresentados os principais indicativos da operação da usina seguindo-se o esquema de despacho sequencial das turbinas obtido através do método proposto para os dias 01 e 02 de Janeiro de 2012.

Através da Figura 5.14 verifica-se que neste cenário, cada ciclo de geração pode também possuir seu próprio despacho. Observa-se ainda que o esquema de despacho é sempre crescente, ou seja, de acordo com a *restrição* descrita na Equação 4.5, é permitido ao algoritmo buscar uma solução em que seja realizado apenas o despacho de novas turbinas, nunca o contrário. Verifica-se ainda que o primeiro ciclo de geração apresenta uma energia gerada bem maior do que os ciclos de geração posteriores. Isso é devido ao fato de que, após o ciclo primeiro ciclo de geração, o reservatório não atinge a sua cota máxima novamente devido a incapacidade das turbinas em dar vazão a uma quantidade de água suficiente durante o processo de geração na maré enchente.

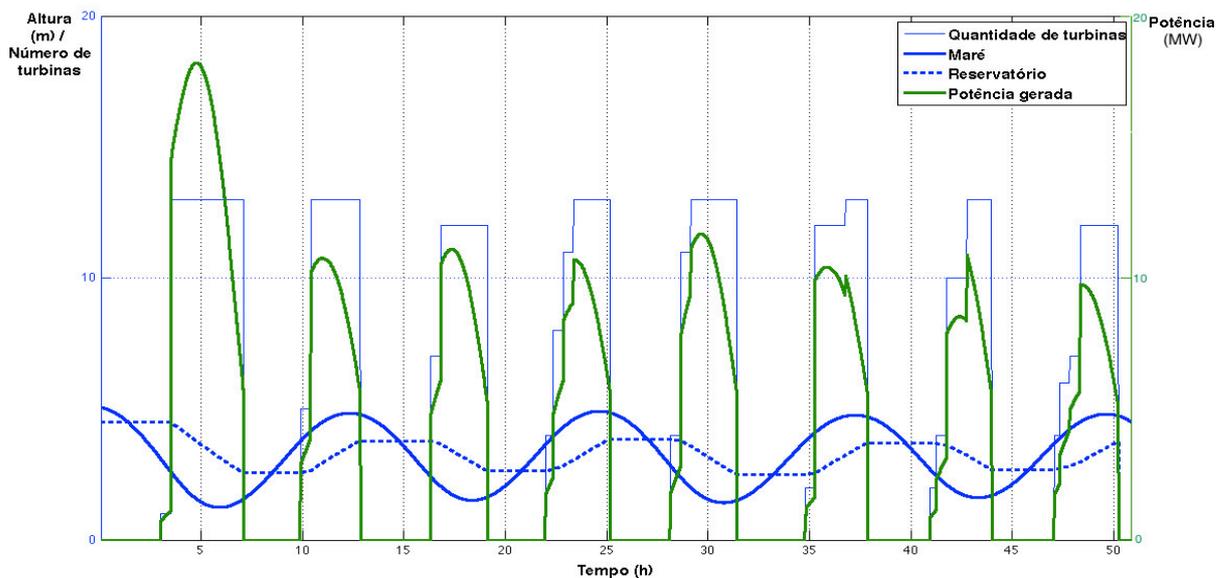


Figura 5.14. Esquema de despacho obtido a partir do método proposto para a usina operando em *efeito-duplo*.

Na Figura 5.15 é realizada uma comparação da potência gerada durante cada ciclo de geração no *cenário 2* e no *cenário 4*, ou seja, sem e com otimização.

