

MAIS CIÊNCIA

# Marés: como são produzidas? é viável utilizar sua energia?

Sadako Yadoya Miyao

***O mar é um assunto que interessa a todos. O estudo das marés, em particular, permite que se aplique conhecimentos de física, tornando-os mais significativos.***

As marés, conhecidas pela subida e descida do nível do mar ao longo da costa, são consequência da ação simultânea das forças gravitacionais da Lua, do Sol e da Terra, e da revolução em torno do centro comum, da Terra e Lua, e da Terra e Sol.

Para entender como essas forças atuam na geração das marés, vamos analisar primeiramente o que acontece com o par Terra-Lua. A Terra e a Lua giram em torno do centro de massa comum. A aceleração centrípeta necessária para cada um dos corpos se manter na órbita é fornecida pela atração gravitacional mútua.

A força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua é proporcional à massa dos dois corpos, e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os seus centros. Dizer isso da distância é o mesmo que dizer que se essa distância dobrasse, a força se reduziria a um quarto.

Para a Terra como um todo, a aceleração centrípeta é fornecida pela atração exercida pela Lua. No entanto, a Terra é um corpo extenso. Isso significa que cada porção da Terra está sendo atraída pela Lua com uma força diferente. Há partes da Terra mais próximas à Lua, e outras mais longe da Lua. Há, portanto, um excesso de aceleração gravitacional no lado mais próximo à Lua, e uma falta no lado oposto, mais afastado. Ou seja, para as partículas mais próximas à Lua do que o centro da Terra, a atração gravitacional é maior do que a necessária para manter a órbita; para as mais distantes, é menor. A diferença entre a força necessária para manter a órbita, e a força de atração

gravitacional que a partícula sofre, produz em cada ponto da superfície da Terra uma resultante, cuja representação é vista na fig.1. O desenvolvimento matemático dessas forças é apresentado no apêndice.

Imaginemos agora a Terra coberta inteiramente por uma camada de água. Sob ação dessas forças resultantes, haverá uma deformação do envoltório de água, produzindo uma elevação do nível da água em direção à Lua no ponto (A) mais próximo da Lua, outra elevação em sentido oposto no ponto (B) mais afastado da Lua, e uma depressão do nível da água nos pontos (C) e (D) (fig.2).

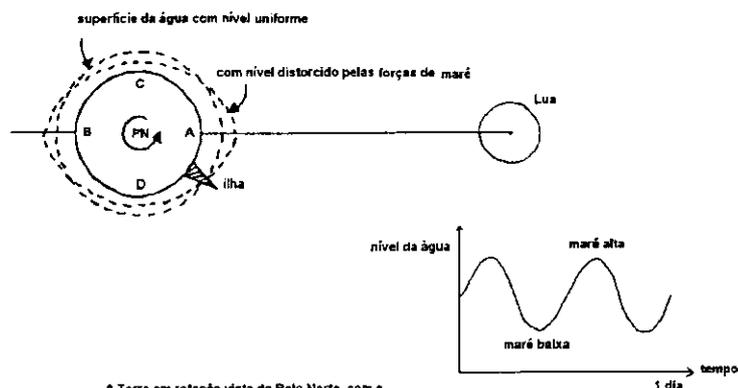


fig. 2 A Terra em rotação vista do Polo Norte, com a superfície da água distorcida pela ação das forças produtoras de maré, e a variação do nível de água na ilha, durante o período de um dia.

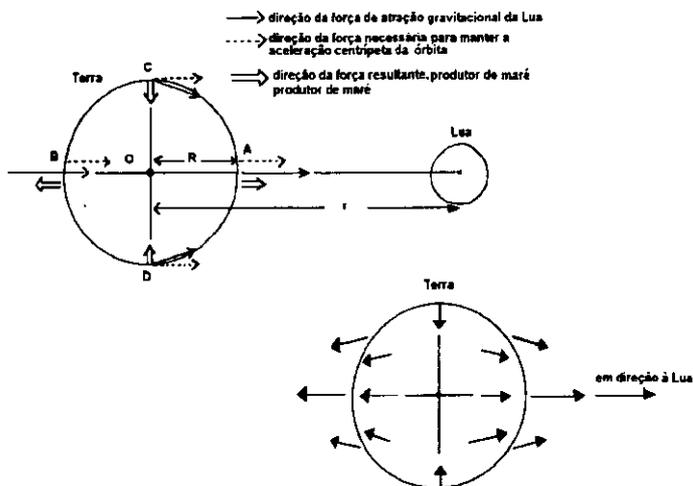


fig. 1 Representação esquemática das forças produtoras de maré na superfície da Terra (sem escala)

