

FIS-25



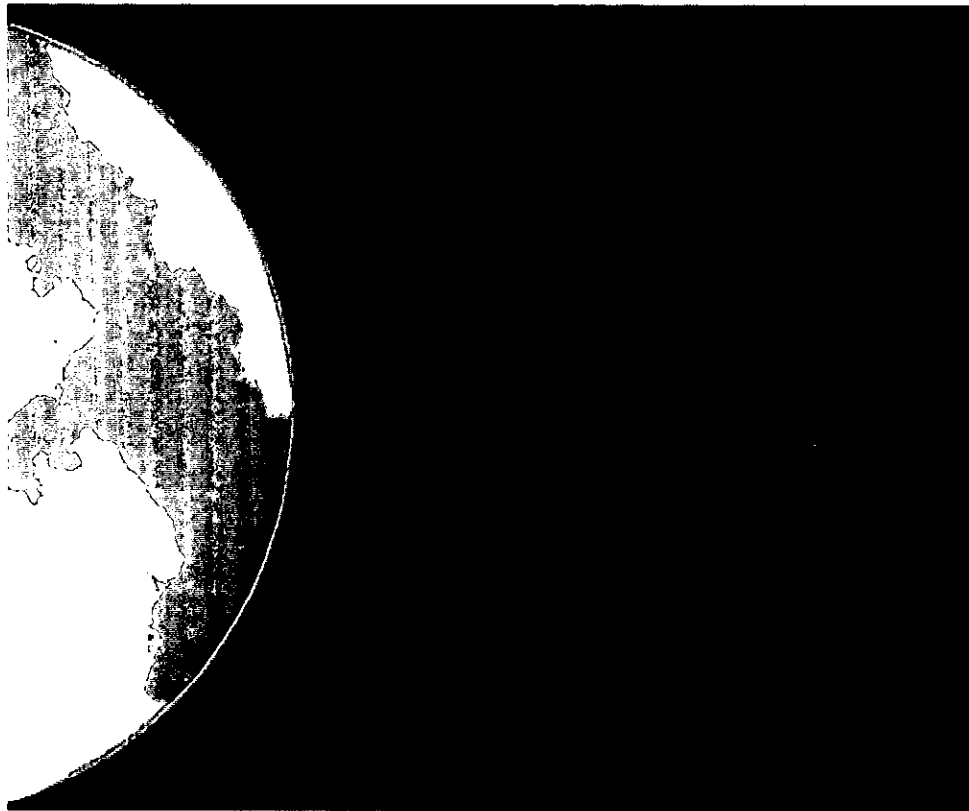
UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

## Análise e Previsão de Marés na Baía de Maputo



Autora: Stella Melta Grichone Langa



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**OCEANOGRAFIA**

Trabalho de Licenciatura

## **Análise e Previsão de Marés na Baía de Maputo**

**Supervisor:** dr.<sup>a</sup> Verónica F. Dove

**Co-supervisor:** dr. Nordino M. Muaievela

**Autora:** Stella Melta Grichone Langa

*Maputo, Maio de 2008*

## Declaração de Honra

Stella Melta Grichone Langa declara por sua honra que o presente trabalho foi inteiramente produzido e realizado com base no material referido ao longo do mesmo e com base nas ideias do autor.

Maputo, Abril de 2008

O autor:

Stella H. G. Langa  
(Stella Melta Grichone Langa)

## Dedicatória

Este trabalho é dedicado:

À minha mãe Flórida Niquice  
E aos meus irmãos Sérgio Langa e Célia Langa.

## Agradecimentos

Agradeço a Deus por me guiar todos os dias da minha vida.

Aos meus supervisores dr<sup>a</sup> Verónica Dove e dr. Nordino Muaievela, pela atenção, disponibilidade e acompanhamento incondicional no processo de realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao dr. Sinibaldo Canhanga, pela atenção, disponibilidade e paciência mostrados durante a realização deste trabalho especificamente na parte que diz respeito ao programa *t\_tide*.

Vão os meus agradecimentos ao INAHINA, Departamento de Oceanografia, pela cedência dos dados, elemento indispensável para a realização deste trabalho.

Agradeço aos docentes e Corpo Técnico Administrativo do Departamento de Física pela indispensável contribuição que tiveram ao longo da minha formação

Os meus agradecimentos especiais à minha família, meus irmãos Sérgio e Célia Langa e à minha mãe Flórida Niquice pelo incondicional apoio moral durante a realização deste trabalho.

Um especial agradecimento aos meus colegas do curso, em especial ao Francisco Francisco, pelo apoio prestado durante a realização deste trabalho.

A todos que directamente ou indirectamente ajudaram na realização deste trabalho o meu muito obrigado.

## Lista de Abreviaturas

<b>Amp</b>	Amplitude
<b>BM</b>	Baixa-Mar
<b>cm</b>	Centímetro
<b>cpd</b>	Ciclos por dia
<b>cph</b>	Ciclos por hora
<b>Freq</b>	frequência
<b>Hz</b>	Hertz
<b>IIP</b>	Instituto de Investigação Pesqueira
<b>INAHINA</b>	Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação
<b>m</b>	Metro
<b>NM</b>	Nível médio
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>PM</b>	preia-mar
<b>SNR</b>	Razão (taxa) do sinal do ruído.

<b>Índice</b>	<b>Página</b>
Declaração de Honra.....	i
Dedicatória.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Lista de Abreviaturas.....	iv
Índice.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas .....	viii
Lista de Gráficos.....	ix
Resumo.....	x
<b>CAPÍTULO I: Introdução e Objectivos .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução.....	1
1.1.1 Área de Estudo.....	2
1.2 Objectivos.....	3
1.2.1 Objectivo Geral.....	3
1.2.2 Objectivos Específicos .....	3
<b>CAPÍTULO II: Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
2.1 Marés .....	4
2.1.1 Marés em Baías.....	6
2.2 Teoria das Forças Geradoras de Marés.....	6
2.2.1 Teoria de equilíbrio .....	7
2.2.2 Teoria Dinâmica de marés .....	8
2.3 Lei da Atracção gravitacional.....	9
2.4 Sistema Terra — Lua.....	10
2.5 Sistema Sol — Terra .....	13
2.6 Variações lunares que Induzem a Maré.....	14
2.6.1 Declinação da Lua .....	14
2.6.2 A Órbita Elíptica Lunar .....	15
2.7 Métodos de Análise e Previsão de Marés.....	16
2.7.1 Método de Análise de Respostas.....	16
2.7.2 Método Não Harmónico .....	16

2.7.3 Método de Análise Harmónica .....	17
2.7.3.1 Princípios Gerais da Análise Harmónica de Marés. ....	17
2.7.3.2 Ajustamento pelo Método de Mínimos Quadrados.....	18
2.7.3.3 Ondas Harmónicas de Marés.....	19
2.7.3.4 Termos de Águas Pouco Profunda.....	21
2.7.3.5 Separação dos Constituintes.....	22
<b>CAPÍTULO III: Material e Métodos.....</b>	<b>23</b>
3.1 Material.....	23
3.2 Métodos .....	23
3.2.1 O $T_{tide}$ .....	23
3.2.1.1 O algoritmo em $T_{tide}$ .....	24
<b>CAPÍTULO IV: Resultados e Discussão .....</b>	<b>26</b>
4.1 Constituintes Harmónicos .....	26
4.2 Contribuição dos Constituintes Harmónicos e Análise da Banda de Frequências .....	27
4.3 Tempo de Resolução das Espécies de Marés. ....	29
4.4 Previsão das Marés e Determinação dos Valores Residuais .....	30
<b>CAPÍTULO V: Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>34</b>
5.1 Conclusões.....	34
5.2 Recomendações .....	34
6 Referências Bibliográficas.....	35
Anexo I .....	36
Anexo II.....	39



## Lista de Figuras

Figura 1. Baía de Maputo (New Millennium Atlas).....	2
Figura 2. Elementos da Maré (Park, 1999).....	4
Figura 3. Representação gráfica dos principais tipos de Marés - Diurna e semi -diurna .....	5
Figura 4. Magnitude Relativa da componente horizontal da força geradora de marés .....	8
Figura 5. Efeitos da força gravitacional em pontos diferentes da Terra (NOAA, 2004) .....	10
Figura 6. Rotação do sistema Terra – Lua (NOAA, 2005) .....	10
Figura 7. Derivação da força geradora de marés.....	11
Figura 8. As duas saliências da maré, situação para o caso da Lua directa ao plano do Equador...13	
Figura 9. Combinação da atracção da Lua e do Sol (NOAA,2005).....	14
Figura 10. Declinação da Lua ao Longo da sua trajectória (HILL, 1972) .....	15
Figura 11. Sucessivas posições da Lua no período de 18.6 anos durante o ciclo de precessão .....	16
Figura 12. Procedimento interactivo entre Matlab e o modelo T_tide.....	24

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Principais constituintes harmónicos de Maré (NOAA, 2004).....	20
Tabela 2. Alguns dos Principais Constituintes das águas pouco profundas .....	21
Tabela 3. Principais constituintes harmónicos para a Baía de Maputo.....	26
Tabela 4. Quantificação das contribuições das espécies de marés.....	28
Tabela 5. Análise do tempo de resolução dos grupos de ondas.....	29

## Lista de Gráficos

Gráfico 1. Quantificação da contribuição das espécies.....	28
Gráfico 2. Marés modeladas para o ano de 2001.....	30
Gráfico 3. Marés Modeladas para o período 25 de Fevereiro à 26 de Fevereiro.....	31
Gráfico 4. Modelação da maré para o período 20 de Março à 25 de Março.....	31
Gráfico 5. Marés Modeladas para o período 10 de Julho à 05 de Agosto.....	32
Gráfico 6. Amplitudes Observadas no período de 04 de Julho à 08 de Julho .....	32
Gráfico 7. Modelação da maré para o período 20 de Agosto à 20 de Setembro .....	33
Gráfico 8. Marés Observadas no período 21 de Setembro à 25 de Setembro .....	33

## Resumo

A eficácia dos modelos de previsão de marés depende do conhecimento sobre as características dos constituintes harmónicos. No presente trabalho faz-se a previsão de marés do ano 2001 da Baía de Maputo, sul de Moçambique, a partir de alturas de marés registadas no ano 2000. Os dados *in-situ* foram registados através de um Marégrafo - OTT ancorado no Porto de Maputo pelo Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação. Uma combinação de uma sub rotina do modelo *T\_tide* e do programa Matlab foi feita para a análise e identificação dos constituintes harmónicos, sua contribuição na maré observada, determinação da banda de frequência e dos resíduos. Foram identificados 59 constituintes, dos quais 16 são os mais significativos sendo os maiores contribuintes as espécies semi-diurnas, seguidas das diurnas com amplitudes de cerca de 89.39% e 4.83% respectivamente. As bandas de frequência situaram-se em dois intervalos, 0.0343966-0.0463430 ciclos por hora, para as espécies diurnas e 0.0759749 - 0.0850736, para as semi-diurnas. Na previsão de marés, os meses de Março e Julho registaram marés de maior amplitude, enquanto o mês de Setembro registou a menor amplitude. O facto de a menor elevação calculada ser maior que o nível de referência, nível igual a zero, e os resíduos não apresentarem descontinuidades consideráveis indica que a previsão de marés da Baía de Maputo foi realizada com sucesso usando o T-tide, que faz a predição com um nível de confiança de 95%.

## **CAPÍTULO I: Introdução e Objectivos**

### **1.1 Introdução**

Marés, são a oscilação periódica do nível das águas do mar causada pela atracção gravitacional entre a Lua, o Sol e a Terra. O conhecimento das características das marés é de grande importância pois contribui para o desenvolvimento de várias áreas de conhecimento tais como a modelação de processos costeiros e marinhos, Transporte de sedimentos e dispersão de poluentes (Canhanga, 2005), predição da subida do nível médio das águas do mar, definição de rotas e horários de navegação e concepção de estruturas de protecção costeira.

Em termos científicos, as marés são, normalmente, consideradas como sendo uma sobreposição de vários constituintes harmónicos e o conhecimento da contribuição efectiva de cada constituinte é usado para melhorar os modelos de análise e previsão de marés. A previsão de marés é feita com recurso a três métodos nomeadamente o modelo de análise de respostas, o método não - harmónico e o método harmónico, sendo este último considerado o melhor, por permitir a obtenção de resultados com maior precisão (Pawlowicz, 2002), e será o método de estudo deste trabalho.

Em Moçambique, país com uma linha de costa de cerca de 2770 km de comprimento (Canhanga, 2005) a previsão de marés é feita pelo Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, INAHINA, que tem marégrafos em vários portos e que anualmente produz uma tabela de marés. Esta instituição faz a previsão de marés através do método harmónico, mas não faz a determinação da contribuição dos constituintes harmónicos.

