



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Livreto sobre a História das Principais Teorias das Marés

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de João Carlos Ferreira Menezes Junior, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Orientador:
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Rio de Janeiro
26 de junho de 2023

Livreto sobre a História das Principais Teorias das Marés

João Carlos Ferreira Menezes Junior

Orientador:
Antônio Carlos Fontes dos Santos

Esse livreto não conterà apenas a explicação da teoria newtoniana das marés (teoria estática das marés, a qual serve de base para construir a proposta de aula e passível de ser lecionada ao público do EM), mas um resgate histórico sobre as diversas teorias sobre esse fenômeno ao longo dos anos, citando alguns dos principais cientistas que se preocuparam de alguma forma em apresentar explicações sobre esse fenômeno. Tentou-se ao máximo seguir a linha cronológica das ideias sobre as marés. A essa consideração, ainda aditamos que tal resgate estará seguramente respaldado em diversos artigos e livros (Ekman, 1993; Marmer, 1922; Aiton, 1954; Cartwright, 1999; Mariconda, 2011; Woodworth, 2023; Bonelli e Russo, 1996, dentre outros). Através de uma revisão bibliográfica, diversos artigos já existentes sobre esse tema foram reunidos para arrumar as informações em uma linha cronológica que faça sentido para o professor-leitor. A contribuição deste trabalho consiste em uma organização sistemática das teorias sobre as marés propostas ao longo da história, desde as explicações antigas até as modernas. Dessa forma, não tivemos a pretensão de fazer um trabalho historiográfico (ver a respeito Martins, 2001, p.37-40, *apud* Martins, 2005, p.306), sendo reservado esse tipo de trabalho árduo para futuras pesquisas. A ideia, essencialmente, é motivar os professores da Educação Básica a estudarem as referências aqui fornecidas, buscando contribuir mais nesse campo da História e Filosofia da Ciência. Ao final do livreto, o leitor terá um panorama das diversas abordagens teóricas desse fenômeno, permitindo sua melhor compreensão e fornecendo uma base para futuras investigações. Em suma, esse trabalho fornece uma visão geral das explicações das marés, organizando e sistematizando informações já existentes para uma melhor compreensão das teorias propostas ao longo do tempo. Ao longo de toda a descrição que será apresentada, perceber-se-á as descrições mecânicas, matemáticas, geométricas, quantitativas e qualitativas das marés. Por fim, uma última ressalva quanto ao termo “principais” no título desse livreto. Ao usar o termo

"principal" para descrever várias teorias elaboradas em torno de um conceito, é importante ter cuidado para não desconsiderar ou minimizar a importância de outras abordagens. Cada teoria pode fornecer uma perspectiva única e valiosa sobre o assunto em questão e todas elas devem ser consideradas em conjunto para uma compreensão completa. Além disso, é importante reconhecer que as teorias evoluem ao longo do tempo e o que é considerado "principal" hoje pode ser substituído por novas ideias no futuro. Portanto, ao discutir teorias em torno de um conceito, é essencial manter uma mente aberta e ser cuidadoso ao usar termos que possam sugerir uma hierarquia de importância entre elas. Durante o tempo dedicado ao programa, consegui reunir informações acessíveis sobre a história das marés. Por isso, ao usar o termo "principal", devo deixar claro que isso se refere apenas a essa perspectiva, sem desmerecer outros cientistas ou trabalhos que não foram encontrados e estudados por mim.

Antes de mais nada, é válido ressaltar que durante o quinto milênio antes da nossa era, o aparecimento da agricultura e da criação de gado permitem, no vale do Nilo e na Mesopotâmia, uma melhoria do nível de vida. A quantidade de víveres aumenta. Certos indivíduos podem então libertar todo o seu tempo da necessidade de procurar comida. Alguns fabricam instrumentos, armas; os ofícios especializam-se. Outros consagram-se a funções de direção e administração ou a funções religiosas. Uma parte da população, até então nômade, sedentariza-se. Aparecem cidades. As tribos, que anteriormente produziam quase inteiramente a totalidade da sua subsistência, trocam os produtos cultivados e fabricados. Mais tarde agrupam-se. A necessidade de grandes trabalhos, principalmente os de irrigação, está na base da constituição de grandes impérios, política e administrativamente muito centralizados. Foi assim na Suméria e no Egito, durante o quarto milênio, na China no terceiro e na Índia no segundo. Isso permite compreender que as técnicas de caça, pesca, recoleção, etc., permitem ao homem, em certas regiões, separar uma parte da alimentação, anteriormente consumida de forma integral pela tribo, para plantar, depois para criar animais domésticos (Rosmorduc, 1983). Em particular, a preocupação com o comportamento do mar e a necessidade de entendê-lo tem relação com a pré-história, e isso leva à conclusão de que a importância da compreensão das marés também é mais antiga do que os registros escritos podem nos confirmar (Soares, 2019).

Desde a antiguidade, o fenômeno das marés tem sido objeto de análise. Segundo Ekman (1993) e Marmer (1922), os registros históricos mais antigos remontam a cerca de 330 a.C. Adicionalmente, McCully (2006) e Mariconda (1999) relatam que Alexandre,

o Grande (356-323 a.C.) e sua tropa foram surpreendidos por um rápido aumento do nível do mar em uma região próxima ao hoje chamado Rio Indu, no Paquistão. Alexandre, conhecido por suas habilidades estratégicas, não tinha conhecimento sobre o fenômeno das marés e nunca havia ouvido falar que o oceano poderia subir e descer duas vezes por dia. Seu tutor, Aristóteles, um dos mais sábios homens da época, aparentemente também não havia lhe ensinado sobre o assunto¹. Parece que a Antiguidade greco-latina não deu grande importância às marés. Não há estudos específicos sobre o fenômeno nas obras dos grandes filósofos da época, como Platão e Aristóteles. A razão para isso pode ser devido ao fato de que as navegações antigas estavam concentradas no mar Mediterrâneo, onde as marés são quase inexistentes. O mar Mediterrâneo é um local de extrema importância histórica, tendo sido o berço de diversas culturas da Antiguidade Clássica. Contudo, é notável que o movimento de maré neste mar é quase inexistente. Devido ao fato de ser um mar interno, com apenas uma pequena ligação com o Atlântico através do estreito de Gibraltar, a amplitude de maré é muito pequena. Isto pode ter sido uma das razões pelas quais o fenômeno das marés não tenha sido tão desafiador para essas culturas antigas. (Mariconda, 1999, 2004, 2005, 2007 e 2011). Por outro lado, a jornada para compreender as marés é longa e foi marcada por muitas descobertas e teorias. Desde os primórdios da história humana, o fenômeno das marés tem sido objeto de estudo e observação. Um exemplo do resultado dessa observação é o conhecimento muito detalhado da relação entre a Lua e marés obtido por vários povos marítimos, especialmente na periodicidade de longo prazo de acordo com as fases da Lua e estações do ano, que já tinha sido obtido, entre outros povos, pelas civilizações da antiga Índia, pelos fenícios e pelo povo da antiga Cária (Wolfschmidt, 2008; Hardisty, 2009).

O desenvolvimento do conceito de força na ciência grega é o título do capítulo 3 do livro *Conceitos de força*, de Max Jammer, onde podemos encontrar informações a respeito de Tales, Anaximandro, Anaxímenes, dentre outros, mas especialmente, **Aristóteles (385 – 323 a.C.)**, dando suas contribuições para conceituar o que é essa grandeza que hoje chamamos de força. No Livro VII da *Física*, Aristóteles resume suas leis da força. Jammer (2011) descreve que força, como ação à distância, não tinha lugar no esquema conceitual aristotélico, e, assim, a explicação do movimento dos planetas e dos astros nos céus só podia ser fornecida pela suposição de um agente externo, um Primeiro Motor, uma inteligência astral, ou pela atribuição de vida própria aos astros. Na

¹ Apesar disso, conseguimos encontrar algumas informações de Aristóteles sobre as marés em um livro relativamente significativo no contexto da historiografia, como veremos a seguir.

Metafísica, Aristóteles refere-se à concepção de uma vida astral ativa de cada esfera planetária na tentativa de dar uma explicação à regularidade dos movimentos celestes, referindo-se ao Primeiro Motor. Com isso, Jammer (2011) afirma que nenhum outro desenvolvimento importante do conceito de força ocorreu durante a época dos primórdios do Liceu ou da Academia. Pappus, o maior matemático do século III, e Arquimedes, o fundador da estática, pouco contribuíram para o desenvolvimento do conceito de força. Somente com os estoicos a história do conceito de força mostrou uma nova guinada. O problema que deu início a esse novo avanço foi a busca de uma explicação para a ligação entre as marés e o movimento do Sol e da Lua. Era um problema antigo. Aristóteles, Dicearco e Píteia haviam tentado resolvê-lo (Jammer, 2011, p.64).

Aristóteles, para quem a ideia de ação a distância era uma impossibilidade, desenvolvera seu esquema de forças tracionadoras e repulsivas para fornecer uma explicação: supusera que o Sol movia os ventos e estes, ao caírem sobre o oceano, empurravam as águas do mar. No *Timeu*, os grandes rios que fluem para o oceano são tidos como a causa das marés (Jammer, 2011, p.64).²

Píteia de Massália (380 – 310 a.C.), mercador, geógrafo, astrônomo, explorador, autor dos registros mais antigos sobre marés de que se tem conhecimento, decidiu embarcar em uma jornada pelo Mar Mediterrâneo. Partindo de sua colônia grega no Ocidente, ele navegou até as Ilhas Britânicas e, ao observar as marés oceânicas, fez uma descoberta que mudaria a forma como se entendia o movimento das marés. Píteia descobriu que a Lua controlava as marés, uma ideia inovadora para a época (Cartwright, 1999). Essa descoberta foi registrada em seu livro *Περί του Ωκεανου* (Sobre o Oceano), que infelizmente se perdeu com o tempo, mas foi citado por outros escritores antigos³. Além de descobrir que havia duas marés altas por dia lunar, Píteia também identificou que a amplitude dessas marés variava conforme as fases da Lua (Ekman, 1993, p.585).

Seleuco de Selêucia (190 - 150 a.C.) foi um seguidor de Aristarco (310 a.C. – 230 a.C.), que como este, sustentava a mobilidade terrestre (Irby-Massie; Keyser, 2001).

² Uma explicação semelhante é dada por **Crates de Mallos (séc. II d.C.)**, que deduziu as marés a partir de certas correntes de águas oceânicas. Por falta de tempo para pesquisar mais sobre esse personagem, deixamos essa nota como menção honrosa.

³ Em um escrito intitulado *Περί του Ωκεανου* (Sobre o Oceano), Píteia narrou suas viagens, embora apenas trechos tenham sobrevivido e sido citados e parafrazeados por autores posteriores. Alguns desses autores, incluindo Políbio e Straborn, questionaram a veracidade das jornadas documentadas por Píteia, alegando que elas poderiam ter sido fictícias e financeiramente inviáveis. Para mais, consultar: Straborn, *Geographika*, Livro I, 4.3 e Straborn, *Geographika*, Livro II, 4.2.

Aparentemente, a teoria das marés de Seleuco consistia basicamente em considerar que, devido à rotação da Terra, o ar é posto em movimento e perturba as águas com uma agitação à qual se associa, para a produção das marés, uma ação perturbadora sobre o ar e deste sobre a água causada pela Lua em seu movimento em torno da Terra. Em outras palavras, Seleuco explica as marés pelo movimento da Lua, que se movia em direção oposta à rotação terrestre e agia sobre o ar intermediário, o qual, por sua vez exercia uma pressão sobre a água, provocando movimentos ondulatórios (Jammer, 2011, p. 64). Logo, infere-se que as duas fontes de perturbação - a translação da Lua e a rotação da Terra - atuavam juntas para criar as marés. Além do caráter mecânico da explicação, é notável nessa teoria o reconhecimento de um vínculo entre o fenômeno das marés e o movimento da Lua.⁴

Posidônio (135 - 51 a.C.), filósofo grego, distinguiu os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribuindo-lhe a influência dos astros e, particularmente, a Lua como causa. Um extenso e aprofundado trabalho de Posidônio, elaborado no século I a.C., entretanto perdido e apenas conhecido a partir de citações antigas, permite concluir que a obra já continha a teoria lunissolar para a explicação dos efeitos diários e mensais da maré devido à ação mútua dos três corpos celestes (Russo, 2005). O trabalho de Posidônio é citado pelo geógrafo grego Straborn (63 a.C. - 25 d.C.) em seu livro *Geographika* (Geografia). Este livro surgiu no ano 23 d.C. e aqui pode-se ler os seguintes trechos:

“When the moon rises above the horizon to the extent of a zodiacal sign [30°], the sea begins to swell, and perceptibly invades the land until the moon is in the meridian; but when the heavenly body has begun to decline, the sea retreats again, little by little; then invades the land again until the moon reaches the meridian below the earth; then retreats until the moon, moving round towards her risings, is a sign distant from the horizon The flux and reflux become greatest about the time of the conjunction [new moon], and then diminish until the half-moon; and, again, they increase until the full moon and diminish again until the waning half-moon.

If the moon is in the equinoctial signs [zero declination], the behaviour of the tides is regular, but, in the solstitial signs [maximum declination], irregular, in respect both to amount and to speed, while, in each of the other

⁴ Todas as teorias antigas, de que temos notícia, reconhecem e popularizam uma conexão de algum tipo entre as marés e a Lua, embora se afastem da explicação mecânica de Seleuco, para adotar explicações de tipo qualitativista (Mariconda, 2011).

signs, the relation is in proportion to the nearness of the moon's approach.”
(Straborn, *apud* Ekman, 1993, p.586).

Straborn escreve ainda:

“There is a spring at the [temple of] Heracleium at Gades [Cadiz], with a descent of only a few steps to the water (which is good to drink), and the spring behaves inversely to the flux and reflux of the sea, since it fails at the time of the flood-tides and fills up at the time of the ebb-tides.” (Ibid., p.586).

Jammer (2011) afirma que Posidônio propôs uma abordagem completamente diferentes de Seleuco e Aristóteles. Ainda descreve que Posidônio viajou para Gades e ali passou 30 dias estudando o fenômeno das marés. Colheu todos os fatos e dados pertinentes. Não teve dúvida quanto à relação de periodicidades entre as marés e os corpos celestes. A população vizinha lhe informou que a altura do fluxo era maior durante o solstício de verão. Posidônio interpretou dinamicamente a doutrina de uma tensão universal, ou tonos, formulada por seu predecessor, Crísipo. A teoria crisipiana das ligações e tensões mútuas baseara-se, originalmente, numa suposta materialização dos conceitos e formas aristotélicos. Para Posidônio, o fenômeno das marés era uma manifestação de forças que permeavam todo o espaço, porém forças completamente diferentes da concepção aristotélica. Em Aristóteles, a força, apesar de ser uma emanção da substância, estava localizada no sujeito, no portador dela, e era independente, a princípio, do objeto no qual era exercida por contato. Posidônio, por outro lado, postulando a força como a ideia primária e mais fundamental de sua filosofia natural, concebeu-a como uma expressão que ligava os dois objetos que ela relacionava e era simultânea a eles. A força tornou-se uma correspondência recíproca da ação, uma “simpatia” na acepção original da palavra. O Universo tornou-se um todo único, pela interação de um sistema de forças (Jammer, 2011, p.64-65).⁵

⁵ Em Aristóteles, a continuidade era uma propriedade puramente geométrica da matéria; com os estoicos, ela se tornou um princípio físico, um agente responsável pela propagação de processos físicos no espaço. Por causa dessa ligação interna, manifesta como uma tensão [*tonos*] em seu estado ativo, as partes distantes do Universo seriam capazes de influir umas nas outras, transformando o cosmo em um único campo de ação. O vácuo – sendo incorpóreo e, portanto, desprovido de continuidade – impediria qualquer percepção sensorial; por isso não podia existir dentro do mundo (Cleomedes, "De motu circulari corporum caelestium libri duo", in J. A. B. Arnim (org.), *Stoicorum veterum fragmenta*, II, 546 (Leipzig, 1905), p.172 *apud* Jammer, 2009, p.47). Essa elaboração da ideia aristotélica – de tendências que permeiam o *plenum* contínuo – é uma generalização importante em dois aspectos: na variedade dos fenômenos contemplados e em sua extensão para além do mundo sublunar (como exemplo, a descoberta de Posidônio sobre a influência da Lua nas marés, que foi vista como uma prova da realidade desse agente transmissor que ligaria os

Quintus Curcius, senador e historiador romano do **século I**, em *De rebus gestis Alexandri Magni* (Dos feitos guerreiros de Alexandre Magno), descreve o primeiro registro de um contato significativo com as marés, sendo fora do ambiente mediterrâneo. Ele relata as dificuldades enfrentadas pela armada de Alexandre, que foi surpreendida pelo movimento de maré de grande amplitude na foz do rio Indo (Mariconda, 2011). Na obra *De la vida y acciones de Alexandre el grande* (Da vida e ações de Alexandre, o Grande), traduzida para o espanhol, destaca-se um relato de Curcius, no que segue:

“[...] eles reconheceram no terceiro dia que a água do mar começou a se misturar com a do rio, e que a maré subiu novamente, o que os fez descer com maior dificuldade. (...) Ignorando os soldados, que este era o fluxo e refluxo do oceano, eles acreditavam, vendo-o de repente crescer e inundando os campos, o que era um sinal da indignação dos deuses, e da punição, que eles queriam dar a sua temeridade”. (*De la vida y acciones de Alexandro el grande*, tradução para o espanhol de Don Mateo Ibanez de Segovia, 1794, Madrid, Livro 9, p.435).

Straborn (63 a.C. - 25 d.C.), geógrafo grego, escreveu o *Geographika* (Geografia) em 23 d.C., que apresentou uma síntese das observações das marés feitas até então. Segundo essa síntese, a posição da Lua no céu governa as marés aqui na Terra, e nas fases de Lua nova e Lua cheia, as marés são mais intensas. A variação da declinação da Lua no céu em relação à linha do Equador pode gerar marés regulares, quando ocorrem amplitudes iguais de maré num dia, ou irregulares, quando há desigualdades diurnas e marés altas de intensidades diferentes ocorrendo no mesmo dia. Além disso, há diferenças nas velocidades de aumento e de diminuição do nível de água, o que significa que o tempo para a maré subir difere do tempo para a maré descer. Portanto, as observações das marés feitas pelos gregos naquele momento sugeriam que as marés estavam diretamente relacionadas com a Lua e, de certa forma, com o Sol, se pensarmos na relação deste com as fases da Lua (Dantas, 2020).

Plínio, O Velho (23 - 79 d.C.), contemporâneo de Curcius, em sua *História Natural*, desenvolve uma teoria na qual a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua (cf. Plínio, 1829). No segundo volume de sua obra citada, ele escreve:

fenômenos celestiais aos terrestres [Crísipo]). O alcance dessas tensões propagadoras se estende a todo o universo material [*holon*], o qual deve ser distinguido da “totalidade” [*pan*]. (Jammer, 2009, p.47 – **grifo nosso**).

“[...] muito já foi dito sobre a natureza das águas; mas a circunstância mais maravilhosa é o fluxo e refluxo alternativo das marés, que existe, de fato, sob várias formas, mas é causado pelo sol e pela lua. A maré flui duas vezes e sobe duas vezes entre cada dois nascimentos da lua, sempre no espaço de vinte e quatro horas”. (Plínio, *apud* Marmer, 1922, p.210).

Plínio era um conhecedor da importância da Lua na formação das marés. Ele tinha compreensão de que a Lua e o Sol atuavam juntos na produção deste fenômeno (Bonelli e Russo, 1996). Além disso, o autor destacou as variações nas amplitudes das marés ao longo dos dias, fruto das fases da Lua, e a cada três meses, consequência dos solstícios e equinócios consecutivos. Plínio também enfatizou a regularidade das marés, afirmando que após oito anos, ou cem revoluções da Lua, os períodos e alturas das marés retornam à mesma ordem inicial. Porém, ele destacou que as marés altas e baixas não ocorrem no mesmo horário dia após dia, ao longo de um mês, e que mesmo quando voltam a repetir o horário, as amplitudes não são as mesmas. Apenas após oito anos é que as marés retornam às mesmas condições iniciais (Soares, 2019).

Cláudio Ptolomeu (90 - 168 d.C.), no *Tetrabiblos*, ofereceu uma visão astrológica sobre a relação entre o movimento da Lua e as marés. Ele acreditava que a influência celestial dos corpos celestes, incluindo a Lua, era o fator determinante das marés, e que essa relação era claramente visível através da observação e da experiência. Ptolomeu aplicou sua compreensão astrológica para explicar a conexão entre o movimento da Lua e o fenômeno das marés, oferecendo uma visão única e notável sobre esse tema.

“A Lua, por ser o astro mais próximo, distribui sobre a Terra o máximo de seu refluxo, pois a maioria das coisas animadas e inanimadas está em sintonia com a Lua e se modifica de acordo com ela. Os rios aumentam e reduzem seus fluxos devido à sua luminosidade; as marés são modificadas conforme seus nascimentos e ocultos; as plantas e os animais tornam-se maiores ou menores, totalmente ou em parte, em consonância com ela”. (Tradução comentada dos três primeiros capítulos do *Tetrabiblos* de Ptolomeu, Pinheiro; Machado. Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 4, v. 1, n. 2, p. 301-332, jul.-dez. 2015. p.312).

Na Antiguidade, já havia uma compreensão básica dos fenômenos relacionados às marés e sua relação com a Lua. Primeiramente, as observações estabeleceram uma

correlação entre as marés e o movimento da Lua. Em seguida, surgiram duas teorias explicativas que tentavam compreender o porquê da ocorrência das marés. Por um lado, temos a teoria "mecânica" de Seleuco, que sugere que a causa das marés é resultado da combinação dos movimentos da Terra e da Lua. Por outro lado, há as teorias "qualitativas", que atribuem o fluxo e refluxo do mar a algum tipo de atração ou afinidade entre as águas e a Lua. Em conclusão, a Antiguidade é responsável pelo estabelecimento da relação entre as marés e a Lua e pela presença de duas teorias explicativas distintas que buscavam compreender esse fenômeno (Mariconda, 2011). Ao final desse resgate histórico será apresentada uma tabela para ilustrar a presença dessas teorias e seus principais defensores.

O conceito de "simpatia" também foi usado para dar respaldo lógico à astrologia. Por meio da "simpatia", **Sexto Empírico (160 - 210)** explicou a influência da Lua nas marés, como fizera **Plotino (205 – 270)**, e sua influência nos seres vivos. Em oposição aos fiéis aristotélicos, que, como Ptolomeu, em seu *Tetrabiblos*, rejeitavam qualquer ação da distância e tentavam explicar as marés pelas forças de contato (correntes atmosféricas, calor e luz), Plotino reduziu as influências cósmicas e astrológicas à relação de "simpatia" que, a seu ver, existia entre todas as partes do Universo (Jammer, 2011, p.68).

Beda, O Venerável (673 – 735), é um nome consagrado na história da Inglaterra. Conhecido como o pai da história inglesa, ele deixou sua marca na literatura com sua obra *Historia ecclesiastica gentis Anglorum* (A História Eclesiástica do Povo Inglês). Além disso, em seu livro *De Temporum Ratione* (Sobre a Contagem do Tempo), Beda abordou temas diversos, incluindo a influência do movimento da Lua nas marés. Explicou que o vento poderia adiantar ou atrasar a maré, e foi o primeiro a se referir ao estabelecimento de um porto, ou seja, o atraso na ocorrência da maré pode ser diferente em portos da mesma costa, pelo que seria conveniente que fosse tabulada, em separado, por porto - a região das cidades de Jarrow e Wearmouth, onde se situava o mosteiro em que vivia o bispo, a amplitude das marés eram acontecimento notável (Rosa, 2012, p.323; Wallis, 2004, p.82-85, 307-312). As anotações de Beda criaram técnicas de observação de amplitude das marés, que mesclavam leis gerais com particularidades locais, e que mais tarde foram adotadas como referência básica para a determinação do estabelecimento de um porto marítimo em todo o mundo (de Almeida, 2007). Beda, em seu Capítulo 29, abordou a operação das marés, revisando suas fontes clássicas e computacionais com cuidado e adicionando suas próprias observações e cálculos. A compreensão das marés na época era limitada pelo fato de que as variações nas marés no Mediterrâneo oriental

eram muito pequenas. Embora a ligação entre a Lua e as marés fosse conhecida há muito tempo, muitas fontes de Beda, como Philippus Presbyter e as fontes irlandesas Pseudo-Agostinho e Pseudo-Isidoro, apresentavam a ideia de que as marés eram causadas por uma variação no volume de água nos oceanos, ocorrendo ao mesmo tempo em todo o mundo. Por exemplo, Philippus Presbyter escreveu sobre um gêiser no mar causando as marés (Wallis, 1999, p.307-312; Benison, 2000). No entanto, Beda mostrou sua habilidade de questionar e corrigir suas fontes. Em sua passagem, ele argumenta contra a afirmação de Philippus sobre o ocorrer de uma enorme enxurrada do oceano em todas as regiões e terras ao mesmo tempo. Beda, com base em suas observações ao longo da costa do Mar Britânico, afirmou que onde a maré subia em um lugar, ela baixava em outro ao mesmo tempo. Portanto, ele concluiu que a onda viajava de um lugar para outro, e não havia uma variação geral do volume de água nos oceanos. (Benison, 2000). Beda mostra sua prontidão para questionar e corrigir suas fontes na seguinte passagem:

“So let him who is capable, see if what Philip says is true or no: There are those who claim and affirm that an enormous outpouring of the ocean takes place in all the streams of every region and land at one and the same time. But we who live at various places along the coastline of the British Sea know that where the tide begins to run in one place, it will start to ebb at another at the same time. Hence it appears to some that the wave, while retreating from one place, is coming back somewhere else; then leaving behind the territory where it was, it swiftly seeks again the region where it first began. Therefore at a given time a greater malina deserts these shores in order to be able all the more to flood other [shores] when it arrives there.” (Wallis, 1999, p.85).

Na Europa medieval, o entendimento do fenômeno das marés foi essencialmente baseado na astronomia islâmica, sendo a visão europeia profundamente influenciada pelos trabalhos dos astrônomos islâmicos, que a partir do século XII foram sendo disponibilizados através de traduções para latim (Tolmacheva, 2004; Glick, 2005). **Abu Ma'shar (787 - 886)**, na sua obra *Introductorium in astronomiam* (Introdução à astronomia), ensinava que a subida e descida da maré eram fenômenos causados pela Lua (confirmando Beda (f. 736) que na Europa também tinha deduzido que a Lua estaria envolvida no ciclo da maré). Abu Ma'shar discutiu na sua obra os efeitos do vento e das fases da Lua em relação ao Sol sobre as marés. Jammer (2011) relata que Abu Ma'shar procurou mostrar que as marés eram causadas por influências astrológicas, mas

sem especificar o tipo e o caráter das influências que tinha em mente. Embora soubesse, por exemplo, que a luz da Lua era irrelevante para explicar as marés, que se produziam tanto na Lua Cheia quanto na Lua Nova, ele não fez nenhuma afirmação positiva sobre a natureza física das influências ou forças envolvidas (Jammer, 2011, p.84). No século XII, o filósofo andaluzino **Alpetrágio (f. c. 1204)** contribuiu com a noção das marés serem causadas pela circulação geral dos astros (Tolmacheva, 2004; Glick, 2005).

Até aqui, percebe-se que os diversos estudiosos mencionados anteriormente, acreditavam que a Lua e o Sol influenciavam as marés. Contudo, o mecanismo exato pelo qual esses corpos celestes causavam esse fenômeno ainda não era totalmente compreendido. **Zakariya al Qazwini (1203 - 1283)**, poeta, cosmógrafo e geógrafo persa, de ascendência árabe, em sua obra *'Aja'ib al-Makhlūqat wa Ghara'ib al-Mawjudat* (As Maravilhas das Criaturas e as Maravilhas da Criação), em 1235, afirma que o fluxo da maré é causado pelo Sol e pela Lua que aquecem as águas, fazendo com que elas se expandam. Ele descreve isso da seguinte maneira no caso do Sol:

“As to the rising of the waters, it is supposed that when the Sun acts on them it rarefies them, and they expand and seek a space ampler than that wherein they were before, and the one part repels the other in the five directions eastwards, westwards, southwards, northwards and upwards.” (Ekman, 1993, p.586).

Apesar das observações relacionadas ao movimento da Lua no céu e ao fato de suas fases estarem em consonância, de alguma forma, com as marés na Terra, algumas teorias dispensavam a presença da Lua para haver marés. Ao norte da Europa, mais precisamente na costa norte de onde hoje chamamos de Noruega, há relatos da presença de um grande turbilhão de águas em forma de vórtices (redemoinhos). A tal fenômeno, chamado pelos nativos como Maelstrom, palavra de origem nórdica, atribuíam-se a causa das marés. Quando a maré estava baixa, isso significaria que parte da água do mar teria entrado neste redemoinho, e quando a maré estava alta, a água teria saído do vórtice. Hoje, sabemos que as formações desses vórtices acontecem devido à conjunção de fortes correntezas que atravessam os limites do continente, em estreitos (canais marítimos que separam duas massas de terra), e à grande diferença de alturas das marés no local. Isto é, esses vórtices são, na verdade, influenciados pelas marés, e não a causa delas (Dantas, 2020).

No século XIV, **Jacopo Dondi dell’Orologio (1290 - 1359)**, pai de Giovanni de Dondi dell’Orologio, publicou a obra *De fluxu et refluxu maris* (Sobre o fluxo e refluxo dos mares), provavelmente inspirado por fontes greco-bizantinas (Dondi *apud* Revelli, 1912). Nesta obra explica-se a existência de duas marés diárias com base na atração da Lua.

Federico Chrisogono (1472 - 1538), um membro da nobreza de Zara, estava preocupado principalmente com a medicina e a astrologia, ensinando essas disciplinas em Pádua de 1495 a 1498. Seu livreto sobre as marés, *Tractatus de occulta causa fluxus et refluxus marts* (Tratado sobre a causa oculta do fluxo e refluxo das marés), foi impresso, juntamente com outras obras suas, em Veneza em 1528. O livreto é muito curto, tendo apenas oito páginas. A obra, embora prolixa e repetitiva, apesar de sua brevidade, é de grande interesse porque contém, pela primeira vez, uma explicação efetiva dos principais ciclos das marés baseada exclusivamente nas posições da Lua e do Sol (Bonelli e Russo, 1996).

Chrisogono observou que o Sol e a Lua fazem com que o mar atinja seu nível mais alto onde estão no zênite ou no nadir⁶ e afundem até seu nível mais baixo onde estão no horizonte, produzindo quatro protuberâncias pontiagudas na água. A partir dessas premissas, Chrisogono deduziu que as marés são influenciadas pelos efeitos combinados do Sol e da Lua, sendo somados durante a Lua Cheia e a Lua Nova e sendo subtraídos um do outro durante a quadratura (Bonelli e Russo, 1996). No entanto, sua teoria difere da teoria moderna das marés em um aspecto: ele considerou que durante a quadratura, a influência das marés é cancelada, o que não é observável na realidade. Chrisogono também deduziu o ciclo anual das marés a partir dos mesmos pressupostos, mas deixou de considerar a diferença entre as duas marés diárias. O livro de Chrisogono era acompanhado por um conjunto de discos de cartão concêntricos para calcular as posições relativas da Terra, Lua e Sol (Bonelli e Russo, 1996).

⁶ Em astronomia, "nadir" é o ponto do céu diretamente abaixo de um observador. É o oposto do "zênite", que é o ponto mais alto do céu diretamente acima do observador. O nadir é geralmente usado como um ponto de referência na astronomia para localizar objetos celestes ou para determinar a altitude de um observador em relação ao nível do mar. O nadir é o ponto onde uma linha vertical traçada a partir do observador se encontra com a superfície da Terra, e é o ponto mais distante da esfera celeste que pode ser visto a partir de uma determinada posição na Terra (Saraiva, 2004).

Bonelli e Russo (1996) relatam que as ideias de Chrisogono sobre marés foram amplamente adotadas por muitos autores, principalmente venezianos, que utilizaram suas teorias em seus próprios trabalhos. Autores como **Federico Delfino (1477 - 1547)**, **Ludovico Boccaferri (1482 - 1545)** e **Girolamo Cardano (1501 - 1576)** se basearam explicitamente nas teorias de Chrisogono em suas próprias obras sobre marés. O trabalho de Chrisogono foi reproduzido na íntegra por **Giovanni Paolo Galluccio (1538 - 1621)** e sua teoria foi adotada em Veneza por **Annibale Raimondo (1505 - 1591)** e na França por **Claude Duret (1570 - 1611)**. Todos esses autores explicaram os fenômenos das marés com base na posição do Sol e da Lua. Por fim, **Florido Ambrosio Patavani**, em 1613, também explica as marés com base nas teorias de Chrisogono (Bonelli e Russo, 1996, p.390).⁷

Apesar de todos esses trabalhos, as ideias expostas por Chrisogono não foram facilmente aceitas. Por exemplo, Simon Stevin⁸, o qual refutava sua teoria das marés. Evidentemente, o conhecimento possuído por Chrisogono era muito difícil de ser alcançado por meios puramente científicos. Nem mesmo Galileu, que estava interessado em explicar as coisas de uma maneira diferente, conseguiu explicar o que Chrisogono

⁷ Decidimos não analisar de forma detalhada cada uma dessas obras se não o capítulo ficaria muito extenso. No entanto, segue o nome de cada uma das obras para o leitor curioso e estudioso:

Federico Delfino, *De fluxu et refluxu aquae marts*, Venice, 1559. Uma segunda edição dessa obra foi impressa em Basileia no ano de 1577.