Vamos colocar agora uma ilha nesse envoltório líquido da Terra, e nele, um observador. Com a Terra em rotação, ele vê durante o período de um dia, uma elevação do nível da água, um abaixamento, novamente uma elevação, e outro abaixamento (fig.2). Ou seja, o que ele observa, é a ocorrência da maré alta e baixa, duas vezes ao dia, por ação das forças resultantes em discussão. Essas forças são portanto, as forças produtoras das marés.

Considerações análogas podem ser feitas para o par Terra-Sol. O Sol tem massa maior que a Lua, mas está a uma distância muito maior da Terra. Como a força produtora de maré é inversamente proporcional à distância ao cubo (ver apêndice), a força produtora da maré solar tem magnitude menor do que a da maré lunar (cerca de 46%), mas as duas vão atuar conjuntamente.

A Terra, Lua e Sol podem estar "alinhados", como ocorre nas condições de Lua Nova e Lua Cheia (fig. 3). A elevação produzida pela Lua se soma à elevação produzida pelo Sol, ocorrendo nestes casos, as maiores amplitudes de maré, ou seja, marés com

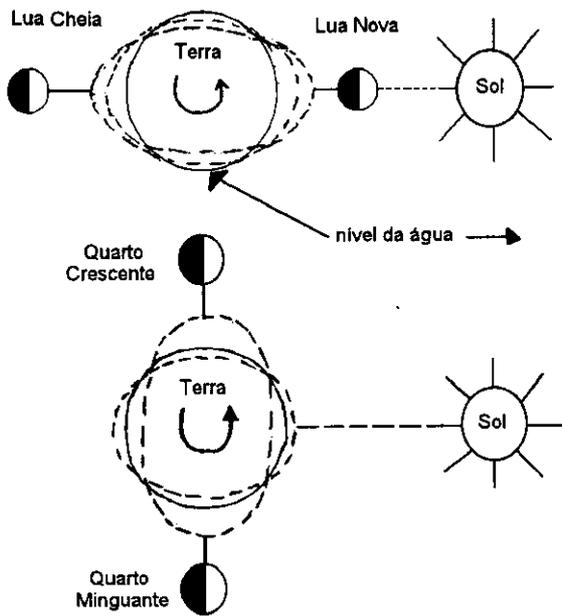


fig. 3 O efeito combinado da maré lunar e solar, em função da posição relativa da Lua, Terra e Sol

máximas elevações e máximas depressões.

Em condições da Lua em Quarto Minguante ou Quarto Crescente, Lua, Terra e Sol fazem um ângulo de 90 graus. Assim, a elevação criada pela Lua, vai coincidir com a depressão criada pelo Sol, e vice-versa. Nessas condições, os efeitos tendem a se cancelar, ocorrendo então, as menores amplitudes de maré.

Os períodos das marés que ocorrem duas vezes ao dia são de 12 horas para a maré solar, e de 12h25 para a maré lunar. A rotação da Terra ao redor de seu eixo, o "dia solar", é feita em 24h. Por outro lado, a Lua se move "ao redor da Terra" com um período de 29,5 dias, por isso o "dia lunar" tem cerca de 24h50.

Devido a essa diferença nos períodos da maré solar e lunar, a diferença de fase entre elas está continuamente mudando, ocorrendo coincidência de fase na Lua Nova e Cheia, e oposição de fase nos Quartos Minguante e Crescente da Lua. Como consequência, a amplitude da maré resultante apresenta uma variação associada às fases da Lua. Também fica explicado, lembrando a importância relativa das componentes solar e lunar, porquê a maré ocorre cada dia com atraso de cerca de 50 minutos em relação ao dia anterior.