O presente estudo tem como finalidade prever as mares da Baía de Maputo e determinar a contribuição dos principais constituintes harmónicos para permitir identificar os mais significativos e tornar os modelos mais simples e eficazes, e consequentemente contribuir para o aperfeiçoamento da previsão e análise de marés na Baía de Maputo. Para a realização do estudo foi escolhida a Baía de Maputo, área de grande importância socio-económica e ecológica pois por um lado encontra-se nela um dos portos mais importantes de Moçambique, o Porto de Maputo, e por outro lado desenvolve-se nesta baía uma pescaria artesanal, baseada na exploração da magumba e do camarão de superfície (Seminário IIP, 2001), recursos estes associados aos escoamentos dos rios Incomati, Maputo e Estuário do Espírito Santo (Umbeluzi, Matola e Tembe). Para além disto o facto de a Cidade de Maputo, com o sistema de esgotos deficiente, situar-se nas proximidades da baía, e o facto de alguns rios que nela drenam serem partilhados com outros países onde são usados para fins

de irrigação agrícola representa uma um risco de poluição das águas da Baía de Maputo, justificando assim o conhecimento detalhado das marés na área.

### 1.1.1 Área de Estudo

Este trabalho tem como área de estudo a Baía de Maputo localizada na região sul de Moçambique Figural, entre as latitudes 25°55'S e 26°10'S e longitudes 32°40'E e 32°55'E. A Baía, com uma área de aproximadamente 1200 Km<sup>2</sup>, tem uma ligação com o mar do lado nordeste e é limitada pela Península de Machangulo, a sul, e pela Ilha da Inhaca a Este. A profundidade média é de cerca de 10m, existindo porém canais que têm profundidades de cerca de 20 metros (Hoguane, 2002). A zona Ocidental da Baía de Maputo apresenta águas com carácter estuarino, devido a influencia dos rios Incomati, Maputo, Umbeluzi, Matola e Tembe, enquanto que a zona Oriental apresenta águas mais salinas devido à conexão da baía com o Oceano Índico. O substrato do lado Ocidental da baía é uma mistura de lodo e areia, encontrando-se bancos de areia dinâmicos numa área de cerca de 381 km<sup>2</sup>.

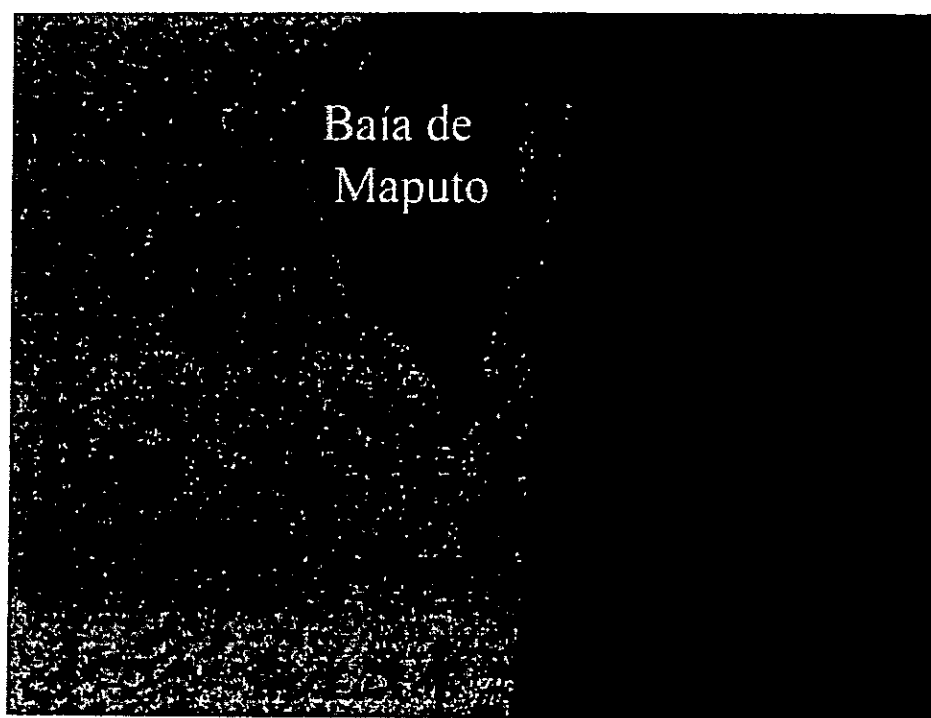


Figura 1. Baía de Maputo (New Millennium Atlas).

## 1.2 Objectivos

### 1.2.1 Objectivo Geral

O presente trabalho tem como objectivo geral prever marés da Baía de Maputo e determinar a contribuição dos principais constituintes harmónicos.

### 1.2.2 Objectivos Específicos

- Identificar os principais constituintes harmónicos;
- Quantificar a contribuição dos constituintes e fazer uma análise da banda de frequências;
- Determinar a relação entre o tempo de resolução para cada espécie de marés, e o período da amostragem necessário para efectuar a análise harmónica.
- Determinar os valores residuais.

## CAPÍTULO II: Revisão Bibliográfica

### 2.1 Marés

Maré ou maré astronómica é a oscilação periódica do nível das águas, devido à atracção gravitacional entre a Lua, o Sol e a Terra (Pugh,1987); esta oscilação é caracterizada por uma amplitude, frequência, velocidade e comprimento de onda. A média dos níveis atingidos pela água durante o fenómeno de marés denomina-se **nível médio, NM**. O aumento e a diminuição do nível do mar resultam dos movimentos horizontais da água (correntes de marés) na onda de maré. O aumento do nível é usualmente referido como fluxo ou enchente, **preia-mar, PM**, enquanto que a diminuição designa - se por vazante, **baixa-mar, BM**, onde a figura 2 ilustra os elementos da maré (alturas em função do tempo).

O fenómeno de enchente e vazante da maré na costa é uma manifestação geral do aumento e diminuição do nível do mar causado pelo movimento de uma onda longa que afecta o oceano como todo. Devido ao seu longo período e comprimento de onda, a onda de maré comporta-se como onda de águas pouco profundas.

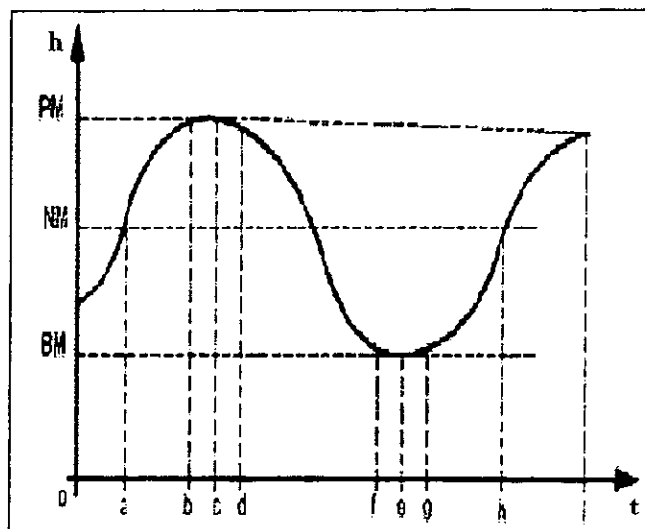


Figura 2. Elementos da Maré (Park, 1999).

Onde:

- a - O nível sobe durante algum tempo, periodo denominado de "enchente";
- b - Atinge um nível máximo denominado "prea mar";



- c - Fica um certo tempo estacionado, período denominado de “estofa de enchente”;
- d - Baixa durante um certo tempo, período da “vazante”;
- e - Alcança o nível mínimo, chamado “baixa mar”;
- f - Fica estacionado algum tempo, novamente chamado de estofa, só que agora denominado “estofa de vazante”; e
- g - Recomeça a subida do nível, iniciando a repetição do movimento de “enchente”.

As medições de marés são referidas a um plano fixo denominado **plano do zero hidrográfico**. A diferença entre o nível instantâneo da maré e o zero hidrográfico chama-se **altura da maré**, e entre aquele nível instantâneo e o nível médio chama-se **elevação da maré**.

Na maioria dos locais onde ocorrem marés, há duas preia-mares e duas baixa-mares por cada dia lunar com elevações idênticas em valor absoluto. A maré com estas características chama-se do tipo **semi-diurna**. Nas marés semi-diurnas a amplitude varia de dia para dia, desde um máximo, que se dá nas proximidades da Lua nova ou Lua cheia — **marés vivas ou de sizígias** — a um mínimo que se verifica nas proximidades do quarto crescente ou minguante — **marés mortas ou de quadraturas**. Em certos locais existe uma única preia-mar e uma baixa-mar por cada dia lunar, e neste caso diz-se que a maré é do tipo **diurna**, Figura 3. Existe uma maré intermédia, denominada maré do tipo **misto**, em que nalguns dias lunares ocorrem duas preia-mares e duas baixa-mares e noutros, apenas ocorrem uma preia-mar e uma baixa-mar (Fernandes,1971). A diferença de alturas entre as preia-mares ou baixa-mares do mesmo dia lunar chama-se **desigualdade diurna**.

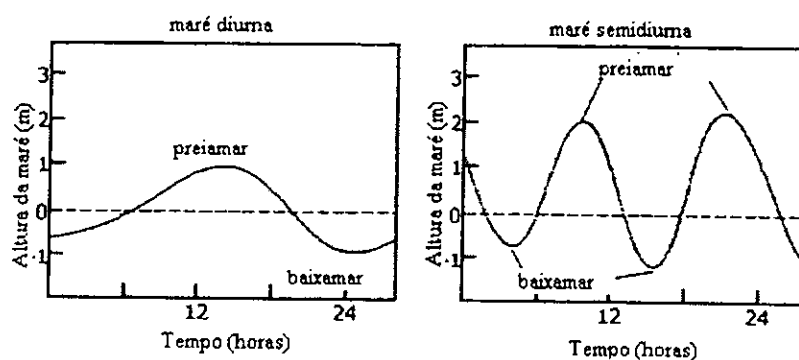


Figura 3. Representação gráfica dos principais tipos de Marés - Diurna e semi -diurna (NOOA, 2005)

A maré resulta da interacção entre acção do Sol e da Lua, quando estes encontram-se sobre o Equador as marés tendem a ter maior amplitude. Quando o Sol está directamente acima do Equador (21 de Março e 22 de Setembro) ocorrem as marés vivas Equinociais. E nos Solisticios, altura em que o Sol fica perpendicular a Terra (21 de Junho - menor distancia à Terra), as amplitudes tendem a reduzir-se mesmo nas marés vivas.

A onda da maré tem períodos que variam de 12.5 horas ou seja as altas e baixas das marés ocorrem aproximadamente duas vezes por dia, e tanto o período como amplitude da maré variam de um modo sistemático. A altura da maré varia na ordem de 3.5 metros e intervalos da altura de maré quase sempre são constantes ou variam dentro de mesmos limites para uma determinada região. Estas características fazem com que ao contrário das ondas geradas por ventos, as ondas de marés sejam previsíveis. A onda da maré é gerada por forças externas periódicas, por isso não se comportam exactamente como as ondas de gravidade. Para casos práticos, principalmente no fundo dos oceanos podem-se considerar ondas de gravidade.

Para além das variações de cerca de 12h, pode se considerar outras variações periódicas de 7-8 dias que correspondem a maré viva e maré morta, podendo também ser previstas e caracterizadas com grande precisão (Foreman,1992). O número finito de termos harmónicos que é usado para a representação de uma onda é chamado de **constituintes harmónicos de marés**.

### **2.1.1 Marés em Baías**

Em algumas baías, o alcance das marés é muito largo comparado com o alcance no oceano próximo a boca das baías. Este fenómeno é as vezes atribuído à ressonância, a água na baía tem um período natural de oscilação próximo ao da maré astronómica e como consequência acumula energia. A onda de maré é reflectida no fundo da baía e, no seu movimento de recuo gera uma onda reflectida que tem o mesmo comprimento de onda e a mesma frequência que a onda incidente. Quando a onda reflectida se move com frequência igual a da onda incidente, gera-se uma onda estacionária e tem lugar a ressonância (Pond e Pickard, 1981).

### **2.2 Teoria das Forças Geradoras de Marés**

As marés são a consequência simultânea da atracção das forças gravitacional entre a da Lua, Sol e Terra, e também da revolução entre a Terra e a Lua, e a Terra e o Sol. Em principio, os outros corpos existentes no sistema solar também exercem forças de marés na Terra, mas os seus valores são muito pequenos comparados com os da Lua e do Sol.

Existem duas teorias que explicam o fenómeno das marés, a teoria de equilíbrio e a teoria dinâmica de marés.