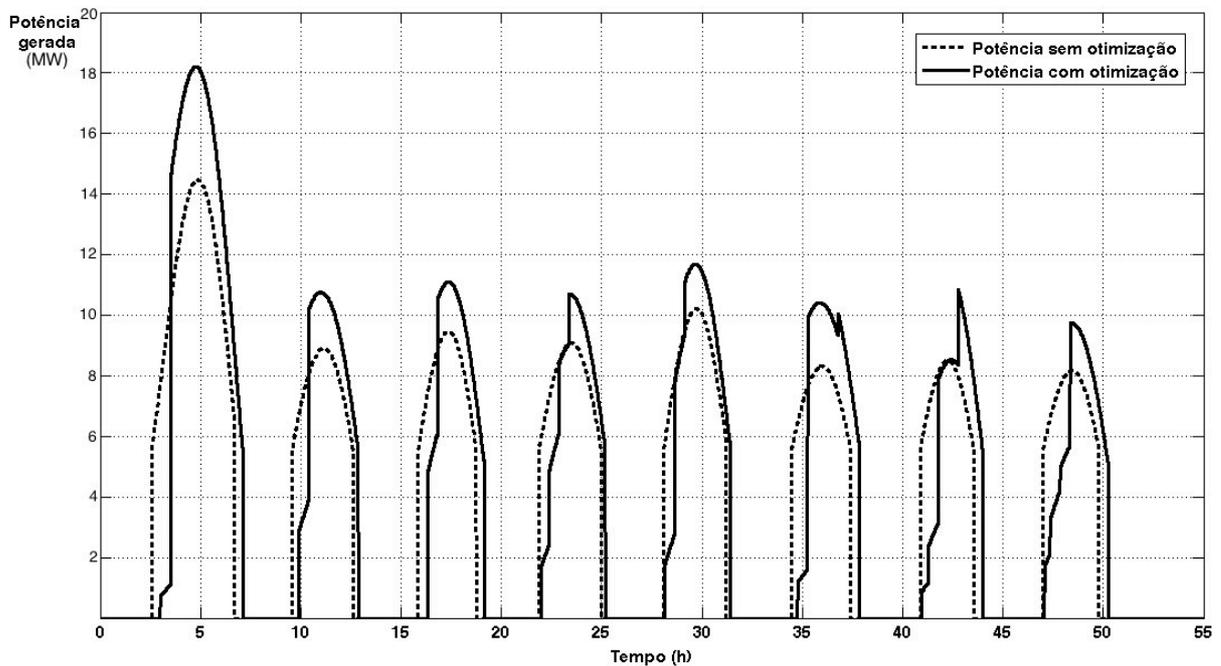


Figura 5.15. Comparação entre as potências geradas sem e com o AG.

De maneira semelhante ao que ocorreu no *cenário 3*, na Figura 5.15 observa-se que, seguindo-se o esquema de despacho obtido através do método proposto, os picos máximos de potência gerada em cada ciclo tendem a ser maiores do que no *cenário 2*. Além disso, de maneira análoga ao que aconteceu no *cenário 3*, há uma tendência em retardar o instante inicial do processo de geração a fim de maximizar a energia produzida em cada ciclo. Isso mais uma vez demonstra que a eficiência da geração em cada ciclo está bastante relacionada à escolha do instante inicial da geração.

Na Tabela 5.8 é feito um comparativo de alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com a otimização obtida através do método proposto durante a operação hipotética da usina na primeira semana de 2012.

Tabela 5.8. Comparativo entre alguns indicadores de desempenho obtidos a partir das simulações sem e com otimização.

	Energia gerada sem otimização (MWh)	Energia gerada com Otimização (MWh)	Δ (%)	Potência máxima sem otimização (MW)	Potência máxima com otimização (MW)	Δ (%)	Tempo de geração sem otimização (h)	Tempo de geração com otimização (h)	Δ (%)
Ciclo 1	46,090	52,775	14,5	14,476	19,075	31,8	4,083	3,833	-6,1
Ciclo 2	23,450	20,393	-13,0	8,909	8,110	-9,0	3,033	3,033	0,0
Ciclo 3	23,390	23,221	-0,7	9,464	9,473	0,1	2,900	3,200	10,3
Ciclo 4	24,211	24,533	1,3	9,098	10,585	16,4	3,083	3,383	9,7
Ciclo 5	26,626	27,219	2,2	10,212	11,516	12,8	3,100	3,283	5,9
Ciclo 6	21,577	23,311	8,0	8,320	9,403	13,0	2,933	3,450	17,6
Ciclo 7	19,916	19,155	-3,8	8,504	8,095	-4,8	2,667	2,883	8,1
Ciclo 8	20,222	21,837	8,0	8,178	10,427	27,5	2,783	3,083	10,8
Ciclo 9	22,275	24,384	9,5	8,990	12,595	40,1	2,867	2,933	2,3
Ciclo 10	20,417	21,003	2,9	8,016	10,556	31,7	2,850	2,683	-5,8
Ciclo 11	19,695	19,534	-0,8	8,309	9,404	13,2	2,683	3,033	13,0
Ciclo 12	19,562	20,582	5,2	8,018	10,611	32,3	2,733	3,033	11,0
Ciclo 13	21,019	21,290	1,3	8,632	8,556	-0,9	2,783	3,317	19,2
Ciclo 14	21,292	20,870	-2,0	8,222	9,689	17,8	2,917	3,067	5,1
Ciclo 15	23,079	23,892	3,5	8,980	9,837	9,5	2,967	3,267	10,1
Ciclo 16	22,617	23,278	2,9	8,662	9,841	13,6	2,983	3,267	9,5
Ciclo 17	23,092	22,633	-2,0	9,056	9,589	5,9	2,950	3,117	5,6
Ciclo 18	25,006	26,656	6,6	8,982	10,970	22,1	3,217	3,417	6,2
Ciclo 19	27,946	30,642	9,6	10,429	11,755	12,7	3,133	3,833	22,3
Ciclo 20	25,418	26,516	4,3	9,358	11,729	25,3	3,167	3,583	13,2
Ciclo 21	26,863	26,282	-2,2	10,139	12,158	19,9	3,100	3,517	13,4
Ciclo 22	28,960	30,112	4,0	9,910	11,914	20,2	3,450	3,650	5,8
Ciclo 23	33,586	39,493	17,6	12,401	15,627	26,0	3,233	4,233	30,9
Ciclo 24	28,564	30,349	6,2	10,205	11,573	13,4	3,333	3,383	1,5
Ciclo 25	31,293	35,221	12,6	11,615	13,712	18,1	3,200	3,483	8,9
Ciclo 26	32,892	34,093	3,7	10,871	11,525	6,0	3,650	3,717	1,8
Ciclo 27	40,028	51,086	27,6	14,757	21,643	46,7	3,333	4,217	26,5
Ciclo 28	25,892	27,421	4,7	9,730	11,480	17,1	3,079	3,367	9,5
TOTAL	724,977	767,781	5,9	272,441	321,447	18,0	86,212	94,267	9,3

Na Tabela 5.8 são apresentados com mais detalhes as principais informações sobre o desempenho do método proposto. Observa-se que, embora o objetivo do algoritmo seja maximizar a energia total produzida ao longo de todo o período de simulação, alguns ciclos obtiveram uma redução em seus valores de energia gerada. Isto se justifica pelo fato de que neste cenário a operação da usina resulta em um *acoplamento hidráulico* entre os ciclos de

geração. Portanto, para que haja um ganho global na energia gerada durante todo o período de operação, possivelmente alguns ciclos deverão ter suas gerações reduzidas.