Outros efeitos ainda se sobrepõem na composição da maré, como o fato dos planos de rotação não estarem no plano equatorial da Terra, mas se moverem ao norte e sul do mesmo, com um ciclo anual no caso do Sol, e mensal da Lua. Por conta desse efeito, o nosso observador na ilha vai notar uma maré alta mais baixa que a anterior, e uma maré baixa mais baixa que a outra. Ou seja, as marés vão apresentar uma desigualdade diurna (fig. 4).

Se o nosso observador agora for retirado da sua ilha, para investigar as marés que ocorrem no oceano real, ele vai verificar que elas são diferentes em cada local, e que não se comportam exatamente como aqui descrito.

Isso pode ser explicado por várias razões, entre as quais, as principais são: A Terra não é coberta

totalmente por um oceano uniforme como supusemos, mas existem continentes separando as bacias oceânicas, estas com formatos, dimensões e profundidades diferentes, cada uma delas com períodos próprios de oscilação, que influenciam a sua resposta às forças produtoras de maré. Deve-se considerar que para movimentos desse tipo, a aceleração de Coriolis (efeito da rotação da Terra) torna-se importante. Outra razão ainda, é que oscilações de maré são ondas de comprimento muito longo, e sua velocidade de progressão no oceano é função da profundidade, e como ondas, estão sujeitas a processos de reflexão, etc. Todos esses fatores vão modificar as características locais da maré, em relação ao modelo simplificado que expomos.

**A utilização da energia da maré**

A obtenção de energia através das marés é possível em áreas costeiras onde ocorrem grandes amplitudes de maré, ou em canais estreitos, com correntes de maré velozes.

As primeiras utilizações das marés como fonte de energia foram através dos moinhos de maré, semelhantes aos moinhos de água, construídos na costa da Grã Bretanha, e ao longo da costa oeste européia, principalmente nos Países Baixos.

A utilização da energia de subida e descida da maré é feita através do represamento da água oceânica na maré alta, numa baía ou estuário, por meio da construção de diques ou barragens. Na maré vazante, quando a diferença de nível com a água represada se torna suficiente, a água represada é liberada através das turbinas, para produzir energia elétrica. Na maré enchente seguinte, a água é novamente represada. Esses sistemas podem ser projetados também para operar na maré enchente e vazante, com sistemas de turbinas especiais para operar nas duas direções.

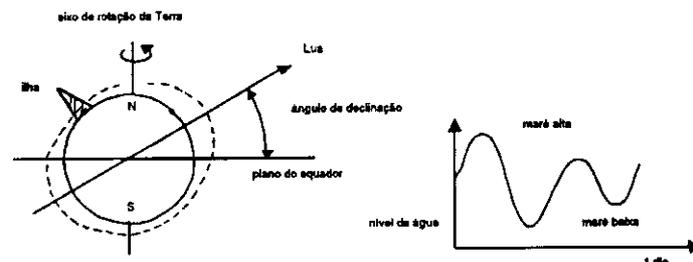
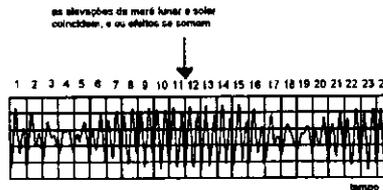


fig. 4 A declinação da Lua produzindo a desigualdade diurna da maré

A geração de energia pelas marés parece ser simples, além de ser uma energia não poluidora e renovável. Contudo, há poucos locais no mundo, onde a altura de maré é suficiente, e onde baías e estuários possam ser represados, a custos razoáveis.

Outros fatores práticos a serem avaliados, são a distância à região consumidora, ou a incompatibilidade de uso da baía para esse fim, caso seja usada para navegação ou recreação.

Questões importantes ainda, são:

- a) as possíveis alterações que podem ser introduzidas nos processos geológicos de transporte de sedimentos,
- b) as alterações nas trocas de água da baía com o oceano,
- c) a interferência nos processos biológicos, uma vez que os diques constituirão barreiras para espécies migratórias em baías e estuários.

O fator que toma a produção de energia em grandes usinas, através das marés, uma alternativa limitada, é o seu caráter periódico, dependente do ciclo diurno da maré, somado às variações de amplitude da maré com ciclos quinzenal, mensal, anual etc, o que traz a necessidade de um esquema de operação conjunta com outras fontes de energia.