### 2.2.1 Teoria de Equilíbrio

A Teoria de equilíbrio foi proposta por Newton como primeiro passo para a investigação da resposta do oceano nas forças geradoras de marés. Esta teoria é usada como padrão de referencia para teorias mais realísticas. Na teoria de equilíbrio, considera que o Oceano cobre toda Terra com profundidade e densidade constante. As forças atractivas, Figura 4, tendem a convergir a água de  $A$  para  $E$ , e divergir do Polo Norte e Polo Sul. Se um tempo infinito for permitido, um equilíbrio será estabelecido quando a força da Pressão hidrostática resultante do declive da água da superficial balançar a força atractiva. Entretanto se a Terra sólida girar, uma sequência de duas marés altas e duas marés baixas serão observadas por dia lunar (excepto nos polos Norte e Sul onde não haverá crescimento ou diminuição das águas). Esta teoria explica a natureza semi-diurna das marés e a desigualdade das alturas das sucessivas altas e baixas mares (quando a Lua não esta no plano equatorial). Entretanto, o alcance de predição da subida e descida das águas, cerca de 0.55m para a maré lunar e 0.24m para a maré solar, com um máximo combinado de 0.79m, esta muito longe do que é observado no oceano real. Outro erro da maré de equilíbrio deve-se ao facto de que a resposta do oceano real em relação as forças dos vários constituintes não estão em proporção ao numero dos constituintes, mas variam de lugar para lugar, e que a maré alta nem sempre ocorre na altura da transição da Lua (passagem no Zenite), mas pode ser horas antes ou depois. (Pond e Pickard, 1981). Esta teoria é torna-se artificial com a assumpção de que a Terra esta completamente coberta de água e um tempo infinito no equilíbrio. Ajuda a predizer marés com um intervalo máximo de 0.5-1m (Park, 1999).

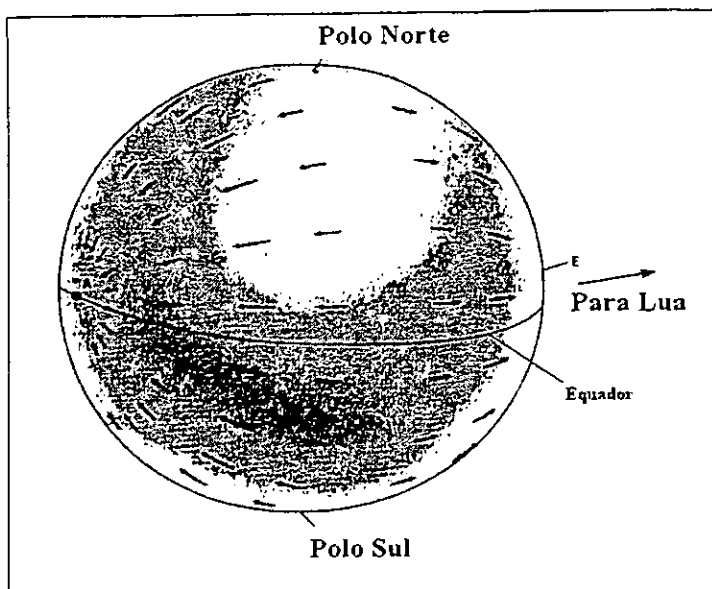


Figura 4. Magnitude Relativa da componente horizontal da força geradora de marés (NOAA, 2004).

### 2.2.2 Teoria dinâmica de marés

Depois de Newton, seguiu-se Laplace com a teoria dinâmica das marés. Nesta teoria, assume-se ainda que um oceano homogêneo cobre toda a Terra com uma profundidade constante mas as forças periódicas atractivas são consideradas que geram ondas com períodos correspondentes aos dos constituintes, isto é, ondas forçadas. A aceleração de coriolis e a aceleração vertical da partícula são desprezadas. Em desenvolvimentos subsequentes, esforços subsequentes foram expandidos na tentativa de encontrar uma solução analítica para a equação de Laplace para corpos de água de forma regular, tais como canais estreitos ( para representar canais ou longo, estreitos mares). Muitos dos estudos formam para águas de profundidades constantes e eles no geral desprezam qualquer oscilação livre que pode ser gerada no oceano livre pela interacção do movimento forçado com a topografia do fundo, entretanto alguns aspectos e alguns efeitos da estratificação da densidade, foram estudados mais tarde. Outras influencias nas marés, que mostraram ser significantes, são os efeitos da auto atracção das massas de água e a deformação da Terra sólida pelas marés oceânicas. Enquanto o termo de coriolis e a aceleração vertical não são desprezados, particularmente para ondas internas de gravidade.

Não foi possível obter uma solução analítica para equação de movimento para bacias que realmente representam o oceano real. Entretanto, é possível resolver a equação numericamente e resultados promissores para uns tantos modelos simplificados da bacia oceânica. A limitação na obtenção de soluções detalhadas, encontra-se no facto de grande quantidade de tempo computacional requer que

a forma e profundidade dos oceanos sejam representados sem tantas simplificações, (Pond e Pickard, 1981).

Esta teoria não prevê as marés com precisão, mas dá -nos uma melhor explicação do modelo da maré observada.

O método de previsão de marés mais preciso (perto da costa), é através da medição cautelosa das marés num período extenso de anos e o uso da análise harmónica (Pawlowicz, 2002).

### 2.3 Lei da Atracção Gravitacional

A lei gravitacional de Newton assume que qualquer partícula no universo de massa  $m_1$  atrai uma outra partícula de massa  $m_2$  com uma força que é directamente proporcional ao produto das duas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre estas massas. A Figura 5, ilustra a acção da força gravitacional em diferentes pontos da Terra (pontos  $a$ ,  $p$  e  $e$ ).

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

Onde:

R –distância entre as duas massas.

F - é a força gravitacional de Newton;

G –constante gravitacional de Newton e

$m_1$  e  $m_2$  - massa da Terra e Lua respectivamente.

Os dois corpos irão girar em torno de um centro de massa comum, com um período chamado de “período sideral”. O centro de massa do sistema Terra-lua encontra-se dentro da Terra, devido ao facto desta ser 81 vezes maior que a Lua (Pugh, 2004). As duas massas movem-se em torno do seu centro de massa comum, a aceleração necessária para cada corpo girar em volta deste centro de massa é produzida pela atracção dos dois. O Período sideral para o sistema Terra-Lua é de 27.32 dias, definido como um mês sideral.

Como os dois corpos giram no sistema, cada elemento individual de cada corpo, irá mover-se em círculos de mesmo raio que o círculo descrito pelo centro de massa.

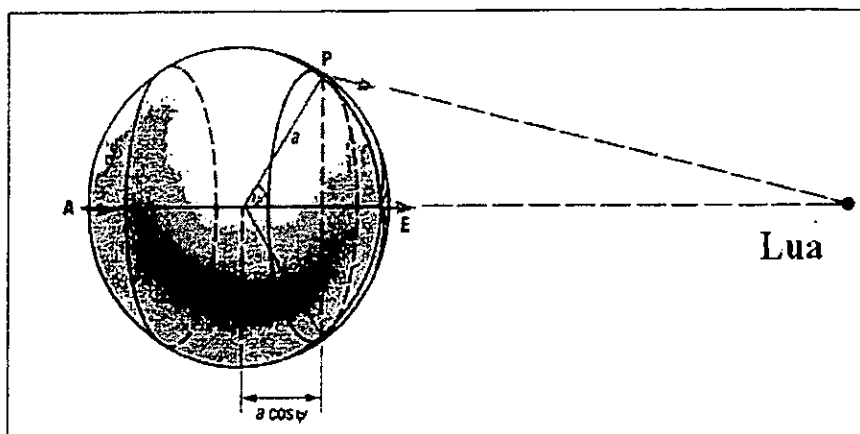


Figura 5. Efeitos da força gravitacional em pontos diferentes da Terra (NOAA, 2004)

#### 2.4 Sistema Terra — Lua

A Terra e a Lua são como um único sistema rodando em volta de um centro de massa comum com um período de 27.3 dias (Pugh, 2003), numa órbita elíptica. Para efeitos de simplificação de cálculos consideraremos a órbita circular. A Terra gira em volta de um centro comum de massa a uma distância de aproximadamente 4700 km em relação ao centro da Terra. A Figura 6 ilustra a rotação do sistema Terra - Lua.

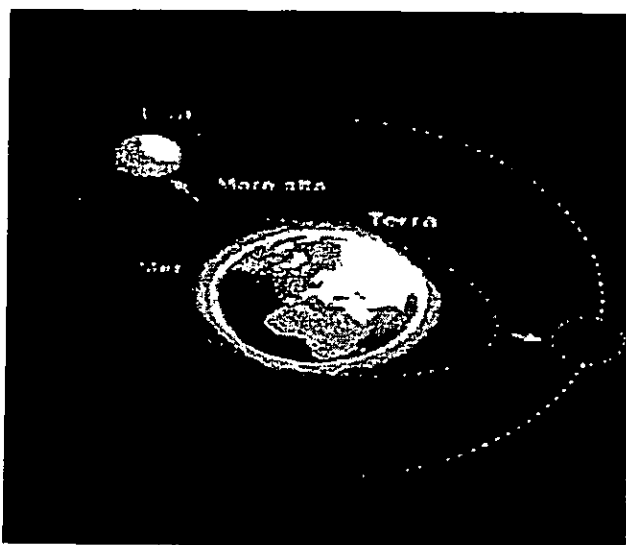


Figura 6. Rotação do sistema Terra - Lua (NOAA, 2005)

A principal consequência do movimento em volta do centro de massa comum é que todos os pontos em volta da Terra também irão mover-se em volta do centro de massa e também terão uma órbita elíptica, deste modo iram experimentar uma força centrífuga que é proporcional a aceleração e dirigida para o centro (produto do raio pelo quadrado da velocidade angular). A Lua encontra-se no plano do Equador, duas vezes em cada 27.3 dias. A força total que actua no sistema Terra - Lua é equilibrada pela força de atracção gravitacional entre os dois corpos, e a força centrífuga é paralela ao eixo que une os centros da Lua e Terra, a força geradora da marés é maior ao longo dos círculos pequenos (Figura 7).

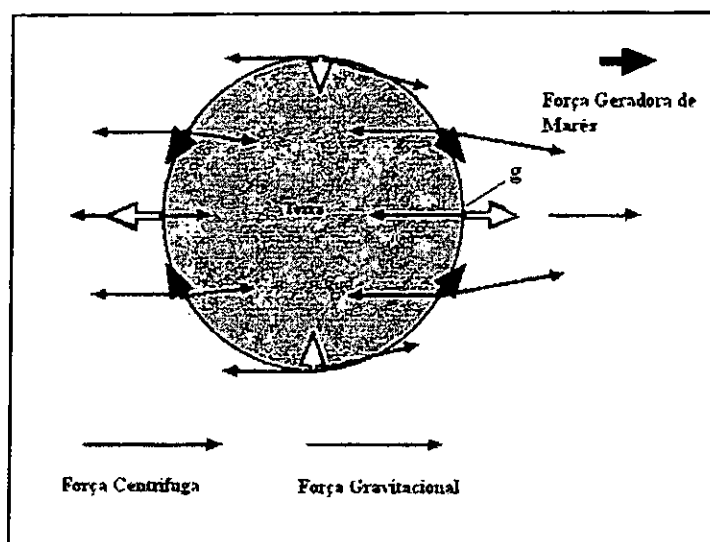


Figura 7. Derivação da força geradora de marés.

A resultante entre a força centrífuga e a força gravitacional da Lua é conhecida como **força geradora da maré**. Dependendo da posição da Terra em relação à Lua, esta força é dirigida para dentro, paralela ou para fora da superfície da Terra. A sua magnitude e direcção relativa são mostradas na Figura 7.

A força gravitacional entre dois corpos é dada por:

$$F_g = \frac{GM_1M_2}{R^2} \quad (2)$$

Onde  $M_1$ ,  $M_2$  são as massas dos dois corpos,  $R$  é a distância entre os centros e  $G$  é a constante universal cujo valor é:  $6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{Kg}^2$ .

A força de atracção gravitacional é maior em  $g$  do que no centro da Terra pois o ponto  $g$  esta próximo da Lua pela distância do raio da Terra  $a$  (Figura 5). A força gravitacional exercida pela Lua no centro da Terra é exactamente igual e oposta a força centrífuga, assim a força geradora de maré no centro da Terra é zero. Como a força centrífuga é igual em todos os pontos da Terra e no centro da Terra é igual a força de atracção gravitacional exercida pela Lua, podendo se substituir o lado direito da equação 1, isto é:  $(GM_1M_2/R^2)$  pela força centrífuga.

A força geradora da maré no ponto  $g$  é dada pela diferença da força de atracção gravitacional devido à Lua pela força centrífuga em  $g$ . Isto é:

$$F_{GM} = \frac{GM_1M_2}{(R-a)^2} - \frac{GM_1M_2}{R^2} \quad (3)$$

Que simplifica-se para:

$$F_{GM} = \frac{GM_1M_2a(2R-a)}{R^2(R-a)^2} \quad (4)$$

Ao se assumir que  $a$  é muito pequeno comparado com  $R$ , são validas as aproximações:

$(2R-a) \approx 2R$  e  $(R-a)^2$  por consequência:

$$F_{GM} = \frac{GM_1M_2 2a}{R^3} \quad (5)$$

Isto mostra que a força geradora da maré é proporcional a  $1/R^3$ .