Ludovico Boccaferri, *Lectiones...in secundum ac tertium meteorum Aristotelis*, Venice, 1570. Teoria de Chrisogono é apresentada nas folhas 14v e seguintes.

Girolamo Cardano, *De rerum varietate*, Basel, 1587.

Giovanni Paolo Galluccio, *Theatrum mundi et temporis*, Venice, 1588, ch. 12, 70-82.

Annibale Raimondo, *Trattato utilissimo e particolarissimo del flusso e del riflusso del mare*, Venice, 1589, folhas. 3r-7v.

Claude Duret, *Discour de la ve'rite des causes et effects des divers cours, mouvements, flux, reflux et saleure de la mer oce'ane, mer Me'diterrannee et autres mers de la terre*, Paris, 1600. Duret simplesmente plagiou o trabalho de Delfino citado anteriormente; veja Duhem, op. cit. (2), 368.

Florido Ambrosio, *Dialogismus de natura universa marts ac eius genesi et de causa fluxus et refluxus eiusdem...*, Padua, 1613.

⁸ Falaremos dele mais para frente.

sabia. Além disso, Stevin também falhou em estabelecer uma teoria científica das marés baseada nas mesmas premissas de Chrisogono (Bonelli e Russo, 1996).

Júlio César Scaliger (1484 - 1558), cientista italiano, depois da (re)descoberta da América, apresentou uma nova teoria sobre as causas das marés. Em 1557, ele sugeriu que não só a Lua, mas também a oscilação da água do mar entre as costas da América e Europa eram responsáveis pelo fluxo das marés. A origem dessa teoria pode ser encontrada nos fenômenos de ressonância que ocorriam em alguns dos grandes lagos da Suíça na época (Woodworth, 2023).

Andreas Cesalpino (1519 - 1603), médico, que também foi professor na Universidade de Pisa na época em que Galileu aí estudou - e Galileu se refere às ideias de Cesalpino no Diálogo (Mariconda, 2011, p.790, 823, 844, 847) - propôs uma explicação, na qual o fluxo e refluxo do mar seria um movimento libratório⁹ causado pela Terra, e não diretamente pelo fluido. Essa explicação era surpreendentemente inovadora e mecânica, mas baseada em ideias astronômicas tradicionais. Para explicar a precessão dos equinócios e a trepidação imaginária, Cesalpino atribuiu à própria Terra um movimento libratório irregular, que produziria as marés como efeito observável. Alguns estudiosos e intérpretes (cf. Ellis, 1876; Shea, 1992) consideram que a teoria de Cesalpino antecipou a de Galileu em certo sentido (Mariconda, 2011, p.844-845). Andrea Cesalpino escreveu *Quaestiones peripateticae*, Veneza, em 1571. A 'Quaestio V no livro III desta obra é intitulada '*Maris fluxum, et refluxum ex motu terrae non lunae fieri*' (As marés acontecem por causa do movimento da Terra, não da Lua). Sosio (1970, p. lxxviii) observa que o título promete mais do que entrega. Cesalpino, que não era de orientação copernicana, na verdade não se refere nem à rotação nem à revolução da Terra, mas a um estranho pequeno movimento comunicado à Terra pelo movimento dos céus. Estamos lidando, portanto, com uma tentativa de explicar as marés por meio de movimentos da Terra por um autor que difere dos outros citados por não ter motivo para acreditar nos movimentos da Terra e introduzir um “*ad hoc*”. Que melhor confirmação de que a associação entre as marés e os movimentos da Terra foi sugerida a diferentes autores não

⁹ Libratório: em que há oscilação. Fonte: <https://aulete.com.br/librat%C3%B3rio>. Acesso em 19/04/2023. Dicionários bem respeitados como Aulete e Sacconi definem esse verbete dessa forma. O Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa (VOLP), 6ª edição, que tem poder de lei, reconhece tal palavra.

por terem argumentos em comum, mas por terem lido recursos em comum? (Bonelli e Russo, 1996).¹⁰

Girolamo Borro (1512 - 1592), que também foi professor na Universidade de Pisa na época em que Galileu foi aluno, em seu *Del Flusso e Reflusso del Mare e dell'inundatione Del Nilo* (Do Fluxo e Refluxo do Mar e da Inundação do Nilo), em 1577, fez relações das marés com a Lua, mas justifica a ação lunar a partir de sua luminosidade, que provocaria o aquecimento das águas causando o fluxo e o refluxo do mar.

“Depois das primeiras seis horas do dia, chegam as seis seguintes, a lua ambulante entra no segundo quarto do mundo e começa a ferir o primeiro quarto à esquerda, deles novamente fugindo. (...) E à medida que o calor mais quente as incha, a hora menos quente as esvazia e as condensa: condensadas e esvaziadas, elas são baixadas. E quanto mais a lua do primeiro quarto se aproxima do oeste de seu horizonte (...) o refluxo no primeiro quarto acaba, e as águas muito altas que estavam naquele primeiro quarto, agora são muito baixas; aquelas do segundo quarto, que já começam a subir, são muito altas (...). Seguido pelo terceiro quarto do dia, a lua ambulante entra no terceiro quarto do mundo e infla os hemisférios dos Antípodas, iniciando um novo fluxo neles. (...) Enquanto a Lua eleva as águas deste terceiro quarto, ela abaixa as do segundo, pelas razões que agora são ditas. A quarta parte do dia vem, e a Lua continua sua jornada, começa a controlar as águas do mar no terceiro quarto, com seus raios um tanto transversais, portanto o calor diminui, e as águas condensadas novamente se esvaziam, e assim, quanto a Lua chega no final das últimas seis horas do dia e do último quarto do caminho, então novamente as águas retornam muito baixas no terceiro quarto passado, e muito altas no último quarto presente. Deste modo, o que você ouviu é feito um fluxo e refluxo perpétuo no mar de seis em seis horas, que é o que se diz sobre o assunto proposto ao nosso raciocínio”. (Borro. *Del Flusso e Reflusso del Mare e dell'inundatione Del Nilo*, p. 146; citado por Soares, 2019, p.16).

Borro afirmou que o fluxo das marés ocorreria tempos depois da passagem da Lua pelo zênite. Entretanto, com a utilização de marégrafos, instrumentos que registram continuamente o nível do mar, é possível observar que há uma diferença de cerca de 3 h

¹⁰ Esta indagação sugere que a similaridade nos argumentos usados por diferentes autores para explicar as marés pode ser explicada pela influência de um conjunto comum de recursos de leitura, em vez de uma conexão direta entre suas ideias. Em vez de terem chegado a essas ideias independentemente, os cientistas podem ter sido influenciados por fontes de informação semelhantes.

entre a passagem da Lua pelo zênite e a subida da maré, contradizendo a teoria de Borro (Soares, 2019).

Simon Stevin (1548 - 1620), em 1590, atribuiu a causa das marés à atração da Lua sobre a massa de água. Stevin, considerado um dos maiores cientistas de sua época, 80 anos depois que o livreto de Chrisogono foi publicado, em sua obra *Van de Spiegheling der Ebbenvloet* (Sobre o espelho das marés), publicada em Leiden em 1608 como parte de seus *Wisconstighe Ghedachtenissen* (Memórias científicas)¹¹, visava ao mesmo objetivo de Chrisogono: uma explicação das principais características das marés baseada em pressupostos sobre a relação entre as marés e a posição dos corpos astrais. Stevin não aceitou a teoria de Chrisogono, uma vez que não mencionava nenhum papel do Sol na afetação das marés, nem, como consequência, podia oferecer qualquer explicação para o ciclo mensal observável, embora o reconhecesse (Bonelli e Russo, 1996). Na sua obra, apresentou uma teorização do fenômeno da subida e descida da maré, refutando muitos conceitos errados que ao tempo existiam em torno do fenômeno das marés. Stevin defendeu a ideia de ser a atração da Lua a força responsável pelo ciclo de maré e explicitou, em termos claros, os conceitos de enchente, vazante e preamar e clarificou os conceitos de maré viva e maré morta, reafirmando a necessidade de mais investigação sobre o assunto (Palmerino, 2010, p.200).

Paolo Sarpi (1552 – 1623), polímata italiano, descreve dois argumentos em defesa da teoria copernicana que, à primeira vista, guardam uma semelhança superficial com argumentos que foram posteriormente apresentados por Galileu no *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo), uma característica que levou um número considerável de historiadores a concluir que as ideias originais devem ter sido de Galileu. Um exemplo, datado de 1592, diz respeito à possibilidade de extrusão de objetos de uma Terra em rotação. Este argumento é, no entanto, bastante diferente daquele apresentado posteriormente por Galileu no Diálogo. Outra é sua teoria das marés e, embora Galileu tenha publicado posteriormente uma teoria semelhante à encontrada no *Pensieri Naturali, Metafisici e Matematici* (Pensamentos Naturais, Metafísicos e Matemáticos)¹², ela é significativamente diferente da de Sarpi e

¹¹ A obra, com uma tradução em inglês, pode ser encontrada em *The Principal Works of S. Stevin*, 5 vols., Amsterdam, 1961, iii, p.323-357.

¹² A obra analisada por Naylor (2014) foi: *Pensieri naturali, metafisici e matematici* / Paolo Sarpi; *Manoscritto dell'iride e del calore, Arte di ben pensare, Pensieri medico morali, Pensieri sulla religione, Fabulae, Massime e altri scritti*; edizione critica integrale commentata a cura di Luisa Cozzi e Libero Sosio, 1996.

não é tão diretamente baseada na teoria de Copérnico quanto a original de Sarpi. Essa teoria, registrada nos *pensieri* (568–571), baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra como sendo um círculo excêntrico onde o Sol não está em seu centro, enquanto no Diálogo a órbita da Terra é considerada um círculo com o Sol em seu centro¹³. (Naylor, 2014, p.661-662 – **grifo nosso**).

Embora ao longo do século XVI tenha existido uma ampla gama de teorias, essa nova teoria foi uma ruptura marcante com as explicações anteriores, pois explicava a origem das marés usando uma explicação baseada na experiência com um argumento diretamente sustentado na teoria copernicana, pois nesses *pensieri* a explicação das marés é fornecida apenas em termos do duplo movimento da Terra – sua rotação diária e seu movimento orbital anual. É ousado, mas muito direto e uma explicação totalmente bidimensional. A ideia de que os movimentos da Terra estariam relacionados com as marés já havia sido sugerida por outros e há duas notas no *Pensieri* que revelam que Sarpi havia adotado essa ideia em 1591 – quatro anos antes de registrar a teoria das marés e um ano antes da chegada de Galileu em Veneza (Sarpi *apud* Cozzi e Sosio, 1996, *pensieri* 568-571, p.423-426 – **grifo nosso**). Na última década do século, mais de uma pessoa apresentou a visão de que poderia haver uma ligação entre o movimento da Terra e as marés. Por exemplo, Andreas Cesalpino¹⁴ sustentava que o movimento da Terra produzia as marés (Cesalpino, 1571)¹⁵. Mas a teoria do *Pensieri* de Sarpi é a tentativa mais antiga conhecida de fornecer uma demonstração física do movimento da Terra e foi vista por Drake e muitos outros como diretamente relacionada à aceitação do copernicanismo por Galileu (Naylor, 2014, p. 662).

Os *pensieri* de Sarpi descrevendo a teoria das marés, embora extremamente abreviados, fornecem uma explicação básica de um ciclo de maré diário e anual com base na teoria de Copérnico.

Note 568: “The diameter of the Earth in the orbit of the annual motion subtends just less than 6 minutes [at the Sun] so that the [Earth’s] centre moving less than 60 [minutes per day] in its upper part of the daily motion in 30 minutes

¹³ Paulo Sarpi, *Pensieri Naturali, Metafisici e Matematici* (ed. Luisa Cozzi and Libero Sosio), Milan: Riccardi, 1996, *pensieri* 568–571, pp. 423–426.

¹⁴ Suas contribuições serão apresentadas mais para frente desse capítulo.

¹⁵ Segue a referência completa: Andrea Cesalpino, *Quaestionum peripateticarum libri V*, Venice: Iuntas, 1571, 70r–71v.

advances 1/5, and in the other 30 of the lower is as much retarded. The upper is the night, the lower the day, so that every point of the surface is now fast, now middling, now slow, as with the Moon” (Sarpi, op. cit. (2), *pensiero* 568, p. 423 *apud* Naylor, 2014, p.662).

Naylor (2014), afirma a existência de argumentos copernicanos nessa nota 568, a saber: a composição dos dois movimentos atribuídos à Terra, seu movimento orbital e seu movimento rotacional. Em notas posteriores, Sarpi explica o fenômeno das marés. A observação final de Sarpi identifica a semelhança entre a mudança cíclica na velocidade do movimento da Lua em relação ao Sol e a da superfície da Terra. O movimento da Lua é máximo quando seu movimento orbital em torno da Terra está na mesma direção que o movimento orbital da Terra e mínimo quando quinze dias depois ela está se movendo na direção oposta. A similaridade dos dois conjuntos de combinações nos movimentos da Terra e da Lua é declarada de forma tão enigmática que seu significado foi negligenciado:

Note 569: “Any water carried in a basin, at the commencement of its movement remains behind and rises at the rear, as it has not yet fully received the motion, and when stopped it continues to be moved by the received motion and rises at the front. The seas are waters in basins, so that the annual motion of the Earth has the effect that it is now swift, now slow and then average by the diurnal motion, which is seen in the diverse movement of the basin. And if the seas are so large that they have a quarter [sphere] so that part is in the swift, part in the average, there will be a greater difference, and yet more if they have a half-sphere, so that part is in the swift and part in the slow.” (Ibid., p. 663).

Note 570: “Therefore it is manifest that lakes and small seas do not produce this effect being insensible basins. It is also manifest that the variation of the eccentricity, varying the ratio of the diurnal to the annual motion, equalizes the augmentations and the decrements. Also it is manifest, how the different positions of the shores may cause variation, if their length is along or across the motion. Finally it is manifest how the motion of the seasons, carrying the shores now to one site and now to another, makes an annual variation of the augmentations and decrements.” (Ibid., p. 663).

A nota 570, embora muito resumida, descreve as diferentes maneiras pelas quais a magnitude da ação da causa primária pode afetar a maré. Ele afirma que há três maneiras pelas quais a magnitude da ação da causa primária é alterada, incluindo a redução direta do efeito da rotação da Terra pelo tamanho do mar ou lago, a orientação do mar e a

mudança na razão entre a rotação diurna e a velocidade orbital da Terra à medida que ela se move ao longo de sua órbita. O texto também sugere que a magnitude das marés está relacionada às estações. Cada uma das quatro frases se refere a uma consequência diferente da teoria (Naylor, 2014, p.663-664).

As notas discutem a teoria de Sarpi sobre a mudança na magnitude das marés devido à alteração na proporção entre a velocidade da superfície da Terra produzida pela rotação diurna e a velocidade orbital da Terra. A teoria de Sarpi sugere que essa proporção é afetada pela excentricidade da órbita da Terra, o que causa um ciclo anual de variação nas marés. A segunda frase é considerada enigmática, mas indica que a variação na velocidade orbital da Terra produzida pela excentricidade da órbita é responsável pela variação cíclica das marés. A conclusão de Sarpi é resumida em sua declaração: "*It is also manifest that the variation of the eccentricity, varying the ratio of the diurnal to the annual motion, equalizes the augmentations and the decrements*" (Naylor, 2014, p.664).

Assim, esta teoria das marés é fundada na suposição básica da teoria de Copérnico de que a Terra se move em uma órbita excêntrica em torno do Sol e que sua velocidade orbital muda ciclicamente ao longo do ano. Nesse aspecto, é totalmente diferente da teoria posterior de Galileu. De fato, a causa única e fundamental da variação das marés na visão de Sarpi é a mudança contínua na velocidade orbital da Terra postulada por Copérnico. Isso ocorre porque acredita-se que o efeito mecânico total seja proporcional à razão entre a velocidade do movimento diurno da Terra e seu movimento orbital. No entanto, essa suposição crucial está implícita e, embora não declarada, é o fundamento da teoria de Sarpi. Este conceito é uma ideia totalmente ausente do primeiro relato de Galileu sobre sua própria teoria das marés, que apareceu em seu *Discorso del flusso e refluxo del mare* (Discurso sobre as marés), em 1616 (Naylor, 2014, p.664).

Em suma, para Naylor (2004), Paolo Sarpi, apesar de suas responsabilidades religiosas, esteve ativamente envolvido na ciência entre 1578 e 1598, conforme indicado em seu livro *Pensieri*. A partir de 1585, ele estudou a teoria de Copérnico e registrou argumentos a favor dela. Em 1595, ele esboçou uma teoria copernicana das marés semelhante à do Diálogo de Galileu, que se tornou bem conhecida. No entanto, uma análise detalhada revela que a teoria de Sarpi é diferente daquela de Galileu em vários aspectos importantes. Além disso, é possível afirmar que Sarpi era um copernicano em 1592, enquanto Galileu ainda não havia se convertido à teoria de Copérnico. A análise da teoria das marés de Sarpi e do trabalho de Galileu na época indica que a teoria registrada por Sarpi em 1595 era originalmente de sua autoria. Isso implica que a contribuição de

Sarpi para a Revolução Científica é mais significativa do que se pensava anteriormente. Além disso, algumas das características mais significativas da teoria das marés publicada por Galileu no Diálogo foram, na verdade, de Sarpi, e provaram ser de valor duradouro.

No Livro XXVIII de sua *Pancosmia*, **Francesco Patrizi (1529 - 1597)**, livro este inserido dentro de sua obra maior, *Nova de universis philosophia* (Nova filosofia no universo) (50 livros), datado de 1591, Patrizi fornecera uma história pormenorizada das teorias sobre as causas das marés, citando, em particular, Frederico Chrysogonos, que havia estudado com mais exatidão a relação temporal entre as marés e movimento da Lua, concluindo que havia uma coincidência temporal entre elas e certas posições lunares. Em decorrência dessas investigações, relatara Patrizi, Chrysogonos, Frederico Delphino, Agostino Cesareo e, por fim, Telésio haviam formulado a teoria de que a Lua causava as marés (Jammer, 2011, p.114-115). Em suma, Francesco Patrizi, no Nova filosofia do universo, desenvolve uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam (cf. Rossi, 1989; Rees, 1996b; Mariconda, 2007, p.507).

Johannes Kepler (1571 – 1630), esboçou a teoria gravitacional das marés na introdução de seu livro *Astronomia Nova*, publicado em 1609 (Aiton, 1954). Ele descreveu a gravidade como uma "afeição corpórea mútua entre corpos cognatos" semelhante à propriedade magnética, e sugeriu que essa influência era proporcional à massa (moles) dos corpos. Já em 1596, em seu livro *Mysterium Cosmographicum* (Mistério cosmográfico), Kepler assumiu, embora sem apresentar qualquer evidência de apoio, que a gravidade da Terra se estendia até a Lua (Aiton, 1955, p.206; Voelkel, 2002, p.72), enquanto em uma carta a Herwart von Hohenburg escrita em 1607, ele identificou a atração da Lua, que causou as marés, com a gravidade da Terra. Kepler escreveu a Herwart:

"The sea is thus attracted to the moon, as all heavy bodies, including the sea itself, are attracted to the earth." (Aiton, 1955, p.206).

O conteúdo dessa carta nos auxilia a compreendermos o contexto histórico em que Kepler chegou à sua concepção de força. Nessa carta, Kepler referiu-se a Francesco Patrizi e sua discussão sobre as marés. Kepler concordou com os defensores¹⁶ da teoria

¹⁶ São eles: Patrizi, Chrysogonos, Delphino, Cesareo e Telésio, já citados anteriormente.

lunar, mas generalizou suas descobertas num sentido importante: os oceanos eram atraídos pela Lua tal como todos os objetos pesados, inclusive os próprios oceanos, eram atraídos pela Terra (Kepler *apud* Jammer, 2011, p.115).¹⁷ Segundo o próprio Kepler, isso foi só uma especulação, como se ele pretendesse dizer que a atração lunar funcionava de maneira análoga à gravitação terrestre. Mesmo assim, se a considerarmos no contexto de seus outros trabalhos, parece que ele já havia concebido o caráter universal da atração, ideia geralmente atribuída a Newton (Jammer, 2011, p.115).

Kepler acreditava que esta força era algum tipo de magnetismo, influenciado pela recente descoberta de William Gilbert sobre o campo magnético da Terra.

"The sphere of influence of the attraction which is in the moon, extends as far as the earth, and incites the water up from the torrid zone, in whatever place it stands in the zenith, insensibly in contined seas, sensibly in those places where the cavities of the ocean are widest and the freedom from restraint of the reciprocation is greatest.

The moon passing swiftly over the zenith, though the waters cannot follow as quickly, causes a westward flow in the torrid zone, until impinging upon the opposite shores, it is deflected; the assembly of the waters is dissolved by the departure of the moon, ..., because deserted by the attraction which had caused it, ..., as in water vases, it returns and leaps against its shores, concealing them." (Aiton, 1954).

Todorov (2016) ainda destaca a seguinte passagem:

"If the earth ceased to attract the waters of the sea, the seas would rise and flow into the moon ... If the attractive force of the moon reaches down to the earth, it follows that the attractive force of the earth, all the more, extends to the moon and even farther..." (Todorov, 2016).

Recomenda-se a exposição emocional bem documentada das seitas. 6.8-10, p.334-343, do livro de Koestler onde essas citações são colocadas em contexto.

¹⁷ "*Aliquamulta de hac re in Francisco Patricio inveniuntur: quamvis perperam is Lunam (si bene memini) excludere conatur a consideratione causarum. Ex illo Germano authore nata mihi est haec speculation: a Luna maria sic attrahi, ut gravia omnia, ipsaque maria, attrahuntur a terra.*" Kepler, *Gesammelte Werke*, v.15, p.387, *apud* Jammer, 2011, p.124.

Harris (1898) menciona que Kepler estava fazendo objeções às ideias de maré de Galileu já em 1598. Em seu *De Fundamentis Astrologiae Certioribus* (Sobre os mais certos fundamentos da astrologia) de 1601, Kepler observou que

“all things swell up with the waxing Moon and subside when she is waning” (Woodworth, 2023. p.9).

Neste livro, Kepler fez o que se acredita ser a primeira menção de uma variação de 19 anos nas marés (ver Tese 47 na tradução de Brackenridge e Rossi, 1979). No último livro de Kepler, um romance chamado *Somnium* (*Sonho*), publicado postumamente em 1634, mas na verdade escrito em 1608, ele especulou que:

“the causes of the ocean tides seem to be the bodies of the Sun and Moon attracting the ocean waters by a certain force similar to magnetism. Of course, the body of the Earth likewise attracts its own waters, an attraction which we call ‘gravity’.” (Woodworth, 2023. p.9).

Um ano depois, os axiomas de Kepler para uma “verdadeira teoria da gravidade” em sua *Astronomia Nova* de 1609 incluíam a necessidade de atração entre a Terra e a Lua. Para isso, procurou uma forma de atração magnética, tendo-se inspirado na publicação de William Gilbert em 1600 sobre o campo magnético da Terra (Ekman, 1993; Fara, 1996; Hecht, 2019). Quanto às marés, afirmou:

“If the Earth ceased to attract (to itself) the waters of the sea, they would rise and pour themselves over the body of the Moon.” (Woodworth, 2023, p.9).

Como resultado, ele afirmou que:

“insensibly in enclosed seas, but sensibly where there are broad beds of the ocean.” (Ibid., p.9-10).

A interpretação de Kepler posteriormente deu um passo aparentemente para trás quando a expressão de suas visões astrológicas no *Harmonices Mundi* (Harmonia do Mundo), de 1619, o levou a interpretar as marés em termos da respiração mística dos

animais terrestres e especialmente a respiração dos peixes. O *Complete Dictionary of Scientific Biography* (CDSB, 2008) afirma que nessa época

“swept on by his fantasy, Kepler found animistic analogies everywhere” (Woodworth, 2023, p.10).

Além disso, a *Scientific American* (1858) relatou que Kepler

“believed that the earth was a real living animal, that the tides were due to its respirations, and that men and beasts were like insects feeding on its back” (Woodworth, 2023, p.10),

mas ignorou seu apoio anterior para uma atração como o magnetismo. No entanto, isso não significa que Kepler tenha renunciado as suas visões anteriores de atração magnética ou gravitacional (Harris, 1898).

Com base em antigas observações e correlações, Kepler já tinha interpretado corretamente, embora apenas de forma qualitativa, a razão pela qual as marés apresentam amplitude diferente consoante a fase da Lua e se comportam de forma diferente em diferentes costas conforme a posição relativa da Lua, mas apenas conseguia explicar as situações em que ocorria um ciclo de maré por dia (Pugh, 1996, p.3). Este conhecimento fora originalmente mencionado na obra de Ptolomeu intitulada *Tetrabiblos* (Robbins, 1940) como sendo derivada de antigas observações.¹⁸

Há muito mais a ser dito sobre Kepler. Revisões recentes de sua vida e obra podem ser encontradas em Hecht (2019). É importante perceber como foi difícil para outros pensadores lidar com a ideia de atração ou “ação à distância” por alguma força misteriosa como a proposta por Gilbert ou Kepler. Para alguns, quase cheirava ao ocultismo¹⁹. Em particular, a ideia foi ridicularizada por Galileu, que a considerou

¹⁸ Ptolomeu com Frank E. Robbins, trans., *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Book 1, chapter 2. From chapter 2: "A Lua também, como o corpo celeste mais próximo da Terra, derrama a sua efluência de forma mais abundante sobre as coisas terreas, porque a maior parte delas, animadas ou inanimadas, são simpatéticas em relação a ela e mudam em companhia dela; os rios aumentam e diminuem a sua corrente com a sua luz, os mares mudam a suas próprias marés com a sua ascensão e ocaso, ...".

¹⁹ “Oculto” é um termo aristotélico e moderno usado para distinguir qualidades que são evidentes aos sentidos daquelas que estão ocultas (Roos, 2001).

“to be a lamentable piece of mysticism which he read with regret in the writings of so renowned an author as Kepler” (Thomson, 1882).

Finalmente, ainda cabe um último comentário de Jammer (2011) sobre as razões que levaram Kepler a introduzir o conceito de força nas ciências exatas. Segundo Jammer, existem três razões circunstanciais e uma razão técnico-metodológica (que não vem ao caso desse trabalho). As razões circunstanciais incluem a revolução copernicana, que refutou a doutrina aristotélica dos lugares naturais e do absolutamente leve e pesado; o fenômeno das marés, que mostrou a influência mecânica direta da Lua na Terra; e a teoria de Gilbert, que ilustrou um possível *modus operandi* dessa força. Essas razões foram corroboradas pelas circunstâncias da época em que Kepler viveu (Jammer, 2011, p.122 – **grifo nosso**).

Em 1614, **Claude d'Abbeville (falecido em 1632)** publicou a obra *Histoire de la mission de pères capucins en l'Isle de Maragnan et terres circonvoisines* (História da missão dos padres capuchinhos na Ilha de Maragnan e terras vizinhas), onde mostrou que os Tupinambás já entendiam a relação da Lua com as marés antes da Europa. Na publicação, d'Abbeville narra suas observações do convívio por quatro meses com índios tupinambás, da família dos tupi-guarani, no Maranhão, localizados perto da Linha do Equador. Uma das anotações do missionário francês diz que “os tupinambás atribuem à lua o fluxo e o refluxo do mar e distinguem muito bem as duas marés cheias que se verificam na lua cheia e na lua nova ou poucos dias depois”. O que confirma o conhecimento por esses povos da relação entre as marés e as fases da lua muito antes das teorias de Galileu e de Newton (<https://mundogeo.com/2009/06/19/astrologia-indigena-preve-influencia-da-lua-sobre-as-mares-antes-de-galileu-e-newton/>)²⁰.

Marco Antonio de Dominis (1560 - 1624), bispo católico, embora envolvido com obras teológico-jurídicas, publicou dois artigos científicos: um sobre a explicação para o arco-íris e uma teoria sobre os telescópios e outro sobre as marés, em seu tratado *Euripus*

²⁰ Fonte: Astronomia indígena prevê influência da lua sobre as marés antes de Galileu e Newton. Disponível em: <https://mundogeo.com/2009/06/19/astrologia-indigena-preve-influencia-da-lua-sobre-as-mares-antes-de-galileu-e-newton/>. Acesso em 02/04/2023.

seu de fluxu et refluxu marts sententia (Euripus, ou sobre o fluxo e refluxo do mar)²¹, publicado em Roma em 1624 (Bonelli e Russo, 1996). O tratado em questão apresenta duas afirmações essenciais sobre as marés: (1) elas são causadas pela interação do Sol e da Lua, exercendo um efeito similar ao magnetismo; (2) a ação das duas luminárias está no máximo não apenas onde estão no zênite, mas também no ponto antipodal. De Dominis deduziu os ciclos diários e quinzenais das marés a partir desses pontos, além de destacar outras características, como a variação geográfica na altura e as correntes de maré horizontais. O principal interesse de sua obra está na sua tentativa de conciliar teoria e observação, apresentando duas teorias de maré diferentes. A primeira é baseada na hipótese de que a ação do Sol e da Lua está no máximo onde estão no zênite e nadir, enquanto a segunda considera que essa ação se estende ao longo de todo o meridiano aos quais esses pontos pertencem. A segunda teoria parece ser a contribuição pessoal de de Dominis. No entanto, a objeção que levou o autor a abandonar a primeira teoria é mais interessante, pois argumenta que a diferença de altura entre as duas marés altas diárias deve estar no máximo durante o solstício e no mínimo durante o equinócio, o que não é observado na prática. De fato, em alguns mares, como o Mar Arábico, as marés seguem o padrão deduzido corretamente da teoria descartada (Bonelli e Russo, 1996).

Agora, *Euripus* compartilhou características importantes com o trabalho de Chrisogono sobre as marés. Ambos concordaram que a atração do Sol e da Lua causa um aumento máximo do nível do mar em dois pontos antipodais. No entanto, *Euripus* adicionou novos argumentos que não estavam presentes no trabalho de Chrisogono, como a causa da esfericidade da Terra e o ciclo anual das desigualdades entre as duas marés diárias. Além disso, há algumas inconsistências científicas no trabalho de de Dominis, como a incompatibilidade entre a teoria das marés e a esfericidade perfeita da Terra. De Dominis teve algumas ideias interessantes, mas acabou descartando-as mais tarde em seu trabalho. Essas ideias incluíam uma explicação correta para as desigualdades diárias das marés e a ideia de que as marés fazem os oceanos assumirem uma forma oval (Bonelli e Russo, 1996).

²¹ O título refere-se às correntes de maré vistas no Estreito de Euripus entre a ilha de Eubéia e o continente grego. Bonelli e Russo (1996) sugerem que é provável que *Euripus* também tenha sido inspirado por um desejo de atacar a posição de Galileu.

Bonelli e Russo (1996) ainda discutem as possíveis fontes de inspiração para o trabalho de de Dominis sobre as marés. Embora as fontes diretas não sejam claras, é provável que ele tenha utilizado conhecimentos clássicos, como os de Seleucus da Babilônia. De Dominis elaborou uma teoria matemática sobre o ciclo anual das desigualdades diárias das marés, que contradiz a explicação de Strabo sobre o assunto. Isso sugere que de Dominis pode ter tido acesso a informações sobre os estudos helênicos das marés que não foram transmitidos por Strabo e Plínio. As considerações aplicadas à de Dominis também se aplicam à Chrisogono, pois ambos são ecléticos em sua abordagem, apresentando considerações contraditórias e seus interesses principais não são relacionados às marés. É possível que a similaridade entre suas obras seja explicada pelo fato de que as fontes usadas por de Dominis também eram conhecidas por Chrisogono. Destaca-se também que Chrisogono criticou Plínio, o Velho, por não ter registrado as causas dos ciclos das marés no livro II da *Naturalis historia*, o que sugere que Chrisogono acreditava que as informações necessárias estavam disponíveis nas fontes de Plínio (Bonelli e Russo, 1996). No entanto, há um possível precedente para as obras que estão sendo discutidas, que é um trabalho sobre as marés do século XIII de Jacopo Dondi. Esse trabalho apresenta um erro grosseiro²² e uma explicação astronômica potencialmente correta que se torna claramente contrária à evidência. O autor também destaca que Dondi era de Pádua, assim como outros autores que escreveram sobre marés e astronomia, sugerindo uma possível origem geográfica comum. Assim, pode ter havido informações disponíveis desde o século XIII sobre uma teoria astronômica estática das marés que não foram completamente compreendidas (Bonelli e Russo, 1996).