Na Figura 5.16 é apresentada a variação do nível do reservatório durante os seis primeiros ciclos de geração descritos na Tabela 5.8. Conforme já justificado através da Figura 5.7, a quantidade de turbinas despachadas em um ciclo de geração influenciará diretamente o nível do reservatório ao final da geração. Ocorre que este nível corresponderá à cota inicial do reservatório para o ciclo seguinte, ou seja, o esquema de despacho adotado em um dado ciclo exercerá uma influência direta sobre a geração no ciclo seguinte, o que implica um *acoplamento hidráulico* entre eles.

Os valores de cotas máximas e mínimas do reservatório indicados na Figura 5.16 são uma consequência da combinação de dois eventos principais: a estratégia de despacho adotada e a cota inicial do reservatório, ambos referentes ao ciclo de geração imediatamente anterior.

O método de otimização proposto para este cenário tem por objetivo a maximização da energia total gerada pela usina ao longo de um dado período de tempo. Devido à existência do acoplamento hidráulico entre os ciclos de geração, é possível que a solução encontrada não corresponda a um esquema de despacho em que todos os ciclos apresentarão um ganho positivo na energia gerada. Esta situação é de fato comprovada através dos resultados apresentados na Tabela 5.8 em que a melhor solução obtida para o período de geração de uma semana implicou a redução da energia gerada em alguns ciclos intermediários.

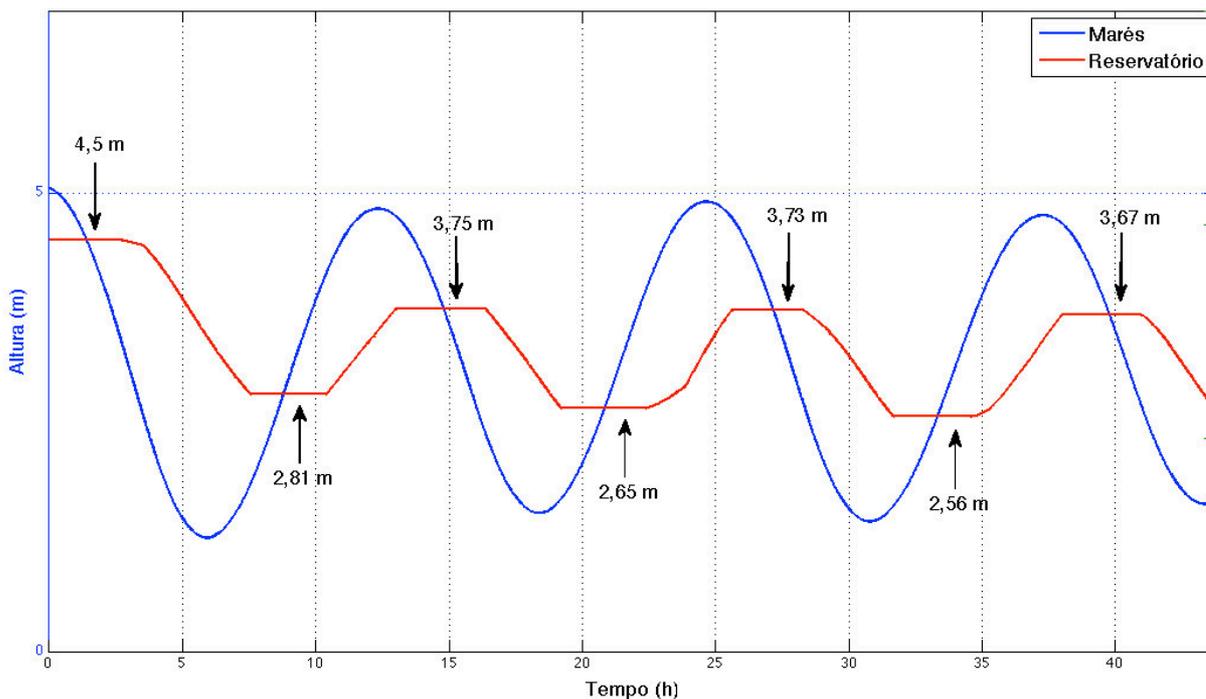


Figura 5.16. Variação do nível do reservatório resultante da otimização da geração em *feito-duplo*.

A situação de acoplamento hidráulico torna ainda mais evidente a necessidade de uma estratégia ótima de despacho da usina maremotriz. Isto por que o despacho realizado em um dado ciclo de geração afetará diretamente a geração nos ciclos seguintes.