Por exemplo no ponto P, Figura 5, a primeira aproximação da força de atracção gravitacional será :

$$fg = \frac{GM_1M_2}{R-a \cos \psi} \quad (6)$$

O comprimento  $a \cos \psi$  é marcado na Figura 5.

É esta força que causa o movimento da água devido à componente horizontal. A força de atracção tem um máximo quando a Terra está sobre o Equador. Num estado de equilibrio, (a chamada maré de equilibrio) pode-se formar duas saliências, produzindo assim um elipsóide. A Figura 8 mostra as saliências da maré de equilibrio, isto é, uma cobertura completa das águas em volta da Terra com a Lua directamente acima do Equador.



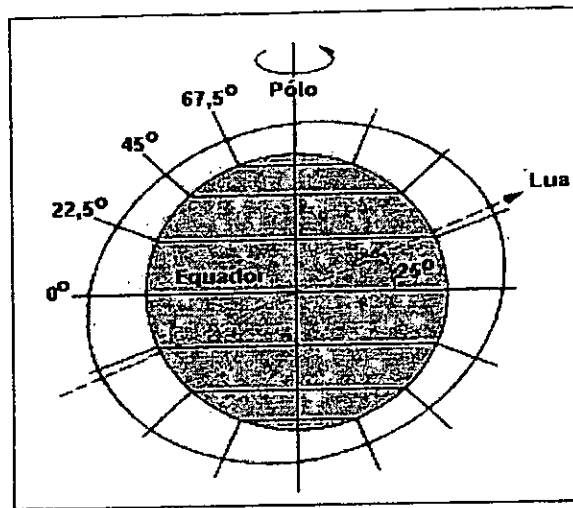


Figura 8. As duas saliências da maré, situação para o caso da Lua directa ao plano do Equador (NOAA, 2004).

Porque a Lua roda em volta do centro de massa do sistema Terra - Lua num período de 27.3 dias, na mesma direcção em que a Terra gira em volta do seu próprio eixo em 24 horas, o período de rotação da Terra em relação à Lua é de 24 horas e 50 minutos e designa-se **dia lunar**. Como consequência, o intervalo sucessivo entre as marés altas ou marés baixas deve ser de 12 horas e 25 minutos e o intervalo entre uma maré baixa e maré alta é de 6 horas e 25 minutos (Pugh, 1987).

## 2.5 Sistema Sol — Terra

À semelhança da Lua, o Sol produz forças de atracção em relação à Terra e por consequência produz também duas saliências de maré; embora tendo maior massa em relação à Lua, o Sol está a 360 vezes mais distante da Terra, assim a magnitude da força geradora da maré é de cerca de 0.46 vezes comparada com a força geradora de maré devido à Lua. As duas marés solares produzir-se-iam assim pelo deslocamento do Sol para o Oeste e da Terra para o Este, e a maré solar semi-diurna teria um período de 12 horas. As características da órbita da Terra em relação ao Sol mudam ciclicamente de períodos de dezenas até centenas de anos e estas mudanças influenciam as marés mas não em escalas temporais de interesse para o presente trabalho (Pugh, 2004). A acção de todos os restantes astros é desprezível, dadas as suas grandes distâncias à Terra ou reduzidas massas (Park, 1999). A Figura 9 representa a combinação da atracção da Lua e do Sol.

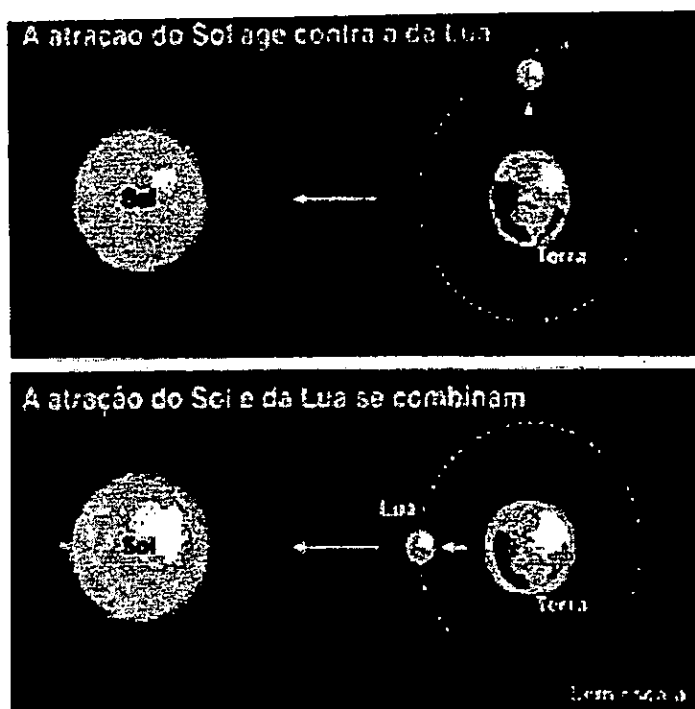


Figura 9. Combinação da atracção da Lua e do Sol (NOOA,2005).

## 2.6 Variações Lunares que Induzem a Maré

A posição relativa e orientação da Lua em relação à Terra não são constantes, mas variam de acordo com um ciclo em interação; contudo, somente dois ciclos têm significado no efeito da maré lunar, nomeadamente a declinação da Lua e a órbita elíptica Lunar.

### 2.6.1 Declinação da Lua

A órbita da Lua não é plana, ela está inclinada em relação ao Equador, Figura 10, e como consequência a linha que une o centro da Terra à Lua faz um ângulo que varia de zero a  $28.3^\circ$ . A inclinação da órbita em relação ao equador é cerca de  $5^\circ$ , sendo portanto a declinação máxima num certo ano de cerca de  $28^\circ$ , ( $23^\circ + 5^\circ$ ), enquanto que num outro ano a declinação máxima será cerca de  $18^\circ$  ( $23^\circ - 5^\circ$ ), (Craig, 1974).

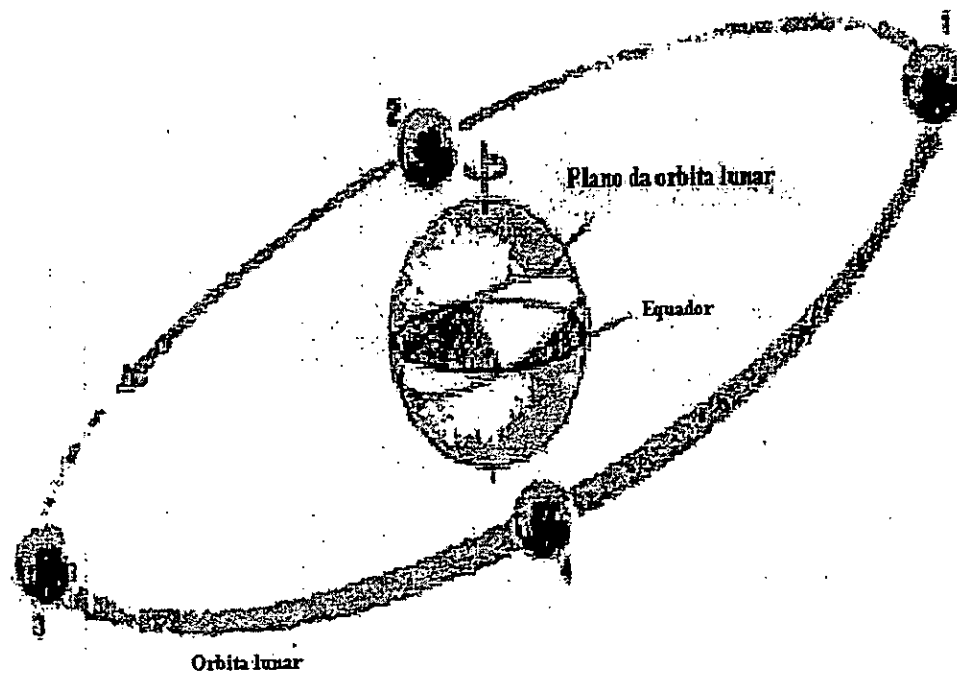


Figura 10. Declinação da Lua ao Longo da sua trajetória (HILL, 1972).

### 2.6.2 A Órbita Elíptica Lunar

A órbita da Lua em torno do centro de massa do sistema Terra -Sol é elíptica, e a Terra é um dos focos da elipse. Como consequência a variação da distância Terra -Lua afecta a força geradora de marés. O período em que Lua está mais próxima da Terra designa-se por perigeu e a força geradora da maré aumenta em 20% do valor médio. Quando a Lua está mais distante da Terra tem-se o apogeu e a força geradora da maré reduz em 20% do valor médio. A situação da máxima declinação ocorre a cada 18.6 anos. Portanto para obter um quadro completo das variações da maré em qualquer ponto da Terra são necessárias observações contínuas num período de cerca de 19 anos. A órbita lunar faz o movimento de "precessão", isto é, o movimento resulta na trajetória como é ilustrada pela Figura 11. O ciclo de precessão só se completa em 18.6 anos (Hill, 1972).

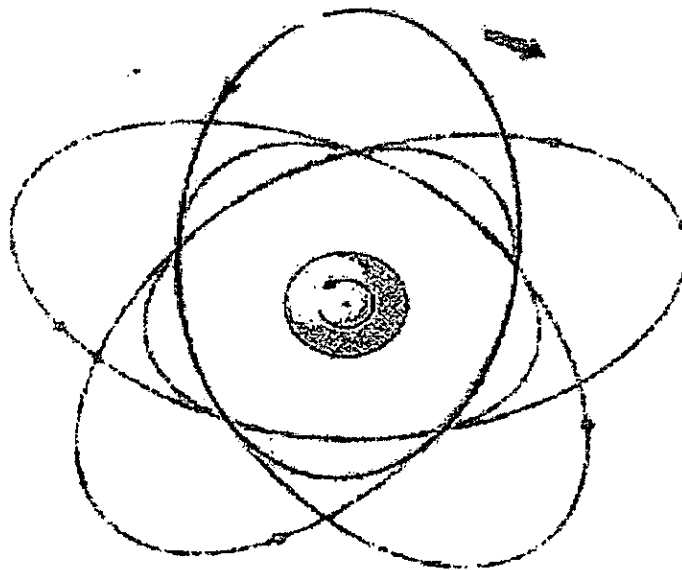


Figura 11. Sucessivas posições da Lua no período de 18.6 anos durante o ciclo de precessão (HILL, 1972).

## 2.7 Métodos de Análise e Previsão de Marés

Existem 3 métodos para análise de marés. Que são: o Método de análise de resposta, Método não harmónico e o Método harmónico, este último usado para presente trabalho.

### 2.7.1 Método de Análise de Respostas

Este método considera a variação interna da onda de maré como não atenuada (a resposta da amplitude é única), mas podendo existir uma diferença de fase. Neste método considera-se como valores de entrada a maré de equilíbrio e procura-se descrever a resposta em função da força gravitacional. O uso da relação com a maré de equilíbrio na análise de pequenos períodos de dados, faz com que este método se torne uma assumpção implícita (Pugh, 2004).

### 2.7.2 Método Não Harmónico

Neste método as alturas horárias das marés altas e baixas são relacionadas com a transição lunar. O intervalo entre a transição lunar na Lua nova ou na Lua cheia e a maré alta seguinte é conhecida como estabelecimento local. Correções são aplicadas para a idade de marés, declinações solares e lunares e as suas distâncias. A vantagem destes parâmetros não harmónicos é a sua facilidade de determinação e de aplicação e a limitação deste método reside na dificuldade de usá-lo em trabalhos

científicos, e no facto de ele conter informações insuficientes para uma descrição completa de marés e para previsões destas.

### 2.7.3 Método de Análise Harmónica

#### 2.7.3.1 Princípios Gerais da Análise Harmónica de Marés

A análise harmónica das marés é um processo de cálculo que nos permite determinar as semi-amplitudes  $H$  e os atrasos de fase  $g$  das várias ondas componentes a partir do conhecimento das alturas de maré observadas  $y$ .