Em suma, de Dominis expõe uma teoria, em grande medida correta, segundo a qual as marés são atribuídas a uma força, semelhante à do magnetismo, exercida pela Lua, e em menor medida pelo Sol, sobre as águas dos mares. Essas forças explicam os ciclos semidiurnos e mensais das marés de maneira bastante satisfatória. No entanto, o desenvolvimento da teoria às vezes parece apressado e pouco coerente; além disso, o autor se baseia em algumas considerações pouco justificáveis, como a prevalência de influências lunares devido à natureza úmida desse corpo celeste. Portanto, a obra não apresenta muita originalidade, muito provavelmente retomando textos mais antigos, mas tem a vantagem de descartar todas as hipóteses substancialmente fictícias sem evidências

²² A descrição desse erro não é muito detalhada em Bonelli e Russo (1996). Para compreendermos bem esse erro, deve-se acessar a obra original de Chrisogono. No entanto, não conseguimos acessá-la pela *internet*.

verificáveis (redemoinhos subaquáticos, incêndios subaquáticos, atividade respiratória da Terra, etc.) ainda invocado no século XVII para explicar as marés. A teoria de Dominis, que essencialmente repropõe o que havia sido exposto séculos antes por Jacopo Dondi e Federico Chrisogono, pode derivar dos estudos de Seleuco da Babilônia. Dominis foi solenemente condenado pelo Santo Ofício, como herético reincidente, e seu corpo exumado foi queimado juntamente com seus escritos proibidos em *campo dei fiori*. (Para um perfil interessante de de Dominis e uma discussão dos métodos da Contrarreforma no pontificado de Urbano VIII, cf. Redondi, 1985, cap. 4).

Francis Bacon (1561 – 1626), em 1611, publicou seu *De fluxu et refluxu maris* (Do fluxo e refluxo do mar), admitindo que a Lua poderia ser a responsável pelas marés, embora não afirmasse categoricamente. De todo o modo, toma uma posição contrária ao seu contemporâneo, Galileu. Bacon, diz que:

“[...] O exame das causas do fluxo e refluxo do mar, tentado pelos antigos e posteriormente deixado de lado, retomado pelos mais modernos e, contudo, mais enfraquecido que resolvido pela diversidade de opiniões, é vulgarmente, por conjectura ligeira, referido à Lua, devido a algum consenso desse movimento com o movimento da Lua.” (Bacon, *Do fluxo e refluxo do mar, scientiæ studia*, São Paulo, v.5, n.4, p.520-48, 2007, p.521 – **grifo nosso**).

Bacon também já sabia da periodicidade:

“Portanto, suprimido o movimento das correntes, deve-se dirigir [a investigação] para os outros quatro movimentos constantes: *o das 6 horas, o mensal, o quinzenal e o semestral*, dos quais somente no de *6 horas* se vê o fluxo do mar agir e mover-se; mas o mensal parece só determinar e restituir aquele das 6 horas e, por sua vez, o quinzenal e o semestral aumentá-lo e intensificá-lo. Com efeito, o fluxo e refluxo das águas inunda e esvazia os litorais em lugares determinados e varia segundo a variação das horas e a força e a quantidade das águas, daí que os três movimentos restantes se apresentem como visíveis.” (Ibid., p.525).

Bacon propõe duas possibilidades para a causa das marés: a primeira ele chama de aumento e diminuição das águas, e a segunda é dita progressão, cujo relato é o seguinte:

“Ora, o movimento de aumento e de diminuição julgamos ser tal qual se encontra na água fervente, que se eleva nas caldeiras e em seguida aquieta-se. E o movimento de progressão é tal qual se encontra na água transportada em uma bacia, da qual a que deixa um lado dirige-se ao lado oposto.” (Ibid., p.525).

Bacon, em *Novo Organum* (1620), sua outra obra, estende suas análises quanto às marés²³ e, dentre as causas supracitadas, sugere três possibilidades para a ocorrência da primeira causa:

“É necessário que este movimento, graças ao qual as águas sobem e descem, sem o concurso do impulso das águas de outro mar, ocorra de uma dessas três maneiras seguintes. Que tal quantidade de água surja das entranhas da Terra e para elas de novo se recolha; ou que não haja qualquer quantidade maior de água, mas que as mesmas águas, sem aumentar a sua quantidade, dilatam-se ou rarifiquem-se a ponto de ocupar maior espaço e dimensão, e depois se contraíam para o volume inicial; ou que não haja aumento nem de quantidade e nem de extensão, mas que as mesmas águas (tal como são em quantidade, densidade e rarefação) subam e depois desçam em razão de uma força magnética que as atrai para o alto e por simpatia. Assim, deixando de lado os dois primeiros movimentos, vamos restringir a questão (se assim se desejar) a este último movimento, procurando investigar se há a elevação por consenso, simpatia ou força magnética”. (Bacon, *Novo Organum*, tradução - José Aluysio Reis de Andrade, 2002, p.202).

Soares (2019), resume essas possibilidades baconianas, da seguinte forma:

- 1º – há água dentro da Terra que escoar para o mar e faz a maré subir, e quando a maré baixa, essa água volta para dentro da Terra;
- 2º – a água do mar dilata e contrai, provocando as marés;
- 3º – existe uma atração que Bacon supõe ser magnética que faz a água subir e descer.²⁴

²³ Inclusive criticando, em 1620, o *Discorso del flusso e riflusso del mare* (Discurso do fluxo e refluxo do mar), escrito por Galileu pouco antes da promulgação do édito de condenação de Copérnico em 1616 e que circulou em cópias manuscritas, das quais uma chegou até Bacon (Mariconda, 2007).

²⁴ Para uma análise mais detalhada dessas três investigações, consultar: Mariconda. *Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo*. *Scientiae Studia*, v.5, p.5013-517, 2007.

Como o próprio Bacon diz na nota citada, ele só se dedica, nessa obra, à investigação da terceira.²⁵ A solução baconiana para o problema das marés, alinha-se ao estilo mecanicista da primeira metade do século XVII em sua negação da possibilidade de uma ação a distância por parte da Lua, muito embora defenda uma tese geocêntrica e geostática que se opõe ao copernicanismo (Mariconda, 2007, p.501).

“Dessa desigualdade fundamental da velocidade dos movimentos extrai Galileu a causa do fluxo e do refluxo do mar. Sendo a terra de rotação mais veloz que a água, deve surgir, segundo ele, a acumulação e a elevação das águas, e vice-versa, em sua descida, como acontece com um recipiente de água fortemente agitado. Mas tal opinião se fundamenta em uma hipótese arbitrária, isto é, que a Terra se move, isso sem ter bem observado o movimento regular de cada seis horas do oceano”. (Ibid. p.245 – **grifo nosso**).

Bacon iniciou seu ensaio de 1623, *On the Flux and Reflux of the Sea* (Sobre o Fluxo e Refluxo do Mar), reconhecendo os ciclos diários, quinzenais e mensais das marés, e um ciclo semestral com marés maiores nos equinócios do que nos solstícios (Shea, 1970). Ele sugeriu que a aparente variabilidade mensal e anual das marés seria semelhante em todos os lugares, o que é o caso. Ele também observou a natureza progressiva de onda das marés à medida que se propagam do sul para o norte ao longo da costa leste do Atlântico Norte, semelhante às observações de Beda ao longo da costa leste da Inglaterra. Ele argumentou a favor de observações em outros lugares. Galileu fez comentários semelhantes sobre a progressão das marés, embora acredite-se que Bacon tenha chegado a suas próprias conclusões antes que as notícias da teoria de Galileu chegassem até ele (Aiton, 1954). Aiton (1954) afirma:

“This idea that the tides depend on the progressive movement of water and not on any alteration of its physical state is the only positive contribution made by either Bacon or Galileo to the solution of the problem of the tides.” (Aiton, 1954 *apud* Woodworth, 2023, p.14).

Bacon, assim como Galileu, ignorou evidências dos ciclos das marés e o papel da Lua na elaboração de sua teoria. Bacon acreditava que o movimento das marés era

²⁵ As marés não eram o tema central no *Novo Organum*, servindo como pano de fundo para o verdadeiro objetivo do autor: organizar a produção de conhecimento filosófico e científico na sua época (Soares, 2019).

semelhante ao movimento diurno da Terra e que as marés ocorriam como resultado da obstrução das correntes oceânicas pelos continentes. Ele não tinha explicação para as duas marés lunares observadas por dia, sugerindo que o período era determinado pelas dimensões do Atlântico em uma ressonância semelhante ao movimento de água que havia levado à teoria de Galileu. Essa ideia, todavia, não era nova, basta lembrarmos da contribuição de Julius Caesar Scaliger para a ideia de um mecanismo de ressonância transatlântica em relação às marés. Aiton (1954) fornece uma discussão das teorias de Bacon e Galileu e a controvérsia generalizada sobre elas na época. Por fim, Aiton (1954) fornece uma discussão sobre as teorias de Bacon e Galileu e a ampla controvérsia sobre elas na época. Ele aponta que, enquanto a teoria das marés de Galileu foi uma tentativa fracassada de provar, de uma vez por todas, a validade do sistema copernicano, a teoria de Bacon foi, em última análise, uma tentativa fracassada de fornecer evidências conclusivas para a perspectiva ptolomaica (ou aristotélica) (Woodworth, 2023, p.15).

O aspecto mais notável da tentativa baconiana de explicação das marés encontra-se, sem dúvida, em sua recusa de uma correspondência estrita ou causalmente eficiente entre o movimento da Lua e o movimento de fluxo e refluxo do mar. Essa recusa de aceitar qualquer tipo de influência ou ação a distância da Lua sobre as águas marinhas é tanto mais surpreendente quando consideramos que, durante todo o século XVI, com o advento e desenvolvimento das grandes navegações marítimas, tornaram-se sempre mais frequentes as viagens e as rotas marinhas, o que permitiu a acumulação de uma significativa quantidade de observações em apoio da “doutrina lunar”, isto é, de uma vinculação, certa e necessária, entre a Lua e as marés. Esses dados mostravam que as marés altas (os fluxos) não só pareciam estar ligadas à passagem da Lua pelo meridiano local, mas também mostravam um atraso diário equivalente àquele pelo qual a Lua passa pelo meridiano (cf. Mariconda, 2004, p, 798, nota 10). A "doutrina lunar" é uma referência a Francesco Patrizi, que, no *Nova filosofia do universo* (1591), obra que serve de fonte para Bacon, desenvolve uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam (cf. Rossi, 1989; Rees, 1996b).

O século XVII foi um período importante na história da compreensão das marés. Embora alguns autores antes desse período já tivessem identificado a relação da Lua com o movimento das águas, foi só nesse século que as causas mecânicas começaram a ser compreendidas. Nesse período, houve um claro domínio das teorias mecanicistas, como

as de Francis Bacon, Galileu Galilei, René Descartes e Isaac Newton. As marés podem ser consideradas um exemplo típico do avanço da visão mecanicista do mundo durante a primeira metade do século XVII (Mariconda, 2011, p.845). O astrônomo e físico, **Galileu Galilei (1564 - 1642)**, em particular, posicionou-se contra as evidências e negou a ação da Lua e do Sol sobre as marés. Com base em Mariconda (2011, p.788), percebe-se que a teoria das marés de Galileu foi discutida na literatura muito mais extensivamente do que a maioria das teorias incorretas (por exemplo, Aiton, 1954; Burstyn, 1962; Clavelin, 1996, p.478-82; Finocchiaro, 1980, p.6-24 e 74-9; Marí (galileu, 1994, "introdução", p. lxi-lxvi); McMullin, 1988a, p.35-43; Pagnini, 1935, p.296-301; Popper, 1974, p.170-80; Shea, 1992, p.224-43; Sosio, 1970, p. lxxii-lxxxvi; Soufrin, 2000). Roos (2001) comentou que “existe uma indústria acadêmica virtual sobre Galileu e as marés”. Woodworth (2023) comenta que as muitas publicações são, sem dúvida, um reflexo das consideráveis conquistas científicas de Galileu. Desde então, a teoria foi categorizada, gentilmente, como uma “ideia fascinante” como resultado da necessidade primordial de fornecer evidências para o movimento da Terra (Einstein, 1954). Caso contrário, foi descrito como “o grande erro de Galileu” (Tyson, 2002).

Sua teoria originalmente desenvolvida para explicar o período diário das marés, foi refinada e expandida para incluir os períodos mensal e anual, como se pode perceber na seguinte passagem:

“**Salviati** – Afirmo, portanto, que três são os períodos que se observam nos fluxos e refluxos das águas marinhas. O primeiro e principal é este grande e conhecidíssimo, ou seja, o diurno, segundo o qual com intervalos de algumas horas as águas sobem e baixam; e esses intervalos são no Mediterrâneo, na sua maior parte, de aproximadamente 6 em 6 horas, ou seja, durante 6 horas as águas sobem e em outras 6 horas baixam. O segundo período é mensal, e parece ter origem no movimento da Lua; não que ela introduza outros movimentos, mas somente altera a grandeza dos já mencionados, com notável diferença conforme seja cheia, nova ou esteja em quadratura com o Sol. O terceiro período é anual, e mostra depender do Sol, alterando tão somente os movimentos diurnos, ao fazê-los, nos solstícios, diferentes quanto à grandeza do que são nos equinócios.” (Mariconda, 2011, p.495).

O Diálogos sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano é um livro de Galileu Galilei publicado em 1632, de cujo trecho anterior foi retirado, e que representa um importante marco na história da ciência. Nele, Galileu

utiliza a forma de diálogo entre três personagens para discutir os sistemas astronômicos ptolomaico e copernicano e defender suas teorias sobre a mobilidade terrestre e o sistema heliocêntrico. As três personagens do livro, Salviati, Simplicio e Sagredo, representam diferentes perspectivas e posturas em relação às teorias astronômicas. Salviati representa Galileu e é defensor das teorias copernicanas, Simplicio é um defensor das ideias aristotélicas e Sagredo é uma personagem imparcial e equilibrada. As homenagens a Filippo Salviati, Simplicio de Cilícia e Giovanfrancesco Sagredo²⁶, respectivamente, destacam a importância dessas pessoas na vida e carreira científica de Galileu. Uma das partes mais importantes do livro é a Quarta Jornada, onde Salviati discute a relação da Lua e do Sol com as marés e apresenta uma explicação mecânica para o fenômeno. Galileu utiliza esse exemplo para justificar suas teorias heliocêntricas e da mobilidade terrestre, pois explica o fluxo e refluxo dos mares a partir dos movimentos da Terra ao redor de seu eixo e ao redor do Sol, como se lê nos seguintes trechos:

“**Salviati** - Portanto, Sr. Simplicio, já que, para fazer o fluxo e refluxo do mar, é necessário introduzir o milagre, façamos milagrosamente mover a Terra, para que com o seu movimento mova-se depois naturalmente o mar [...]” (Ibid., p.498).

“**Salviati** – [...] Dissemos que dois são os movimentos atribuídos ao globo terrestre: o primeiro anual feito com seu centro pela circunferência do orbe magno na eclíptica segundo a ordem dos signos, ou seja, de ocidente para oriente; o outro, feito pelo mesmo globo que gira em torno de seu próprio centro em vinte e quatro horas, e este igualmente de ocidente para oriente, ainda que em torno de um eixo um pouco inclinado e não equidistante àquele da revolução anual. Da composição desses dois movimentos, cada um por si mesmo uniforme, afirmo que resulta um movimento disforme nas partes da Terra: o que, para que se compreenda mais facilmente, mostrarei traçando uma figura”. (Ibid., p.502-503).

²⁶ Filippo Salviati (1582 – 1614), florentino, cuja casa, em 1611, fora usada para algumas reuniões de Galileu com outros intelectuais a fim de debater assuntos científicos. Simplicio de Cilícia (500 - 549), filósofo grego da Idade Média, profundo comentador das obras aristotélicas. Giovanfrancesco Sagredo (1571 - 1620), colega de estudos de Galileu, a quem este recorria quando tinha necessidades financeiras.

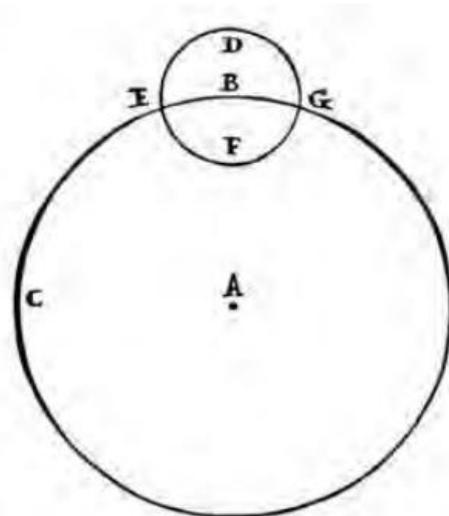


Figura 1. Teoria das marés de Galileu. Fonte: Mariconda. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2011, p.503.

Essa figura é aproveitada por Martins (1994) com algumas observações importantes, no que segue:

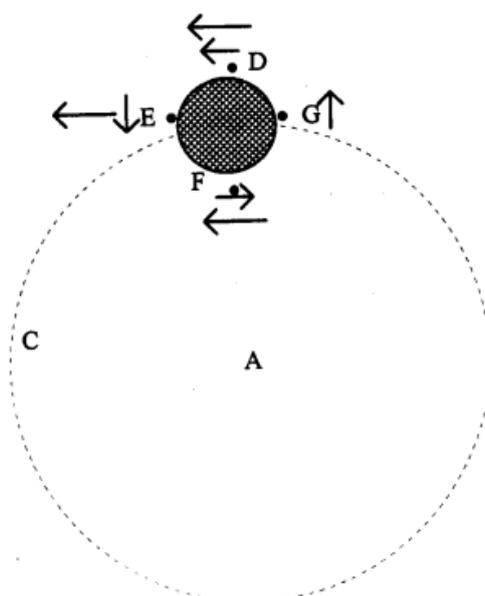


Figura 2. Teoria galileiana das marés. Fonte: Martins. Galileu e a rotação da Terra. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 11, n. 3, p.207, 1994.

Galileu investiga a possibilidade de dar conta das marés por causas mecânicas. Apresenta então sua proposta, sob a forma de uma comparação: “Se tomarmos um recipiente com água e se ele for agitado para um lado e para o outro, a água não se manterá nivelada e horizontal, mas oscilará, subindo de um lado e descendo do outro”. Galileu utiliza como exemplo um barco navegando, mas cheio de água: “se ele for acelerado repentinamente, a água irá para trás e subirá nessa parte, descendo, pelo contrário, na

proa. Se o navio for retardado ou parado bruscamente, a água subirá na proa e descera na popa.” (Galileu *apud* Martins, 1994).

Galileu compara esse fenômeno ao que ocorre no Mediterrâneo, afirmando que as partes da Terra também se aceleram e retardam periodicamente. Martins descreve de forma traduzida e adaptada o raciocínio empregado por Galileu para defender seu argumento:

“A Terra tem dois movimentos principais, no sistema de Copérnico: em torno de seu eixo e em torno do Sol. A associação desses dois movimentos faz com que alguns pontos da Terra tenham maior velocidade resultante e outros uma menor velocidade, como se vê pelo diagrama acima: no ponto **D**, as velocidades de rotação e de translação se somam; em **F**, elas se subtraem. Ora, como cada parte da Terra está em certos instantes na posição **F** (ao meio-dia) e em outros instantes nas posições **G**, **D** e **E** (ao anoitecer, meia-noite e ao amanhecer, respectivamente), cada parte da Terra é sucessivamente acelerada e retardada: "(...) na associação desse movimento diário com o anual, resulta um movimento absoluto das partes da superfície terrestre, ora acelerado, ora retardado (...)" (Ibid., p.207).

Assim, infere-se que a composição dos dois movimentos (rotação e translação) produz acelerações e retardamento nos movimentos de cada parte da Terra:

“Concluamos portanto que, assim como é verdade que o movimento de todo o globo e de cada uma de suas partes seria constante e uniforme se ela tivesse um só movimento, fosse apenas o anual ou apenas o diário, é igualmente necessário que, mesclando esses dois movimentos, resultem movimentos não uniformes para as partes do globo, ora acelerados e ora retardados, mediante as adições ou subtrações da rotação diária à circulação anual.” (Ibid., p.207-208).

Assim como no barco a aceleração ou retardamento fazem oscilar a água para um lado ou para o outro, da mesma forma o movimento irregular das partes da Terra produz, segundo Galileu, as marés. Portanto, a existência das marés é, para o cientista, uma indicação empírica de que a Terra tem dois tipos de movimento (Martins, 1994).

Galileu já havia divulgado sua teoria das marés anteriormente, numa carta que enviou ao Cardeal Orsino, em 8 de janeiro de 1616. Nesta carta, ele critica várias explicações anteriores das marés, incluindo a de Marcantonio de Dominis. Conforme

visto anteriormente, a ideia de uma força lunar influenciando as marés já existia há muito tempo, baseada em observações de correlação entre as fases da Lua e as marés. No entanto, Galileu não concordava com essas concepções astrológicas. No final de seu livro, Galileu critica Kepler, admirando-se de que ele,

"Salviati – [...] com seu engenho livre e agudo e conhecendo os movimentos atribuídos à Terra, tenha dado ouvidos e concordado com o domínio da Lua sobre a água, e com propriedades ocultas e outras infantilidades semelhantes" (Mariconda, 2011, p.536).²⁷

Galileu, portanto, estava convicto de que as marés eram resultado do movimento da Terra, e que as teorias antigas sobre a influência lunar eram inadequadas. Contudo, a explicação de Galileu, apresentada anteriormente, é, sem dúvida, corajosa e engenhosa, mas é inconsistente com as evidências e inadmissível de acordo com a mecânica do próprio Galileu²⁸. Tratar-se-á aqui apenas do primeiro caso, ou seja, a inconsistências da teoria galileana das marés com as evidências. A teoria das marés de Galileu, apresenta somente uma maré alta e uma baixa ao longo de um dia, mas já era bem sabido à época que ocorrem duas marés altas e duas baixas por dia. A teoria, portanto, falhou em dois pontos principais, como havia sido apontado a Galileu por Kepler. Galileu deixou esses problemas de lado. Cartwright (1999) explicou que Galileu não estava convencido da evidência de duas marés por dia (lunar) na maioria dos locais, ignorando assim as descobertas de Possidônio e outros, e em vez disso poderia ter sido influenciado pela maré em Veneza tendo um forte componente diurna. Polli (1952) lista as amplitudes dos

²⁷ Mariconda (2011, p.826), explica que devemos “nos manter no âmbito das razões apresentadas por Galileu nesta passagem do Diálogo, sem ajuizá-las como verdadeiras ou melhores, mas limitando-nos apenas ao seu fundo de coerência”, pois “parece evidente que, para Galileu, são inaceitáveis os próprios termos em que estão expressas as passagens de Kepler; ou seja, termos como ‘força animal’, ‘potência animal’, ‘corpo aparentado’, que estão profundamente enraizados em uma metafísica especulativa de tipo renascentista, para a qual o mundo é um imenso organismo composto por forças, poderes e entidades ocultas. Por isso, Galileu acusa Kepler respeitosamente de aderir ‘a propriedades ocultas e a semelhantes infantilidades’.” Mariconda adita que “essa crítica é compatível com as críticas movidas por Galileu ao misticismo pitagórico (Primeira Jornada, [35] e a nota 11) e à astrologia e à alquimia (Segunda Jornada, [135]-[136] e as notas 11 e 13).” Por fim, Mariconda nos provoca a entender o juízo retrospectivo de Galileu, formulado quatro anos após a morte de Kepler, na carta a Fulgenzio Micanzio de 19 de novembro de 1634: "(...) eu sempre estimei Kepler pelo seu engenho livre (e talvez muito) e agudo, mas o meu filosofar é diferentíssimo do seu; e pode acontecer que, escrevendo sobre as mesma matérias, e particularmente acerca dos movimentos celestes, tenhamos por vezes chegado a algum conceito similar, se bem que poucos, de modo que tenhamos atribuído a algum efeito verdadeiro a mesma razão verdadeira; mas isso não se verificará em um por cento de meus pensamentos" (EN, 16, p. 163).

²⁸ Martins (1994) explora mais sobre esse aspecto.

constituintes M_2 , S_2 , K_1 e O_1 na Ponta della Salute como 23, 13, 16 e 5 cm, dando um fator de forma para a maré de Veneza de 0,58, o que implica um regime de maré “*mista, principalmente semidiurno*”²⁹ (Pugh; Woodworth, 2014). Continuando a explicação dos erros cometidos por Galileu em sua teoria, a maré alta deveria corresponder a uma hora fixa do dia, pois depende da posição do ponto considerado em relação ao Sol, e, no entanto, observa-se que seu horário varia, conforme se pode ver a nas figuras 3 e 4:

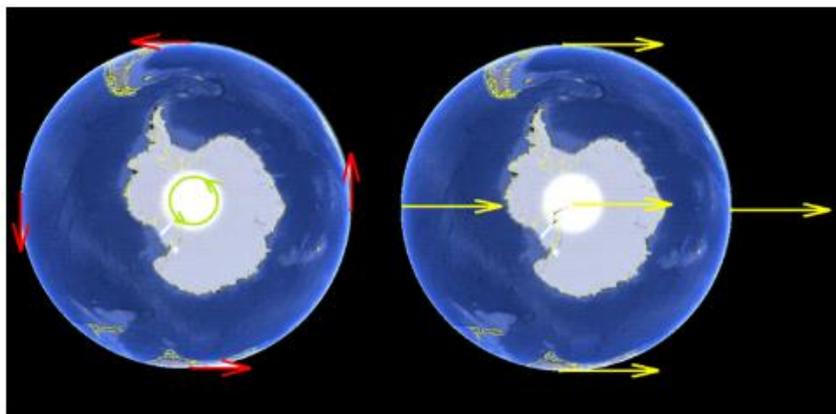


Figura 3. Devido ao movimento de rotação e de translação da Terra pontos diferentes do planeta apresentam diferentes velocidades lineares. Fonte:

<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=galileu-e-a-teoria-de-mares-uma-mare-alta-por-dia>. Acesso em: 30/03/2023.

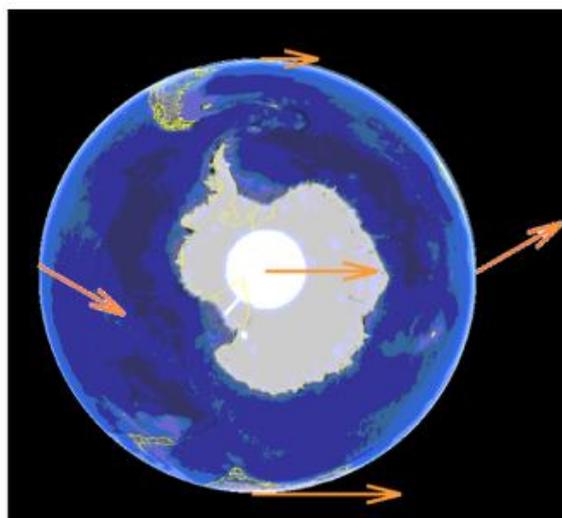


Figura 4. A soma vetorial das velocidades em cada ponto da Terra resulta em velocidades com diferentes valores e orientações. Fonte:

²⁹ Isso significa que se trata de uma mistura de marés de alta e baixa duas vezes por dia, mas com uma pequena influência de marés de uma vez por dia.

<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=galileu-e-a-teoria-de-mares-uma-mare-alta-por-dia>. Acesso em: 30/03/2023.

Galileu observou que as águas dos oceanos apresentavam uma velocidade variável devido à superposição de dois movimentos, resultando em uma agitação semelhante ao movimento de água em uma bacia que é chacoalhada. Ele concluiu que esse movimento causaria uma maré alta e uma maré baixa a cada 24 h em cada ponto da Terra. O raciocínio galileano envolvendo as figuras anteriores não é correto, pois a aceleração que resulta do movimento de rotação com o movimento de translação é uma aceleração radial ou centrípeta.

Em contrarresposta a isso, Galileu (ou Salviati) diz o seguinte:

“**Salviati** – [...] Mas como os acidentes particulares, que se observam em lugares e tempos diferentes, são múltiplos e variados, é necessário que eles dependam de outras causas concomitantes diferentes, ainda que todas devam ter conexão com a primária; por isso se faz mister propor e examinar todos os diversos acidentes que possam ser causas desses diversos efeitos”. (Mariconda, 2011, p.504).

Pode se perceber, pois, que seu modelo é razoavelmente complexo, envolvendo, na verdade, duas causas: uma causa *primária*, correspondente à aceleração e retardamento das partes da Terra e que depende da composição dos dois movimentos anual e diurno da Terra, causa esta apresentada e explicada anteriormente; e uma causa *secundária* (concomitantes), que reside na própria gravidade da água, a qual, tendo recebido o impulso que lhe é comunicado pelo recipiente, procura conduzi-la ao equilíbrio com alternâncias sucessivas (Mariconda, 1999, p. 48).

Bacon³⁰ talvez tenha feito uma das principais críticas a causa primária do modelo galileano (cf. Bacon, 1973, II, § 46) afirmando que o fluxo e refluxo não deveria se produzir mais que uma vez por dia, porque, obviamente, isso se demonstra contrariamente às evidências empíricas como já explicado também. Só que a resposta de Galileu consiste em afirmar que o período diário não depende apenas da causa primária, mas também da secundária, a qual está ligada, basicamente, às condições locais em que se realiza a propagação da “onda” produzida pela causa primária: tipo de costa marinha, tamanho e

³⁰ Trataremos de sua teoria das marés mais para frente.

orientação do recipiente, profundidade do recipiente, etc. Galileu continua dizendo que isso tudo altera de tal modo o intervalo de 12 h entre os impulsos primários que o período diário dos fluxos e refluxos se reduz a 6 h, em média.³¹

Galileu ainda elabora uma explicação para o período mensal das marés. O problema consiste em encontrar uma causa de disformidade, com o período mensal, na disformidade cotidiana da Terra (aceleração ou retardamento). Para isso, Galileu utiliza uma analogia, baseada no princípio de correspondência entre o tempo de revolução de um planeta e o tamanho de sua órbita, que havia sido originalmente introduzido, em [144]-[145] da Segunda Jornada, no contexto da discussão a favor da rotação diurna da Terra. (Mariconda, 1999, 2004 e 2011) Em [474], segundo esse princípio, Galileu expressa:

“**Salviati** - [...] uma coisa verdadeira, natural e mesmo necessária, um mesmo móvel, que é girado por uma mesma virtude motriz, efetua seu percurso por um círculo maior num tempo mais longo que por um círculo menor.” (Ibid., p.524)³²

No contexto da explicação das marés, o princípio será apoiado por dois exemplos a fim de estabelecer uma analogia entre o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol: (i) o mecanismo de regulação do tempo nos grandes relógios a engrenagens e (ii) as oscilações do pêndulo.

Quanto ao primeiro exemplo, diz Galileu em [474]-[475]:

³¹ Para alguns intérpretes, a resposta de Galileu é evasiva e o acusam de má-fé. Para Mariconda (2011), Galileu esforça-se para tratar o fenômeno das marés em toda sua complexidade e considerando sua componente dinâmica para a explicação do período diário, tratada no conjunto das causas secundárias. Como lembra Mariconda e ainda se verá aqui na dissertação, essa componente dinâmica das marés terá um lugar bastante secundário na teoria de Descartes e desaparecerá da teoria de Newton, em que ambas as teorias tratarão essencialmente das condições estáticas do fenômeno com base em modelos simplificados e que eliminam as condições locais particulares. Um estudo recente mostra que as amplitudes de marés em muitos locais estão mudando consideravelmente devido a fatores não astronômicos. Vide: Haigh et al. The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2018RG000636, 2020.

³² Esse princípio já havia sido confirmado, no contexto da discussão sobre o heliocentrismo das revoluções planetárias realizada na Terceira Jornada em [349]-[354], para a ordenação copernicana dos planetas no sistema solar, pois Saturno, cujo orbe é o maior, faz sua revolução em torno do Sol em 30 anos; Júpiter, em 12 anos; Marte, em 2 anos; a Terra, em 1 ano; Vênus, em 9 meses e Mercúrio, em 80 dias. O mesmo princípio é também confirmado pelas observações telescópicas do período de revolução das luas de Júpiter, pois, quanto mais próximo o planeta está de Júpiter, ou seja, quanto menor a sua órbita, menor é o tempo de sua revolução. (Mariconda, 2011, p. 849).

"**Salviati** – [...] Nos relógios de rodas, e particularmente nos grandes, para regular o tempo, os seus artífices instalam uma certa haste que gira horizontalmente e às suas extremidades adaptam dois pesos de chumbo; e, quando o tempo seja muito lento, basta aproximar um pouco os mencionados pesos ao centro da haste, tornando as suas vibrações mais frequentes; e, ao contrário, para retardá-lo, basta afastar os mesmos pesos em direção às extremidades, porque desse modo as vibrações se fazem mais lentas e, conseqüentemente, alongam-se os intervalos das horas. Aqui a virtude motriz é a mesma, ou seja, o contrapeso, os móveis são os mesmos pesos de chumbo, e suas vibrações são mais frequentes, quando estão mais perto do centro, ou seja, quando se movem por círculos menores" (Ibid., p.849 – **grifo nosso**).