Ao contrário do que ocorre no *cenário 3*, neste cenário não é possível obter uma relação entre as variações percentuais da energia gerada, da potência máxima e do tempo de geração de cada ciclo. Isso devido ao fato que, conforme observado na Figura 5.15, o perfil de potência gerada seguindo-se o esquema obtido através o AG difere bastante do perfil de potência obtido sem a utilização do AG.

Para fins de comparação, na Tabela 5.9 são apresentados os principais indicadores de desempenho da usina durante um ano de operação sem e com a otimização obtida através do método proposto.

Nota-se através da Tabela 5.9 que, ao longo de 1 ano de operação da usina seguindo-se o esquema de despacho obtido através do método proposto, um acréscimo significativo na energia gerada é obtido (5,9 %). Além disso, foi constatada uma significativa elevação da potência máxima e também um significativo acréscimo da potência média gerada. Tal condição justifica o incremento do fator de carga da usina. Por outro lado, houve uma redução

significativa do tempo de operação, o que indica que os períodos de geração em cada ciclo se tornaram menores, porém mais eficientes.

A geração anualizada adicional obtida é de 3,699 GWh. Considerando um valor de energia de R\$120 por MWh, a receita adicional obtida pela usina é de R\$ 443.800,00, número que cresce proporcionalmente com a capacidade da planta.

Tabela 5.9. Comparativo dos principais indicadores de desempenho da usina para um ano, operando sem e com a utilização de otimização – efeito-duplo.

	Sem Otimização	Com Otimização	Δ (%)
Quantidade de turbinas	13	13 (variável)	-
Energia Gerada (GWh/a)	53,920	57,619	6,9
Potência Máxima (MW)	27,509	32,407	16,07
Potência Média (MW)	6,138	6,559	6,86
Fator de Carga (%)	22,485	24,02	6,85
Tempo de Operação (%)	54,30	31,89	-41,49

Quanto ao desempenho do método proposto para este novo cenário, na Tabela 5.8 é ilustrada a evolução das soluções obtida pelo AG ao longo das gerações. As simulações foram realizadas em uma plataforma MAC OS com processador de 2,4 GHz Intel i5. O tempo de execução da simulação foi de 80,20 minutos.

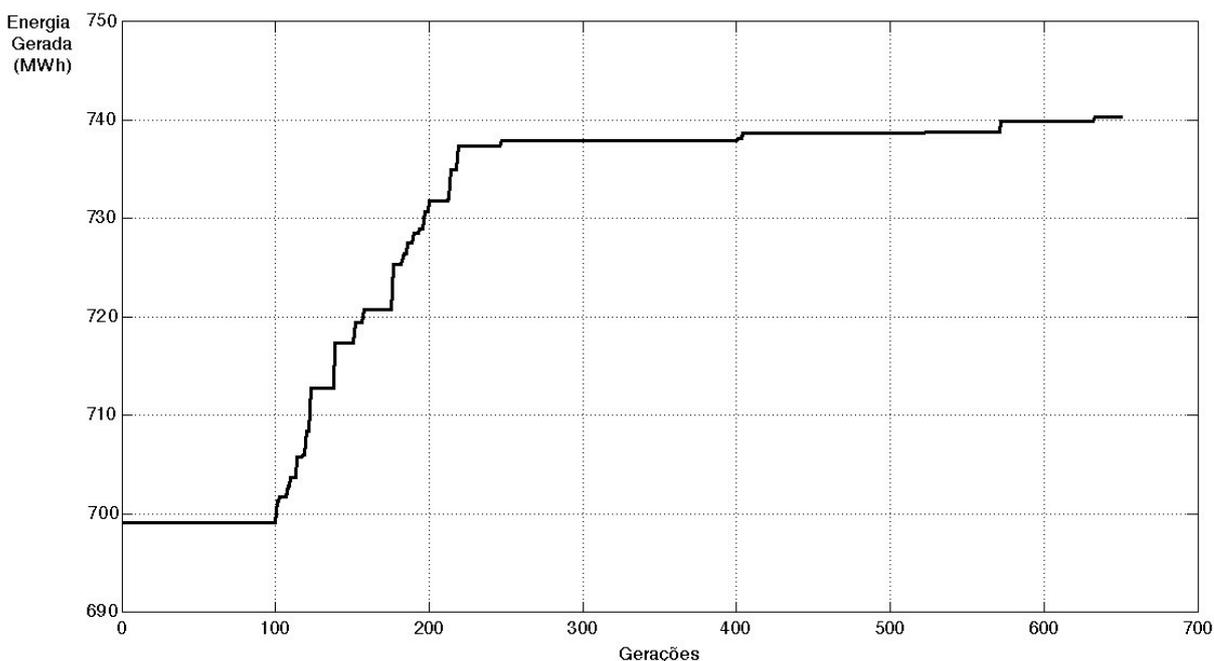


Figura 5.17. Evolução das soluções obtidas pelo AG proposto ao longo das gerações.

Através da Figura 5.16 é possível observar a evolução sempre crescente das soluções obtidas pelo AG. Esta característica acontece devido à utilização da técnica de *Elitismo* que garante que a melhor solução já obtida pelo AG será automaticamente incluída na geração seguinte. Além disso, observa-se que a utilização de 650 gerações para o critério de parada do AG mostrou ter uma boa relação entre esforço computacional e solução encontrada.