A base da análise harmónica assume que as variações da maré podem ser representadas por um numero finito  $N$ , ou seja, pela soma de uma série de ondas harmónicas da seguinte forma:

$$y = fH \cos(V_0 + nt + u - g) \quad (7)$$

$f$  – coeficiente de redução de amplitude;

$V_0$  – argumento astronómico da onda às 0:00 horas médias de Greenwich;

$n$  – velocidade horária da onda;

$u$  – correcção da fase

As constantes  $H$  e  $g$ , semi-amplitude e atraso de fase, é que são desconhecidas à priori e variam de local para local. A observação de marés dá-nos porém o valor da altura da maré em relação a um plano de referência fixo. Se este for o zero hidrográfico designá-lo-emos por  $Z_0$ , a sua distância ao nível médio, as alturas lidas no marégrafo ou na escala de marés à hora  $t$  obedecem à expressão:

$$y = Z_0 + \sum fH \cos(V_0 + nt + u - g) \quad (8)$$

Esta decomposição só é possível a partir da observação do fenómeno durante um período relativamente longo, porque baseia-se na variação relativa das fases das ondas componentes, devido ao facto de as suas velocidades angulares horárias,  $n$ , serem diferentes. Esta separação das ondas componentes da maré é extremamente complexa, não só por haver numerosas ondas cujas velocidades não estão relacionadas entre si por expressões numéricas simples, como por as observações estarem sempre sujeitas a erros (ver Pugh, 1987), não só os inevitáveis erros acidentais de todas as observações físicas, como as influências meteorológicas estranhas ao fenómeno astronómico, único que nos interessa. Assim, as influências da pressão atmosférica ou do vento

podem ser muito grandes, em dados e circunstâncias locais chegando até a mascarar completamente a maré astronómica.

### 2.7.3.2 Ajustamento pelo Método de Mínimos Quadrados

No método de análise harmónica nós ajustamos a função de maré do seguinte modo:

$$y = Z + \sum_N Hf \cos[\sigma t - g + (V + u)] \quad (9)$$

Onde os parâmetros desconhecidos são  $Z$ , nível do mar, e as series  $H$  e  $g$  que são a amplitude e o desfasamento respectivamente. Onde o ajustamento será  $\Sigma S^2(t)$ , o quadrado da diferença entre a maré observado e a maré computadorizada:

$$S(t) = O(t) - T(t)$$

quando somados todos valores observados, ter-se-á o seu valor mínimo. O  $f$  e o  $u$  são os ajustamentos nodais, e os termos  $\sigma t$  e  $V$  juntos determinam o ângulo de fase da maré de equilíbrio.  $V$  é o ângulo de fase de equilíbrio para os constituintes de origem num tempo arbitrário. Uma convenção aceitável, é tomar  $V$  como sendo do meridiano de Greenwich, e  $t$  como o tempo padrão da local em estudo.

Neste método determinam-se as ondas componentes de curto período recorrendo ao principio de que a soma das alturas de maré observada nos instantes em que determinada onda tem uma certa fase, para um número suficientemente longo de observações, apenas é influenciada por essa onda, eliminando-se portanto todas as restantes.

O procedimento de ajuste de mínimos quadrados envolve uma matriz algébrica que esta fora do alcance das sub rotinas dos programas matemáticos computadorizados, mas esquematicamente a equação pode ser escrita como:

$$[\text{nível observado} - \text{conhecido}] = [\text{maré de equilíbrio} - \text{conhecida}][\text{constante empírica} - \text{desconhecida}]$$

Na verdade, para horas especiais, o contributo da onda considerada é constante, ao passo que os contributos das outras são variáveis e tendem a cancelar-se, porque as suas fases passam por todos os valores possíveis (Pugh, 1987).

### 2.7.3.3 Ondas Harmónicas de Marés

A cada termo do desenvolvimento harmónico corresponde uma oscilação periódica do nível do mar do mesmo período. A sua amplitude varia, porém, de local para local e existe normalmente um desfasamento entre esta oscilação e a componente harmónica que a origina, que também é característico do local. Portanto a cada termo harmónico o potencial tem a forma:

$$y = fA \cos(V_0 + nt + u) \quad \text{ou} \quad y = fA \cos(V + u) \quad (10)$$

Sendo  $A$  amplitude teórica relativa, e  $V = V_0 + nt$  ( $n$  = velocidade horária) a fase astronómica, corresponde em cada local da Terra uma oscilação periódica, ou onda de maré, de forma:

$$y = fH \cos(V_0 + nt + u - g) \quad (11)$$

onde  $H$  e  $g$  são as constantes harmónicas locais dessa onda, que podem calcular-se a partir das observações de marés (Pugh, 1987).

As ondas harmónicas distribuem-se essencialmente por várias categorias:

- *Ondas de período - longo* (como  $S_a, S_{sa}$ ) - de velocidades angulares horárias pequenas;
- *Ondas diurnas* (de índice 1, como  $P_1, S_1, K_1$ ) - de velocidade de cerca de  $15^\circ/h$  e, portanto, períodos próximos de 24 horas;
- *Ondas semi-diurnas* (de índice 2, como  $M_2, S_2$ ) - de velocidade próxima de  $30^\circ/h$  e, portanto, períodos próximos das 12 horas;
- *Ondas terço-diurnas* (de índice 3, como  $M_3, MO_3$ ) - de velocidade próxima de  $45^\circ/h$  e, portanto, períodos próximos de 8 horas;
- *Ondas quarto-diurnas* (de índice 4, como  $M_4, S_4$ ) - de velocidade próxima de  $60^\circ/h$  e, portanto, períodos próximos de 6 horas;
- *Ondas sexto-diurnas* (de índice 6, como  $M_6, MSN_6$ ) - de velocidade próxima de  $90^\circ/h$  e, portanto, períodos próximos de 4 horas.

Como exemplo analisa-se o significado físico das seguintes ondas:

$M_2$  - Tem exactamente o dobro da velocidade média do movimento aparente diurno da Lua. Representa a maré devido a uma Lua fictícia que percorre o Equador com movimento uniforme e

sempre à distância média da Terra, originando duas preia-mares e baixa-mares, separadas de cerca de 24h 50m, e de elevações iguais. Por isso é designada por *lunar principal semi-diurna*.

S<sub>2</sub>— conceito idêntico para o sol médio. É a *solar principal semi-diurna*.

Para atender as variações de distância, declinação, etc., consideram-se outras ondas que produzam efeito equivalente.

Devido à variação da paralaxe da Lua consideram-se as ondas que estão em conjunção ou em oposição com M<sub>2</sub>, conforme a Lua esteja no perigeu ou no apogeu.

N<sub>2</sub> é chamada “elíptica lunar maior” e L<sub>2</sub> “elíptica lunar menor”.

Como a acção da Lua é maior quando ela atravessa o Equador do que quando atinge a sua declinação máxima, considera-se uma onda que esteja em fase com M<sub>2</sub> quando a Lua atravessa o Equador, e em oposição quando a Lua atinge a sua declinação máxima (Fernandes, 1971).

Tabela 1. Principais constituintes harmónicas de Maré (NOAA, 2004).

Espécies	Símbolo	Período (horas)	Frequências (cph)
<b>Semi-diurnas</b>			
Lunar principal	M <sub>2</sub>	12.42	0.0805
Solar principal	S <sub>2</sub>	12	0.0833
Grande lunar elíptica	N <sub>2</sub>	12.66	0.0789
Luni-solar	K <sub>2</sub>	11.97	0.0835
<b>Diurnas</b>			
Lunar -solar diurna	K <sub>1</sub>	23.93	0.0418
Lunar principal	O <sub>1</sub>	25.82	0.0387
Solar principal	P <sub>1</sub>	24.07	0.0415
Grande lunar eclíptica	Q <sub>1</sub>	26.87	0.0372
<b>Longos Períodos</b>			
Lunar quinzenal	M <sub>f</sub>	327.9	0.0030
Lunar mensal	M <sub>m</sub>	661.3	0.0015
Solar semi-anual	S <sub>sa</sub>	438.3	0.0022



### 2.7.3.4 Termos de Águas Pouco Profundas

Nas águas pouco profundas a progressão da onda de maré é modificada pela fricção do fundo e outros processos físicos que dependem do quadrado ou força da altura da maior amplitude da própria maré. Estes termos de águas pouco profundas causam por vezes o dobro menor e maior altura do nível da água. Esta distorção pode, também, ser expressa como um simples constituinte harmónico com uma velocidade angular que pode ser o produto, soma ou diferença das velocidades dos constituintes astronómicos listados na Tabela 1. A Tabela 2 mostra os principais constituintes de águas pouco profundas e os constituintes dos quais foram gerados.

Tabela 2: Alguns dos principais constituintes de águas pouco profundas (Pugh, 1981)

Espécies	Geradas
<b>Semi-diurnas</b>	
MNS <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
2MS <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub>
MSN <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
2SM <sub>2</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub>
<b>Diurnas</b>	
MP <sub>1</sub>	M <sub>2</sub> , P <sub>1</sub>
SO <sub>1</sub>	S <sub>2</sub> , O <sub>1</sub>
<b>Longos Períodos</b>	
M <sub>SF</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub>
<b>Quarto Diurnas</b>	
MN <sub>4</sub>	M <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>
M <sub>4</sub>	M <sub>2</sub>
MS <sub>4</sub>	M <sub>2</sub> , S <sub>2</sub>
MK <sub>4</sub>	M <sub>2</sub> , K <sub>2</sub>
S <sub>4</sub>	S <sub>2</sub>
<b>Octa Diurnas</b>	
M <sub>8</sub>	M <sub>2</sub>

### 2.7.3.5 Separação dos Constituintes

Para separação de constituintes da mesma espécie usa-se a formula 11 (Pugh, 1972), que permite conhecer o período necessário para resolver dois constituintes da mesma espécie.

$$T = \frac{360^\circ}{(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (12)$$

Onde:  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  - velocidade do constituinte com menor e maior frequência respectivamente.

## CAPÍTULO III: Material e Métodos

### 3.1 Material

Para a realização deste trabalho foram usados:

- Dados horários de marés registados no Porto de Maputo por um marégrafo flutuador OTT. Este dados foram disponibilizados pelo INAHINA., Departamento de Oceanografia.
- Programa Matlab;
- Um computador e consumíveis.

### 3.2 Métodos

Os dados usados no presente trabalho foram colhidos no ano de 2000, digitalizados e tratados até um nível de confiança 5, considerado satisfatório para o uso.

Através do subprograma *t\_tide* acoplado ao MATLAB (ver Anexo I), construíram-se os gráficos das séries previstas e observadas gerando ao mesmo tempo uma tabela com os constituintes, suas amplitudes, frequências e fases.

A quantificação da contribuição dos constituintes é feita através da soma das amplitudes dos constituintes da mesma espécie de maré.

As diferenças entre os valores previstos e observados determinam os valores residuais.

#### 3.2.1 O *T\_tide*

O *t\_tide* é um programa computarizado específico para prever marés, dentro deste programa encontra-se um conjunto de subprogramas escritos em Matlab que fazem a análise harmónica, classificam e separam os constituintes difíceis de resolver devido à semelhança entre eles. Este programa faz a predição com um nível de confiança de 95%.

No programa estão incluídas 146 constituintes astronómicas e de águas pouca profundas. Dependendo do tempo de observações e da frequência de cada constituinte, algumas são incluídas nos cálculos e outras não.

A significancia dos constituintes é determinada através da Razão Sinal Ruído, SNR, que é calculado através do quadrado da razão entre a amplitude e o erro da amplitude. Considera-se o constituinte significativo quando o SNR é maior que unidade (Rayleigh=1).

A Figura 12 mostra o procedimento interactivo entre o Matlab e o T-tide em termos de variáveis de entra e de saída.

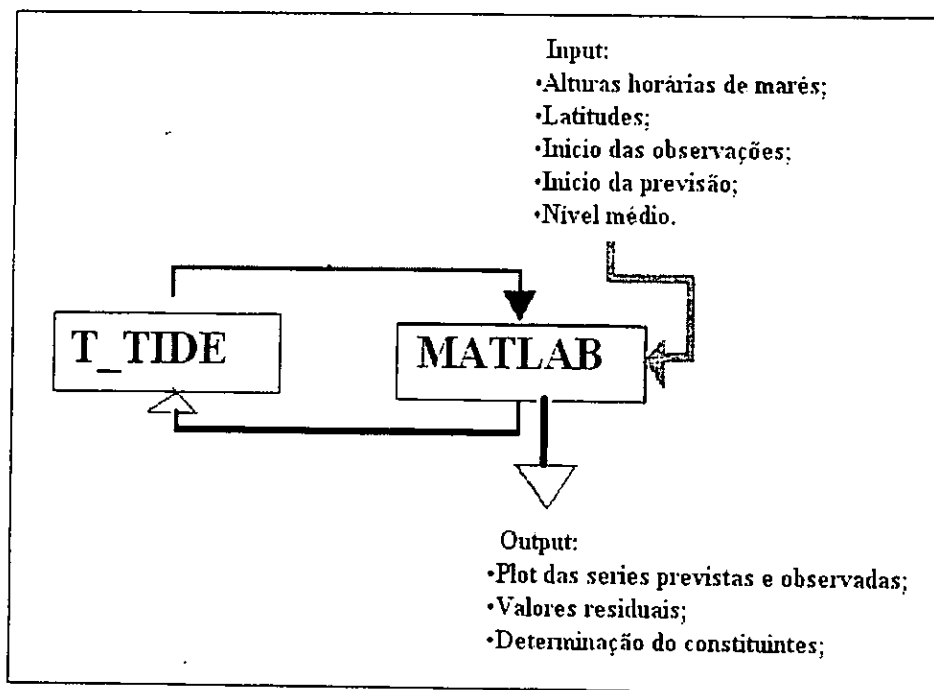


Figura 12. Procedimento interactivo entre Matlab e o modelo *T\_tide*

### 3.2.1.1 O Algoritmo em *T\_tide*

O algoritmo *t\_tide* consiste na separação de uma função de senos e cossenos, em que a serie temporal é expressa por números complexos ( $u+iv$ ). Sendo  $y(t)$  a série temporal observada com  $t = t_1, t_2, \dots, t_M$ , a resposta é modelada de modo:

$$x(t) = b_0 + b_1 t + \sum_{k=1}^N (a_k e^{i\sigma_k t} + a_{-k} e^{-i\sigma_k t}) \quad (13)$$

Onde:

$x(t)$  é a maré modelada,  $N$  é o número de componentes,  $\sigma$  é a frequência.