Mariconda (2011) percebe que Galileu metaforiza o sistema planetário a uma máquina – o relógio (cf. Daumas, 1964, v.2. p.287-310; especialmente, p.296). No entanto, não se trata apenas de uma metáfora, mas, antes, uma referência das marés a um mecanismo subjacente.

Já no segundo exemplo, Galileu aprofunda a analogia, comparando o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol ao movimento pendular. Nessa comparação, ele destaca que, da mesma forma que um objeto que se move em círculos menores realiza suas revoluções mais rapidamente, um mesmo peso, suspenso por cordas de comprimentos diferentes, realiza suas oscilações mais rapidamente quanto menor for a corda que o suspende. Essa analogia é importante para compreender como a variação da distância entre a Terra e a Lua afeta o movimento do sistema e, conseqüentemente, as marés (Mariconda, 2011, p.849).

Tendo consolidado a analogia entre o movimento do sistema Terra-Lua em torno do Sol e o movimento pendular, Galileu propõe sua explicação para o período mensal das marés. Essa explicação se baseia na hipótese de que a Terra apresenta uma desigualdade no movimento anual, cujo mecanismo seria o seguinte: enquanto a Terra mantém uma distância constante do Sol, a distância da Lua em relação ao Sol varia constantemente ao longo do mês, alcançando sua menor distância durante a Lua Nova e a maior distância durante a Lua Cheia. Conseqüentemente, o centro do sistema Terra-Lua fica mais próximo do Sol durante a Lua Nova do que durante a Lua Cheia. De acordo com a analogia do movimento pendular, isso significa que o movimento anual da Terra sofre variações mensais, acelerando-se durante a Lua Nova e retardando-se durante a Lua Cheia. Assim, a Lua atua como uma espécie de contrapeso, cuja posição é capaz de alterar

a velocidade do sistema Terra-Lua em seu deslocamento em torno do Sol. Essa alteração de velocidade é responsável pelo período mensal das marés (Mariconda, 2011, p.848-852).

Galileu usou a analogia da mudança nos períodos dos pêndulos para explicar as variações da amplitude das marés. Ele considerou o Sol como o ponto de suspensão de um pêndulo, e a Terra e a Lua como pesos suspensos. Quando estamos na Lua Cheia, a ordem dos astros (Sol - Terra - Lua) faz com que o “pêndulo astronômico”³³ tenha um comprimento maior, logo um período maior, fazendo a Terra se mover mais lentamente em sua trajetória. Já na fase de Lua Nova, a ordem dos astros (Sol - Lua - Terra) torna o comprimento do pêndulo menor, diminuindo o período e fazendo a Terra se mover mais rápido ao redor do Sol. A variação da velocidade da Terra ao longo do mês, consequência dessas mudanças, ocasiona variações nas acelerações e desacelerações dos pontos na superfície da Terra, resultando em acúmulos de magnitudes diferentes de água (Soares, 2019). O trecho a seguir apresenta a explicação de Galileu:

“**Salviati** – [...] Mas voltando ao nosso primeiro propósito, onde estávamos expondo como nos corpos movidos circularmente por uma virtude motriz, que se conserva constantemente a mesma, os tempos das circulações eram prefixados e determinados, e impossíveis de serem alongados ou abreviados, tendo dado exemplos e apresentado experiências sensíveis e factíveis, podemos confirmar agora a mesma verdade com as experiências dos movimentos celestes dos planetas, nos quais se observa que se mantém a mesma regra: que aqueles que se movem por círculos maiores gastam mais tempo para percorrê-los. Podemos observar isso muito facilmente nos planetas mediceus, que em pouco tempo fazem suas revoluções em torno de Júpiter. De modo que não se deve pôr em dúvida, antes podemos ter como certo e seguro, que, quando, por exemplo, a Lua, continuando a ser movida pela mesma faculdade movente, fosse levada pouco a pouco por círculos menores, ela adquiriria uma disposição a abreviar os tempos dos seus períodos, tal como aquele pêndulo do qual, no curso de suas vibrações, encurtavamos a corda, ou seja, diminuíamos o semidiâmetro das circunferências por ele percorridas. Sabei agora que o que acabo de dizer, tomando a Lua como exemplo, acontece e verifica-se essencialmente de fato. Relembremo-nos de já termos concluído, juntamente com Copérnico, que não é possível separar a Lua da Terra, em torno da qual, [478] sem controvérsia, move-se em um mês: recordemo-nos igualmente que o globo terrestre, sempre acompanhado pela Lua, vai pela circunferência do orbe

³³ Este termo não foi usado por Galileu, e foi utilizado por Soares (2019) apenas para fins didáticos.

magno em torno do Sol em um ano, tempo durante o qual a Lua gira em torno da Terra quase 13 vezes; dessa circulação segue-se que a Lua ora se encontra próxima do Sol, ou seja, quando está entre o Sol e a Terra, ora bastante mais afastada, que é quando a Terra fica entre a Lua e o Sol: em suma, próxima, no tempo de sua conjunção e novilúnio; afastada, no plenilúnio e oposição; e a diferença entre o máximo afastamento e a máxima proximidade é igual ao diâmetro do orbe lunar. Ora, se é verdade que a virtude que move a Terra e a Lua em torno do Sol conserva sempre o mesmo vigor; e se é verdade que o mesmo móvel, movido pela mesma virtude, mas por círculos desiguais, percorre em tempos menores arcos similares aos círculos menores; devemos necessariamente afirmar que a Lua, quando está a uma distância menor do Sol, ou seja, no tempo da conjunção, percorre arcos maiores do orbe magno, que quando está num afastamento maior, ou seja, na oposição e plenilúnio: e é igualmente necessário que a Terra participe dessa desigualdade lunar. Pois, se imaginarmos uma linha reta traçada do centro do Sol pelo centro do globo terrestre e prolongada até o orbe lunar, esta linha será o semidiâmetro do orbe magno, no qual a Terra, quando estivesse só, mover-se-ia uniformemente; mas se no mesmo semidiâmetro colocamos um outro corpo a ser conduzido, colocando-o às vezes entre a Terra e o Sol, e outras vezes para além da Terra num afastamento maior do Sol, é preciso que, neste segundo caso, o movimento comum de ambos segundo a circunferência do orbe magno, devido ao afastamento da Lua, resulte um tanto mais lento que no outro caso, quando a Lua está entre a Terra e o Sol, ou seja, a uma distância menor: de modo que neste caso acontece exatamente o que acontece com o tempo do relógio, se nos representarmos que a Lua é aquele pedaço de chumbo que se adapta ora mais afastado do centro, para diminuir a frequência das vibrações da haste, e ora mais próximo, para torná-las mais frequentes. Pode-se assim deixar evidente que o movimento anual da Terra pelo orbe magno e sob a eclíptica não é uniforme, e que a sua disformidade deriva da Lua e tem os seus períodos e restituições mensais. E como se tinha concluído que as alterações periódicas, mensais e anuais, dos fluxos e refluxos não podiam derivar de [479] outra causa além da alteração da proporção entre o movimento anual e os acréscimos e subtrações da rotação diurna; e tal alteração podia fazer-se de dois modos, a saber, alterando o movimento anual e mantendo constante a quantidade dos acréscimos, ou mudando a grandeza destes e mantendo a uniformidade do movimento anual; acabamos de encontrar o primeiro destes dois modos, fundado sobre a disformidade do movimento anual dependente da Lua, e que tem os seus períodos mensais: é, portanto, necessário que, por essa causa, os fluxos e refluxos tenham um período mensal, durante o qual se fazem maiores ou menores. Vedes agora como a causa do período mensal reside no movimento anual, e vedes ao mesmo tempo o que a Lua tem a ver com isso, e

como ela faz sua parte sem ter nada a ver com os mares nem com as águas.”
(Mariconda, 2011, p.527-528 – **grifo nosso**).

Mariconda (Diálogo, 2011, p.816) concorda com Pagnini (Galileu, 1935, v.3, p.277) que a comparação usada por Galileu sugere que, para este, a duração das revoluções dos planetas seguia as leis do pêndulo, ou seja, que assim como para os pêndulos os quadrados dos tempos dos períodos são proporcionais aos comprimentos, assim também para os planetas os quadrados dos tempos de revoluções seriam proporcionais às distâncias do Sol. Evidentemente a questão é mais complexa, pois Galileu pensa em Júpiter com seus satélites e na Terra com a Lua como constituindo sistemas pendulares em que os satélites – as estrelas mediceias para Júpiter e a Lua para a Terra – ora encurtam a distância do sistema ao Sol, ora a encompridam. Nada é dito dos planetas que não possuem satélites. De qualquer modo, Pagnini sugere que, se esta interpretação puder ser sustentada,

“este poderia ser outro argumento que explica a tenacidade de Galileu em não aceitar as leis keplerianas em manifesto contraste com esta suposição galileana falsa: de fato, a terceira lei de Kepler diz que os quadrados dos tempos são proporcionais aos cubos dos grandes eixos” (Mariconda, 2011, p.816).³⁴

O modelo proposto por Galileu para explicar o período mensal das marés é interessante do ponto de vista teórico, embora enfrente dificuldades empíricas. Mesmo com as marés de novilúnio (Lua Nova) e plenilúnio (Lua Cheia) apresentando pouca diferença, a ideia central da analogia é relevante: a Terra e a Lua são pesos ligados de alguma forma ao Sol. Embora exista uma diferença entre os exemplos do mecanismo de regulação do relógio e do pêndulo, onde há uma ligação material rígida, e o sistema Terra-Lua-Sol, cuja ligação é gravitacional, a analogia se revela significativa, uma vez que as diferentes posições da Lua em seu movimento exercem influência no movimento da Terra. É importante notar, no entanto, que Galileu não extraiu consequências dinâmicas do modelo, limitando-se apenas às variações de velocidade.

A explicação de Galileu para o período anual das marés, apesar de manter a unidade da teoria, é igualmente refutada pela observação empírica. Explicando de forma

³⁴ Para mais informações sobre a relação entre Galileu e Kepler, consulte a nota 79, e para uma notícia bibliográfica sobre Kepler, consulte a nota 207 da Segunda Jornada (Mariconda, 2011).

simplificada, seu modelo, baseado na variação da inclinação do eixo terrestre em relação à eclíptica (plano do orbe magno), prevê que as marés sejam maiores nos solstícios e menores nos equinócios. Porém, a observação mostra exatamente o oposto. Ainda assim, a ideia central de Galileu de que a causa das marés deve estar na composição dos movimentos diurno e anual é correta e pavimentou o caminho para as teorias futuras. O mecanismo é descrito de [482] a [485], a saber:

"considerando o plano da eclíptica, o equador terrestre o interceptará segundo uma elipse. Ora, a tangente ao orbe magno, que passa pelo centro da Terra, será interceptada em dois pontos pela projeção do equador terrestre; o comprimento do segmento resultante será diferente segundo a Terra se encontre nos solstícios ou nos equinócios; isso significa que, nos vários períodos do ano, haverá uma mudança na relação entre a velocidade do movimento diurno e a velocidade do movimento anual; donde a periodicidade anual do fenômeno" (Sosio, 1970, p. lxxxv).

De acordo com isso, as marés deveriam ser maiores nos solstícios, quando os dois movimentos, anual e diurno, estão na mesma linha, de modo que sua combinação produziria a máxima aceleração e retardamento, do que nos equinócios, quando os dois movimentos estão em seu ângulo máximo de inclinação e o efeito de sua combinação é mínimo. De fato, Galileu extrai essa consequência que, entretanto, é contrária à observação que mostra as marés serem máximas nos equinócios e mínimas nos solstícios (Mariconda, 2011, p.850-851). Como mostraria Newton no *Principia*, Livro III, Proposição 24, recebem nesse momento os efeitos máximos da atração gravitacional do Sol. Como assinala Shea (Shea, 1992, p.239), o fato de que as marés são máximas nos equinócios era conhecido por Bacon e Riccioli, que criticam duramente a teoria de Galileu por essa inconsistência com os dados da observação (Mariconda, 2011, p.820, cf. Bacon, 2007).

Galileu até apresenta uma figura (figura 5) para esclarecer sua explicação:

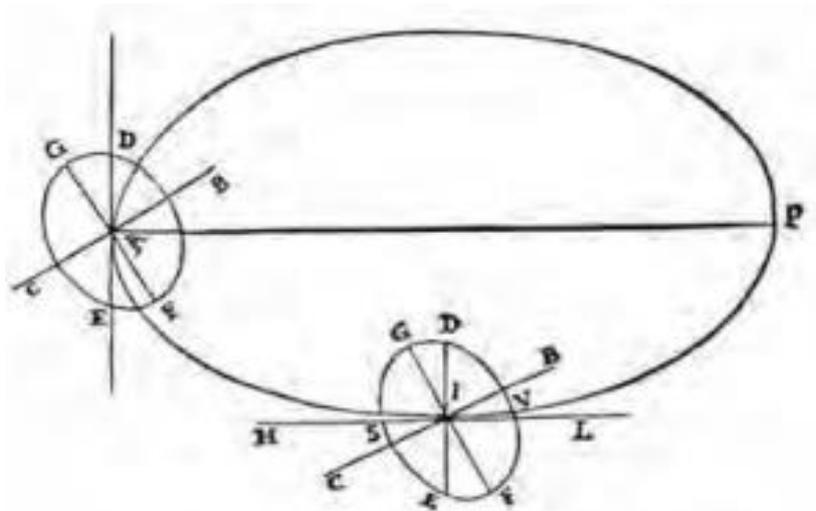


Figura 5. Explicação de Galileu para o período anual das marés. Fonte: Mariconda, 2011, p.532.

Na figura 6, porém, podemos estudá-la melhor, pois Pagnini a aperfeiçoa (Galileu, 1935, v.3, p.285):

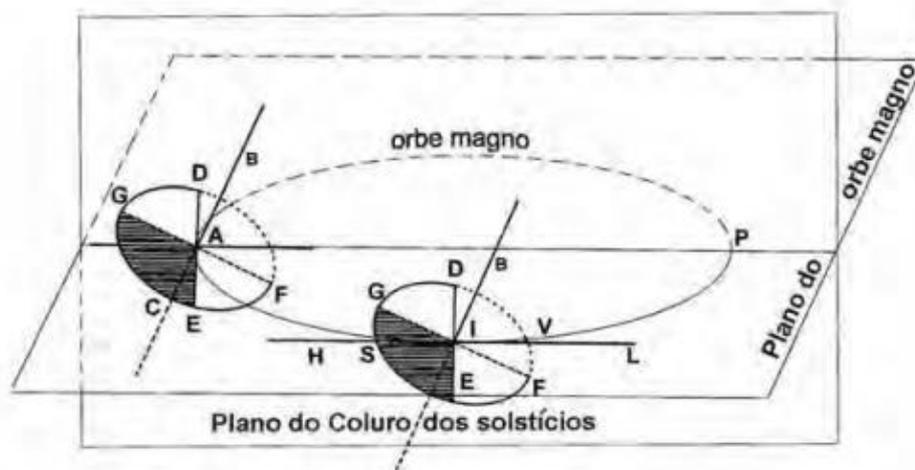


Figura 6. Pagnini aperfeiçoa o desenho para a explicação de Galileu para o período anual das marés. Fonte: Mariconda, 2011, p.820.

Como se descreve na nota 150 da Terceira Jornada, trata-se da projeção dos planos dos meridianos perpendiculares entre si. O coluro³⁵ dos solstícios passa pelos polos e pelos solstícios; o coluro dos equinócios passa pelos polos e pelos equinócios.

³⁵ No *Trattato della sfera* (Tratado da esfera), Galileu define da seguinte maneira os coluros: "São imaginados sobre a esfera dois outros círculos máximos, os quais se cortam sobre os polos do plano equatorial em ângulos retos: um deles passa pelos pontos dos equinócios, o outro pelos solstícios; do que se segue a denominação de coluro dos solstícios para este e coluro dos equinócios para aquele. (. . .) Em

Mariconda (2011) aponta que a teoria das marés de Galileu apresenta um desafio metodológico que não deve ser subestimado. Embora a teoria não se adeque completamente aos dados empíricos, isso não significa que Galileu tenha negligenciado a observação em sua abordagem. Pelo contrário, os problemas de adequação empírica surgem em grande parte porque Galileu considera o fenômeno das marés em toda a sua complexidade, o que torna o ajuste da teoria aos dados bastante fluido. No entanto, a racionalidade da teoria de Galileu não pode ser limitada à exigência de que ela se ajuste aos dados empíricos. Existem outras razões importantes que intervêm na construção de seu modelo explicativo. Uma delas é a recusa teórica, e até mesmo metafísica, de qualquer influência externa, não mecânica, no "sistema da Terra". Galileu rejeita a ideia de uma influência da Lua sobre as marés, que era amplamente aceita em sua época. Essa recusa é metafísica porque a tese da influência lunar é considerada astrológica e afastada juntamente com todas as categorias qualitativas da filosofia natural renascentista, pois representa uma explicação que se baseia em uma causa oculta. A recusa da tese da influência lunar também conduz Galileu a um tratamento estritamente mecanicista das marés. Como bem o expressa Popper, Galileu

"trabalhava com um princípio de conservação do movimento para os movimentos rotacionais e isso parecia excluir as influências interplanetárias. Sem a tentativa de Galileu de explicar as marés nessa base bastante estrita, jamais poderíamos ter constatado que a base era muito estrita." (Popper, 1974, p.173-4).

A segunda razão é a ideia de que as marés são sempre ocasionadas por uma mesma causa, assimilável a um mecanismo subjacente de composição dos movimentos anual e diurno da Terra. Essa ideia é responsável pela unidade da representação teórica do modelo de Galileu. Dito de outra maneira, essa segunda razão é como uma forma de organizar as ideias da teoria de Galileu sobre as marés. Ele acreditava que a causa das marés era sempre a mesma, e que essa causa estava relacionada à maneira como a Terra se movia. Ele achava que a combinação dos movimentos anual e diário da Terra era a causa das marés. Essa ideia ajudou a manter uma explicação coerente sobre as marés em todos os períodos, o que tornou a teoria de Galileu mais fácil de entender e aceitar. Dessa forma,

suma, não se trata de nada mais que de dois meridianos" (EN, 2. p.232). Obviamente, os coluros dividem a esfera celeste em quatro partes iguais.

o valor e a racionalidade da teoria galileana das marés transcendem o confronto exclusivo com as observações. Galileu se baseia em princípios teóricos que vão além da simples adequação empírica e que levam em conta a complexidade do fenômeno estudado. A rejeição de influências externas e a busca por uma unidade teórica na explicação das marés são características fundamentais da abordagem galileana (Mariconda, 2011, p.851).

René Descartes (1596 - 1650), difere das teorias baconiana e galileana em relação ao papel da Lua na produção das marés. Enquanto Bacon não atribui nenhum papel à Lua e Galileu considera seu papel bastante secundário, Descartes dá à Lua um papel central em sua explicação, afirmando que as marés são exclusivamente devidas à sua ação (Mariconda, 2011, p.851). A teoria cartesiana é apresentada originalmente no capítulo XII de *Le Monde ou Traité de la Lumière* (O Mundo ou Tratado da Luz), que nunca foi publicado devido à condenação de Galileu em 1633³⁶. No entanto, uma explicação essencialmente igual pode ser encontrada em *Les Principes de la Philosophie* (Os Princípios da Filosofia), Parte IV, seções 49 a 56, publicado originalmente em latim em 1644. Essa diferença nas teorias reflete as concepções filosóficas de cada autor e suas respectivas visões sobre o papel da Lua e dos corpos celestes na produção dos fenômenos naturais. A teoria cartesiana das marés é um exemplo notável de como a concepção filosófica de um autor pode influenciar sua compreensão de fenômenos naturais. Sua teoria se apoia na sua concepção da matéria, que é entendida como uma "substância extensa em comprimento, largura e profundidade", isto é, "sua natureza consiste apenas em que ela é uma substância que tem extensão" (AT, 9, parte 2. seção 4, p.65), não existindo vazio em sua concepção de universo, contrariando, assim, os atomistas, que defendiam que as marés eram causadas pela atração da Lua ao vazio deixado pela água. Em vez disso, Descartes defende uma concepção plenista do universo, em que a matéria é contínua e preenche todo o espaço (Mariconda, 2011, p.852). Quanto ao movimento, Descartes concebe que ele existe apenas por contato, sendo governado pelas leis do choque entre corpos materiais. Isso também é fundamental para a sua explicação das

³⁶ A história dos processos e da condenação de Galileu pelo Tribunal do Santo Ofício ilustra como a separação das evidências empíricas das interpretações das sagradas escrituras defendida por Galileu não se dava. O reconhecimento da importância científica das teses de Galileu pela Igreja Católica, somente se deu no 350º aniversário da sua morte, em 31 de outubro de 1992. Isto aconteceu no bojo de uma decisão do Papa Wojtyła (João Paulo II), definindo as condições de diálogo entre a fé e o mundo contemporâneo e encaminhando os preparativos para o Jubileu de 2000, que foi antecedido de um grande ato de penitência da parte da Igreja Católica, com pedidos de perdão por sua omissão no caso do holocausto e da repressão política na América Latina. (Baiardi; dos Santos; Rodrigues. *Processos cavilosos, sentença vingativa e abjura humilhante: o caso Galileu*. **Cadernos de História da Ciência**, v. 8, n. 2, p.190, 2012).

marés, pois ele entende que o movimento da Lua, em seu giro ao redor da Terra, cria ondas na matéria que compõe o oceano, que então produzem as marés.

O mundo cartesiano é construído a partir de uma base conceitual que envolve os conceitos de matéria e movimento. Nesse mundo, o Sol ocupa o centro do sistema, e cada astro está contido em seu próprio céu particular. Esses céus são preenchidos completamente por matéria, que liga os astros mecanicamente através de movimentos causados apenas pelo contato entre os corpos. A Lua gira em torno da Terra dentro de seu próprio céu, movimentando-se juntamente com a matéria do céu que a envolve. É essa matéria do céu que carrega os astros com seu movimento circular, conhecidos como os turbilhões ou vórtices cartesianos. Para Descartes, essa teoria das marés está estreitamente ligada a essa concepção de matéria e movimento, que é uma parte fundamental do sistema filosófico e científico que ele construiu (Mariconda, 2011, p.852).

No que segue, ver-se-á que a teoria cartesiana está em conformidade com a ocorrência das duas marés altas e duas baixas por dia, e dá conta de explicar os intervalos entre as duas marés consecutivas³⁷, embora ela não esteja de acordo com o posicionamento da Lua em relação ao estado da maré (alta ou baixa) em determinada região. A figura de Descartes (figura 7), que representa a Terra encerrada em seu céu, acompanhada da Lua, facilita a compreensão de sua teoria das marés. Essa imagem visual ajuda a ilustrar a ideia de que a Lua, em sua órbita em torno da Terra, move-se junto com a matéria do céu que a envolve, e é essa matéria que carrega os astros com seu movimento circular - os turbilhões ou vórtices cartesianos (cf. AT, 11, cap. 11, p.74).

³⁷ Descartes explica de forma bem segura e didática o porquê de o real período entre duas marés altas consecutivas ser de 12 h 24 min (Soares, 2019).

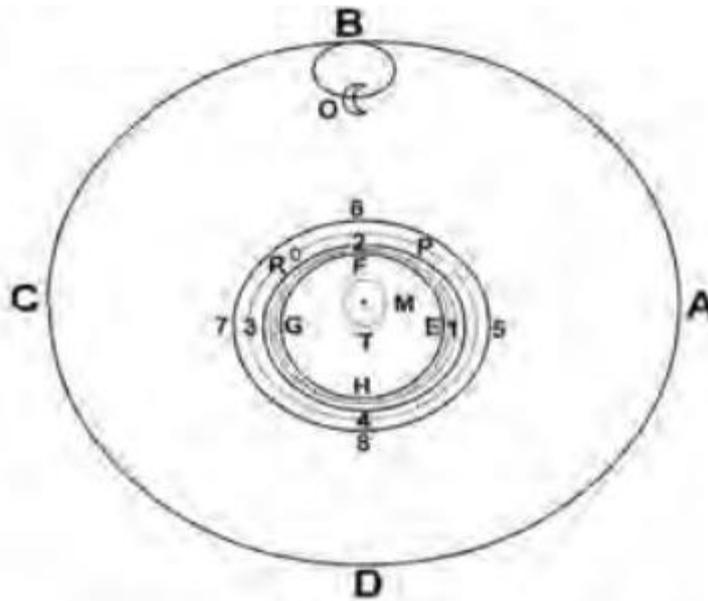


Figura 7. Teoria cartesiana das marés. Fonte: *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano*, 2011, p.852.

Na figura anterior, o círculo **ABCD** é o que ele chama de primeiro céu, o qual a Lua está compreendida; o círculo que delimita o céu da Terra, ou seja, o vórtice em torno da Terra **EFGH**. O círculo mais achatado **5.6.7.8** representa o ar (ou a atmosfera); mais internamente está a Terra que está envolta pelo mar, representado pelo círculo **1.2.3.4**; por dentro da figura que representa a Terra, têm os pontos **EFGH** representando a superfície dela, além dos pontos **T** e **M**, que representam, respectivamente, o centro do planeta e o turbilhão sobre a superfície terrestre. Descartes insiste que a matéria do céu preenche não apenas todo o espaço que está entre os círculos **ABCD** e **5.6.7.8**, mas ainda “todos os pequenos intervalos que estão abaixo entre as partes do ar, da água e da Terra” (cf. AT, 11, cap. 11, p.74-75), de modo que toda a região **ABCD** constitui um *plenum* de matéria, onde não existem nem os grandes vazios entre os corpos celestes, nem os pequenos vazios intracorporais (Galileu *apud* Mariconda, 1999).

Segundo Descartes, na situação da figura, os pontos **2** e **4** do mar seriam de marés baixas e os pontos **1** e **3**, de marés altas. Isso porque, de acordo com ele, o ar e o mar sofrem mais pressão na direção da linha que passa pela Lua (por ação da mesma) e por isso os pontos **2** e **4** do mar teriam menor profundidade, assim como em **3** e **5** teriam maior profundidade. Sabemos hoje que nas regiões por onde a Lua “passa” ocorrem marés altas, bem como nas regiões diametralmente opostas no globo terrestre. (Soares, 2019,

grifos nossos)³⁸. Repete-se que o modelo cartesiano das marés explica por que existem, simultaneamente, duas marés altas em pontos diametralmente opostos e duas marés baixas nas mesmas condições. No entanto, contrariamente às evidências empíricas, sua explicação tem a consequência de que a maré alta ocorre na passagem da Lua pelo horizonte do lugar e a maré baixa ocorre na passagem da Lua pelo meridiano do lugar. Ainda assim, a explicação da periodicidade diária das marés é bem explicada por Descartes ao se considerar a rotação da Terra sobre seu próprio eixo:

“[...] considerando depois que a Terra gira, entretanto, em torno de seu centro [...] aquela parte de seu lado **F** que está agora em frente da Lua [...] deve encontrar-se em 6 horas em frente do céu marcado por **C**, onde essa água será mais alta, e em 12 horas em frente do lugar do céu **D**, onde a água será mais baixa.” (AT, 11, cap. 12, p.81-82 *apud* Mariconda, 2011, p.853 – **grifos nosso**).

Quanto ao período mensal das marés, Descartes explica primeiro o retardamento na sucessão das marés, que ele considera ser de 12 min a cada 6 h, pelo movimento da Lua em torno da Terra:

“[...] e assim ela [Lua] faz avançar pouco a pouco para oriente os pontos **1, 2, 3 e 4** que marcam as marés mais altas e mais baixas, de modo que as marés não mudam precisamente de seis em seis horas, mas elas se retardam aproximadamente a quinta parte de uma hora a cada vez.” (AT, 11, cap. 12, p.82 *apud* Mariconda, 2011, p.853 – **grifos nosso**).

Para melhor compreensão do que acaba de ser apresentado na explicação de Descartes, segue a imagem da figura 8 em que se esquematiza o retardamento diário das marés:

³⁸ Os grifos foram feitos por nós para dar ênfase às principais partes da explicação das causas das marés de acordo com o Descartes.

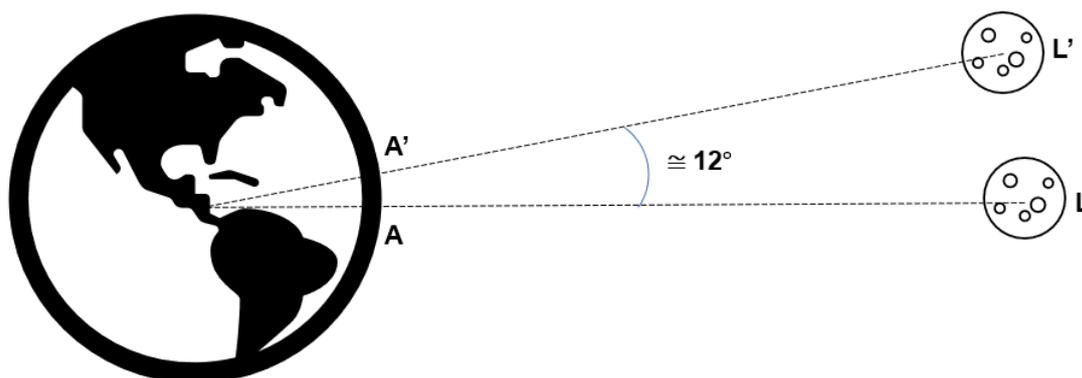


Figura 8. Explicação de Descartes para o retardamento das marés (baseada em Mariconda, 2011). Fonte: autor, 2023.

Para compreender esse retardamento, deve-se levar em consideração o deslocamento angular da Lua a cada 24 h e o tempo necessário para que um ponto **A** sobre a superfície da Terra tenha de novo a Lua sobre seu meridiano. A distância angular percorrida pela Lua enquanto o ponto **A** realiza a revolução de 24 h é cerca de 12° (360° em um pouco mais de 28 dias). Para que **A** tenha novamente a Lua em seu meridiano deve percorrer ainda a distância **AA'**, fazendo-o em cerca de 50 min. Como Descartes considera que o retardamento é de 12 min entre cada maré e como existem quatro marés diárias (duas altas e duas baixas), o retardamento diário vem a ser cerca de 48 min e, portanto, sua explicação para o retardamento é, em tese, correta (Mariconda, 1999).

Quanto à variação mensal na amplitude das marés, Descartes justifica pela forma oval do céu da Terra, que se estende mais em direção a **A** e **C** que em direção de **B** e **D**. Assim, quando a Lua está em **B** e **D**, sua velocidade é maior que em **C** e **A** e, conseqüentemente, as marés são proporcionalmente maiores (Mariconda, 1999).

Assim, para Descartes, a forma ovalada do céu da Terra é:

“[...] a causa de que os fluxos e refluxos do mar sejam bastante maiores, quando ela [a Lua] está em **B**, onde ela é cheia, e em **D**, onde ela é nova, que quando ela está em **A** e em **C**, onde ela é meio-cheia [quadraturas].” (AT, 11, cap. 12, p.83 *apud* Mariconda, 2011, p.854 – **grifos nosso**).

Quanto ao período anual das marés, Descartes não o menciona no *Le Monde*, mas o faz nos *Principles*, encontrando, assim, uma forma condizente com sua teoria de explicar por que nos solstícios as marés têm amplitudes maiores do que nos equinócios:

“É necessário também notar que a Lua está sempre bastante próxima do plano da eclíptica, enquanto a Terra gira sobre seu centro segundo o plano do equador, que lhe é bastante afastado, e que esses dois planos se interceptam nos lugares em que se fazem os equinócios, mas que eles são muito afastados um do outro naqueles [lugares] dos solstícios. Donde se segue que é no começo da primavera e do outono, ou seja, no tempo dos equinócios, que a Lua age mais diretamente contra a Terra e, assim, torna as marés maiores.” (AT, 9, parte 4, seção 52, p.229 *apud* Mariconda, 2011, p.854).

Como se percebe, Descartes sempre recorre exclusivamente à Lua para explicar as marés, embora momento algum ele mencione a ação conjunta do Sol. Pelos trechos acima, é possível observar que Descartes tem em mente a ideia de que a interceptação dos planos da órbita lunar e do plano equatorial terrestres explica esta questão, mas neste caso ele ignora que o Sol esteja atuando como agente causador das marés também. (Soares, 2019 – **grifos nossos**).

O texto fala sobre a explicação das marés com base no modelo simplificado de que a Terra é inteiramente coberta por água. Descartes acrescentou a consideração das condições locais, como a diferente situação das costas do mar e os ventos. Contudo, enquanto as condições locais são sumariamente introduzidas no *Le monde*, que se limita a afirmar laconicamente que as outras particularidades do fluxo e do refluxo

"dependem em parte da diferente situação das costas do mar e, em parte, dos ventos que reinam nos tempos e nos lugares em que são observados" (AT, 11, cap. 12, p.83 *apud* Mariconda, 2011, p.854),

seu tratamento é expandido nos *Principes*, onde descreve com maior detalhe o mecanismo que produz as "diferenças particulares dos fluxos e refluxos" (Mariconda, 2011, p. 854).