Atualmente existem no mundo algumas usinas geradoras de energia por maré, entre as quais, no estuário do Rio La Rance, na França ( $5,4 \times 10^{10}$  watt-hora/ano), e no estuário do Rio Annapolis, no Canadá ( $3,0 \times 10^{10}$  watt-hora/ano), onde as alturas de maré variam de 8,7 a 4,4 metros no ciclo mensal. Estações menores operam também na União Soviética e China, entre outras.

Vale lembrar que, além das marés, outras possíveis fontes de energia oceânica são as ondas, correntes, e principalmente os gradientes térmicos. Nesse caso, utiliza-se as diferenças de temperatura entre as águas superficiais e profundas dos oceanos.

**APÊNDICE**

**As forças geradoras de maré**

A força de atração gravitacional entre a Terra e a Lua é escrita como:

$$F = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} \quad (1) \quad \text{onde}$$

M = massa da Lua

m = massa da Terra

r = distancia entre os centros da Lua e da Terra

G= constante de gravitação universal

A aceleração centrípeta necessária para a Terra manter sua órbita em torno do centro de massa Terra-Lua é fornecida pela força de atração da Lua, sobre a Terra como um todo. Portanto, a aceleração centrípeta por unidade de massa da Terra é dada por:

$$\frac{F}{m} = \frac{G \cdot M}{r^2} \quad (2)$$

No centro da Terra (ponto O) a aceleração centrípeta da massa unitária é exatamente satisfeita pela força de atração gravitacional.

No ponto A da superfície da Terra (fig. 1), situado mais próximo à Lua, a força de atração gravitacional da massa unitária é dada por:

$$\frac{G \cdot M}{(r - R)^2} \quad (3) \quad \text{onde R= raio da Terra}$$

Fazendo a diferença das forças (3) e (2), temos:

$$\frac{G \cdot M}{(r - R)^2} - \frac{G \cdot M}{r^2} = \frac{G \cdot M \cdot R \cdot (2r - R)}{r^2 \cdot (r - R)^2}$$

Como  $R \ll r$ , podemos simplificar, desprezando os termos em R dentro dos parênteses. A força resultante em A será:

$$F_A = \frac{2 \cdot G \cdot M \cdot R}{r^3} \quad (4)$$

A força resultante, produtora de maré, tem portanto uma dependência inversa com a distância ao cubo, e tem a direção da força de atração gravitacional, com sentido em direção à Lua.

No lado oposto, no ponto B, a força de atração gravitacional da massa unitária é escrita como:

$$\frac{G \cdot M}{(r + R)^2}$$

Fazendo considerações análogas ao ponto A, a força resultante, produtora de maré em B, será:

$$F_B = \frac{G \cdot M}{(r + R)^2} - \frac{G \cdot M}{r^2} = - \frac{2 \cdot G \cdot M \cdot R}{r^3} \quad (5)$$

Ela tem o mesmo valor absoluto que a força do ponto A, mas é dirigida em sentido oposto.

A representação esquemática das forças resultantes em outros pontos da superfície da Terra é vista na fig. 1.

massa da Terra.....	$5,97 \times 10^{24}$ Kg
massa da Lua .....	$7,34 \times 10^{22}$ Kg
massa do Sol.....	$1,97 \times 10^{30}$ Kg
raio da Terra.....	$6,36 \times 10^6$ m
distância Terra-Lua.....	$38 \times 10^7$ m
distância Terra-Sol.....	$149 \times 10^9$ m

Sadako Y. Miyao foi professora assistente do departamento de Oceanografia Física do Inst. Oceanográfico da USP. Atualmente trabalha no Projeto Pesquisa em Parceria do Dpto Metodologia de Ensino, Fac Educação, Unicamp e EEPSP Barão Geraldo de Rezende apoiado pela Fapesp. R. Ruberli Boaretto da Silva, 715. Campinas, SP. CEP 13084-011

**Nota do Editor:** Por razões técnicas as figuras deste artigo estão ligeiramente deformadas e com acabamento aquém do desejado. Lamentamos publicá-las assim. Agradecemos a compreensão da autora e pedimos aos leitores que nos peçam cópias se acharem necessário.