Capítulo 6

Considerações Finais e Conclusões

Os grandes desafios do setor energético mundial e nacional colocam as fontes alternativas em uma posição de destaque, tendo em vista que uma maior participação destas na matriz energética já é uma tendência inevitável para os próximos anos. Neste contexto, os estudos sobre a exploração da energia das marés tornam-se de bastante interesse sob um ponto de vista estratégico.

Um dos principais fatores que tem impulsionado a exploração maremotriz são os avanços e melhorias alcançados por parte dos equipamentos eletromecânicos usados na conversão da energia das marés. Esta situação permite a exploração até mesmo em situações de baixa queda, o que constitui um ponto bastante favorável para esta forma de geração de energia.

Embora a geração maremotriz ainda represente uma parcela mínima da matriz energética mundial, a tecnologia já utilizada neste tipo de geração, bem como os princípios operacionais adotados, já se mostrou bastante madura e confiável e, portanto, pode ser reproduzida seguramente em diversos outros locais com potencial significativo para este modelo de geração de eletricidade.

Diante desse novo contexto, novos estudos sobre a viabilidade de aproveitamento do estuário do Bacanga para a geração maremotriz devem ser encorajados.

Neste trabalho foi apresentada uma nova metodologia para a estimação de indicadores energéticos de uma usina maremotriz tomando-se como estudo-de-caso o estuário do Bacanga. A alta previsibilidade das marés demandou a elaboração de uma modelagem bastante precisa da operação da usina ao longo de um ano e de tal modo que as metodologias apresentadas nesse trabalho podem se tornar ferramentas bastante úteis para a modelagem e análise de projetos semelhantes ao do estuário do Bacanga.

As principais contribuições desta dissertação de mestrado foram:

- modelar de forma mais precisa os componentes de uma usina maremotriz com vistas a uma operação otimizada;
- formular o problema de operação ótima de uma usina maremotriz, objetivando a extração máxima de energia, considerando restrições técnicas e operacionais;
- estimar o número ótimo de unidades geradoras a ser instalada no estuário.
- prover um estudo mais realístico e atual para balizar a tomada de decisão com vista à implantação de uma usina geradora maremotriz no estuário do Bacanga.

No *cenário 1*, foi realizada uma modelagem e análise da operação da usina em *efeito-simples*. Os indicadores de desempenho resultantes desta estratégia de operação mostraram-se bastante promissores, embora haja restrições físicas que impeçam a exploração plena do potencial do reservatório. Além disso, alguns sub-cenários em que a cota máxima do reservatório é estendida para níveis além do limite atual foram analisados. Foi constatado que a elevação da cota máxima do reservatório resultaria em um ganho bastante considerável na energia total gerada pela usina. Portanto, uma análise detalhada sobre a possibilidade e viabilidade de elevação da cota máxima do reservatório é recomendada.

No *cenário 2* foi realizada a modelagem e análise da operação da usina em *efeito-duplo*. Através desta análise foi constatado que é possível elevar consideravelmente a energia total gerada pela usina mesmo havendo restrições quanto ao limite de cota máxima do reservatório. Os resultados obtidos através das simulações constataram que este cenário de operação pode ser considerado como uma alternativa ao problema de restrição de cota do reservatório, pois se observou que a quantidade de energia gerada neste cenário de operação é praticamente a mesma quantidade de energia gerada no *cenário 1* sem a restrição do reservatório.

Através da modelagem e análise dos *cenários 3 e 4* foi possível mostrar que, através da obtenção de um despacho ótimo das turbinas ao longo do processo de geração, é possível incrementar significativamente a energia gerada pela usina maremotriz.

Especificamente no *cenário 4*, em que a geração ocorre tanto na maré enchente quanto na maré vazante, o processo de otimização se torna ainda mais crítico e necessário devido a existência de um acoplamento hidráulico entre os ciclos de geração, ou seja, o esquema de despacho adotado em um ciclo poderá afetar significativamente o desempenho da geração nos ciclos seguintes. Desta forma, torna-se evidente que, para que haja um ganho global da

energia gerada pela usina em um dado período de tempo, é necessária a redução da geração em alguns ciclos intermediários. Em outras palavras, o ótimo global não implica necessariamente a soma dos ótimos individuais.

Como todo e qualquer algoritmo de otimização, o desempenho do método proposto neste trabalho está bastante relacionado à extensão do seu espaço de busca, ou seja, quanto maior, mais chances de melhorar o desempenho do algoritmo. Neste caso, o espaço de busca está relacionado à quantidade máxima de turbinas que é permitida ao algoritmo explorar. Portanto, pode-se afirmar que o desempenho global da técnica de otimização apresentada poder ser melhorado caso seja possível a utilização de mais turbinas na usina.

É possível afirmar, por exemplo, que as necessidades operacionais para a realização de bombeamento d'água para incrementar a energia gerada são bem maiores do que realizar um despacho otimizado das turbinas. Sabe-se, por exemplo, que a utilização de bombeamento d'água requer um complexo sistema que normalmente considera o uso dos próprios turbogeradores. Além disso, esta técnica requer que não haja restrições de limites de cotas no reservatório, reduzindo a sua aplicabilidade, como no caso do Bacanga.