Ele descreveu que nas sizíguas, as águas que estão no meio do oceano são mais infladas às seis horas da tarde e da manhã, enquanto as águas das bordas são menos infladas ao meio-dia ou à meia-noite. Isso faz com que as águas do meio escorram para as bordas (fluxo) e as águas das bordas escorram para o meio (refluxo). Partindo, então, dessa consequência geral de sua teoria que, como já dissemos, implica que a maré alta ocorre quando a Lua está no horizonte e a maré baixa, quando a Lua passa pelo meridiano do lugar, Descartes passa a considerar o efeito das condições locais, pois

"segundo essas costas sejam mais próximas ou mais afastadas, e que essas águas passem por caminhos mais ou menos retos e largos e profundos, elas chegam mais cedo ou mais tarde e em maior ou menor quantidade; e também, que os diferentes desvios desses caminhos, *causados pela interposição de ilhas, pelas diferentes profundidades do mar, pelo desagramento de rios e pela irregularidade das bordas ou costas*, fazem frequentemente que as águas que vão para uma borda sejam encontradas por aquelas que vêm de uma outra, o que adianta ou retarda seus cursos de várias maneiras diferentes; e, enfim, que ela pode também ser adiantada ou retardada pelos ventos, algum dos quais sopram sempre regradamente em certos lugares, em certos tempos" (AT, 9, parte 4, seção 56, p.231 *apud* Mariconda, 2011, p.855).

Descartes também considerou o efeito das condições locais, como as causas secundárias concomitantes de Galileu, devidas à propagação da onda primária, e mesmo as causas terciárias, devidas ao regime dos ventos. Seu modelo foi influente e ensinado nas universidades inglesas do século XVII por muitos anos, mesmo após a publicação dos *Principia* de Newton, que chega à caracterização considerada correta da causa primária das marés (Mariconda, 2011, p.855).

Nicolás Mascardi (1625 - 1673), padre jesuíta, missionário, cuja atuação, dentre outras, era a de realizar viagens exploratórias e de observações de fenômenos naturais, ao longo de 1650 até 1674, período em que esteve na América, entrou em contato com diversos grupos nativos, como os *Mapuches*, nas missões de *Arauco*, os *Hulliches* e os *Chonos*, em Chiloé e no Arquipélago dos Chonos, respectivamente, e com os *Poyas* e os *Puelches*, em *Nahuelhuapi* e arredores. Poucos são, no entanto, os trabalhos que têm se debruçado sobre os estudos de astronomia que Mascardi realizou, havendo, em razão disso, certo desconhecimento acerca das observações que fez de fenômenos como eclipses solares e lunares e, especialmente, das marés na Ilha de Chiloé (Fleck, 2014, p.106-107).³⁹

Ao que tudo indica nos relatos históricos analisados por Fleck (2014), a geografia da região e a necessidade de atender espiritualmente os nativos nas diversas ilhas que compunham o arquipélago contribuíram para o interesse que Mascardi demonstrou ter

³⁹ Ainda de acordo com o autor, as informações sobre estas atividades se encontram dispersas nas cartas que enviou ao Provincial da Companhia de Jesus ou nas endereçadas a companheiros da Ordem ou a cientistas leigos com os quais mantinha contato. (Dentre as poucas as obras que abordam a trajetória do jesuíta Mascardi como um homem de ciência, estão as escritas por Guillermo Furlong (1943 e 1963)). Nelas, encontramos não apenas registros das observações astronômicas que realizou, mas também sua percepção sobre as explicações que os indígenas davam a certos fenômenos naturais e à origem dos astros (Fleck, 2014, p.107-108).

nas marés. É interessante notar que Mascardi, apesar de ter vivenciado situações bastante distintas na Europa em relação ao que enfrentava no arquipélago, não deixou de se aprofundar nos estudos sobre as marés, buscando compreender as teorias astronômicas e comparando o fenômeno próprio da região com o que ocorria em outras ilhas. Considerando que Nicolas Mascardi dedicou-se, especificamente, ao estudo de ciências naturais entre 1640 e 1642, sob a orientação do padre Athanasius Kircher, no Colégio de Roma, acredita-se que tenha podido conhecer as publicações de Francis Bacon, Galileu Galilei e René Descartes e, até mesmo, discutir as teorias que estes homens de ciência defendiam. Dado o seu martírio em 1674, ele não pôde posicionar-se em relação à teoria da gravitação universal, formulada por Newton somente em 1687 (Fleck, 2014, p.119-120). Nas cartas que Mascardi enviou ao seu mestre em Roma, constata-se sua adesão às explicações que Nicolau Copérnico dava aos fluxos e refluxos das águas marinhas. De acordo com Furlong (1963), as cartas enviadas por Mascardi a Kircher revelariam que

“Lejos ya de Aristóteles, vibra en sus escritos el sonido de las campanas de plata de Copérnico, en concordancia con las lecciones que en Roma había recibido de uno de los más grandes geógrafos de su época, Athanasius Kircher. Por eso nos habla del sol en el solsticio de invierno y de su apogeo, y Kircher y Riccioli, ambos jesuitas y eximios matemáticos son sus autores preferidos. El postrero de ellos, es verdad, sostenía la inmovilidad de la tierra, pero no nos consta que Mascardi se ladeara a él en este punto” (Furlong, 1963, p.70).

Como se percebe, as observações de Mascardi afastam-no da teoria de Bacon, que adotava o sistema geocêntrico, e da teoria de Descartes, que possuía uma interpretação muito particular, com um céu próprio para cada planeta e uma matéria com extensão entre os astros. Mascardi se aproximava mais da proposição de influência lunar formulada por Descartes, embora também não tenha caracterizado as marés quanto a sua intensidade, como propôs Galileu. Por fim, Mascardi referiu-se à interferência de especificidades locais em suas observações, embora não tenha confirmado o intervalo de seis horas entre as marés diárias. É possível perceber, portanto, que Mascardi desenvolveu uma investigação minuciosa sobre as marés, levando em conta as teorias científicas da época e as particularidades da região em que vivia.

Talvez seja surpreendente, de uma perspectiva moderna, encontrar o magnetismo, em vez da gravidade, tão discutido no contexto da história das marés, e descobrir que Gilbert e depois Kepler, entre outros, foram inspirados a propor o magnetismo como um

mecanismo para eles. No entanto, Fara (1996) explica como o *De Magnete*, de Gilbert, foi amplamente adotado como uma “filosofia magnética” que era uma parte central do pensamento do século XVII. Além disso, Athanasius Kircher (discutido posteriormente) era um especialista em muitos aspectos filosóficos (e aparentemente mágicos) do magnetismo, incluindo um mapa magnético do mundo (Glassie, 2012; Udías, 2020). Os escritos de Newton incluíam apenas referências passageiras ao magnetismo, e ainda assim ele estava interessado o suficiente para possuir um anel de sinete magnético montado com um poderoso *chip* de magnetita. Em um nível mais prático, no século XVIII encontramos William Hutchinson, o estivador de Liverpool, defendendo melhores ímãs em bússolas para negociar as marés (Hutchinson, 1777).

É interessante que, depois de todo esse corpo de trabalho e apenas algumas décadas antes da publicação dos *Principia* de Newton, investigadores respeitados (em alguns lugares) ainda apresentassem o que agora são vistos como ideias absurdas para as marés. Em seu livro, Cartwright (1999) observa que seria “desnecessário [para ele] ampliar algumas teorias não científicas das marés”. No entanto, omiti-los completamente apresentaria uma perspectiva de investigação naquela época através de um filtro de percepção moderna. Portanto, vale a pena mencionar aqui alguns deles que tinham seguidores na época.

Athanasius Kircher (1602 - 1680) foi descrito como “um mestre de cem artes” em sua própria opinião, ou “mais um charlatão do que um erudito” na opinião de Descartes (Brauen, 1982; Findlen, 2004; Glassie, 2012). De qualquer forma, ele era um personagem fascinante e influente com interesses em muitas coisas, especialmente geologia, extremamente lido e um escritor prolífico com mais de 30 livros, fazendo uso de uma enorme quantidade de evidências científicas (reais ou fabricadas) enviado a ele em Roma por outros jesuítas ao redor do mundo. Alinhado com a doutrina religiosa da época, ele se opôs à proposição heliocêntrica copernicana e sua assunção na obra astronômica de Gilbert e Kepler. Ele considerou suas falácias científicas

“perniciosas para a República Cristã e perigosas para a fé da igreja”
(Baldwin, 1985).

No entanto, ele se comunicou com um grande número dos mais importantes cientistas de meados do século XVII por meio do que foi chamado de República das

Letras. Seu nome está amplamente esquecido hoje, provavelmente porque, é preciso dizer, a maioria de suas ideias eram ridículas (Woodworth, 2023, p.16).

No *Mundus Subterraneus (Mundo Subterrâneo)*⁴⁰ de 1665, Kircher cobriu uma vasta gama de ciência e pseudociência renascentista, buscando causas racionais para vários fenômenos por meio de uma compreensão das leis naturais derivadas de observações em vez de explicações milagrosas (Woodworth, 2023, p.16). O redemoinho mítico de Charybdis no Estreito de Messina perto da rocha Scylla na Calábria, mencionado pela primeira vez por Homero, é discutido no final do Livro 2 (de 12) em termos de ventos conduzindo a água através de um canal subterrâneo que liga os dois lados da Sicília em que são aquecidos pelo Monte Etna. O Livro 3 de 12 trata de aspectos mais amplos da hidrografia. A Seção 1 discute as propriedades gerais do oceano, incluindo seu movimento geral de leste a oeste. As marés são abordadas na Seção 2, na qual fica claro que Kircher apreciou a astronomia básica da Lua retornando à sua posição aparente após cerca de 25 h e os papéis combinados da Lua e do Sol no ciclo das Luas Nova, Crescente e Cheia. Ele sabia que as marés tinham um caráter diurno e mensal (do que se entende hoje por semidiurnas e quinzenais) e estava ciente das grandes marés fora do Mediterrâneo, como as experimentadas por Alexandre, o Grande. Ele sugeriu que as marés eram causadas pelo efeito da Lua sobre a luz do Sol. A luz pura do Sol seria infectada com uma “qualidade nitrosa” ao ser refletida na Lua e, passando para a Terra, causa turbulência e elevação do nível do mar. Como resultado, os “eflúvios nitrosos da Lua” fazem com que a água seja empurrada e puxada através de uma rede global de “passagens ocultas e secretas” (um tópico principal do *Mundus Subterraneus* discutido longamente no *Pyrographicus* do Livro 4). A seção 2 do livro 3 também apresenta descrições de diversas marés em diferentes locais, incluindo as marés altas de Londres, que são habilmente descritas como resultado das marés do Atlântico que são restringidas pela passagem através do Canal da Mancha. Acredita-se que Kircher provavelmente obteve suas informações sobre as marés de Londres de Sir Robert Southwell (um diplomata, mais tarde presidente da Royal Society) ou de um visitante inglês anterior a Roma, como o diarista John Evelyn, outro dos fundadores da Royal Society (Brauen, 1982; Reilly, 1974). Além disso, ele se refere ao vórtice de maré (*maelstrom*) na costa norte da Noruega, localizado adjacente a outra suposta passagem subterrânea abaixo da Escandinávia, conectando o Atlântico ao Golfo de Bótnia (Woodworth, 2023, p.16-17).

⁴⁰ Esta publicação ricamente ilustrada pode ser inspecionada no Internet Archive (2022).

Ele sustentou que a prova de tudo isso poderia ser demonstrada pela observação da “qualidade nitrosa” da Lua em um pequeno experimento de bancada envolvendo a Lua brilhando em uma bacia de sal amoníaco (cloreto de amônio). Ele alegou que uma infusão desse sal volátil

“placed obliquely to receive the Influence of the Moon ... did Increase and Decrease as it held of an equal Correspondence, by an uninterrupted Chain of Atoms, with the Flowings and Ebbings of the Marine waters.” (Woodworth, 2023, p.17).

Além disso, o efeito seria mais forte em uma noite de luar, quando Sol e Lua estivessem em conjunção ou oposição. Roos (2001) sugere que por trás de sua ideia pode estar o fato de que o cloreto de amônio é higroscópico. No entanto, o experimento foi tentado na Royal Society por Henry Oldenburg (seu primeiro secretário e primeiro editor do *Philosophical Transactions*) e Robert Boyle (um dos fundadores da química moderna), com a visita de **Sir Robert Moray (1609 - 1673)** (um dos fundadores da Sociedade) para ver o seu sucesso (Reilly, 1974; Glassie, 2012; Roos, 2001). Moray havia dissolvido uma onça de “Bay Salt” e outra de nitro (salitre) em dois litros e meio de água e, depois de olhar para ela por meia hora, foi recompensado com apenas algumas bolhas. Boyle então fez seu assistente repetir o experimento por duas noites inteiras, sem êxito novamente. Moray disse a Oldenburg que ele não deveria se preocupar em comunicar tais resultados experimentais negativos para as *Philosophical Transactions* “sabendo que seus momentos podem ser melhor empregados”, enquanto Oldenburg concluiu que, este primeiro experimento de Kircher tendo sido um fracasso, era provável que todos os outros em *Mundus Subterraneus* também seriam (Woodworth, 2023, p.17).

Uma ideia semelhante foi proposta pelo poeta e escritor inglês **Thomas Philipot (falecido em 1682)**. Sua ideia pode ser considerada independente da de Kircher, e Philipot provavelmente desconhecia os experimentos da Royal Society. Ele produziu seu ensaio de 1673 sobre uma teoria química das marés, em parte como uma crítica (justificável) de Galileu e Kepler e da maioria das outras teorias que precederam Newton. O ensaio incluiu uma revisão das muitas ideias concorrentes na época. Ele propôs que o “fluxo da maré” (sua subida) era devido a sais voláteis “sal ou espírito amoniacal, que é envolto nas entranhas do mar” que foram liberados pelas “impressões do sol e da lua”. Para o “refluxo da maré” (sua queda), ele invocou a ação da “nascente do ar”, que era o termo de Boyle

para a pressão do ar. Deve-se ler Roos (2001) para uma explicação das justificativas de sua teoria no contexto da época. Seus argumentos podem ser considerados como uma contribuição para o então interesse geral na química dos sais envolvendo Boyle e outros, e, como o próprio Philipot observou, sua teoria das marés não era menos absurda do que a respiração animal de Kepler. (Woodworth, 2023, p.18).

Mas, voltando a Kircher, um aspecto das marés pelo qual ele merece crédito é sua sugestão do uso de uma boia e um poço calmante para medições das marés, uma tecnologia simples que continua em uso em muitos locais ao redor do mundo (Woodworth, 2022). Um desenho pode ser encontrado no Livro 3 do *Mundus Subterraneus* (figura 9).

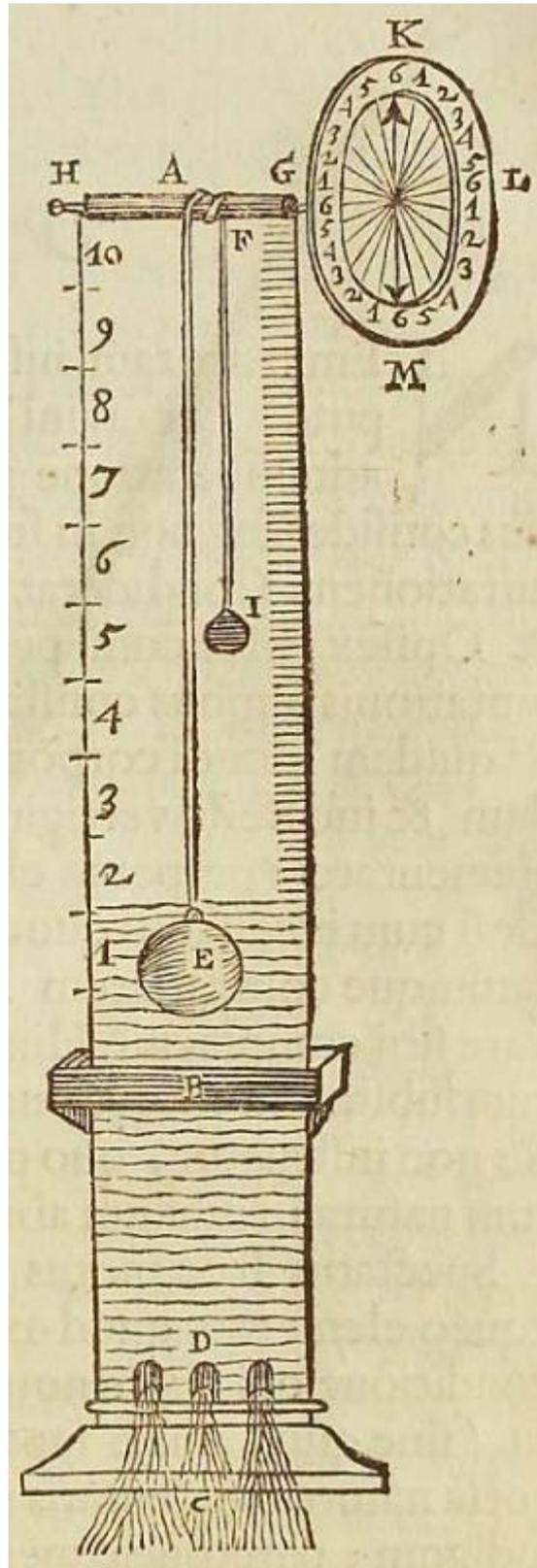


Figura 9. Um diagrama de um medidor de maré flutuante e de poço de calma na página 157 do Livro 3 do *Mundus Subterraneus* de Athanasius Kircher (Kircher, 1665). Disponível em: [WDB - Wolfenbütteler Digitale Bibliothek - drucke/na-2f-3-1](http://www.wdb.de/drucke/na-2f-3-1) (hab.de). Acesso em 24/04/2023.

A mesma sugestão foi feita quase ao mesmo tempo por Sir Robert Moray em um artigo que também foi publicado no primeiro volume de *Philosophical Transactions* (Moray, 1666). Moray geralmente recebe o crédito pela ideia, mas as duas sugestões podem não ter sido uma coincidência. Moray é conhecido por ter lido o livro de Kircher de 1641, *Magnes Sive de Arte Magnetica* (A Lodestone, ou a Arte Magnética), enquanto era prisioneiro do Duque da Baviera em 1643 - 1645. Glassie (2012) afirma que isso deu início a um conjunto de correspondência entre Moray e Kircher que durou décadas. Por exemplo, as observações de Moray sobre as marés nas Hébridas, publicadas no mesmo primeiro volume das *Philosophical Transactions* (Moray, 1665), são mencionadas no Livro 3 do *Mundus Subterraneus*. Portanto, é bem possível que eles tenham se correspondido sobre a ideia do poço.

Lalande menciona o medidor de marés de Moray e as instruções para seu uso (Lalande, 1781). Lalande também menciona um instrumento similar que havia sido descrito em um jornal italiano em 1675.⁴¹ Este foi o primeiro periódico acadêmico na Europa, iniciado em janeiro de 1665, pouco antes das *Philosophical Transactions* em março.

Moray (1665) foi o primeiro artigo sobre marés, publicado em um periódico científico (figura 10), enquanto Wallis (1666) poderia ser considerado o primeiro artigo sobre teoria das marés (Woodworth, 2023, p.19 – **grifo nosso**).

⁴¹ Um resumo e diagrama derivados desse relatório podem ser encontrados no *Journal des Sçavans* de 22 de abril de 1675 (página 118, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56526h/f107.item>)

PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS.

Munday, June 5. 1665.

The Contents.

A Relation of some extraordinary Tydes in the West-Isles of Scotland, by Sr. Robert Moray. The judgment of Monsieur Auzout, touching the Apertures of Object-glasses, and their proportions in respect of the severall lengths of Telescopes; together with a Table thereof. Considerations of the same Person upon Mr. Hook's New Engine for grinding of Optick-glasses. Mr. Hook's Thoughts thereupon. Of a means to illuminate an Object in what proportion one pleaseth; and of the distances, that are requisite to burn Bodies by the Sun. A further account by Monsieur Auzout of Signior Campani's Answer thereunto; and Mr. Auzout's Animadversions upon that Answer. An account of Mr. Lower's newly published Vindication of Dr. Willis's Diatriba de Febribus.

A Relation of some extraordinary Tydes in the West-Isles of Scotland, as it was communicated by Sr. Robert Moray.

IN that Tract of Isles, on the West of Scotland, called by the Inhabitants, the *Long-Island*, as being about 100. miles long from North to South, there is a multitude of small Islands, scituated in a *Fretum*, or *Frith*, that passeth between the Island of *Eust*, and the *Herris*; amongst which, there is one called *Borneray*, some three miles long, and more than a mile broad, the length running from East to West, as the *Frith* lyes. At the East end of this *Island*, where I stayed some 16. or 17. daies, I observed a very strange Reciprocation of the Flux and Re-flux of the Sea, and heard of another, no less remarkable.

Upon the West side of the *Long Island*, the Tides, which came

H

f.

Figura 10. Primeira página de Moray (1665), o primeiro artigo sobre marés em uma revista científica. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/>. Acesso em 24/04/2023.

Moray (1665) apontou as correntes de maré entre as ilhas Hebrides, observadas por ele e por pescadores locais, sendo diurnas em um regime de maré semidiurno, um aspecto que não foi totalmente compreendido até recentemente (veja o Capítulo 13 de Cartwright, 1999).

Na mecânica clássica moderna, a teoria das marés envolve duas forças: as gravitacionais do Sol e da Lua, e as forças inerciais causadas pela aceleração da Terra (tomada como referencial acelerado). Enquanto as explicações de Chrisogono e de Dominis antecipam as forças gravitacionais, eles não oferecem uma explicação para as forças inerciais. Esta é a razão pela qual eles foram obrigados a postular que a ação do Sol e da Lua se estende da região em que parecem estar no zênite até a região antipodal correspondente, sem oferecer qualquer explicação para uma característica tão estranha. Por outro lado, Galileu é considerado o representante mais ilustre de uma segunda linha de pensamento que preparou o terreno para a consideração dessas forças inerciais (Bonelli e Russo, 1996).

Já estudamos a Quarta Jornada, em que Galileu, afirma que acredita ter demonstrado que as marés são um efeito dos movimentos da Terra. Já vimos também que o raciocínio de Galileu (no qual ele trata como "infantil" a ideia de que a Lua poderia ter um papel na criação das marés) estava repleto de inconsistências. Já vimos também que a ideia de que o movimento da Terra poderia explicar as marés não era original de Galileu, tendo sido proposta por outros cientistas, como **Calcagnini (1479 - 1541)**⁴², Cesalpino e Sarpi, no século XVI. No entanto, como também já vimos, a origem dessa ideia remonta a tempos antigos, com Seleucus sendo famoso por apoiar Aristarchus na suposição de uma rotação axial da Terra, relacionando-a com sua teoria das marés. Embora as fontes não permitam concluir que Seleucus se referiu à rotação da Terra, a declaração de Plutarco (Plutarco, *Platonicae quaestiones*, VIII, i (= *Moralia*, 1006C) *apud* Bonelli e Russo, 1996) não deixa dúvidas de que Seleucus foi precursor de Galileu na tentativa de demonstrar a existência de movimentos da Terra. No século XVI, o conhecimento de Plutarco e Aetius era essencial para quem se interessasse pelos movimentos da Terra, o que levou muitos estudiosos a tentarem reconstruir a prova, incluindo Calcagnini, Sarpi, Cesalpino e Galileu (Bonelli e Russo, 1996). A teoria galileana das marés, por mais

⁴² A afirmação de que as marés são causadas por variações nos movimentos da Terra pode ser encontrada na obra *Quod caehim stet, terra moveatur, vel de perenni motu terrae*, publicada postumamente em *Caelii Calcagnini Ferrarensis opera aliquot*, Basel, 1544. Por falta de tempo para estudarmos mais sobre a teoria de marés desse cientista, deixamos apenas essa observação como menção honrosa.

imprecisa que seja, acabou, por outro lado, contribuindo para a teoria moderna das marés e para mecânica moderna através dos trabalhos posteriores de Pierre Gassendi (Gassendi, *De motu impresso a motore traslato*, Paris, 1641) e **Giambattista Baliani (1582 - 1666)**. Já vimos que o limite mais óbvio da explicação galileana era sua incapacidade de explicar o ciclo mensal das marés. Baliani, pois, tentou resolvê-la adicionando um terceiro movimento da Terra (de período mensal), além da rotação e revolução, em torno da Lua. Essa tentativa de Baliani, apesar de parecer uma curiosidade, foi adotada por John Wallis (apresentado em breve), que propôs a noção de que o movimento de dois corpos interagindo deve ser calculado em torno do centro de massa do sistema, que mais tarde se tornaria parte da mecânica clássica.⁴³

John Wallis (1616 – 1703), um matemático inglês, professor de geometria em Oxford, elabora, em 1666, uma versão estendida da teoria de Galileu. Wallis, sugeriu que as oscilações das marés resultaram da rotação da Terra combinada, não apenas com o movimento da Terra ao redor do Sol, mas também com seu movimento ao redor do centro de gravidade do sistema Terra-Lua. Assim, Wallis tentou incluir a influência da Lua na teoria. Harris (1898) aponta que, para ser justo, Galileu estava cogitando um tratado sobre a teoria das marés, mas que a perseguição religiosa da época não o teria possibilitado continuar com seu trabalho científico. Portanto, tem de se esperar até 1666, para se obter uma versão estendida da teoria de Galileu, proposta por Wallis (Deacon, 1971). Wallis estava preocupado com a falta de associação das marés com a Lua na teoria de Galileu. Ele observou corretamente que era o centro de gravidade do sistema Terra-Lua que orbita o Sol. Como consequência, as marés resultam da rotação da Terra combinada, não só com o movimento da Terra em torno do Sol, mas também com a rotação em torno do centro de gravidade. A sugestão de Wallis assim inferiu uma maré por dia lunar, uma melhoria em relação à uma maré por dia solar de Galileu, mas ainda não duas marés.

Para conectarmos as ideias, na verdade, segundo Wallis, a Terra tem na verdade um movimento mensal causado pela Lua, como afirmado por Baliani, mas com a Terra se movendo em torno do baricentro do sistema Terra-Lua (e não apenas a Lua), explicando assim o ciclo mensal das marés. Não é difícil reconhecer importantes antecedentes da teoria moderna das marés nessa ideia de Wallis: a existência do que viria a ser chamado de forças inerciais em relação à aceleração da Terra devido à interação

⁴³ A teoria de Baliani, que ele não publicou, chegou ao conhecimento de Wallis por meio de um relatório de **Giovanni Battista Riccioli (1598 - 1671)** em seu *Almagestum novum*, Bolonha, 1651; veja Wallis, *Philosophical Transactions* (1666), p. 270 *apud* Bonelli e Russo, 1996, p.386.

com a Lua. Para chegar à teoria moderna, o próximo passo seria entender que o argumento de Wallis não deveria ser colocado em oposição às explicações de Chrisogono e de Dominis, mas seria complementar a elas, reconhecendo que as marés são criadas a partir da combinação de dois tipos de forças: aquelas devidas à interação gravitacional direta com o Sol e a Lua, e as forças inerciais devido aos movimentos da Terra (Bonelli e Russo, 1996).

Alguns anos depois, em 1651, foi publicada, em latim, postumamente,⁴⁴ a teoria das marés de **William Gilbert (1544 – 1603)**, em *A New Philosophy of Our Sub-Lunar World* (Uma Nova Filosofia do Nosso Mundo Sublunar). Gilbert já havia proposto que a Terra age como um grande ímã, conforme publicado em *De Magnete* em 1600 (Fara, 1996). Ele agora sugeria que as órbitas dos planetas e as marés eram determinadas pelo magnetismo e, da mesma forma,

“The Moon produces the movements of the waters and the tides of the sea...” (Ekman, 1993; Hecht, 2019; Woodworth, 2023).

Bryant (1920) afirma que Gilbert não sugeriu explicitamente que havia uma atração entre a Lua e a água, mas vagamente que

“subterranean spirits and humors, rising in sympathy with the Moon, cause the sea also to rise and flow to the shores and up rivers.” (Woodworth, 2023, p.15).

Embora a conexão lunar, em vez da solar, tenha sido reconhecida aqui, o caráter duas vezes ao dia das marés permaneceu inexplicado.

Alguns dos investigadores mencionados anteriormente perceberam que, para haver progresso, seriam necessárias mais medições das marés. Vários dos mais importantes associados à Royal Society em Londres e pela Académie Royale des Sciences em Paris são descritos no Capítulo 6 de Cartwright (1999). Por exemplo, Wallis não conseguiu ver por que as marés deveriam ser maiores nos equinócios, uma característica das marés que parece óbvia agora. Em vez disso, ele persistiu com relatos de que eram maiores em fevereiro e novembro. Essa controvérsia após sua publicação em 1666 levou a um apelo para mais medições de alturas de água altas e baixas ao longo do ano em

⁴⁴ Por isso, inserimo-la aqui para respeitar a ordem cronológica dos fatos.

portos o mais próximo possível do mar aberto (Deacon, 1971). Uma série de outros relatórios foram inconclusivos, em grande parte devido à dificuldade de separar as marés dos efeitos dos ventos e do escoamento do rio em conjuntos de medições curtas e imprecisos. Em particular, a publicação de Joshua Childrey (1670) rejeitou a afirmação de Wallis de que as marés eram maiores em fevereiro e novembro, sugerindo também que essas observações foram o efeito dos ventos e não das marés. Ele afirmou que os marinheiros ingleses geralmente acreditavam que as maiores marés ocorriam nos equinócios. Além disso, ele foi o primeiro a observar que as marés altas também tendem a ocorrer quando a Lua está próxima do perigeu, além da *spring-neap periodicity* (período de alternância entre maré de sizígia e de quadratura), resultando em “marés vivas perigeanas” (Childrey, 1670, p.2068).

As primeiras observações sistemáticas das marés para fins científicos no Reino Unido, precedendo aquelas associadas à Royal Society, foram provavelmente as de **Jeremiah Horrocks (1618 - 1641)** em Toxteth, perto de Liverpool. Acredita-se que suas medições de maré abrangeram várias semanas em 1640, com a esperança de coletar um registro muito mais longo. Isso foi evitado por sua morte em 1641, e seus registros de maré não sobreviveram à Guerra Civil (Woodworth, 2023, p.22).

Cartwright (1999) refere-se a alguns desses indivíduos (mas não a Horrocks) como “primeiros observadores amadores”, embora suas observações fossem tão importantes em retrospecto quanto as dos ilustres cientistas da época. A agitação causada na Royal Society pela publicação de Wallis levou a Sociedade a encarregar William Brouncker (seu primeiro presidente) e Moray de organizar um programa de medições em tantos locais quanto possível, como no Tâmesa e no Canal de Bristol, onde as marés são grandes. Essa campanha de medição em si nunca aconteceu. No entanto, os padrões de medição que Moray estabeleceu e suas sugestões para o uso de poços de atenuação (mencionado anteriormente) lançaram as bases para medições futuras (Woodworth, 2023, p.22).

Quanto à previsão das marés, **Henry Philips** fez uma modificação na previsão do momento das marés altas em Londres através do ciclo de sizígia e quadratura, introduzindo uma adição ao aumento familiar de 48 minutos por dia, devido a um termo cosseno com período de 15 dias e amplitude de 45 minutos (Woodworth, 2023, p.22).⁴⁵

⁴⁵ Para ver na íntegra uma de suas tabelas, consulte: Philips. A letter written to Dr. John Wallis by Mr. Henry Philips, containing his observations about true time of the tides. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, n. 34, p.656-659.

Uma visão sobre a natureza e qualidade das previsões de maré naquela época é apresentada por Henry Phillips (1668):

“. . . this time of the Tides, though it be a very necessary thing to be known, yet is very rudely and slightly reckoned up by most seamen and astronomers; most of them reckoning, as if the moon being upon such a set point of the compass (as the seaman calls it) or so many hours past the Meridian (as the Almanack-Makers reckon) it were high-tide in such and such a port at all times of the moon”. (Rossiter, 1972, p.16).

Phillips sabia melhor:

“Now this is true indeed at the new and full moon, but not at other times of the moon, which few take any notice of: only Mr Booker had wont to give this caveat, that about the first and last quarters of the moon, the neap-tides did not flow so long as the spring-tides by one point of the compass; but he gives no rule to proportion the difference.” (Rossiter, 1972, p.16).

De fato, a partir de suas próprias observações em Londres, ele descobriu que a mudança no ciclo de maré de sizígia e quadratura era em "proporção circular".