O ajuste dos mínimos quadrados que é a minimização dos coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $a_k$ , e  $a_{-k}$  é feita de modo:

$$E = \sum_{m=1}^M |x(t_m) - y(t_m)|^2 = \|Ta - y\|^2 \quad (14)$$

Onde:

$Y(t_m)$  é a maré observada,  $T$  é uma matriz de funções lineares e sinusoidais medidas no tempo de observação,  $y$  é uma matriz de valores observados e  $a$  é uma matriz de coeficientes  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $a_1, a_{-1}$  e  $a_k$ . O programa *T\_tide* estima os erros cometidos durante o ajuste dos coeficientes e faz a computação do intervalo de confiança que permite que se façam comparações quantitativas de análises diferentes.

## CAPÍTULO IV: Resultados e Discussão

### 4.1 Constituintes Harmônicos

Com recurso ao programa *t\_tide* identificaram-se 59 constituintes, Anexo II, as fases e amplitudes foram calculadas com 95% de intervalo de confiança, sendo os mais significativos 16, Tabela 3. Das componentes obtidas, 12 destas pertencem ao conjunto das principais componentes de águas pouco profundas. O número de constituintes depende do tempo de observação. Para este trabalho o período de observação, foi de um ano, e o número de constituintes encontrado é considerado satisfatório quando se toma em consideração que o programa Matlab inclui uma lista de 146 constituintes e destes os mais significantes foram identificados no presente trabalho. O grau de significancia dos constituintes é determinado pelo SNR dos mesmos.

Tabela 3. Principais constituintes harmônicos para a Baía de Maputo

Constituinte	Freq.(h <sup>-1</sup> )	Ampl.(m)	Ampl_ Erro	Fase(°)	Fase_ Erro	SNR
*Q1	0.0372185	0.0090	0.004	321.78	22.57	6.2
*O1	0.0387307	0.0278	0.004	359.85	7.92	63
*P1	0.0415526	0.0132	0.004	211.67	15.00	14
*K1	0.0417807	0.0350	0.004	200.86	6.31	89
*OO1	0.0448308	0.0058	0.004	273.78	40.18	2.4
*2N2	0.0774871	0.0240	0.007	103.28	16.45	10
*MU2	0.0776895	0.0633	0.006	171.51	6.22	97
*LDA2	0.0818212	0.0191	0.007	121.72	17.30	8
*L2	0.0820236	0.0397	0.006	124.46	8.14	41
*S2	0.0833333	0.5517	0.007	163.86	0.69	5.4e+003
*K2	0.0835615	0.1491	0.006	161.52	2.59	6e+002
*M3	0.1207671	0.0070	0.000	233.96	1.01	2.8e+003
*M4	0.1610228	0.0060	0.000	169.47	1.20	2.4e+003
*MS4	0.1638447	0.0120	0.000	285.00	0.57	9.8e+003
*S4	0.1666667	0.0010	0.000	201.16	8.30	58
*M8	0.3220456	0.0280	0.000	325.75	0.24	5.1e+004

## 4.2 Contribuição dos Constituintes Harmónicos e Análise da Banda de Frequências

A contribuição de cada espécie de marés foi obtida através da soma das amplitudes dos constituintes.

Os resultados encontram-se ilustrados na Tabela 4 e no Gráfico 1. Aqui constatou-se que as espécies semi-diurnas são as que mais contribuem para a amplitude total da maré na Baía de Maputo, com uma amplitude de cerca de 1.97m, o que corresponde a cerca de 89.38% da maré total e em seguida as diurnas com uma amplitude de cerca de 0.1064 m, que corresponde a cerca de 4.83% da maré total. Estes valores comprovam que estas são de carácter semi-diurno como foi constatado por (Canhanga, 2005). As ondas quarto diurnas, apesar da sua fraca contribuição, 0.87% da maré total, são compostas na sua maioria por constituintes de águas pouco profundas, mostrando que a maré da Baía pode ser considerada como onda de águas pouco profundas.

As ondas hexa e octa diurnas tiveram menor contribuição na maré total enquanto que, a contribuição das ondas hepta- diurnas considerou-se desprezível (0.0%). A contribuição das ondas hepta deve-se ao facto de a maré na Baía de Maputo ser semi-diurna e também por ter-se usado dados de um ano. A contribuição total das espécies foi de 2.2m que se aproxima ao nível médio calculado pelo *t-tide* que é de 2m.

A análise da banda de frequências mostrou que as espécies diurnas e semi-diurnas são as que maior banda possuem pois as frequências encontradas situaram-se em dois intervalos, 0.0343966 a 0.0463430 ciclos por hora, para as diurnas, e 0.0759749 a 0.0850736 ciclos por hora, para as semi-diurnas. Estes valores são satisfatórios pois aproximam-se das frequências típicas dos constituintes.

Tabela 4. Quantificação das contribuições das espécies de marés

Ondas	Contribuição das espécies de marés (m)	Contribuição percentual das espécies de marés (%)	Banda de frequência (cph)
Longo – período	0.0724	3.28	0.0002282-0.0030501
Diurna	0.1064	4.83	0.0343966-0.0463430
Semi-diurna	1.9678	89.38	0.0759749-0.0850736
Terço-diurna	$7.2 \cdot 10^{\exp(-3)}$	0.32	0.1192421 -0.1251141
Tetra-diurnas	0.0192	0.87	0.1595106-0.1668948
Penta-diurnas	$2 \cdot 10^{\exp(-4)}$	0.01	0.2028035-0.2084474
Hexa- diurnas	$3 \cdot \exp(-4)$	0.01	0.2400221-0.2474062
Hepta-diurnas	0.000	0	0.2833149
Octa-diurnas	0.0280	1.27	0.3220456
<b>TOTAL</b>	<b>2.2015</b>	<b>100%</b>	

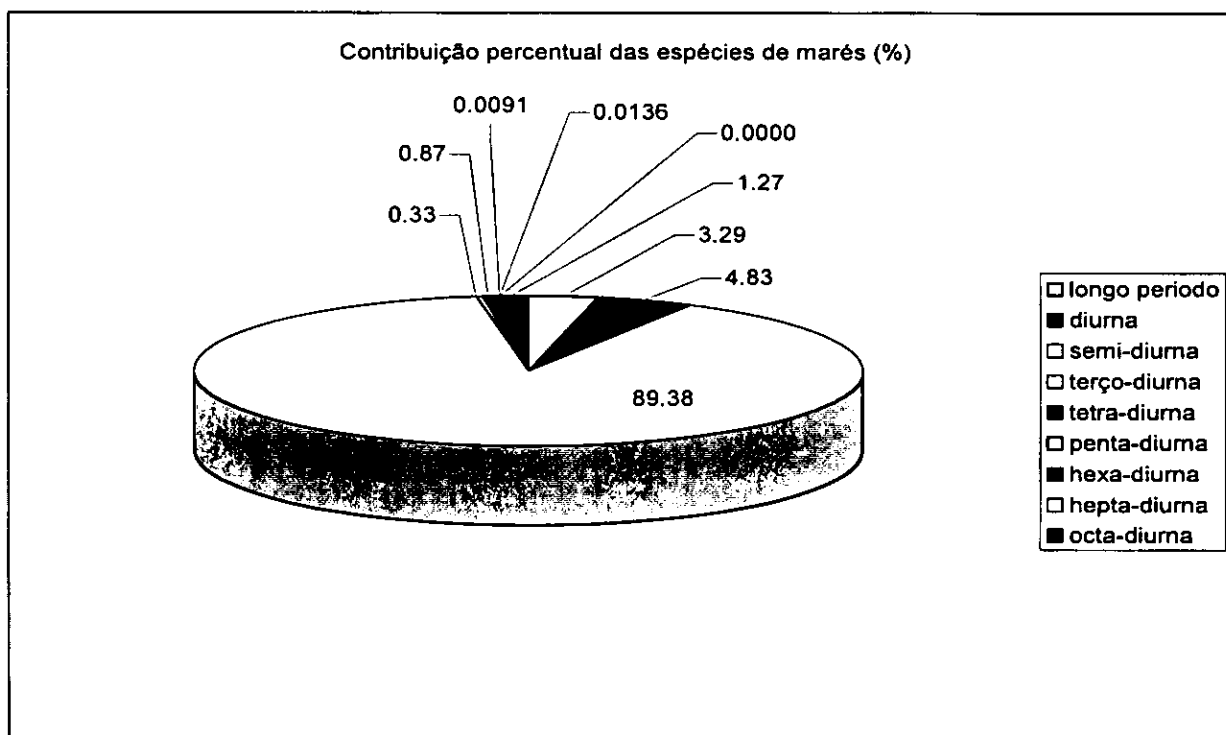


Gráfico 1. Quantificação da contribuição das espécies.



### 4.3 Tempo de Resolução das Espécies de Marés.

O tempo de resolução dos constituintes, que é o tempo de separação de cada espécie de maré, foi determinado através da Equação 11 e os resultados encontrados estão na Tabela 5. O tempo de resolução das espécies de ondas variou de cerca de 7.38 dias, para as ondas Penta-diurnas, para 208 dias (cerca de sete meses) para as ondas Tetra-diurnas. Estes valores significam que são necessários cerca de 208 dias para poder-se separar um constituinte harmónico do outro. Os 208 dias permitem-nos conhecer o tempo de amostragem necessário para fazer-se uma previsão de um ano com os constituintes separados um dos outros. Não foi possível determinar a separação das espécies hepta e octa diurnas, pois elas contribuem apenas com um constituinte.

Tabela 5. Análise do tempo de resolução dos grupos de ondas

Ondas	Tempo de resolução (dias)
Período longo	187
Diurna	189.1
Semi-diurna	185.1
Terço - diurna	182.5
Tetra -diurnas	208
Penta - diurnas	7.38
Hexa - diurnas	182
Hepta - diurnas	-
Octa - diurnas	-

#### 4.4 Previsão das Marés e Determinação dos Valores Residuais

Com base no modelo  $t\_tide$  através do programa teste (Anexo II) realizou-se uma previsão das marés na Baía de Maputo para o ano de 2001 cujos resultados observados, previstos e resíduos estão representados nos gráficos 2 à 8. As amplitudes máximas registaram-se nos meses de Março e Setembro enquanto que a mínima registou-se em Julho. Os gráficos da modelação apresentam descontinuidades não consideráveis, que provavelmente resultam da influência de factores

atmosféricos (por exemplo o vento) que não fazem parte da análise harmónica. O facto de a menor elevação (0.2m) ser maior que o nível de referência (nivel=0) e os resíduos não apresentam picos consideráveis significa que a previsão de marés foi satisfatória.