Finalmente, através das técnicas e resultados apresentados nesse trabalho, é possível concluir que ainda é possível um aproveitamento significativo do estuário do Bacanga para geração maremotriz mesmo que restrições físicas impeçam o aproveitamento pleno de seu potencial.

Apêndice

Apêndice A – Contribuições Bibliográficas em Anais de Congressos e Periódicos

A seguir são listadas as publicações em anais de congressos e periódicos decorrentes das pesquisas desenvolvidas durante a elaboração desta dissertação de Mestrado.

- **LEITE NETO, P. B.** ; O. R. Saavedra ; N. J. Camelo ; Ribeiro L. A. S . Viabilidade de Pequenos Aproveitamentos para Geração de Energia Eletromotriz. In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito. Anais do CBA 2010. Ilha Solteira: UNESP, 2010. v. 1. p. 66286.
- **LEITE NETO, P. B.** ; O. R. Saavedra ; N. J. Camelo ; Ribeiro L. A. S ; FERREIRA, R. M. S. A. . Exploração de Energia Maremotriz para Geração de Eletricidade: Aspectos Básicos e Principais Tendências. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería (Impressa), v. 19, p. 219-232, 2011.
- **LEITE NETO, P. B.** ; O. R. Saavedra ; Ribeiro L. A. S . Modelagem e Análise de Geração Maremotriz no Estuário do Bacanga. In: XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. Anais do CBA 2012. Campina Grande: UFCG, 2012. v. 1. p. 100168.
- SANTOS, I. S.; **LEITE NETO, P. B.**; SANTOS, M. C. F. V.; O. R. Saavedra. Long-Term Tidal Hydro-Thermal Coordination. In: 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, 2012, Montevideo. Proceedings of 6th IEEE/PES T&D-LA 2012. Montevideo, 2012. v. 1. p. PID343.
- Oliveira D. Q.; **LEITE NETO, P. B.**; O. R. Saavedra; DELBONI, L. F. N.; Lima, B. I. L.. The Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles and Renewable Power Penetration into Distribution Systems. In: 6th IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition, 2012, Montevideo. Proceedings of 6th IEEE/PES T&D-LA 2012. Montevideo, 2012. v. 1. p. PID149.

Anexos

Anexo A - Principais Componentes Harmônicas de Marés no Terminal Ponta da Madeira

Na Tabela A.1 são apresentadas as principais componentes harmônicas de marés no terminal Ponta da Madeira [3].

Tabela A.1. Principais componentes harmônicas de marés no terminal Ponta da Madeira.

Componentes ¹	Frequência (ciclo/h)	Amplitude (cm)	Fase(°)
M2	0,08051	210,140	157,6
S2	0,08333	57,932	264,4
N2	0,07900	38,079	80,2
K2	0,08356	16,952	69,0
L2	0,08202	13,849	35,6
K1	0,04178	10,237	71,1
NU2	0,07920	10,149	131,9
O1	0,03873	9,825	343,1
MU2	0,07769	9,342	181,9
2N2	0,07749	7,920	19,4
LDA2	0,08182	5,529	321,6
M4	0,16102	4,907	100,5
SSA	0,00023	4,079	249,1
MSN2	0,08485	3,233	115,7
M6	0,24153	3,188	161,1
EPS2	0,07618	3,121	76,0
2MS6	0,24436	3,101	258,3
P1	0,04155	3,042	73,3
MS4	0,16384	2,413	241,4
OQ2	0,07598	2,140	307,1
M3	0,12077	2,014	74,5
MF	0,00305	1,900	225,4
MKS2	0,08074	1,842	89,2
2MN6	0,24002	1,756	79,6
Q1	0,03722	1,687	264,6
MN4	0,15951	1,432	32,0
MO3	0,11924	1,344	52,5
NO1	0,04027	1,167	341,0
MM	0,00151	1,096	62,2
MSF	0,00282	1,049	305,6
2SM6	0,24718	1,029	356,8

¹ As componentes harmônicas utilizadas para a modelagem de marés são representadas por siglas. Cada sigla corresponde a um fenômeno astronômico específico.

Referências Bibliográficas

- [1] Technical Support Unit Working Group III, "Renewable Energy Sources and Climates Mitigation - Special Report of the International Panel on Climate Change," Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), New York, 978-1-107-02304-6, 2012.
- [2] John Huckerby, "An IEA OPEN Energy Technology Bulletin Article," International Energy Agency, 2011.
- [3] R. M. S. A. Ferreira, Aproveitamento da Energia das Marés. Estudo de Caso: Estuário do Bacanga, MA, 2007, Dissertação de Mestrado.
- [4] Centrais Elétricas Brasileiras S/A, "Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá. Inventário Preliminar," Sondotécnica Engenharia de Solos, 1981.
- [5] R. M. S. A. Ferreira and Segen Farid Estefen, "Alternative Concept for Tidal Power Plant with Reservoir Restrictions," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 4, pp. 1151-1157, 2009.
- [6] AltProfits, "Wave and Tidal Energy - Market Potentials and Business Opportunities - PREVIEW," Clixoo, Nungambakkam, 2010.
- [7] J. Radtke, C.J. Dent, and S.J. Couch, "Capacity Value of Large Tidal Barrages," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1697-1704, Ago 2011.
- [8] International Energy Agency, "Key World Energy Statistics," IEA, Paris, 2008.
- [9] World Energy Council, "A Indústria da Energia Revela Sua Estratégia Contra as Alterações Climáticas," WEC, Londres, 2007.
- [10] International Energy Agency, "Renewable in Global Energy Supply. An IEA Fact Sheet.," IEA, Paris, 2007.
- [11] Ministério de Minas e Energia, "Balanço Energético Nacional. Relatório final - Ano base