John Flamsteed (1646 - 1719), o primeiro Astrônomo Real, utilizou medições dos horários das marés altas em Tower-Wharfe no final de 1661 e em Tower-Wharfe e Greenwich no verão de 1682, juntamente com seus conhecimentos astronômicos sobre as órbitas da Lua e do Sol, para produzir uma tabela de marés para os horários das marés de Londres para 1683-88 e, por meio de ajustes simples, horários (um tanto imprecisos) das marés em outros lugares (Woodworth, 2023, p.22)

Como vimos, até esse ponto havia poucas restrições ao avanço de teorias sobre as marés que conflitassem com evidências bem estabelecidas. Todas as teorias tendiam a ser descritivas e careciam de rigor matemático. De fato, como aponta Glassie (2012), embora a Europa tivesse muitos dos chamados professores de matemática (Kircher era um deles), os matemáticos eram tradicionalmente vistos com condescendência por filósofos naturais e teólogos. Na opinião deles, a matemática podia ser usada para medir e descrever e tinha algumas aplicações práticas, mas não tinha nada a dizer sobre as causas ou a natureza das coisas. Tudo isso iria mudar, como demonstrado pela Restauração na Inglaterra que levou à fundação da Royal Society em 1660 como um “*College for the Promoting of Physico*

Mathematical Experimental Learning” (Colégio para a Promoção da Aprendizagem Experimental Físico-Matemática) (Woodworth, 2023, p.23).

A atenção às evidências científicas e o uso do poder da matemática foram as duas chaves para o triunfo do *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural) de **Isaac Newton (1642 - 1727)**, publicado em 1687. Como observou Cartwright (1999), as medições científicas forneceriam a base sobre a qual as ideias teóricas seriam construídas. Newton afirmou mais tarde: “Em vez das conjecturas e probabilidades que estão sendo espalhadas por toda parte, devemos finalmente alcançar uma ciência natural apoiada pela maior evidência”. Harper (2011) descreve em detalhes a “filosofia experimental” de Newton ou o que agora seria chamado de seu “método científico” aplicado aos seus argumentos para a gravidade universal. Central para esse método é a necessidade de testar hipóteses usando observações de quaisquer consequências que fluam delas. A matemática foi essencial para Newton chegar às conclusões dos *Principia*, tendo sido obtida por meio de seu “cálculo infinitesimal”, embora para sua publicação Newton tivesse retrabalhado seus argumentos na linguagem mais amplamente compreendida da geometria. Newton desenvolve sua teoria das marés principalmente em três proposições do Livro III do *Principia*, a saber, as Proposições 24; 36 e 37, as quais são, de certo modo, consequências dos Corolários 19 e 20 da Proposição 66 do Livro I (cf. Cohen, 1999, p.238-246). Em particular, a explicação das marés teve uma tal importância na época que Edmond Halley (1656-1742) a escolheu como tema principal de sua apresentação dos *Principia* ao rei da Inglaterra no Discurso ao Rei sobre as Marés no mesmo ano de 1687.⁴⁶

A partir daqui, apresentar-se-á a explicação newtoniana para as marés com base no que é descrito em Mariconda (Mariconda, 2011, p.856-860). Esquemáticamente, as marés são uma consequência da gravitação universal e do princípio de ação e reação. Supondo-se que a Terra esteja inteiramente recoberta pela água, a forma que a superfície dessa água terá no equilíbrio sob o efeito da atração gravitacional de um astro perturbador, será a de um esferoide de revolução, cujo eixo passa pelo centro **O** da Terra e pelo centro **L** do astro perturbador, no caso, a Lua. Como mostra a figura 10, a superfície da água, sob a ação da massa da Lua, incha-se nos dois pontos diametralmente opostos, **M** e **N**, da reta que une os centros da Lua e da Terra e esse inchaço, ou seja, as suas cristas de onda

⁴⁶ Devemos agradecer a Edmond Halley por pagar pela publicação dos *Principia*, pois as finanças da Royal Society foram prejudicadas pelo fracasso da publicação de *History of Fishes*, de Francis Willughby (Woodworth, 2023, p.24).

da maré, será depois transportado pela superfície terrestre por efeito do movimento diurno da Terra, produzindo o fluxo e refluxo do mar.

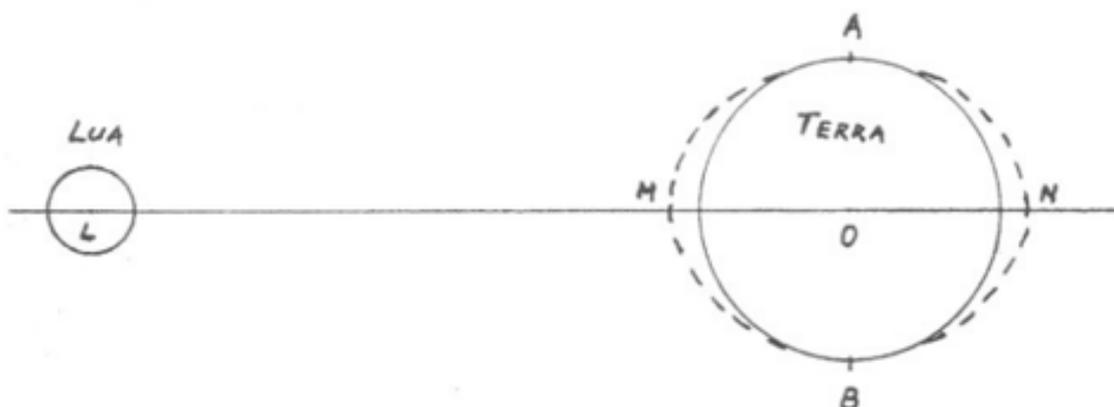


Figura 10. Teoria do equilíbrio das marés descrita por Newton em seu *Principia*.

Fonte: Cad. Hist. Fil. Ci. Campinas. Série 3, v. 9, n.1-2, p.33-71, jan-dez. 1999.

Para entender como acontece esse duplo inchaço da superfície da água é preciso, primeiro, considerar que todos os pontos da Terra estão sujeitos simultaneamente à força da gravitação terrestre e lunar, porque, pelo terceiro princípio da dinâmica newtoniana, a cada ação contrapõe-se uma reação igual e contrária: por isso, assim como a Lua atrai a Terra, esta atrai a Lua. Em segundo lugar, a ação constante de uma força, como é o caso da força gravitacional que age constantemente, traduz-se na produção de uma aceleração. Tomemos agora, na figura, os pontos **M**, **N** e **O** da Terra sobre a linha reta que une os centros da Terra e da Lua e sejam eles tais que **M** esteja voltado para a Lua, **N** seja diametralmente oposto e **O** seja, como já foi dito, o centro da Terra. Chamando g a aceleração devida à atração terrestre, ela será em **M** de $+g$, em **O**, de zero, em **N**, de $-g$. Entretanto, sobre esses três pontos age ainda a Lua, provocando, por reação da Terra, uma aceleração que será $-y$ para o centro **O**, $-(\Psi + \Delta\Psi)$ para o ponto **M** e $-(\Psi - \Delta\Psi)$ para **N**, em que $\Delta\Psi$ é a variação da atração lunar Ψ , que se exerce no centro da Terra; evidentemente, a aceleração é maior em **M**, porque ele está mais próximo da Lua que o centro **O**, e menor em **N**, porque ele está mais afastado da Lua que o centro **O** da Terra. Mas a aceleração lunar $+\Psi$ age sobre todos os pontos da Terra rígida e age, portanto, igualmente em **M**, **N** e **O**. Assim, cada um desses três pontos está submetido à resultante das três acelerações:

“Pois todo o mar é dividido em duas marés cheias hemisféricas, uma no hemisfério KHk no lado norte, a outra no hemisfério oposto Khk , que podemos, portanto, chamar de marés cheias do norte e do sul. Estas marés, sendo sempre opostas entre si, chegam alternadamente aos meridianos de todos os lugares após um intervalo de doze horas lunares. E como os países participam mais das marés cheias no norte, e os países do sul mais das marés cheias do sul, ocorrem marés, alternadamente maiores e menores em todos os lugares fora do equador, nos quais os astros nascem e se põem.” (Newton. *Principia* – Livro III, tradução de Assis, 2008, p.227).

É importante ter claro que as marés não são devidas à força de atração, mas à variação dessa força sobre os diversos pontos da superfície terrestre, pois essa variação da atração permite não apenas explicar, como demonstrado, porque existem geralmente duas marés por dia (período diário), mas também porque o efeito do Sol é mais fraco que o da Lua, ainda que o primeiro exerça evidentemente uma atração mais forte sobre a Terra. Com efeito, a massa do Sol é cerca de 27 158 000 vezes maior que a da Lua e a distância do Sol à Terra é cerca de 390 vezes maior que a distância da Lua à Terra. Como, pelo princípio da atração universal, a atração gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do quadrado da distância, teremos

$$\frac{27\ 158\ 000}{390^2} = \frac{27\ 158\ 000}{152\ 100} \cong 178,5$$

portanto, a atração gravitacional do Sol sobre a Terra é cerca de 178 vezes maior que a da Lua. Entretanto, como a força das marés corresponde à diferença dos valores assumidos pela força de atração gravitacional entre um ponto da superfície terrestre e o centro da Terra, a variação da ação gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do cubo da distância. De um ponto de vista matemático, enquanto a força gravitacional varia na razão $\frac{1}{R^2}$, sua diferença, obtida tomando-se sua derivada, varia na

razão $\frac{1}{R^3}$. Tem-se, assim:

$$\frac{27\ 158\ 000}{390^3} = \frac{27\ 158\ 000}{59\ 319\ 000} \cong 0,45,$$

ou seja, a diferença da ação gravitacional do Sol sobre a Terra é cerca de 0,45 vezes a da Lua, ou ainda, a ação da Lua sobre as marés é cerca de 2,2 vezes maior que a do Sol.

Esquematizando, na Lua Nova (no lado da Terra voltado para o Sol) ou na Lua Cheia (no lado da Terra longe do Sol), as forças geradoras de maré do Sol e da Lua estão

alinhas. Na figura 12, o bojo das forças geradoras de maré do Sol aumenta o bojo da Lua.

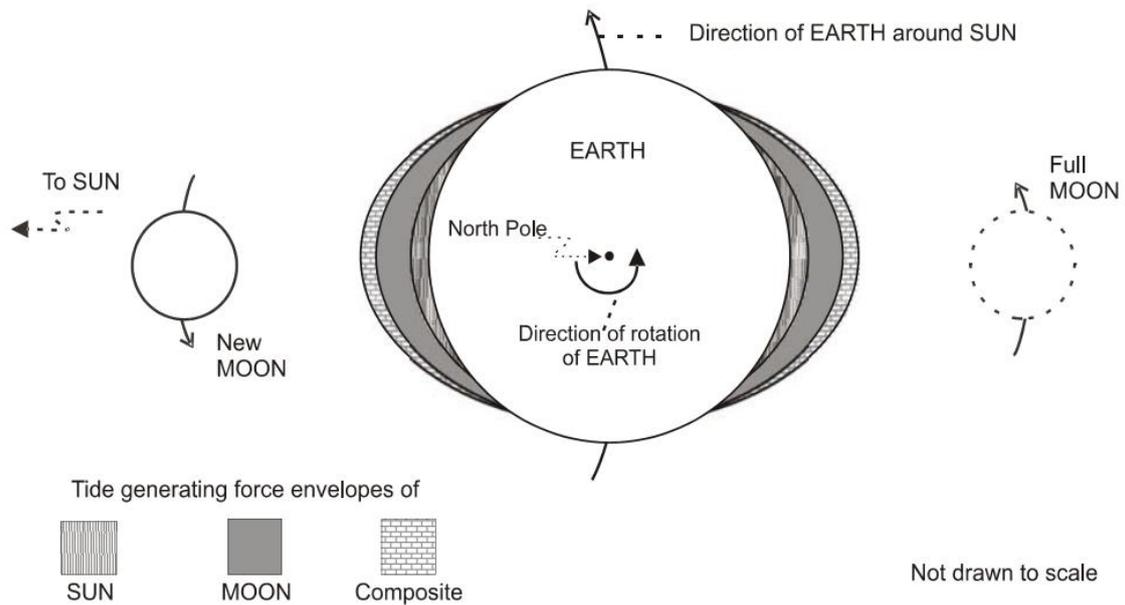


Figura 12. Marés-vivas. Fonte: Hicks. **Understanding tides.** US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

As marés altas da protuberância solar ocorrem ao mesmo tempo que as marés altas do lunar. Isso aumenta a altura das marés altas compostas. Da mesma forma, as marés baixas da protuberância solar ocorrem nas marés baixas do lunar. Isso diminui a altura das marés baixas compostas. Portanto, ocorrem amplitudes de maré maiores do que a média, chamadas de marés-vivas (*spring tides*).

Na Lua Crescente ou Minguante, por outro lado, as forças geradoras de maré do Sol estão em ângulos retos com as da Lua. Na figura 13, o bojo das forças geradoras de maré do Sol é mostrado em conflito com o bojo de força da Lua.

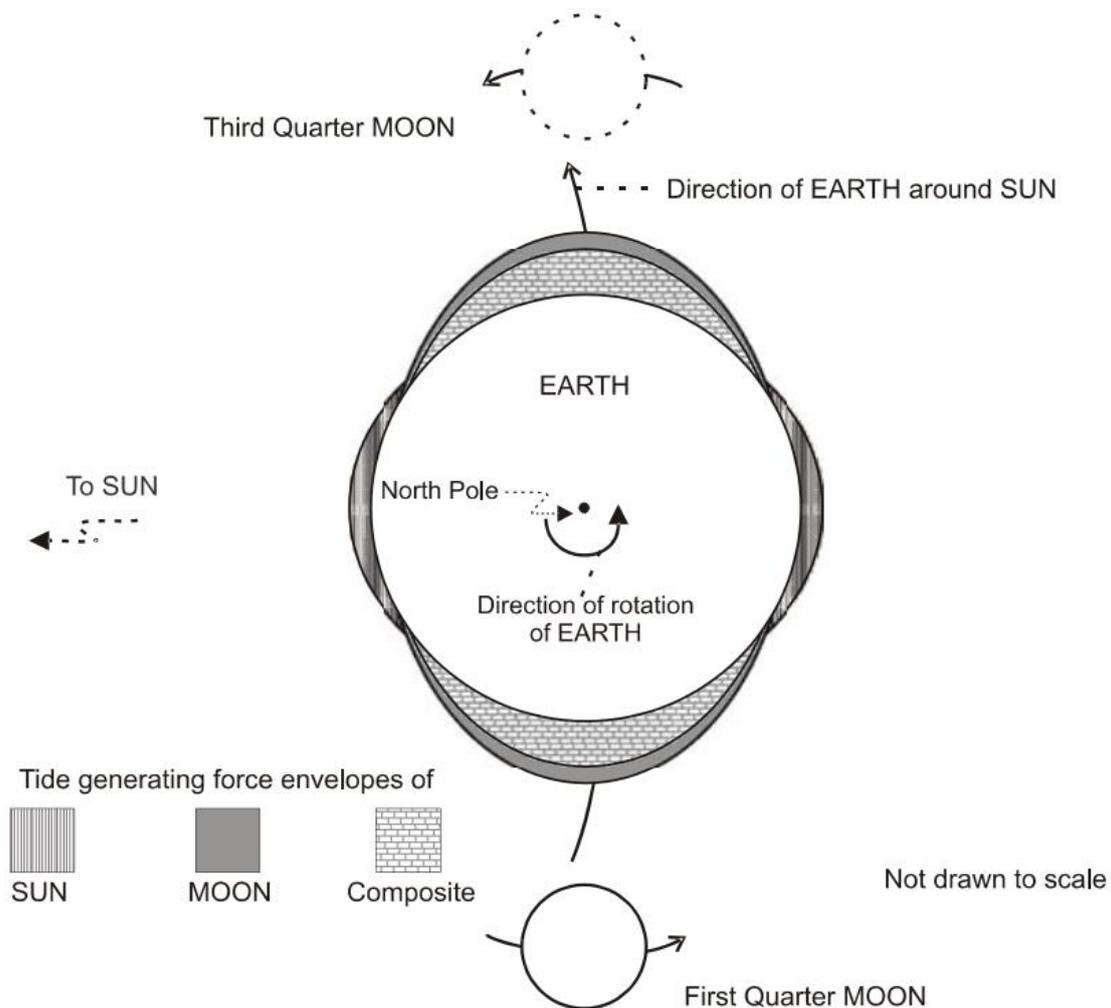


Figura 13. Marés-mortas. Fonte: Hicks. **Understanding tides.** US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

As marés baixas da protuberância solar ocorrem nos momentos das marés altas do lunar. Isso reduz a altura das marés altas compostas. Da mesma forma, as marés altas da protuberância solar ocorrem nas marés baixas do lunar. Isso aumenta a altura das marés baixas compostas. Portanto, ocorrem amplitudes de maré menores que a média, chamadas de marés-mortas (*neap tides*). A variação entre as marés-vivas e marés-mortas é de cerca de 20%. (Hicks, 2006).

Determinada a participação de cada uma das luminárias na produção das marés pode-se, por um lado, reiterar a explicação cartesiana do atraso diário das marés pela combinação do movimento da Lua em torno da Terra e da rotação terrestre e, por outro lado, explicar o período mensal com base nas posições relativas do Sol e da Lua. Assim, no primeiro caso, como a Lua gira em torno da Terra enquanto esta faz uma rotação sobre

si mesma, é preciso um pouco mais do que 24 h (cerca de 50 min a mais), para que a Lua se encontre novamente na vertical do mesmo meridiano, ou seja, se a maré for alta ao meio-dia de um certo dia, ela será alta um pouco antes das 13 h do dia seguinte (Mariconda, 2011, p.858, cf. p.859, para a explicação cartesiana). Quanto ao período mensal, podemos representá-lo esquematicamente com o auxílio da figura 14, na qual estão representadas duas posições relativas do Sol e da Lua.

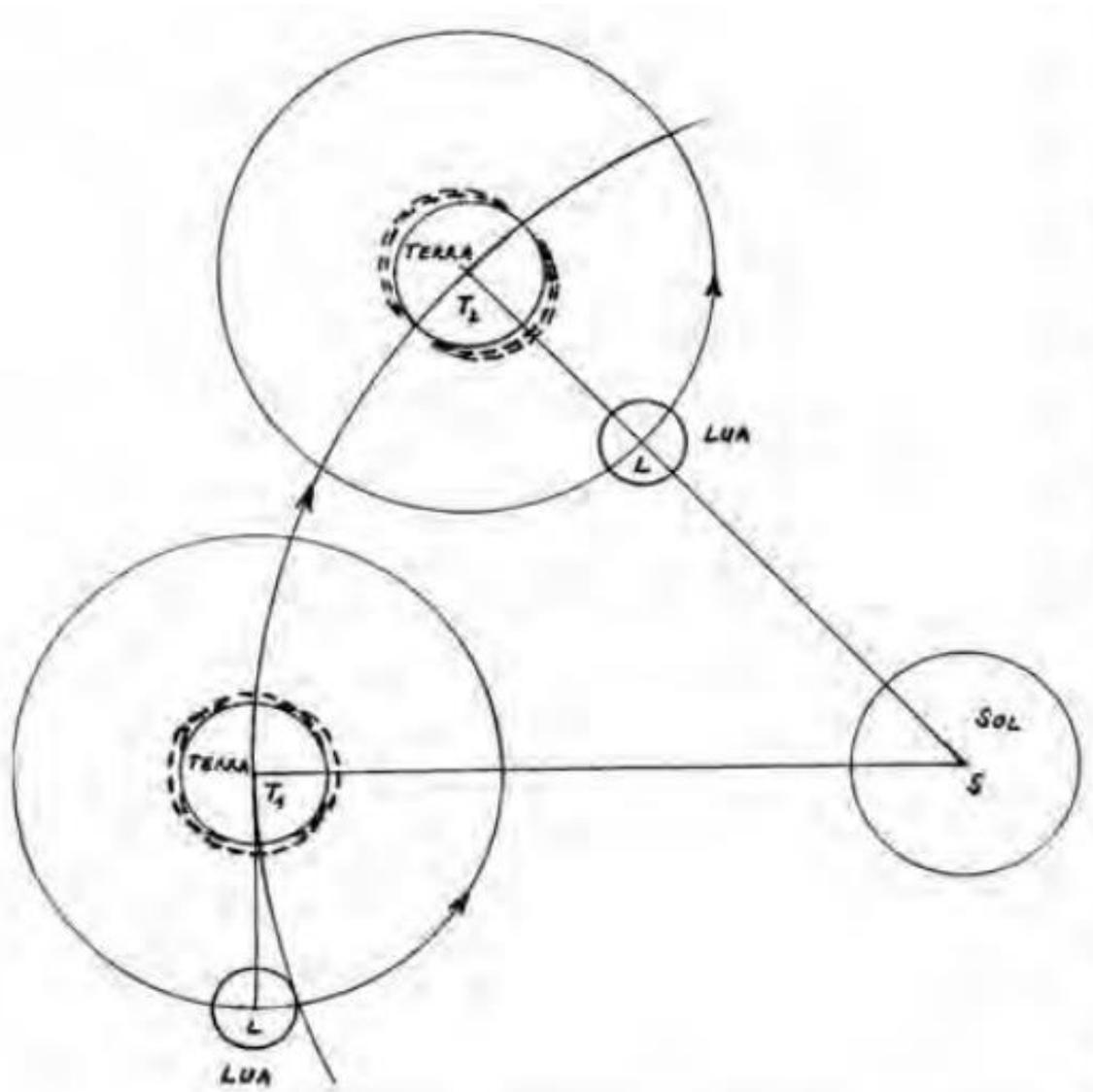


Figura 14. Período mensal das marés explicada por Newton. Fonte: Mariconda, 2011, p.856-858.

Quando a Terra está em T_1 , o Sol e a Lua estão em quadratura e, no caso representado pela figura, a Lua está em quarto minguante. Quando a Terra está em T_2 , o Sol e a Lua estão em conjunção e a Lua é Nova. No primeiro caso, a ação gravitacional do Sol e a da Lua sobre as águas opõem-se, resultando uma maré de intensidade mínima.

No segundo caso, a ação gravitacional do Sol e a da Lua concorrem, resultando uma maré de intensidade máxima. Como diz Newton:

"os dois movimentos, que as duas luminárias excitam, não serão discernidos separadamente, mas causarão o que se poderia chamar um movimento composto. Na conjunção ou na oposição das luminárias, seus efeitos serão combinados e o resultado será o fluxo e refluxo máximo. Nas quadraturas, o Sol levantará a água enquanto a Lua a abaixa e abaixará a água enquanto a Lua a levanta; e a mais baixa de todas as marés originar-se-á da diferença entre esses dois efeitos" (Newton, 1999, Livro III, Proposição 24, p.835).

Cabe, entretanto, notar que, em virtude do plano de rotação da Lua em torno da Terra não coincidir com o plano de rotação da Terra em torno do Sol, ou seja, da órbita lunar ter uma inclinação de $5^{\circ} 8'$ com relação ao plano da eclíptica⁴⁷, nem sempre a Lua Cheia e a Lua Nova coincidem com um alinhamento perfeito da Lua, da Terra e do Sol, de modo que, na maioria das vezes, a Lua atrai ligeiramente mais para seu lado do que o Sol e os efeitos das duas luminárias não podem ser exatamente acrescentados (Mariconda, 2011, p.859).

Além das mudanças na amplitude da maré, o fenômeno de maré de sizígia também causa mudanças quando ocorrem as fases de maré alta e baixa da maré lunar. À medida que a Lua Nova passa para Crescente ou da Lua Cheia para o Minguante, a envoltória solar está atrás da Lua, de modo que o composto é retardado. Assim, à medida que a Terra gira, as fases de maré alta e baixa do composto ocorrem mais cedo do que apenas com a envoltória lunar. Isso é chamado de "*priming*", mostrado na figura 15.

⁴⁷ Tonel e Marranghello (2013) salientam que esta inclinação varia ao longo de um período de 18,6 anos. Esta variação faz com que a inclinação da órbita da Lua, com relação ao plano terrestre varie entre $5,15^{\circ}$ e $-5,15^{\circ}$. Como o eixo de rotação da Terra também está inclinado com relação à sua órbita ($23,5^{\circ}$, a inclinação da órbita da Lua com relação ao equador terrestre varia entre $28,65$ ($23,5^{\circ} + 5,15^{\circ}$) e $18,35^{\circ}$ ($23,5^{\circ} - 5,15^{\circ}$).

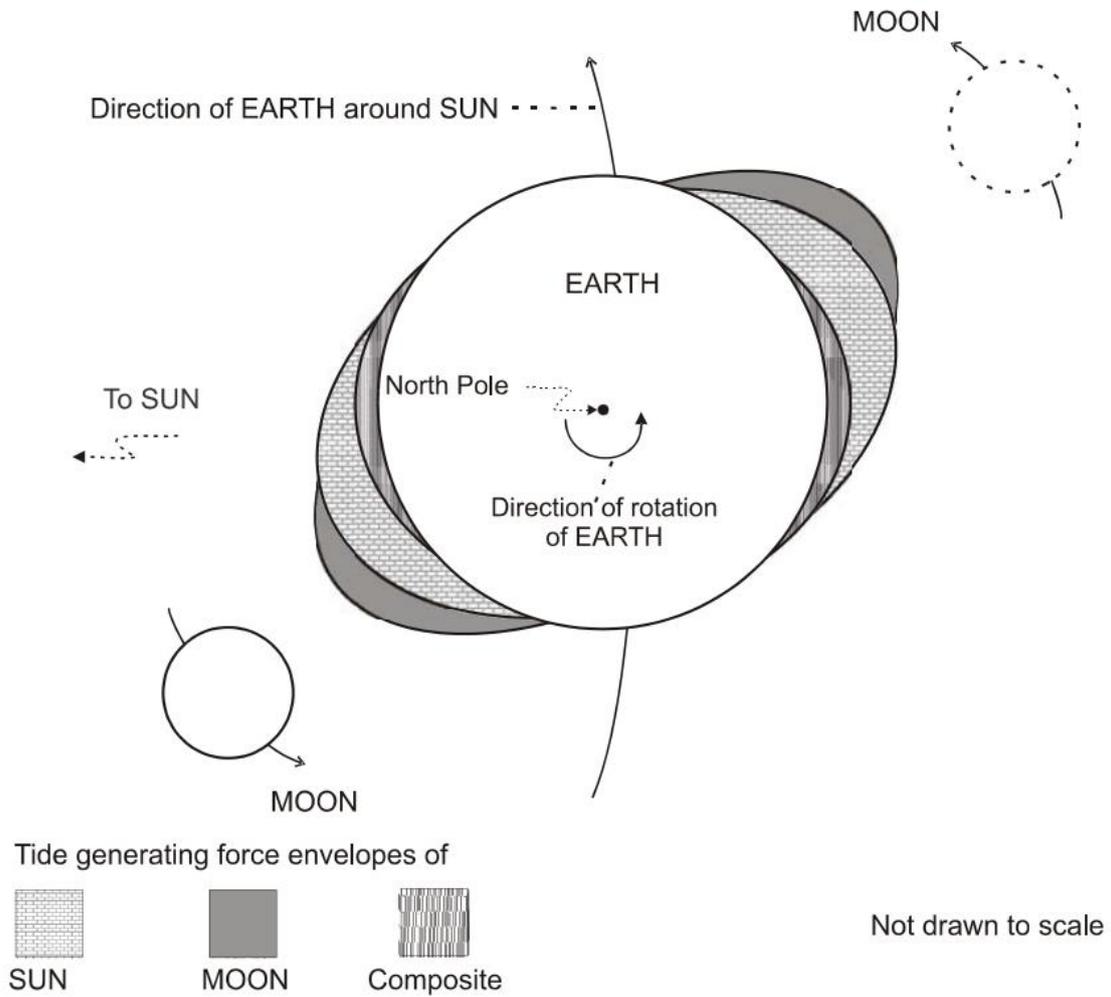


Figura 15. *Priming*. Fonte: Hicks. **Understanding tides**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

Da mesma forma, à medida que a Lua Crescente passa para a Lua Cheia ou de Minguante para Nova, a envoltória solar está à frente da lunar, de modo que o composto é acelerado. Assim, à medida que a Terra gira, as fases de maré alta e baixa do composto ocorrem mais tarde do que apenas com a envoltória lunar. Isso é chamado de "*lagging*", ilustrado na figura 16.

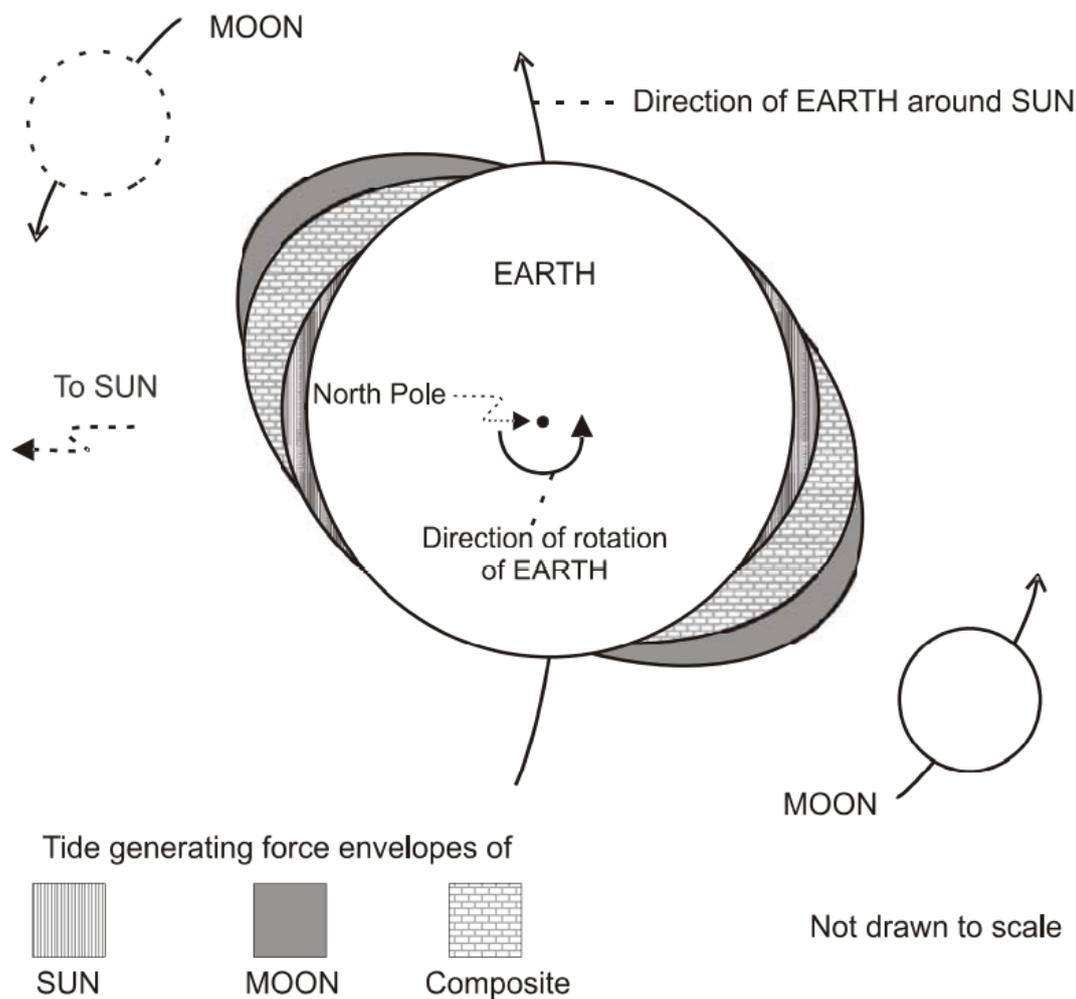


Figura 16. *Lagging*. Fonte: Hicks. **Understanding tides**. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, 2006.

Quanto ao período anual, devido a sua complexidade, limitar-se-á aqui a indicar os dois principais fatores dos quais ele depende. Primeiro, como os efeitos das duas luminárias, o Sol e a Lua, dependem de suas distâncias da Terra, as marés altas e baixas dependem do perigeu e apogeu da Lua e do periélio e afélio da Terra. As marés máximas anuais dependem, então, da coincidência entre o perigeu da Lua e o periélio da Terra e, por outro lado, as marés mínimas anuais dependem da coincidência entre o apogeu da Lua e o afélio da Terra. Segundo a declinação desses astros, ou seja, a distância angular entre eles e o plano do equador, altera significativamente a ação de suas forças gravitacionais sobre as águas. Assim, quando esses astros se afastam do equador em direção ao polo, aumentando sua distância angular, seus efeitos devem diminuir pouco a pouco. Em particular, isso explica as diferenças entre as marés equinociais e solsticiais,

porque, nos equinócios (de primavera e de outono), o Sol se encontra no ponto em que o plano da eclíptica intercepta o plano do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta máxima; mas, nos solstícios (de verão e de inverno), o Sol se encontra em seu maior afastamento angular do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta mínima. Como, entretanto, o período anual depende da combinação dos dois fatores expostos, o ciclo das marés é razoavelmente complexo e completa-se no intervalo de vários anos (Mariconda, 2011, p.859).