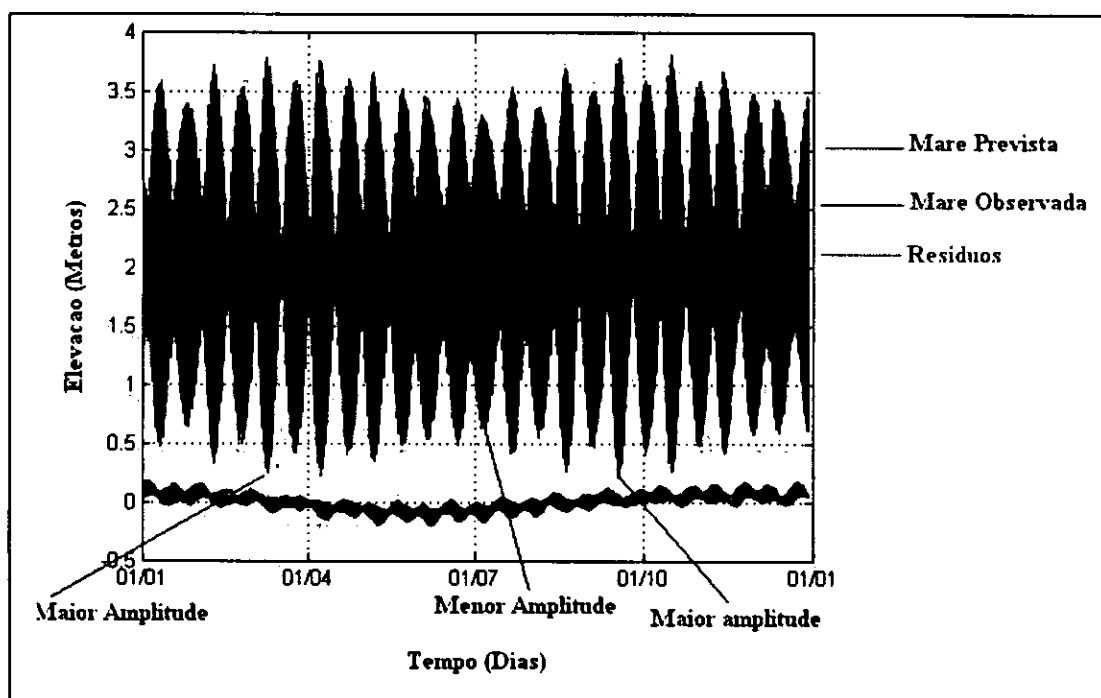


Gráfico 2. Marés modeladas para o ano de 2001.

Os gráficos 3 e 4 representam a modelação da maré para o mês de Março, onde se observam os dias das primeiras maiores amplitudes registadas ao longo do ano. Este facto pode estar relacionado com a aproximação do equinócio que se regista no mesmo período, estando os astros (Sol e Lua) alinhados, as marés vivas apresentaram-se mais intensas, com amplitudes de cerca de 3.8m de altura, valor este que ultrapassa a media das amplitudes registadas que é de 3m (Canhanga, 2005).

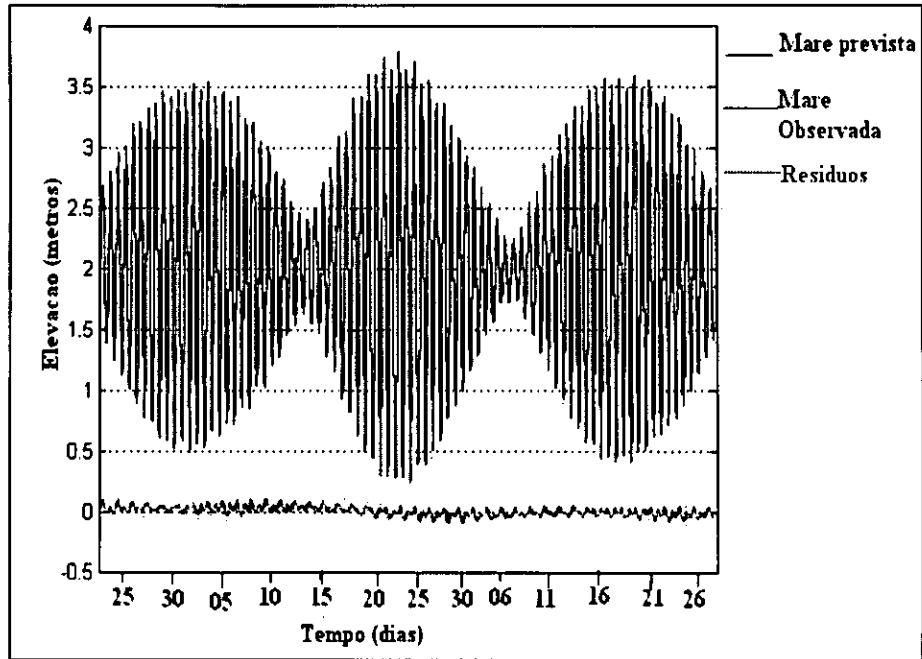


Gráfico 3. Marés Modeladas para o período 25 de Fevereiro à 26 de Março.

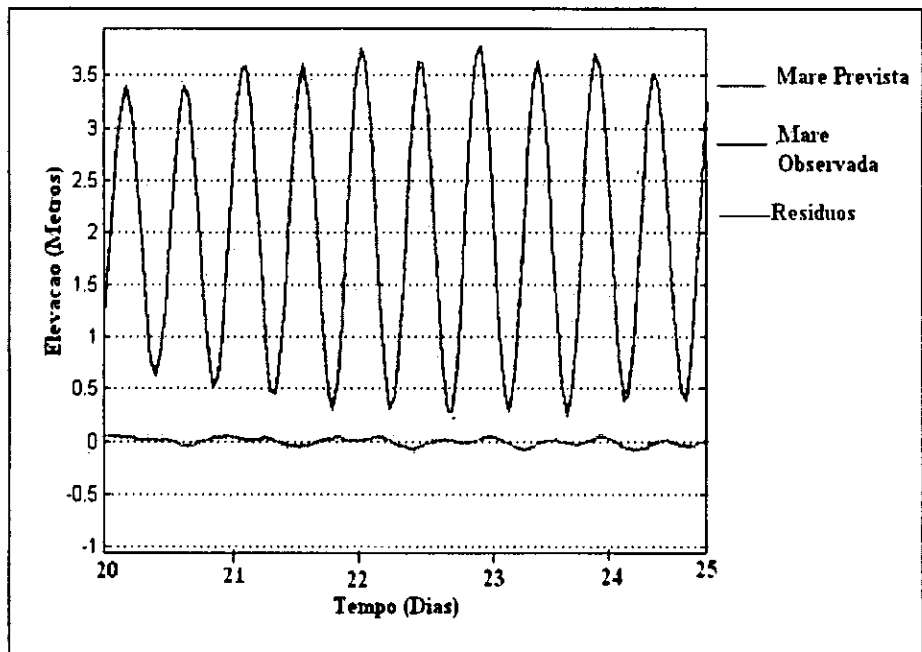


Gráfico 4. Modelação da maré para o período 20 de Março à 25 de Março.

Nos gráficos 5 e 6 representam-se amplitudes previstas e observadas para o ano de 2001 no mês de Julho, onde as alturas das marés mínimas registaram-se nas marés mortas e a diferença entre as alturas na Preia e Baixa mares são muito reduzidas, as baixa mares apresentam-se com amplitudes

de cerca de 0.2 m de altura, e as preia mares com amplitudes de 3m. Estes valores mínimos coincidem com a passagem do solstício de Inverno no hemisfério Sul, onde o Sol se encontra mas afastado da Terra, daí as amplitudes reduzidas mesmo nas marés vivas.

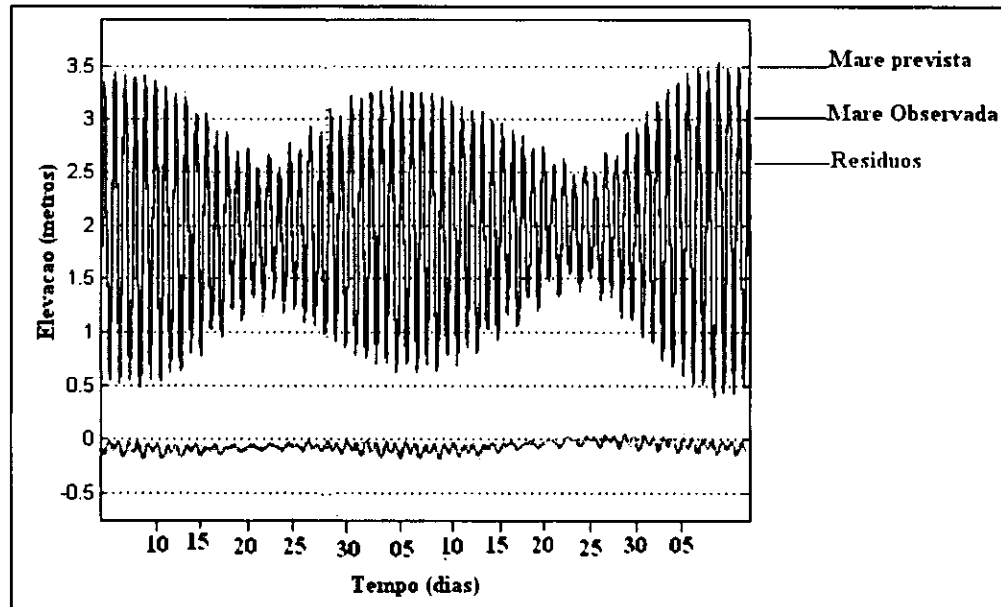


Gráfico 5. Marés Modeladas para o período 10 de Julho à 05 de Agosto.

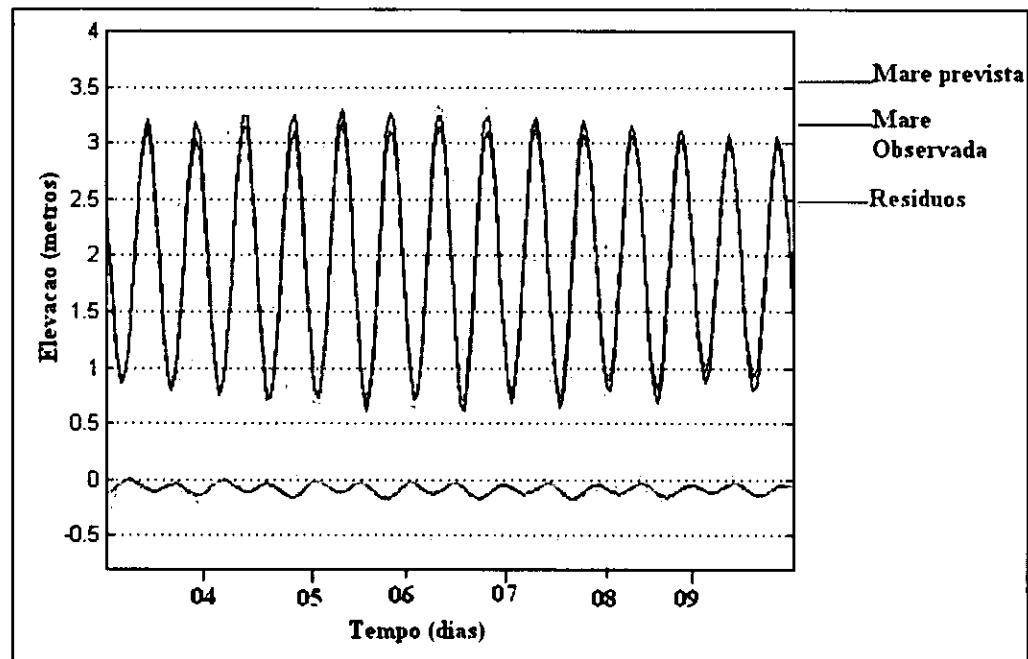


Gráfico 6. Amplitudes Observadas no período de 04 de Julho à 08 de Julho.

Os gráficos 7 e 8 são a representação da maré no período de Setembro, na altura da passagem do equinócio, onde novamente os astros encontram-se alinhados e o Sol mais próximo da Terra, as marés apresentam-se vivas com amplitude acima das médias anuais, que variaram de 0.2m na Baixa mar e 3.8m da preia mar ambos da maré viva.

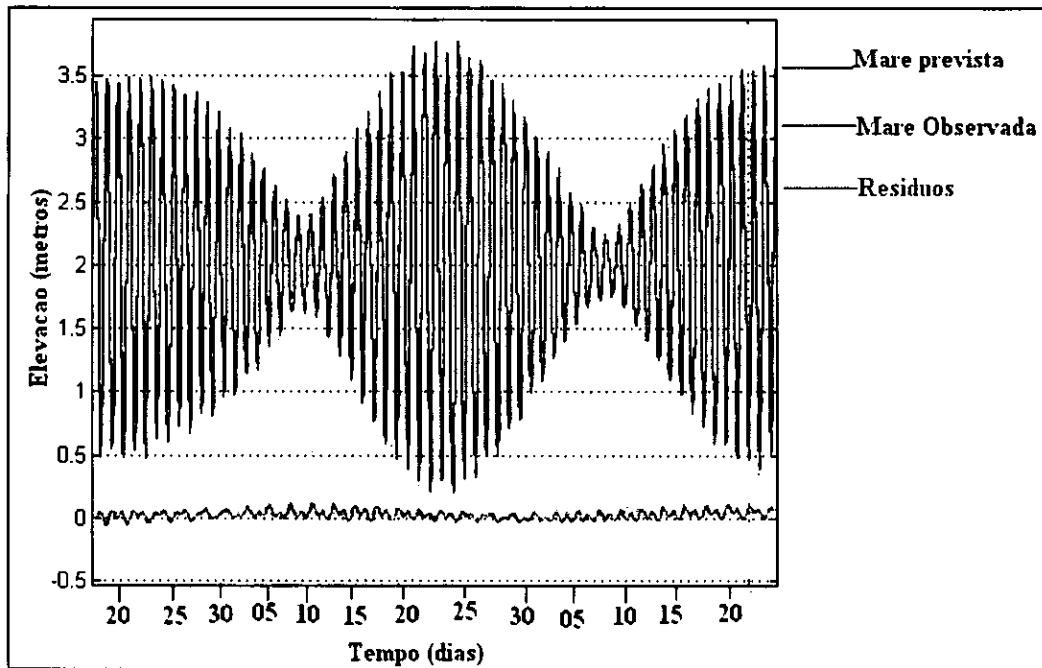


Gráfico 7. Modelação da maré para o período 20 de Agosto à 20 de Setembro.