- 2011," Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2011.
- [12] Ministério de Minas e Energia. (2012) PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. [Online]. www.mme.gov.br/programas/proinfa
- [13] Empresa de Pesquisa Energética. (2007, jun) EPE. [Online]. www.epe.gov.br/PNE
- [14] Ministério de Minas e Energia, "Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Manual de Operacionalização," MME, Anexo à Portaria no 287/2006 2006.
- [15] Ribeiro, L. A. de S, O. R. Saavedra, J. G. de Matos, G. Bonan, and A. S. Martins, "Small renewable hybrid systems for stand alone applications," in *IEEE - Power Electronics and Machines in Wind Applications - PEMWA*, Lincoln, 2009, pp. 1-9.
- [16] J King and T. Tryfonas, "Tidal Stream Power Technology – State of the Art," in *IEEE Oceans 2009 - Europe*, Bremen, 2009, pp. 1-8.
- [17] Sondotécnica Engenharia de Solos, "Aproveitamentos Maremotrizes na Costa do Maranhão, Pará e Amapá - Inventário Preliminar," Eletrobrás S/A, 1981.
- [18] S. L. Lima, O. R. Saavedra, A. K. Barros, and N. J. Camelo, "Projeto da Usina Maremotriz do Bacanga: Concepção e Perspectivas," in *5th Latim-American Congress Electricity Generation and Transmission*, vol. 1, 2006, pp. 1-6.
- [19] Instituto Hidrográfico Nacional - Portugal. (2012, set) Hidrográfico - Marinha. [Online]. <http://www.hidrografico.pt>
- [20] Leonor Martins and Joana Reis, "Nível Médio, Maré e Análise Harmónica," in *5as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Lisboa, 2007, pp. 1-16.
- [21] Roger H. Charlier and Charles W. Finkl, *Ocean Energy - Tide and Tidal Power*, 1st ed., Springer, Ed. Berlim, Alemanha: Springer, 2009, vol. 1.
- [22] Sherif Masoud, Maher Amer, and Mohamed Samir, "Tidal Power Generation Systems,"

Electrical Engineering Department, The American University in Cairo, Cairo, 2001.

- [23] AEA Energy & Environment, "Tidal Power in UK - Severn non-barrage Options," Sustainable Development Commission, 2007.
- [24] Roger H. Charlier, *Tidal Energy*, 1st ed. Nova York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982, vol. 1.
- [25] Robert H Clark, *Elements of Tidal Electric Engineering*, 1st ed., IEEE Press, Ed. Canadá: Wiley & Sons Inc, 2007, vol. 1.
- [26] Andritz. (2010) Hydromatrix - Main Conditions and Application Criteria. [Online]. www.andritz.com
- [27] Dimitri Boulze. (2008, abr) L'usine marémotrice de la Rance. [Online]. www.faiteslepleindavenir.com
- [28] MJ2 Technologies. (2012) Very Low Head Turbine. [Online]. www.vlh-turbine.com
- [29] D. Prandle, "Simple Theory for Designing Tidal Power Schemes," *Advances in Water Resources*, vol. 7, no. 1, pp. 21-27, mar 1984.
- [30] P. B. Leite Neto, O. R. Saavedra, N. J. Camelo, L. A. S. Ribeiro, and R. M. Ferreira, "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, ago 2011.
- [31] J.P. Frau, "Tidal energy: promising projects: La Rance, a successful industrial-scale experiment," *IEEE Transactions on Energy Conversions*, vol. 8, no. 3, pp. 552-558, set 1993.
- [32] The Annapolis Country Spectator. (2010, ago) Tidal Power, a Sussess Story. [Online]. <http://www.annapoliscountyspectator.ca>
- [33] Cañra20K. (2010, ago) Wikimedia Commons. [Online]. <http://commons.wikimedia.org>