Finalmente, Newton também levou em consideração os fatores locais que complicam o fluxo e refluxo do mar. Um desses fatores é a "força de reciprocação das águas", que é o ímpeto conservado pela massa líquida quando os efeitos do Sol e da Lua cessam. A inércia das águas mantém o movimento de vai-e-vem e perturba o desenvolvimento das marés, pois o movimento gerado por uma passagem da Lua pelo meridiano interfere na maré seguinte. Outro fator importante é a situação geográfica das costas, pois os fundos baixos criam atritos que retardam o avanço das águas, alongando o período "normal" de seis horas. A "onda primária" da maré pode propagar-se seguindo caminhos diferentes, podendo dividir-se e chegar ao mesmo lugar por diferentes vias. Quando essas ondas se encontram, elas se adicionam ou se subtraem, aumentando ou diminuindo o efeito da "onda primária". Newton discute em detalhes, na Proposição 24 do Livro III do Principia, as marés do porto de Batsha, no atual Vietnã. A particularidade das marés de Batsha é a existência de uma maré alta e baixa a cada 24 horas, ao invés de duas como previsto pela teoria. Newton utiliza pela primeira vez o princípio de interferência em sua explicação das marés de Batsha (cf. Cohen, 1999, p.240). Em suma, a explicação consiste em mostrar que

"uma maré é propagada a partir do oceano através de diferentes canais até o mesmo porto e passa mais rapidamente por alguns canais do que por outros; neste caso, a mesma onda, dividida em duas ou mais ondas que chegam sucessivamente, pode compor novos movimentos de tipos diferentes" (Newton, 1999, p.838).

A limitação da explicação gravitacional das marés consiste basicamente em que Newton propõe uma teoria "estática" das marés que leva em consideração somente o aspecto de equilíbrio das forças gravitacionais envolvidas, negligenciando o aspecto "dinâmico", representado basicamente pela "inércia e [pelos] atritos", que têm,

entretanto, forçosamente um papel primordial nas velocidades colocadas em jogo pela rotação da Terra” (Maury, 1999, p.609).

“Newton fracassou em entender que a análise das forças gravitacionais da maré é apenas uma parte do problema, correspondendo a outra parte a um entendimento da natureza das respostas a essas forças das marés e dos efeitos da rotação da Terra” (Cohen, 1999, p.240).

Em suma, as marés oceânicas, são um fenômeno complexo produzido pelo imbricamento de dois conjuntos de fatores causais: de um lado, as forças gravitacionais do Sol e da Lua geradoras de um efeito primário de maré; de outro lado, as respostas específicas das águas oceânicas sob as condições delimitadas pelo movimento de rotação da Terra e pela situação geográfica local. Burstyn insiste nesse imbricamento causal, para ressaltar o aspecto positivo da contribuição de Galileu:

“Nossa explicação corrente vê as marés como um fenômeno ondulatório primariamente local, a resposta das bacias oceânicas de tamanhos, formas e profundidades variáveis às forças geradoras das marés da Lua e do Sol. A maré, em qualquer bacia oceânica dada, é peculiar àquela bacia e é resultante das oscilações de período-fixo devidas às forças geradoras das marés e às oscilações de período-livre devidas à configuração da própria bacia. Em outras palavras, embora o oceano seja posto em movimento pelas forças geradoras das marés que variam periodicamente, uma vez posto em movimento, ele tende a oscilar por sua própria inércia com um período que pode diferir daquele das forças geradoras das marés. Mas esta é substancialmente a concepção de Galileu dos fenômenos das marés, embora seu fracasso em entender a atração gravitacional tenha conduzido a ideias incorretas sobre as forças de geração das marés e seus períodos.” (Burstyn, 1962, p.164 *apud* Mariconda, 2011, p.861).

Embora muitas pessoas acreditem que as ideias de Newton foram aceitas rapidamente, a realidade é que pelo menos nos cinquenta anos seguintes à sua publicação, havia muitas explicações concorrentes sendo propostas e a teoria de Newton não era unanimidade (van Lunteren, 1993). De fato, em 1692, o *The Gentlemen's Journal* listou 10 explicações concorrentes para as marés, o que indica que havia muitas opiniões divergentes sobre o assunto (Roos, 2001). A teoria de Newton foi promovida por seus apoiadores no mundo científico, como Edmond Halley, mas ainda assim houve reações contrárias de outras direções. Na Inglaterra, por exemplo, surgiu o movimento

Hutchinsoniano, nomeado após John Hutchinson (1724-1770) (Wilde, 1980; Aston, 2008), que se opunha ao domínio cultural da física newtoniana, a qual consideravam a "religião de Satanás" (figura 17).

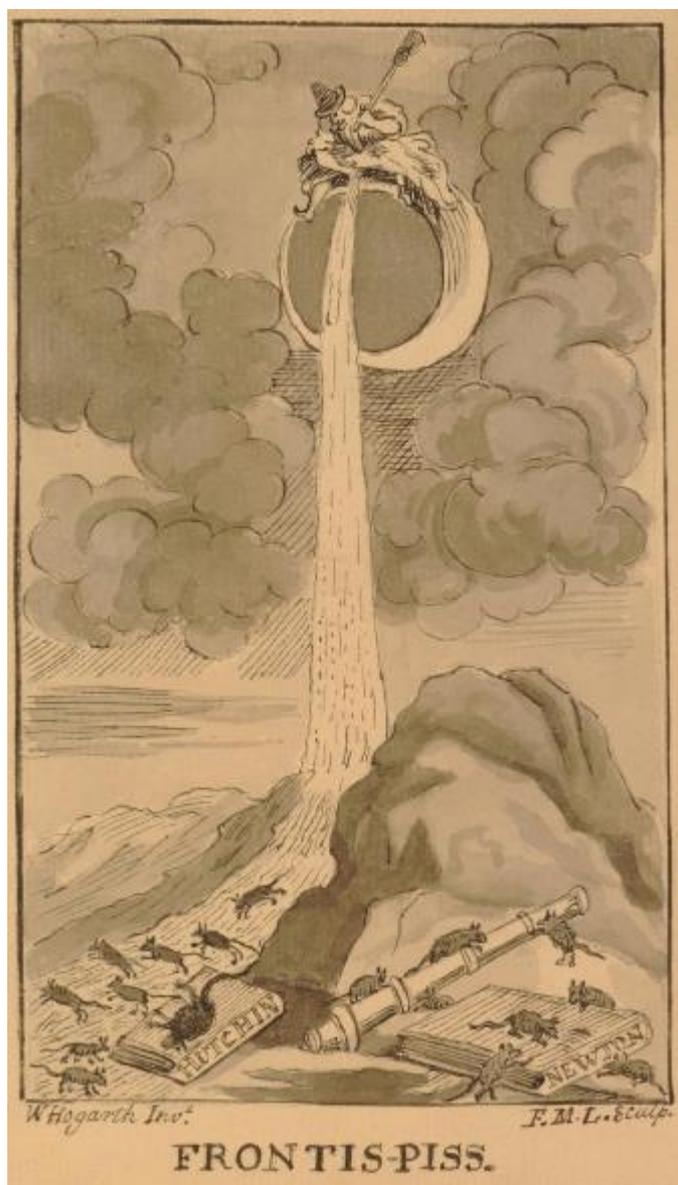


Figura 17. Imagem projetada por William Hogarth para um panfleto contra os Hutchinsonianos em 1763. Na imagem, uma bruxa está sentada no topo de uma Lua Crescente e urinando em uma cascata que atinge uma cópia encadernada do livro "Hutchin" (o *Moses's Principia* de 1724 e 1727 por John Hutchinson), e afogando um grupo de ratos pretos, que simbolizam os seguidores de Hutchinson. Enquanto isso, alguns dos ratos estão tentando roer em vão a filosofia de Newton, representada por uma cópia encadernada do livro "Newton" (*Principia*) e um telescópio. Disponível em: < https://www.britishmuseum.org/collection/object/P_Cc-2-255 >. Acesso em 04/04/2023.

Em vez disso, eles alegaram que a verdade estava no texto hebraico original do Antigo Testamento. A principal objeção pessoal de Hutchinson à filosofia newtoniana era sobre o uso da força como um conceito explicativo sem atribuir uma causa mecânica, um aspecto da gravidade que preocupava o próprio Newton (Aiton, 1969; Wilde, 1980). Levaria um século após os *Principia* de Newton para que o movimento Hutchinsoniano morresse.

Esta exposição das principais teorias das marés do século XVII permite algumas considerações finais. Em primeiro lugar, destaca-se a distância conceitual entre as explicações qualitativas baseadas em alguma influência da Lua sobre as águas e a teoria newtoniana que propõe uma causa baseada na atração gravitacional, uma propriedade universal da matéria. Além disso, é importante notar que a teoria newtoniana, ao contrário das explicações qualitativas, é matemática e mecânica, o que representa a realização da mecanização da imagem do mundo preconizada por Galileu e Descartes. Em continuação, pode-se observar que a hipótese do movimento de rotação da Terra, embora rejeitada pela Igreja Católica na época de Galileu, tornou-se uma hipótese tácita e consensual no patrimônio científico adquirido do século XVII⁴⁸. É interessante notar que, além da aceitação do movimento de rotação da Terra como hipótese explicativa para o atraso diário das marés, a teoria de Newton sobre a gravidade e as marés introduziu uma nova maneira de conceber a natureza, a partir de uma perspectiva mecanicista e matemática. Isso representa um afastamento das explicações qualitativas baseadas em alguma modalidade de predomínio ou influência da Lua sobre as águas, e evidencia a realização da mecanização da imagem do mundo preconizada pelas explicações de Galileu e Descartes. Portanto, as teorias das marés no século XVII, incluindo a teoria newtoniana, contribuíram significativamente para o desenvolvimento da ciência e para a construção de uma nova perspectiva sobre a natureza, marcada pela ênfase na matematização e na mecanização. Além disso, a aceitação da hipótese do movimento de rotação da Terra como causa secundária das marés também representa um importante marco na história da ciência, evidenciando a progressiva superação das concepções geocêntricas e a emergência de um novo paradigma científico, baseado na observação empírica e na

⁴⁸ Para Galileu, trata-se de mostrar que as marés são uma prova do movimento da Terra, por meio de uma argumentação que vai do efeito para a causa; para Descartes e Newton, o movimento de rotação da Terra é apenas uma causa secundária, assumida hipoteticamente para explicar um efeito particular das marés (Mariconda, 2011, p.860).

experimentação. Fleck e Biehl construíram um quadro (ver quadro 1, Fleck e Biehl, 2014, p.119), compilando as teorias sobre marés vigentes no século XVII dos principais cientistas dessa época, se assim pudermos nos expressar, categorizando tais explicações em termos da periodicidade das marés, ou seja, o ciclo diário, mensal e anual das marés. Como esse quadro apenas inseri as contribuições de Bacon, Galileu, Descartes e Newton, pode ser útil ao professor para se ter uma primeira ideia geral de suas teorias.

As descobertas que marcaram a época de Newton significaram que uma base havia sido construída para um tratamento matemático das marés. Em 1740, a *Académie Royale des Sciences* na França concedeu a quatro ganhadores um prêmio pelo melhor ensaio filosófico sobre a “cheia e vazante do mar” (Cartwright, 1999). Um deles era **Colin Maclaurin (1698 - 1746)**, professor de geometria na Universidade de Edimburgo, e outro era **Daniel Bernoulli (1700 - 1782)**, professor de anatomia e botânica em Basel. Eles podem servir como exemplos de quão bem conectados os cientistas estavam agora e de como seus desenvolvimentos da teoria de Newton levariam a melhorias práticas no fornecimento de informações sobre as marés (Woodworth, 2023, p.24).

Maclaurin provou o que Newton presumiu intuitivamente, que a forma de um oceano esférico em equilíbrio estático com a força das marés induzida por um corpo perturbador (ou seja, a Lua ou o Sol) é um esferoide prolato (formato parecido como o de uma bola de rúgbi com um eixo de simetria alongado), cujo eixo principal aponta para o corpo. O *Traite Sur le Flux et le Reflux de la Mer* (Tratado sobre o fluxo e refluxo do mar) de Bernoulli estendeu o ensaio de Maclaurin, embora na época ele desconhecia a contribuição de Maclaurin (Aiton, 1955b). Seu ensaio introduziu a chamada Teoria do Equilíbrio, que descreve a estrutura temporal e espacial da maré de equilíbrio devido à combinação da Lua e do Sol. Em outras palavras, Bernoulli combinou os dois esferoides prolatos individuais em uma forma geral e introduziu as órbitas lunar e solar e a rotação da Terra na discussão, de modo que a dependência temporal da maré de equilíbrio em qualquer ponto da superfície da Terra pudesse ser parametrizada (figura 18).⁴⁹ Bernoulli usou sua fórmula para construir sua tabela, (ver Fig. 5 de Aiton, 1955b), mostrando as alturas relativas das marés para as várias fases da lua.

⁴⁹ Um diagrama semelhante com mais detalhes nas equações matemáticas pode ser encontrado em Aiton, 1955b. The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of tides. *Ann. Sci.*, 11, 206–223. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00033795500200215>. Acesso em 24/04/2023.

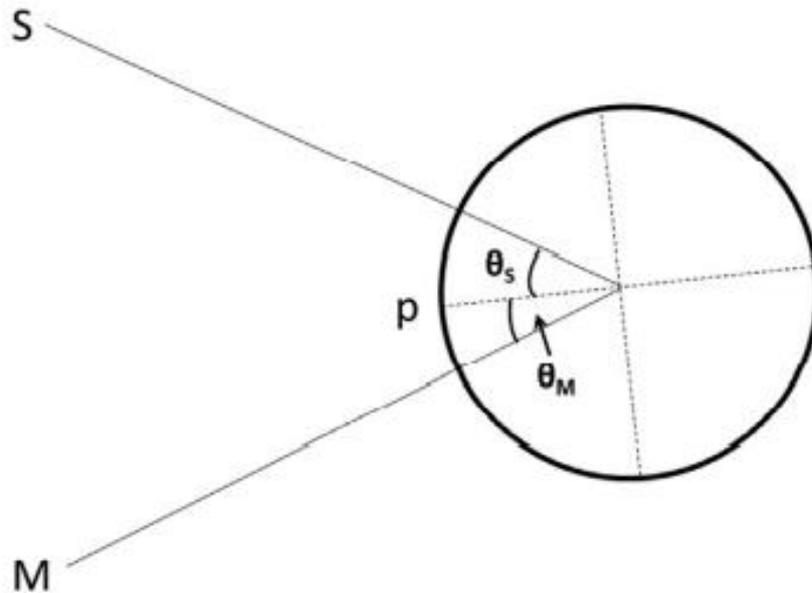


Figura 18. Diagrama de Bernoulli para os parâmetros da maré de equilíbrio combinada devido ao Sol (S) e à Lua (M). A maré combinada no ponto **p** é dada por $h \left(\cos^2 \theta_s - \frac{1}{3} \right) + H \left(\cos^2 \theta_M - \frac{1}{3} \right)$. Para uma tábua de maré, basta saber as proporções relativas da maré semidiurna solar e lunar naquele local (h e H , respectivamente) com os ângulos θ_s e θ_M obtidos no Almanaque Náutico. Fonte: Woodworth, P. L. *Tidal science before and after Newton*. In: **A Journey Through Tides**. Elsevier, 2023. p.26 (Adaptado de um diagrama em Cartwright, 1999. *Tides: A Scientific History*. Cambridge University Press: Cambridge, p.292.

Bernoulli também descobriu que Newton havia superestimado a razão entre as marés lunar e solar; usando observações francesas, chegou a um valor de 2,5, próximo das estimativas modernas (Ekman, 1993). Como sabemos agora, a variação espacial da maré no oceano real é muito mais complicada do que a da maré de equilíbrio por causa da dinâmica do oceano, mas Bernoulli descobriu que sua variação temporal em qualquer local com marés predominantemente semidiurnas (que inclui a maior parte da costa atlântica europeia) pode ser parametrizada em termos da maré de equilíbrio para uma boa aproximação com um pequeno número de ajustes. Como resultado, ele foi capaz de calcular uma tabela de marés genérica para tais locais (ver Fig. 5.4 de Cartwright, 1999).

Em 1744, o físico francês **Jean le Rond d'Alembert (1717 - 1783)** estudou a aplicação das equações de maré à atmosfera terrestre, sem contudo incluir os efeitos a rotação da Terra. O trabalho de d'Alembert na *Encyclopédie* (Enciclopédia), combinado com suas impressionantes realizações matemáticas, permitiu que ele entrasse em círculos

políticos que muitos acadêmicos só poderiam sonhar. Em 1746, um artigo apresentado por d'Alembert, que envolvia ventos planetários e a tentativa de explicar as marés atmosféricas, ganhou o prêmio da Academia de Berlim, e ele foi reconhecido por Frederico II, "O Grande", como um dos principais matemáticos da Europa. Pelo resto de sua vida, d'Alembert permaneceria um dos correspondentes favoritos do rei prussiano, e "a admiração de d'Alembert pelo rei-filósofo é [era] tão sincera quanto [era] ilimitada" (McGee, 2008, p.8).

Um fator importante em relação ao método de Bernoulli foi a publicação do *Nautical Almanac* (Almanaque Náutico) sob a direção do quinto astrônomo real **Nevil Maskelyne (1732 - 1811)**, que tinha seus próprios interesses nas marés oceânicas. Como é sabido, o Almanaque Náutico foi publicado principalmente para fins de navegação no mar usando o método de "distâncias lunares". No entanto, as tabelas de parâmetros lunares e solares contidas nas edições de 1767 e posteriores estavam em uma forma ideal para aplicação ao método de Bernoulli (Woodworth, 2023, p.26). Como resultado, logo após a publicação do primeiro Almanaque Náutico, encontra-se a primeira tabela de marés confiável e de acesso público sendo produzida para o porto de Liverpool⁵⁰ pelos irmãos **Richard (1718 - 1775)** e **George Holden (1723 - 1793)**⁵¹, ajustada a partir do método genérico de Bernoulli graças à disponibilidade de 4 anos de observações por **William Hutchinson (1715 - 1801)**, o administrador do porto de Liverpool. A família Holden tentou manter os detalhes de seu método em segredo por muitos anos. No entanto,

⁵⁰ Por muitos anos, Liverpool tem sido reconhecida como um polo de estudos sobre as marés, sendo considerada o berço da ciência de marés e nível do mar. É possível descobrir mais sobre os heróis locais que contribuíram para essa área e explorar como as observações e pesquisas realizadas desde o século XVII tornaram Liverpool um porto de importância global e uma cidade excepcional, sendo hoje um centro de cultura, comércio e inovação que continua a expandir os limites da ciência oceânica e muitas outras áreas. Veja mais em: <<https://tide-and-time.uk/tidal-science-liverpool>>. Acesso em 21/04/2023.

⁵¹ A partir de 1770, os irmãos Richard e George Holden publicaram algumas das primeiras tabelas de marés de alta qualidade e acessíveis ao público no Reino Unido. Suas tabelas de Liverpool continuaram a ser produzidas por membros da família por quase 100 anos, e o *Holden Almanack and Tide Table* foi publicado por diferentes proprietários por mais um século. Essas tabelas de previsão de marés eram tão melhores do que as disponíveis anteriormente que têm um lugar pequeno, mas importante, na história da ciência de marés do Reino Unido. Elas são de interesse especial, uma vez que surgiram em um período que, de outra forma, foi descrito como a "calmaria da ciência de marés do Reino Unido", quando os desenvolvimentos pós-Newton neste país eram modestos e a liderança intelectual do campo tinha passado para a Europa (Woodworth, 2002). Para estudos mais profundos sobre a biografia desses autores e suas contribuições nas construções das tabelas de marés, veja: Woodworth. **Three Georges and one Richard Holden: the Liverpool tide table makers**. Historic Society of Lancashire and Cheshire, 2002; Woodworth. **Some further biographical details of the Holden tide table makers**. 2003 e Proudman Oceanographic Laboratory Report N°. 58. Um último comentário quando à data de nascimento desses irmãos: Woodworth (2002) comenta que os registros paroquiais mostram que Richard foi o primeiro filho deles, batizado em 9 de março de 1718. O estilo moderno de datas foi utilizado em todo o texto. Os registros paroquiais ocasionalmente fornecem a data de nascimento, bem como o batismo, mas não neste caso.

finalmente foi mostrado por Woodworth (2002) que se trata simplesmente de uma versão daquele especificado por Bernoulli (figura 19).

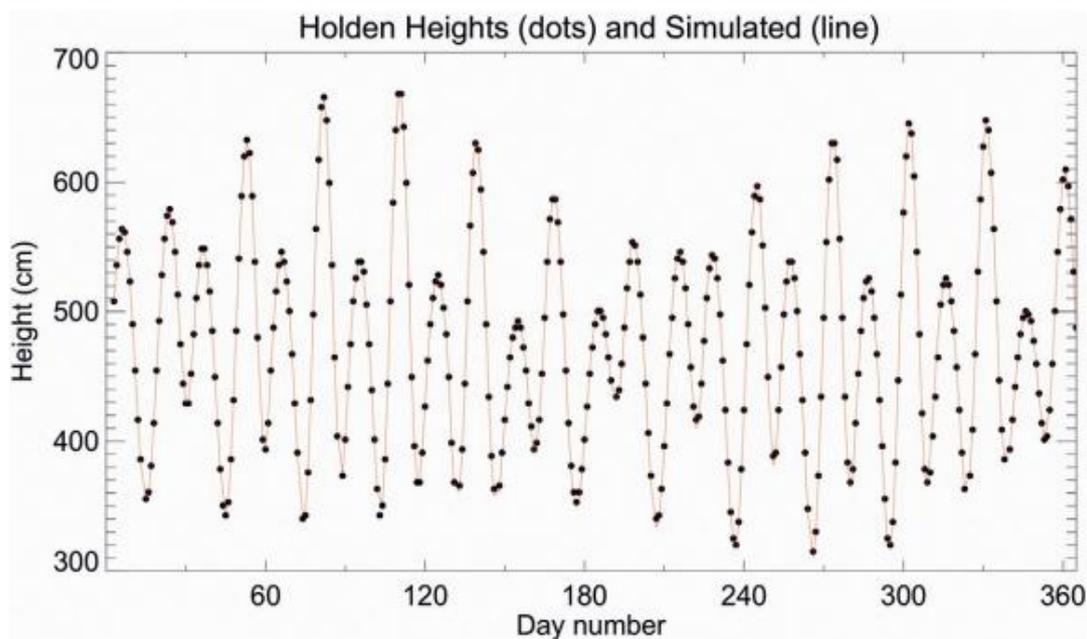


Figura 19. Alturas das preamares diurnas para 1795 a partir das tabelas de Holden (pontos) e calculadas por Woodworth (2002) usando o método de Bernoulli (linha) (Woodworth, *Three Georges and one Richard Holden: The Liverpool tide table makers*. Trans. Hist. Soc. Lancashire Cheshire, 151, 19–51, 2002).

As importantes conexões entre os personagens individuais dessa história podem ser demonstradas por referência a **James Ferguson (1797 - 1867)**, que era um astrônomo, eleito membro da Royal Society em 1763. Ele escreveu vários tratados astronômicos, dos quais um contém um “exercício” para a construção de um relógio de maré (Ferguson, 1773). Ele ganhava a vida viajando pelo país e apresentando longas séries de palestras sobre assuntos científicos. Ele visitou Liverpool em várias ocasiões e geralmente ficava na casa de Hutchinson. Acredita-se que Ferguson foi a pessoa que encorajou Hutchinson a começar suas medições de maré. Ele era um amigo de longa data de Maclaurin, com quem ele havia contatado pela primeira vez sobre aspectos da astronomia. Ferguson e Maclaurin também estavam ligados por **Murdoch Mackenzie (1712 - 1797)**, um nativo das Órcades e um “inspetor marítimo muito viajado”. Mackenzie iniciou sua carreira em hidrografia por conselho de Maclaurin, e Maclaurin o recomendou para a tarefa de pesquisar as Orkneys (Órcades)⁵², onde fez suas próprias observações sobre as marés

⁵² São um arquipélago localizado no Mar do Norte, cerca de 16 km ao largo do Norte da Escócia.

(Mackenzie, 1749). Ferguson e Mackenzie se conheceram em Edimburgo e eram muito próximos, Ferguson nomeou seu terceiro filho em homenagem a Mackenzie, e ambos foram chamados de protegidos de Maclaurin (Millburn, 1988). Acredita-se que Mackenzie foi a pessoa que apresentou Ferguson a Hutchinson. Por sua vez, Hutchinson era amigo ou colega próximo de Richard Holden, como demonstrado por seus interesses comuns em astronomia e na invenção de refletores de farol (Woodworth, 2002).

Enquanto os ensaios de Maclaurin e Bernoulli podem ter levado a benefícios práticos, os de **Leonhard Euler (1707 - 1783)**, professor de matemática em São Petersburgo, e **Antoine Cavalleri (1698 - 1765)**, professor de matemática em Cahors, foram menos úteis em retrospecto. No entanto, todos os quatro ensaios poderiam pelo menos ter o mérito de ter aprendido com o que veio antes. Euler mostrou que era a componente horizontal, e não vertical, do campo de força que levava ao movimento das marés (Aiton, 1955b). O ensaio de Cavalleri baseou-se na obra de Descartes, embora ele discordasse da teoria anterior devido à falta de uma contribuição importante das marés solares. Ele também discordou da teoria da gravitação de Newton e, em vez disso, perseverou em um desenvolvimento infrutífero da teoria cartesiana dos vórtices. Aiton fornece uma discussão detalhada da teoria do vórtice dos movimentos planetários (Aiton, 1957, 1958a, 1958b). Ele observa que Cavalleri não tinha nada realmente novo a acrescentar a esse assunto (Aiton, 1958b; cf. Woodworth, 2023).

Até agora, foi apresentada uma breve comparação das ideias contrastantes sobre as marés nos períodos pré e pós-Newton. As teorias anteriores eram frequentemente especulativas, sem rigor matemático ou qualquer outra base. Meio século depois, como evidenciado pelos ensaístas parisienses, especialmente Bernoulli e Maclaurin, mas todos os quatro até certo ponto, havia uma maior disposição em basear as teorias em observações e no trabalho anterior de outros pesquisadores. Bernoulli, em particular, beneficiou-se de sua pesquisa para criar uma tabela de marés genérica, aplicável em qualquer lugar do mundo com regime de maré semidiurno. No entanto, mostramos que a aceitação das teorias de Newton não foi universal e imediata. Além disso, após as realizações de Newton e Halley, as investigações das marés se tornaram em grande parte uma atividade da Europa continental e não da Inglaterra, culminando no final do século na teoria dinâmica das marés de Laplace com as marés consideradas como fluidos em movimento em uma Terra em rotação (Woodworth, 2023). O *Traité de Mécanique Celeste* (Tratado de Mecânica Celeste) de Laplace, escrito em cinco partes, entre 1798 e 1825, pode ser considerado quase tão importante para o estudo das marés quanto os

Principia de Newton. De fato, apontou que as Equações de Maré de Laplace (Laplace, 1775, 1776) podem ser consideradas como a primeira formulação de um modelo oceânico, neste caso um modelo de maré (Marmer, 1922, Ekman, 1993, Arbic, 2022). Enquanto isso, na Inglaterra, houve uma “estagnação da ciência das marés no Reino Unido” até o trabalho durante o século XIX pelos cientistas do Reino Unido (Rossiter, 1971). Iniciativas na medição das marés, bem como na teoria das marés, passaram para a Europa continental, especialmente a França, depois de Newton.

Os tempos e alturas das marés altas e baixas foram registrados em Brest entre 1711 e 1716, que foram enviados para análise por **Jacques Cassini (1677 - 1756)** na Academie Royale des Sciences. Medições posteriores também foram feitas em Brest e portos vizinhos. Cassini interpretou esses dados como suporte para a teoria das marés de Descartes. Cartwright (1972) e Wöppelmann et al. (2006) discutem seu uso em análises modernas. Medições estendidas de águas altas na Inglaterra tiveram que esperar as de William Hutchinson em Liverpool em 1764-1793 (Woodworth, 2023, p.29). No século XVIII, marinheiros europeus entendiam as marés em termos de apenas dois parâmetros: subida/descida e água alta completa/mudança (também conhecido como estabelecimento). O estabelecimento é o atraso entre o trânsito da Lua pelo meridiano e a próxima maré alta durante a sizígia. As informações sobre isso foram registradas nas tabelas de **Jérôme Lalande (1732 - 1807)**, em 1781. Alguém poderia pensar que a possibilidade de marés diurnas em locais distantes seria conhecida pela maioria dos capitães na época da viagem de Cook, um século depois do relatório de Davenport. Os fabricantes da tabela de marés de Holden nessa época certamente sabiam que as marés noturnas em Liverpool eram mais baixas do que as diurnas de novembro a abril (e vice-versa), principalmente devido ao atraso de fase local da constituinte diurna K_1 com uma amplitude de 11 cm, e fizeram um ajuste apropriado para suas “previsões de Bernoulli” (Woodworth, 2002)⁵³. A desigualdade diurna seria futuramente um aspecto importante da pesquisa das marés por Whewell e outros no século XIX (Woodworth, 2023).

Apesar dos avanços na formulação matemática do fenômeno das marés, as previsões calculadas no século XVIII eram imprecisas. Somente a partir do século XIX,

⁵³ Para um estudo mais detalhado e bem didático em sua apresentação, veja: Kvale. Tidal constituents of modern and ancient tidal rhythms: criteria for recognition and analyses. In: **Principles of tidal sedimentology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p.1-17 e Lefevre; le Provost; Lyard. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.105, n.C4, p.8707-8725, 2000.

com o aumento do conhecimento sobre a mecânica das oscilações forçadas em líquidos em movimento e do conhecimento mais preciso das massas dos corpos celestes envolvidos, as previsões foram ganhando precisão gradualmente. Um exemplo dessas dificuldades ocorreu em 1770, quando a barca *HMS Endeavour*, comandada por **James Cook (1728 - 1779)**, encalhou na Grande Barreira de Coral. Na tentativa de colocar o navio em flutuação na preamar seguinte, eles falharam, mas na enchente que se seguiu, o navio foi levantado o suficiente para ser facilmente retirado do encalhe. Cook aproveitou a oportunidade para observar os ciclos de maré por um período de sete semanas, notando que, durante as marés mortas, ambas as marés do dia eram semelhantes, mas durante as marés vivas, a maré subia 2,1 m no ciclo da manhã e 2,7 m ao anoitecer (Thomson, 1819; Woodworth; Rowe, 2018).

Voltemos, pois, à parte que culmina nas teorias dinâmicas das marés. A descoberta de uma teoria matemática das marés foi feita por **Pierre de Laplace (1749 - 1827)**, o matemático e astrônomo francês. Ele introduziu o potencial das marés, em uma teoria apresentada à Royal Academy of Sciences, em Paris, em 1775. Mais tarde, ele ampliou consideravelmente essa teoria e a incluiu em seu Tratado da Mecânica Celeste. Ekman (1993) afirma que na figura 20, pode-se encontrar a "fórmula das marés de Laplace", expressando o potencial de maré em função da latitude, declinação e ângulo horário⁵⁴, conforme a figura 20.

⁵⁴ Para um estudo mais detalhado sobre a obtenção das equações diferenciais do movimento de uma partícula do mar sob a atração gravitacional de um astro, como a Lua e o Sol, por Laplace, consulte Durand-Richard (2016), p.111-118. Laplace utiliza a equação geral do equilíbrio de um fluido em movimento e a condição de continuidade do fluido para obter as equações diferenciais, e apresenta as equações no livro IV, capítulo I da Mecânica Celeste.

La partie de $\alpha V'$ dépendante de l'action de l'astre L , est par le n°. 4, égale à

$$\begin{aligned} & \frac{L}{4r^3} \cdot \left\{ \sin.^2 \nu - \frac{1}{2} \cdot \cos.^2 \nu \right\} \cdot (1 + 5 \cdot \cos. 2\theta) \\ & + \frac{3L}{r^3} \cdot \sin. \nu \cdot \cos. \nu \cdot \sin. \theta \cdot \cos. \theta \cdot \cos. (nt + \pi - \downarrow) \\ & + \frac{3L}{4r^3} \cdot \cos.^2 \nu \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos. (2nt + 2\pi - 2\downarrow). \end{aligned}$$

Supposons que la partie correspondante de αy , soit égale à cette quantité multipliée par une indéterminée Q ; ce produit étant de la forme $Y^{(s)}$, ou satisfaisant pour $Y^{(s)}$, à l'équation aux différences partielles,

$$0 = \left\{ \frac{d \cdot \left\{ (1 - \mu\mu) \cdot \left(\frac{dY^{(s)}}{d\mu} \right) \right\}}{d\mu} \right\} + \frac{\left(\frac{ddY^{(s)}}{d\pi^2} \right)}{1 - \mu\mu} + 6 \cdot Y^{(s)};$$

la partie de $\alpha V'$ correspondante à l'action de la couche fluide dont le rayon intérieur étant l'unité, le rayon extérieur est $1 + \alpha y$, sera par le n°. 2, $\frac{4\pi}{5} \cdot Y^{(s)}$, ou $\frac{3}{5\rho} \cdot g \cdot Y^{(s)}$; l'équation $\alpha g y = \alpha V'$, donnera donc,

$$\begin{aligned} \alpha y = & \frac{L}{4r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5\rho}\right)} \cdot \left\{ \sin.^2 \nu - \frac{1}{2} \cdot \cos.^2 \nu \right\} \cdot (1 + 5 \cdot \cos. 2\theta) \\ & + \frac{3L}{r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5\rho}\right)} \cdot \sin. \nu \cdot \cos. \nu \cdot \sin. \theta \cdot \cos. \theta \cdot \cos. (nt + \pi - \downarrow) \\ & + \frac{3L}{4r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5\rho}\right)} \cdot \cos.^2 \nu \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos. (2nt + 2\pi - 2\downarrow). \end{aligned}$$

Dans l'hypothèse que nous considérons, si le soleil et la lune sont en conjonction avec la même déclinaison; alors, l'excès de la haute mer relative à midi, sur la basse mer qui la suit, sera

$$\frac{3L}{2r^3 \cdot g \cdot \left(1 - \frac{3}{5\rho}\right)} \cdot (1 + e) \cdot \sin.^2 \theta \cdot \cos.^2 \nu \cdot \{1 + 2 \cdot \text{tang. } \nu \cdot \text{cot. } \theta\},$$

Figura 20. Fórmula das marés de Laplace como aparece no *Mécanique céleste* (1799).