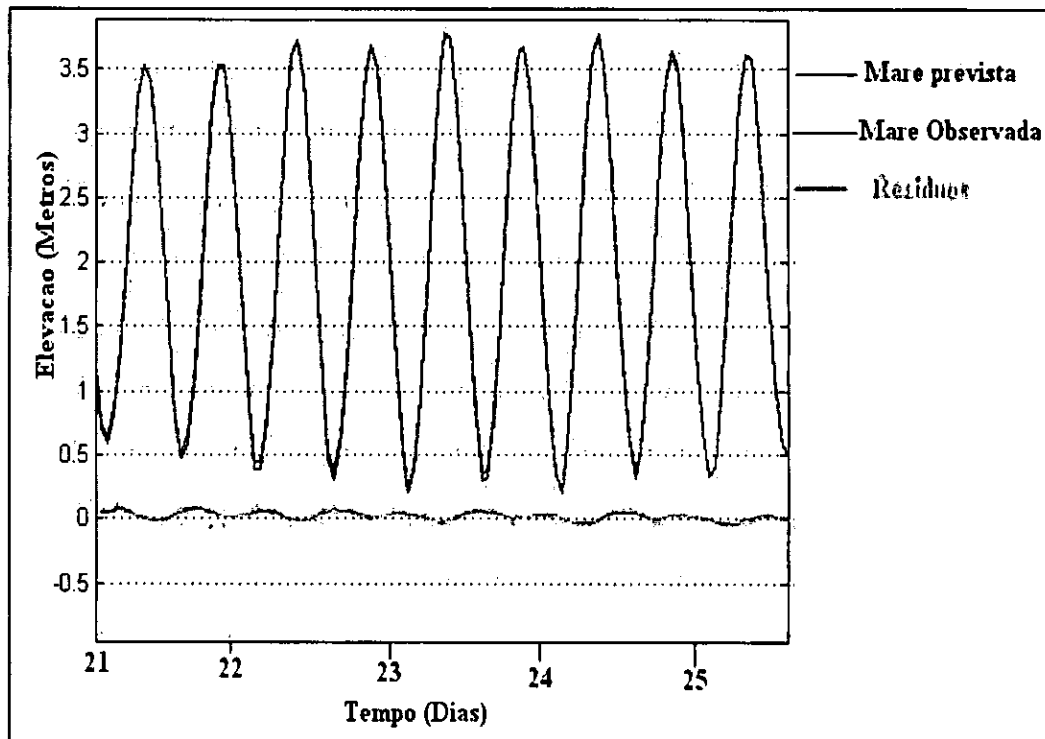


Gráfico 8. Marés Observadas no período 21 de Setembro à 25 de Setembro.

## CAPÍTULO V: Conclusões e Recomendações

### 5.1 Conclusões

Os constituintes harmónicos semi-diurnos são os que mais contribuem na maré da Baía de Maputo com 89.39% da altura total da maré observada, concordando que as marés na Baía de Maputo são semi-diurnas.

As constituintes diurnas contribuem com cerca de 4,83%, seguindo-se as outras espécies com menor contribuição.

A espécie Hepta diurna é a que menor contribuição exerce na maré observada na Baía de Maputo.

O período de 7 meses de dados observados é suficiente para realizar uma previsão fiável de 1 ano, com uma precisão de 95% que é o intervalo de confiança do  $t_{tide}$ .

As marés são influenciadas de uma maneira significativa pelos equinócios e solstícios, estes fenómenos provocam variações consideráveis na maré total da Baía de Maputo, provocando um aumento ou diminuição da amplitude destas.

O modelo  $t_{tide}$  pode ser usado para identificar os constituintes harmónicos e prever marés na Baía de Maputo com sucesso, pois a maré prevista reflecte a maré observada, os gráficos não apresentam saltos nem interrupções consideráveis e a menor elevação é maior que o nível de referência.

### 5.2 Recomendações

Recomenda-se:

- Que se faça a monitoria, assistência e manutenção regular do marégrafo ancorado na Baía de Maputo para que haja um registo continua de dados de modo a garantir-se uma previsão de marés mais precisa.
- Que coloquem mais marégrafos na baía, em diferentes pontos, para se ter uma previsão mais abrangente.
- Que se comparem previsões através de análises de diferentes períodos de observação com vista a conhecer o período de amostragem necessário para uma previsão cada vez melhor.

## 6 Referências Bibliografia

- Canhanga, S. e Dias, J.M. (2005). *Tidal characteristics of Maputo Bay, Mozambique. Journal of Marine Systems.*
- Foreman, M.G.G. (1992); *Manual for tidal heights analysis and prediction*, pp 10-112
- Fernandes, J.A. Barahoma, (1971); *Manual de hidrografia*, Instituto hidrográfico, Lisboa, Portugal.
- Hill, M. N. (1972), *The Sea*, Interscience Publishes VI, Physical Oceanography;
- Hoguane, A. M., Motta, H.e Preira, M. A. M. (2002). *Proceedings of the II National Conference on Coastal zone Research*. Maputo. pp 9-11.
- [http://www.marlinegro.na-web.net/mares\\_engl.htm](http://www.marlinegro.na-web.net/mares_engl.htm). Acedido em 16 de Fevereiro de 2008.
- IIP. (2001); *Seminário sobre pescarias da Baía de Maputo*. Boletim de Divulgação No. 34. Instituto de Investigação Pesqueira. Maputo.
- Nehama, F.P.J. (2004). *Previsão de Marés na Estação Biológica da Inhaca*. Tese de Licenciatura. Faculdade de Ciências – Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.
- NOAA. (2005). *A brief explanation of the basic astronomical factors which produce tides and tidal currents*. Acedido em: 23 de Janeiro de 2008, em:  
<http://www.co-ops.nos.noaa.gov/restles1.html>.
- NOAA. (2004). *National ocean service education: Tides and water levels*. Acedido em: 23 de Janeiro de 2007, em: <http://www.ngs.noaa.gov/GRD/GPS/projects/OLT/agu.99spring/olt.html>.
- Park, D. (1999); *waves, tides and shallow water process*; prepared by Open University course team.
- Pawlowicz, R.; Bob, B. e Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE*. USA.
- Pond, S; Pickard, G.L. (1981) *Introductory Dynamical Oceanography*. Vancouver, Canada. Pp258-261.
- Pugh, D. (1987); *Tides, surges and mean sea level*. Natural environmental council. Swindon, UK. pp 96-140.
- Pugh, D.T. (2004). *Changing sea levels: Effects of tides, weather and climate*. pp 20-75.

## ANEXO I



## Anexo I

### Programa Para Efectuar a Previsão de Marés Usando o T\_TIDE

```
% teste ...

clear, close all;

load maputo01.txt;

ts=maputo01;

%plot(m000)

for i=1:length(ts)

    if ts(i)==0 | ts(i)>5

        ts(i)=NaN;

    end

end

end

%figure

%plot(m000)

start=datetime(2001,1,1,00,0,0);

lat=-25-59.0/60;

[TIDESTRUC,XOUT]=t_tide(ts,'start_time',start,'latitude',lat);

x=XOUT;

med=input('introduza o valor de x0, ver em cima ');

mm=size(ts,1);

for i=1: size(ts,1)
```

```

tm(i)=i/24;

end;

tm=tm;

% plot(tm,ts,'b');hold on; plot(tm,(x+med),'r');hold on; plot(tm,(ts-(x+med)),'c')

plot(tm(1:mm),ts(1:mm),'b');hold on; plot(tm(1:mm),(x(1:mm)+med),'r');hold on;
plot(tm(1:mm),(ts-(x(1:mm)+med)),'c')

grid on;

datetick('x',19);

aa=size(ts);bb=max(ts);

% text( (aa-1000),(bb-3), '----- previstos');text( (aa-500),(bb-1), '----- observados')

text( (500),(0.25), '----- previstos');text( (750),(0.25), '----- observados');

text( (1000),(0.25), '----- residous');

```

## ANEXO II

## Anexo II

Tabela dos Constituintes Harmónicos Obtidos Através do T\_TIDE

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
SSA	0.000228	0.0152	0.019	310.74	65.86	0.62
MSM	0.00131	0.0039	0.016	357.74	187.27	0.063
MM	0.001512	0.0224	0.02	286.3	58.31	1.3
MSF	0.002822	0.0202	0.021	281.96	62.93	0.95
MF	0.00305	0.011	0.019	87.7	117.29	0.35
ALP1	0.034397	0	0.003	161.81	276.85	0.00021
2Q1	0.035706	0.0029	0.003	287.66	69.4	0.87
SIG1	0.035909	0.0002	0.003	105.43	243.33	0.0077
*Q1	0.037219	0.009	0.004	321.78	22.57	6.2
RHO1	0.037421	0.0032	0.003	24.78	63.28	0.84
*O1	0.038731	0.0278	0.004	359.85	7.92	63
TAU1	0.038959	0.0001	0.002	243.86	273.15	0.0032
BET1	0.04004	0.0006	0.003	327.59	223.96	0.044
NO1	0.040269	0.0028	0.003	60.89	69.35	0.76
CHI1	0.040471	0.0006	0.002	60.69	181.14	0.091
*P1	0.041553	0.0132	0.004	211.67	15	14
*K1	0.041781	0.035	0.004	200.86	6.31	89
PHI1	0.042009	0.0001	0.002	3.65	280.06	0.0018
THE1	0.043091	0.0007	0.003	37.49	202.07	0.075
J1	0.043293	0.004	0.003	232.52	53.68	1.4
SO1	0.044603	0.0003	0.002	237.63	237.5	0.014
*OO1	0.044831	0.0058	0.004	273.78	40.18	2.4
UPS1	0.046343	0.0001	0.003	338.7	256.96	0.00049
OQ2	0.075975	0.0002	0.005	331.11	276.34	0.0023
EPS2	0.076177	0.0002	0.005	247.63	273.03	0.0021
*2N2	0.077487	0.024	0.007	103.28	16.45	10
*MU2	0.07769	0.0633	0.006	171.51	6.22	97
*N2	0.078999	0.1411	0.006	107.28	2.94	4.80E+02
*NU2	0.079202	0.0323	0.006	82.32	12.24	30

tide	freq	amp	amp_err	pha	pha_err	snr
*M2	0.080511	0.9437	0.006	121.69	0.41	2.20E+04
MKS2	0.08074	0.001	0.005	47.99	204.47	0.04
*LDA2	0.081821	0.0191	0.007	121.72	17.3	8
*L2	0.082024	0.0397	0.006	124.46	8.14	41
*S2	0.083333	0.5517	0.007	163.86	0.69	5.40E+03
*K2	0.083562	0.1491	0.006	161.52	2.59	6.00E+02
MSN2	0.084846	0.0007	0.004	351.7	238.3	0.024
ETA2	0.085074	0.001	0.004	154.64	204.22	0.055
MO3	0.119242	0	0	62.48	167.81	0.26
*M3	0.120767	0.007	0	233.96	1.01	2.80E+03
SO3	0.122064	0.0001	0	219.1	72.86	0.77
MK3	0.122292	0	0	158.81	198.6	0.11
SK3	0.125114	0.0001	0	258.18	135.47	0.31
MN4	0.159511	0	0	224.92	128.79	0.17
*M4	0.161023	0.006	0	169.47	1.2	2.40E+03
SN4	0.162333	0	0	249.54	165.24	0.15
*MS4	0.163845	0.012	0	285	0.57	9.80E+03
MK4	0.164073	0.0001	0	1.81	78.33	0.79
*S4	0.166667	0.001	0	201.16	8.3	58
SK4	0.166895	0.0001	0	336.75	79.5	0.62
2MK5	0.202804	0.0001	0	344.84	98.15	0.46
2SK5	0.208447	0.0001	0	240.51	88.11	0.84
2MN6	0.240022	0.0001	0	354.48	51.64	1.1
M6	0.241534	0.0001	0	100.44	77.5	0.63
2MS6	0.244356	0	0	306.79	241.33	0.0075
2MK6	0.244584	0	0	62.49	150.78	0.14
2SM6	0.247178	0	0	357.61	136.4	0.15
MSK6	0.247406	0.0001	0	312.69	77.51	0.71
3MK7	0.283315	0	0	270.54	210.36	0.075
*M8	0.322046	0.028	0	325.75	0.24	5.10E+04