- [34] Markus Schneeberger, "Sihwa Tidal - Turbines and Generators for the World's Largest Tidal Power Plant," British Hydropower Association, Andritz VA Tech Hydro, Bristol, 2008.
- [35] Nohyoung Park, "Sihwa Tidal Power Plant: a success of environment and energy policy in Korea," Korea University, 2007, 2007.
- [36] F. H. Fhamy, "An Optimum Operation and Mathematical Model of Tidal Energy System at Red Sea Area," in *Chemistry and Chemical Engineering International Conference*, vol. 1, Kyoto, 2010, pp. 664-667.
- [37] Madhu Chittora. (2008, out) Projects Monitor. [Online]. <http://www.projectsmonitor.com>
- [38] L. B. Bernshtein, "Tidal Power Development - A Realistic, Justifiable and Topical Problem of Today," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, Moscow, 1995, pp. 591-599.
- [39] Koh Siong Lee, Kuala Lumpur, and Lim Yun Seng, "Preliminary investigation of the potential of harnessing tidal energy for electricity generation in Malaysia," in *IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago, 2008, pp. 1-7.
- [40] A. Sarmiento. J.M. Pólo J. Rodríguez, "Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas," *Revista de Ingeniería*, vol. 1, no. 28, pp. 99-105, jul 2008.
- [41] Hydro Tasmania Hydro Electric Corporation, "Study of Tidal Energy Technologies for Derby," Sustainable Energy Development Office, Tasmania, 2001.
- [42] Sustainable Development Commission. (2007, set) Turning the Tide. Tidal Power in the UK. [Online]. <http://www.sd-commission.org.uk/>
- [43] P.B. L. Neto, D.Q. Oliveira, N.J. Camelo, and O.R. Saavedra, "Estudo do Potencial para Geração de Energia Elétrica a partir de Fonte Maremotriz," in *The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE*, vol. 1, Ubatuba, 2009, pp. 709-713.

- [44] P. B. Leite Neto, O. R. Saavedra, and L. A. S. RIBEIRO, "Modelagem e Análise de Geração Maremotriz no Estuário do Bacanga," in *XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2012*, vol. 1, Campina Grande, 2012, p. 100168.
- [45] DAEWOO E&C, "Sihwa Tidal Power Plant Project," DAEWOO E&C,.
- [46] Jahangir Khan and Gouri S. Bhuyan. (2006) Ocean Energy: Global Technology Development Status. [Online]. www.iea-oceans.org
- [47] S. Gooch, J. Thomson, B. Polagye, and D. Meggitt, "Site characterization for tidal power," in *OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi - Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges*, Biloxi, 2010, pp. 1-10.
- [48] J. King and T. Tryfonas, "Tidal stream power technology - state of the art," in *OCEANS 2009 - EUROPE*, Bremen, 2009, pp. 1-8.
- [49] N.E. Turner and A. Aberdeen Owen, "The Development of a Tidal Turbine for Deployment in Areas with Slow Moving Tidal Flows," in *OCEANS 2007 - Europe*, Aberdeen, 2007, pp. 1-3.
- [50] SeaGeneration. (2012, ago) Marine Current Turbines LTD. [Online]. www.seageneration.co.uk
- [51] Hammerfest Strom. (2012) Andritz Hydro Hammerfest. [Online]. <http://www.hammerfeststrom.com>
- [52] M.L Rahman and Y. Kyoto Shirai, "Hybrid Offshore-wind and Tidal Turbine (HOTT) Energy Conversion I (6-Pulse GTO Rectifier and Inverter)," in *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies*, Singapura, 2008, pp. 650-655.
- [53] Aboul-Seoud and A.M. Sharaf, "A Dynamic Voltage Regulator compensation scheme for a grid connected village electricity hybrid wind/tidal energy conversion scheme," in *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*, Montreal, 2006, pp. 1-6.
- [54] Hybrid Power Generation System Using Offshore-Wind Turbine and Tidal Turbine for

- Power Fluctuation Compensation (HOT-PC), "Rahman, M.L.; Oka, S. ; Shirai, Y. ," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010, pp. 92-98.
- [55] Zoneamento Ecológico do Estado do Maranhão - ZEEMA. (1999) Fotos Aéreas - São Luís. [Online]. www.zeema.ma.gov.br
- [56] Google Inc. (2012, out) Google Earth.
- [57] Centrais Elétricas Brasileiras S/A, "Estudo preliminar de variantes para a usina-piloto," ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 1981.
- [58] Sebastián de la Torre and Antônio J. Conejo, "Optimal Self-Scheduling of a Tidal Power Plant," *Journal of Energy Engineering*, vol. 131, no. 1, pp. 26-51, abr 2005.
- [59] A. Merlin, P. Sandrin, J. M. Gres, and M. Hilairret, "AGRA, the New Operation Model for the "La Rance" Tidal Power Plant," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 101, no. 2, pp. 290-294, fev 1982.
- [60] Bodhibrata Nag, "A Dynamic Programming Algorithm for Optimal Design and Operation of Tidal Power Plants," Indian Institute of Management Calcutta, Calcutta, 2011.
- [61] D.N. Deokar, N.S. Lingayat, S.A. Khaparde, and S.P. Sukhatme, "Modelling tidal power plant at Saphale," in *IEEE Region 10 International Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control*, Mumbai, 1998, pp. 544-547.
- [62] Diretoria de Hidrografia e Navegação - Centro de Hidrografia da Marinha. (2012) Banco Nacional de Dados (2012). Previsões de Marés - Terminal Ponta da Madeira. [Online]. www.mar.mil.br
- [63] Rui, M. G Castro, "Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Mini-Hídrica.," Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.
- [64] Thomas James Hammos, "Tidal Power," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 8, 1993, pp. 419-433.

[65] Melanie Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press, Ed. Estados Unidos: MIT Press, 1998.

[66] Marek Obitko. (1998) Introduction to Genetic Algorithms. [Online]. www.obitko.com