Fonte: Laplace Pierre-Simon de, 1799-1825, *Traité de Mécanique Céleste*, vol. 2, livre

4 (1799), in OC 2, 1878, vol. 5, livre 13 (1825), in OC 5, 1882. Disponível em:

https://books.google.com.br/books?redir_esc=y&hl=fr&id=DcwE1g8xRvMC&q=Supposons#v=onepage&q&f=false. Acesso: 04/04/2023.

De acordo com Laplace,

"The three preceding terms give rise to three different types of oscillations. The periods of the oscillations of the first type are very long; they are independent of the rotational motion of the Earth, and depend only on the motion of the celestial body L in its orbit. The periods of the oscillations of the second type depend mainly on the rotational motion t of the Earth; they are one day approximately. Finally, the periods of the oscillations of the third type depend mainly on the angle $2t$; they are about half a day." (Ekman, 1993, p.590).

Assim, Laplace mostrou que a maré é matematicamente separável em três tipos diferentes de marés: longas periódicas, diurnas e semidiurnas. Desde então, essa separação tem sido a pedra angular da teoria das marés. Além disso, no mesmo trabalho Laplace foi o primeiro a tratar as marés oceânicas como um problema de água em movimento em vez de água em equilíbrio. Ele deduz um conjunto de equações para o movimento de um fluido em 3 dimensões sobre um globo esférico (a Terra), fazendo uso: da equação de continuidade (conservação da massa para líquidos incompressíveis), da equação de movimento de Newton aplicada ao fluido sobre a esfera, e da expressão da força da gravidade de Newton para indicar a ação do astro sobre o fluido, na equação de movimento dele. A força da gravidade é representada em suas equações por um potencial e ele faz um estudo para as soluções dessas equações considerando um potencial escrito como somas de funções trigonométricas, cujos ângulos são funções do tempo; expressa, assim, o potencial como soma de funções periódicas, o que reproduz o comportamento dos astros em relação a um lugar específico da Terra. Ao estudar as soluções possíveis das equações para os potenciais gravitacionais dos astros descritos dessa forma, Laplace identifica que deve haver pelo menos três tipos de ondas de marés, sendo uma delas a de período semidiurno (Dantas, 2020). Suas equações hidrodinâmicas, descrevendo a propagação das ondas de maré através do oceano, não puderam ser resolvidas na prática até a invenção do computador.

A dificuldade de calcular as marés devido às muitas variáveis envolvidas serviu de inspiração e fundamentação para os futuros estudiosos desse fascinante fenômeno. Não somente a “sociedade científica” da época estava preocupada em formular teorias científicas, mas a própria sociedade, a qual dependia dos portos para o deslocamento de pessoas e mercadorias. As observações empíricas e específicas para cada local eram usadas para produzir as tábuas de marés. A descrição teórica de Laplace e o crescimento das observações das marés nas diversas partes do globo contribuíram para uma nova formulação para o problema das marés, que não devem ser vistas como um fenômeno

único, mas compreendidas como fenômenos locais unidos pela força gravitacional do Sol e da Lua. Essa compreensão se aprofundou no século XIX com a ampliação e os métodos de sistematização de dados obtidos sobre características das marés nos diversos oceanos.

“A formulação mais antiga do problema da maré envolveu a determinação da agência por meio da qual a lua controlava a maré. Com o anúncio da lei da gravitação, o problema mudou para derivar uma fórmula matemática para expressar completamente a subida e descida da maré em qualquer ponto em resposta às forças produtoras de maré do sol e da lua, isso envolvendo a suposição de que a maré representa um fenômeno mundial. Agora chegamos a uma mudança adicional no reconhecimento de que os fenômenos das marés, como os encontramos na natureza, envolvem vários problemas. Do jeito que as coisas estão agora, podemos formular os problemas da maré da seguinte maneira: dadas as forças produtoras da maré do sol e da lua e a forma, tamanho, profundidade e localização de uma bacia oceânica ou outro corpo de água; obtenha-se os fenômenos de marés resultantes”. (Marmer, 1922, p.214).

Em 1823, **Thomas Young (1773 - 1829)**, escreveu um longo artigo sobre marés para o *Supplement* de seis volumes da *Encyclopaedia Britannica*, editado por Macvey Napier (Young, 1823)⁵⁵. Na verdade, para este *Supplement*, ele escreveu nada menos que 63 artigos, grandes e pequenos, sobre uma ampla gama de tópicos; veja [1, Cap. 12]. Muitos apareceram anonimamente, pois Young não queria ser considerado negligente com sua prática médica. Mas mais tarde ele permitiu que sua autoria fosse identificada: seu artigo sobre marés apareceu com as iniciais "A.L.", mas ele é identificado em outro lugar no volume como o autor desse e de outros artigos. Dez anos antes, ele havia publicado *A Theory of Tides* (Uma teoria das marés) no *Nicholson's Journal* (Young, 1813)⁵⁶. Em grande parte, explorou uma analogia com o movimento de um pêndulo sujeito a força periódica (Craik, 2010, p.106). Em suas próprias palavras:

“The oscillations of the sea and of lakes, constituting the tides, are subject to laws exactly similar to those of pendulums capable of performing vibrations in the same time, and suspended from points which are subjected to

⁵⁵ Young T = “A.L.” (1823) Article “Tides”, Supplement to the 4th, 5th and 6th edns of Encyclopaedia Britannica, 6 vols (1815–1824), Napier M (ed), vol 6, pp 658–675. Constable, Edinburgh. Also in [8], 2:291–335

⁵⁶ Young T = “E.F.G.H.” (1813) A theory of tides, including the consideration of resistance. Nicholson's J 35:145–159, 217–227. Also in [8], 2:262–290.

compound regular vibrations of which the constituent periods are completed in half a lunar and half a solar day.” (Ibid., 8, v.2, p.280).

Ele também observou a intensificação não linear de ondas e ondas de maré, observando que:

“The slight difference of the ascent and descent of the tide remarked by Laplace in the observations at Brest [in Book IV of *Mécanique céleste*] may be explained by comparison with the form of a common wave, which, where the water is shallow, is always steeper before. This circumstance arises from the greater velocity with which the upper parts of the wave advance, where the differences of the depths become considerable ... and it is, perhaps, somewhat increased by the resistance of the bottom. Where the tide travels far in shallow channels, its irregularity of inclination increases more and more: for instance, in the Severn, it assumes the appearance of a steep bank.” (Ibid., 8, v.2, p.287).

Laplace havia calculado as marés em um oceano imaginário de profundidade variável. Young expandiu a teoria para o caso mais geral de um oceano irregular que cobria apenas parte da superfície da Terra e tentou incluir o efeito preciso da fricção hidráulica nos cálculos. Young observou que a linha das marés contemporâneas geralmente não está na direção exata do meridiano, como é suposto nas teorias de Newton e Laplace. Ele também notou que a onda principal se curva ao redor dos continentes da África e Europa de uma maneira semelhante à refração em uma costa. Young explorou a analogia entre marés e pêndulos forçados e incorporou os efeitos de fricção já explorados em suas *Hydraulic Investigations* (Investigações Hidráulicas). Ele examinou as oscilações livres de um pêndulo cicloide com resistência proporcional ao quadrado da velocidade (Craik, 2010, p.107).

A maré é uma onda longa que se propaga na superfície terrestre e está sujeita a diversas barreiras que mudam o seu percurso. Devido à presença de feições na bacia oceânica, um dos fenômenos que acontecem com a onda de maré é a reflexão. Essa reflexão forma ondas estacionárias, que juntamente com a rotação da Terra geram sistemas de pontos anfidrômicos, intimamente relacionado com a força de Coriolis (UNESCO, 1985). Os pontos anfidrômicos são regiões onde a maré é nula, ou seja, onde não há a mudança do nível da água causado pela maré. Os pontos anfidrômico estão espalhados por todos os oceanos, formando um sistema anfidrômico. A partir desses pontos, a maré tem uma propagação com sentido horário no hemisfério sul e anti-horário

no hemisfério norte. Os pontos podem ser interligados através das linhas cotidais, que indicam quais pontos estão em mesma fase de seu ciclo. Esse ciclo se completa quando a crista da onda de maré alta gira em torno de um ponto anfidrômico. Em volta do ponto anfidrômico também existem as linhas de co-amplitude, que indicam o valor da amplitude da onda de maré, sendo essa, crescente ao se afastar do ponto, demonstrado na figura 21 (Open University Course Team, 2002).

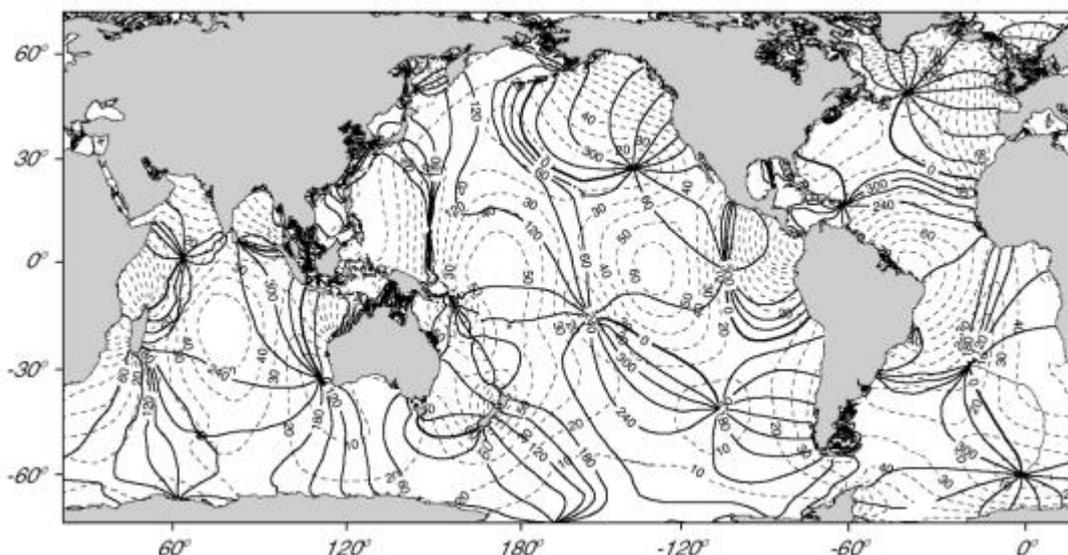


Figura 21. Sistema global dos pontos anfidrômicos, onde as linhas contínuas são as linhas cotidais e as pontilhadas são as de co-amplitude. Fonte: Stewart, 2004.

Em 1833, **William Whewell (1794 - 1866)** sistematizou dados disponíveis sobre marés em diferentes portos num mapa de linhas cotidais, que ligavam pontos onde as marés altas ocorriam ao mesmo tempo. Segundo Whewell, as marés originavam-se no oceano Antártico e progrediam para o norte, o que ficou conhecido como Teoria da Onda Progressiva. No entanto, Whewell não tinha garantia sobre as linhas que elaborou em seus desenhos, uma vez que não dispunha de dados de muitos portos e nem estes eram tão precisos. Apesar de Whewell ressaltar que queria que os dados mostrassem as marés como elas ocorriam, sua teoria estava subjacente à forma como o mapa foi construído, pois Whewell unia pontos muito distantes em suas linhas, a partir dos pressupostos da ideia de onda progressiva. A teoria de Whewell explicava muitas observações das marés e foi bem aceita pelos estudiosos da época, o que permitiu a mobilização de observações simultâneas em vários portos. No entanto, com o tempo, a ampliação dos dados mostrou que a teoria tinha limitações, como não explicar as direções diferentes das marés (Dantas, 2020).

O aspecto da fricção das marés, completamente novo até o momento, foi introduzido pelo cientista e filósofo alemão **Immanuel Kant (1724 - 1804)**. Em 1754, ele escreveu um artigo na revista semanal Königsberg chamado *Ob die Erde in ihrer Umdrehung um die Achse einige Veränderung erlitten habe* (Se a Terra sofreu alguma mudança em sua rotação em torno do seu eixo). Kant percebe aqui que o atrito causado pelo movimento das marés do oceano em relação à Terra pode causar um retardo acentuado na rotação da Terra. Ele descobre que isso continuará até que a Terra sempre vire para o mesmo lado em direção à Lua, ou seja, até que a duração do dia seja igual a um mês. Kant escreve:

“One can no longer doubt that the everlasting motion of the ocean from evening towards morning [from east towards west], a real and considerable force, will also always contribute something to decreasing the rotation of the Earth around its axis. This effect must inevitably become noticeable after a long period of time.

As the Earth gradually approaches the standstill of its rotation, the period of this change will come to an end when the Earth's surface comes to a rest in relation to the Moon, i.e. when the Earth turns around its axis in the same time as that in which the Moon moves around the Earth.” (Ekman, 1993, p.590).

Kant admite que não pode apresentar nenhuma evidência para apoiar sua hipótese, mas deixa isso como uma tarefa para outros (Ekman, 1993, p.590).

Embora Kant afirmasse que seria "um preconceito muito vergonhoso" não se preocupar com o atrito das marés, quase ninguém o fez até cem anos depois, em 1853. Então **William Ferrel (1817 - 1891)**, oceanógrafo e meteorologista americano, apontou que a fricção das marés causando um alongamento do dia (unidade de tempo utilizada) levaria a uma aparente aceleração nos movimentos dos corpos celestes. Ele tentou calcular esse efeito para o movimento da Lua, assumindo que a maré oceânica semidiurna tinha um atraso médio de fase de 30° (2 h) (Ekman, 1993).

Halley (1693) já havia detectado uma pequena aceleração da Lua através de registros antigos de eclipses solares, mas se sabia que era causada pelas forças gravitacionais do Sol e dos planetas. Ferrel explicou por que o efeito da aceleração lunar não foi observado usando a ideia popular da época de que a Terra estava esfriando e, portanto, se contraindo, o que faria a Terra girar mais rápido. Ferrel presumiu que os efeitos da fricção das marés e do resfriamento da Terra se equilibravam, de modo que

nada podia ser observado. Um erro foi encontrado nos cálculos da gravidade da Lua ao mesmo tempo em que Ferrel publicou seu artigo. Corrigindo o erro, descobriu-se que metade da aceleração observada não podia ser explicada. Em 1864, Ferrel afirmou que essa aceleração residual poderia ser explicada pelo atrito das marés, causando um alongamento do dia de 1 segundo em 300 000 anos, com um atraso de fase de apenas 2° (8 min) (Ekman, 1993). O artigo de Fresnel saiu no *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, vol. 6, maio, 1862 – maio, 1865, p.379-383 (veja figura 3 de Ekman, 1993, p.592). Como a publicação da obra de Ferrel ocorreu na América, isso pode ter levado ao seu desconhecimento na Europa da época (Ekman, 1993, p.592).

Em 1865, o astrônomo francês **Charles Delaunay (1816 - 1872)** retomou o desenvolvimento da teoria da perturbação lunar e chegou a uma conclusão semelhante à de Ferrel, sem aparentemente ter conhecimento de seu trabalho. Foi por meio de Delaunay que a questão da fricção das marés se tornou amplamente conhecida nos círculos científicos (Ekman, 1993).

Logo depois, em 1866, o astrônomo e geodesta inglês **George Airy (1801 - 1892)** comentou o artigo de Delaunay. Airy descobriu que o atrito das marés, além de alongar o dia, deveria causar uma distância crescente da Lua da Terra. Mas as dificuldades em lidar com esses problemas eram esmagadoras; isso é muito bem ilustrado por Airy em um exemplo simples:

“Conceive, for instance (as a specimen of a large class), a tide-mill for grinding corn. The water, which has been allowed to rise with the rising tide, is not allowed to fall with the falling tide, but after a time is allowed to fall, thereby doing work, and producing heat in the meal formed by grinding the corn. I do not doubt that this heat is the representative of vis viva [kinetic energy], lost somewhere, but whether it is lost in the rotation of the Earth or in the revolution of the Moon, I am quite unable to say.” (Ekman, 1993, p.593).

Desde então, o fenômeno da fricção das marés tem sido objeto de discussões científicas mais ou menos contínuas.

Vale uma breve apresentação, nesse recorte histórico, sobre a descoberta das marés terrestres, tendo em vista que o conceito de marés terrestres abriu novas perspectivas para a pesquisa sobre o atrito das marés. Na segunda metade do século XIX, a discussão sobre a constituição interna da Terra era intensa. Uma questão levantada era se a Terra era fluida ou sólida. O físico inglês **William Thomson (1824-1907)**, também

conhecido como **Lord Kelvin**, desenvolveu uma teoria que defendia que a Terra era um sólido elástico. Essa teoria foi apresentada em um artigo intitulado *On the Rigidity of the Earth* (Sobre a Rigidez da Terra) publicado nas *Philosophical Transactions* da Royal Society de Londres em 1863 (veja figura 4 de Ekman, 1993, p.594)⁵⁷. A partir dos seus cálculos, Thomson concluiu que:

“Hence it is obvious that, unless the average substance of the earth is more rigid than steel, its figure must yield to the distorting forces of the moon and sun, not incomparably less than it would if it were fluid.” (Ekman, 1993, p.593).

Assim, Thomson propõe a existência das marés terrestres. Thomson propôs que as marés terrestres poderiam ser detectadas e avaliadas através da observação das marés oceânicas de longo período. Ele argumentou que as marés terrestres reduziriam a amplitude das marés oceânicas observadas, sendo que apenas as de longo período poderiam ser calculadas teoricamente. As marés diurnas e semidiurnas, por sua vez, eram muito influenciadas por fenômenos de ressonância e, portanto, mais difíceis de serem estudadas (Ekman, 1993).

Mais ou menos na mesma época, em 1868, Thomson introduziu a poderosa ferramenta de análise harmônica na teoria das marés. Isso o levou a inventar, quatro anos depois, a primeira máquina de previsão de marés; ela poderia lidar com 10 constituintes de maré (figura 22).

⁵⁷ Pode ser acessada em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspl.1862.0014>. Acesso em 24/04/2023.



Figura 22. Máquina de previsão de marés de 10 componentes de 1872-3, concebida por Sir William Thomson (Lord Kelvin) e projetada por Thomson e colaboradores, no Science Museum, South Kensington, Londres. Disponível em: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/DSCN1739-thomson-tide-machine.jpg>. Acesso em 24/04/2023.

Thomson, reformulou as equações de Laplace em termos de vorticidade⁵⁸, o que permitiu soluções que descrevem ondas estacionárias costeiras excitadas pela maré, conhecidas por ondas de Kelvin (Cartwright, 1999; Case, 2000).

⁵⁸ A vorticidade é uma medida usada na mecânica dos fluidos e na meteorologia para avaliar a rotação das partículas de um líquido em movimento.

George Darwin⁵⁹ (1845 - 1912), um dos alunos de Thomson, aplicou as ideias do físico em suas pesquisas sobre astronomia e geofísica. Ele analisou observações de maré em 14 portos na Inglaterra, França e Índia, totalizando 33 anos de observações. Utilizando as marés lunares quinzenais e mensais, Darwin encontrou a razão entre a altura da maré oceânica na Terra elástica e na Terra rígida, o que atualmente denotamos como γ . Seu valor obtido foi de $\gamma = 0,68 \pm 0,11$, que concorda bem com os valores modernos. Mas o mais importante foi que Darwin demonstrou que γ era significativamente menor do que 1, provando assim a existência das marés terrestres. Esse resultado histórico foi publicado pela primeira vez em 1882 em *A Numerical Estimate of the Rigidity of the Earth* (Uma estimativa numérica da rigidez da Terra) na revista *Nature* (ver figura 5 de, Ekman, 1993, p.595).

O relato completo da análise das marés foi feito no ano seguinte, donde ele conclui:

“These results really seem to present evidence of a tidal yielding of the earth's mass, showing that it has an effective rigidity about equal to that of steel.”
(Ekman, 1993, p.594).

Como já relatado e pode se perceber, com efeito, o conceito de marés terrestres auxiliou nas pesquisas sobre o atrito das marés. Considerando a Terra um fluido viscoso, George Darwin estudou o atrito das marés no interior da Terra, em vez de nos oceanos. Darwin descobriu, como Airy havia feito no caso do oceano, que o atrito das marés não apenas retarda a rotação da Terra, mas também faz com que a Lua se afaste da Terra:

“The moon-earth system is, from a dynamical point of view, continually losing energy from the internal tidal friction. One part of this energy turns into potential energy of the moon's position relatively to the earth, and the rest develops heat in the interior of the earth.” (Ekman, 1993, p.595).

Os cálculos de Darwin, publicados em 1879 como o primeiro de uma longa série de artigos sobre o assunto, mostraram que, nos primeiros dias da história da Terra, a Lua deve ter estado muito mais próxima da Terra do que agora. Assim, descobriu-se que o atrito das marés desempenha um papel fundamental na evolução do sistema Terra-Lua; descobriu-se até que levantava questões quanto à própria origem do sistema Terra-Lua.

⁵⁹ Filho de Charles Darwin.

Três anos depois, em 1882, Darwin tentou calcular o efeito do carregamento do oceano na crosta elástica. Isso o levou a prever a existência de marés de carga, ou seja, marés terrestres devido ao carregamento das marés oceânicas (Ekman, 1993).

Para calcular as marés de carga, seriam necessárias cartas cotidais globais das marés oceânicas. O primeiro mapa realista desse tipo foi construído pelo oceanógrafo americano **Rollin Harris (1863 - 1918)**, que descobriu e explicou, em 1904, o caráter anfidrômico geral das marés oceânicas. Isso se deu um pouco depois de Whewell, quando aos poucos pesquisadores começaram a considerar que as características das marés observadas em determinadas costas marinhas não eram tão bem explicadas pela ideia de uma onda progressiva advinda do Oceano Antártico, e começaram a analisar a possibilidade das marés naquelas localidades e em outros locais resultarem da formação de ondas do tipo estacionárias. Ondas estacionárias apresentam formas em que as suas posições de máximo e mínimo não variam com o tempo, ou seja, são ondas em que cada ponto do meio onde ela se forma está em fase com o outro. Esse, de fato, seria outro tipo de onda que poderia se formar nos oceanos, bacias, estuários, a partir das forças perturbadoras periódicas da Lua e do Sol sobre as águas do planeta. A ideia de que as marés pudessem se formar com esse padrão foi defendida principalmente por Harris, a partir de um artigo publicado em 1901, onde apresentou um estudo matemático dos modos de vibração de corpos de água. Harris apresentou também um mapa de linhas cotidais fazendo uso dos dados adicionais acumulados desde o mapa de Whewell, e partindo da interpretação de que em oceano aberto teríamos a formação de ondas estacionárias em consequência da perturbação gravitacional da Lua e do Sol (Marmer, 1928). Apresentou, ainda, o conceito de pontos anfidrômicos, que são correspondentes a nodos das ondas estacionárias, onde as marés teriam amplitude nula ou próximo de nula. Segundo Camargo e Harari (2015), a partir desse ponto, a propagação faz com que as linhas de mesma fase da oscilação sejam radiais em relação a ele.

A Teoria de Ondas Estacionárias (de Harris), diferente da Teoria da Onda Progressiva (de Whewell), expressa que as marés nos diversos locais não possuem uma origem única, ou seja, não resultam da propagação de uma maré específica que se formou num determinado local, mas originam-se de marés distintas, em cada região que estejamos interessados em estudar. A Lua e o Sol ainda são considerados os agentes astronômicos causadores do fenômeno, conforme pensado por Newton, no entanto, cada região dos oceanos no globo responde vibrando de maneira específica em relação às perturbações que esses astros irão causar. Tais perturbações irão gerar ondas estacionárias

com características diferentes, em razão de muitas variáveis, tais como como o relevo da costa, profundidade das águas, época do ano, presença de sedimentos, temperatura da água, entre outros. A Teoria de Ondas Estacionárias recebeu algumas críticas pesadas de cientistas que acreditavam de forma aficionada na teoria que Whewell havia proposto. Lidou ainda com certo preconceito da comunidade europeia que estudava marés. No entanto, certo tempo depois, o prestigiado matemático e físico francês **Poincaré (1854 - 1912)**, em seu *Leçons de Mécanique Céleste: Théorie des Marées* (Lições de Mecânica Celeste: Teoria das Marés) apresentou análises bem convincentes e sistematizadas sustentando a teoria de Harris, o que fez com que esta merecesse novos olhares entre os que ainda eram céticos em relação a ela (Dantas, 2020 – **grifo nosso**).

A partir daqui a evolução da pesquisa sobre as marés terrestres e o papel de diferentes cientistas em contribuir para a compreensão desse fenômeno pode ser resumida, cronologicamente, da seguinte forma: **Oskar Hecker (1864 - 1938)** observou a inclinação de maré em 1907, concordando com o resultado de Darwin. **Augustus Love (1863 - 1940)** descreveu as deformações elásticas da Terra em 1909. **Wilhelm Schweydar (1877 - 1959)** observou as marés terrestres com um gravímetro em 1914. **Arthur Doodson (1890 - 1968)**, baseando-se nos desenvolvimentos anteriores e na teoria lunar de Ernest William Brown (que descreve os movimentos da Lua), fez uma expansão harmônica do potencial das marés em 1921. Ela consistia em nada menos que 386 componentes de diferentes períodos e amplitudes que seriam determinantes para a análise de marés numa determinada região! (Ekman, 1993; Casotto; Biscani, 2004; McCully, 2006), agregando valor a Teoria das Ondas Estacionárias de Harris. Alguns dos seus métodos continuam em uso na previsão das marés (Moyer, 2003). **Harold Jeffreys (1891 - 1989)** apresentou evidências do retardo secular da rotação da Terra causado pelo atrito das marés em mares rasos em 1920. Era uma extensão de uma teoria publicada no ano anterior pelo meteorologista inglês **Geoffrey Taylor (1886 - 1975)**, cuja ideia, curiosamente, surgiu de uma semelhança dinâmica entre a fricção das marés no fundo de um oceano e a fricção do vento em um solo coberto por grama. Ainda introduziu um efeito de maré diferente na rotação da Terra em 1928. **Chaim Leib Pekeris (1908 - 1993)** resolveu o problema das marés nos poços⁶⁰ em 1940. **Gustav Herglotz (1881 - 1953)** e **Leander Miller Hoskins (1860 - 1937)** desenvolveram uma teoria para deformações elásticas da Terra não homogênea em 1905 e 1920, respectivamente. Resultou em uma

⁶⁰ Um problema sem solução desde os tempos de Posidônio e Straborn. Para mais detalhes, veja Ekman, 1993, p.597.

equação diferencial de sexta ordem que estava, naquela época, além da capacidade de qualquer pessoa resolver. **Hitoshi Takeuchi (1920 - 2004)**, em 1950, resolveu numericamente o problema em três equações diferenciais de segunda ordem em 1950 (Ekman, 1993).

Hoje em dia, as tábuas de marés são acessadas *online*. Os dados obtidos passam por análises computacionais e nos informam o horário em que a maré estará cheia ou seca, qual será a altura máxima e mínima, qual a posição da Lua e do Sol no momento, e outras informações. Essas informações são úteis para atividades como pesca, exploração de petróleo, atracação de embarcações e pelos turistas a fim de aproveitar satisfatoriamente suas viagens. A compreensão atual das marés atribui sua origem à força gravitacional da Lua e do Sol, juntamente com vários outros fatores que agem juntos para gerar o fenômeno das marés em uma região específica.

Até aqui, percebe-se que o panorama geral e atual da teoria das marés deve levar em conta o modelo dinâmico do fenômeno. Mais de 20 modelos globais de marés oceânicas foram desenvolvidos desde 1994, principalmente como consequência da análise das medições altimétricas precisas de Topex/Poseidon e como resultado de desenvolvimentos paralelos em modelagem numérica de marés e assimilação de dados. Shum et al. (1997) fornece uma avaliação de precisão de 10 desses modelos de maré e discute seus benefícios em muitos campos, incluindo geodésia, oceanografia e geofísica. Um estudo revisional sobre as mudanças nas amplitudes das marés devido a causas não astronômicas, levando em consideração o modelo dinâmico das marés, destaca seis fatores principais que podem causar mudanças nas estatísticas de maré medidas em escalas locais: (1) dissipação e mistura turbulenta; (2) profundidade de canais e planos; (3) área de superfície, largura e convergência; (4) ressonância e reflexão; (5) vazão do rio; e (6) mudanças na instrumentação. Discute-se ainda outros oito possíveis mecanismos regionais/globais: (1) tectônica, (2) profundidade da água, (3) posição da costa, (4) extensão da cobertura de gelo (marinho), (5) rugosidade do fundo do mar, (6) estratificação oceânica e marés internas, (7) interações não lineares (atrito ou tríade) e (8) forçamento radiacional (Haigh et al., 2020). Woodworth (2010) ainda cita que as marés reais dos oceanos podem mudar por um ou mais motivos. Um outro estudo (Jänicke et al., 2021), apresenta uma análise das mudanças na amplitude das marés na região do Mar do Norte entre 1958 e 2014. Os autores utilizaram dados de estações maregráficas de longa duração e aplicaram técnicas estatísticas para avaliar as mudanças nas amplitudes das marés em diferentes períodos ao longo dos anos. Os autores documentaram um caso

excepcional de grande escala espacial de mudanças na amplitude das marés no Mar do Norte, apresentando tendências pronunciadas entre -2,3 mm/ano nos medidores de maré no Reino Unido e até 7 mm/ano na baía alemã entre 1958 e 2014.

As marés tiveram um lugar bastante especial na história da ciência. Do ponto de vista puramente prático, a capacidade das pessoas que navegam no mar de prever os horários e alturas da maré alta é extremamente valiosa. Os padrões de maré podem ser complexos, mas a previsão é sempre possível para qualquer lugar específico apenas analisando cuidadosamente os registros das marés passadas. Tal análise deve ter sido uma das primeiras instâncias de observação paciente que produziu conhecimento útil sobre o mundo físico. Civilizações antigas, sem dúvida, perceberam uma ligação entre as marés e a Lua, tanto em sua posição no céu quanto em sua idade no mês. De um ponto de vista mais teórico, esse movimento do mar conectado astronomicamente implorava por uma descrição científica, e alguns dos maiores nomes da ciência aplicaram suas mentes ao assunto. Hoje, previsões precisas de maré estão disponíveis em grandes tabelas anuais para centenas de locais costeiros ao redor do mundo, e parece que as marés respeitosamente cederam todos os seus segredos. Na verdade, essas tabelas ainda são feitas sobre extrapolações de registros passados, e a teoria só foi capaz de adicionar sofisticação ao método antigo. É ainda impossível gerar tabelas precisas de maré a partir dos primeiros princípios, não porque haja problemas fundamentais com a teoria, mas porque seria necessária uma extensa pesquisa do leito do mar, juntamente com uma potência de computação verdadeiramente formidável. Como tabelas perfeitamente boas já podem ser feitas, este exercício mal foi visto como um dos principais problemas da ciência do século XX. Uma consequência infeliz desse estado de coisas é que a teoria das marés se tornou algo como um beco sem saída, mal compreendido pelo público em geral e provavelmente pela maioria dos cientistas. Antes de se considerar os efeitos das forças de maré sobre as pessoas, no entanto, precisa-se de uma compreensão decente do porquê os mares respondem como o fazem. Nesse sentido, o sintético texto cronológico revisa e compila as teorias estáticas e dinâmicas das marés desenvolvidas por cientistas ao longo do tempo, desde a Grécia Antiga até os dias atuais. Espera-se que esse capítulo motive os professores da Educação Básica a estudarem as referências aqui fornecidas, buscando contribuir mais nesse campo da História e Filosofia da Ciência. A revisão também destaca a importância histórica, social, econômica e geográfica das marés oceânicas, o que pode ser um incentivo para os alunos se interessarem pelo assunto e compreenderem como a física está presente em nossas vidas cotidianas. Finalmente, o texto pode

contribuir para a literatura nacional de história da ciência, fornecendo uma revisão atualizada e completa das principais (se assim pudermos nos referir) teorias estáticas e dinâmicas das marés. Isso pode ser valioso para pesquisadores e estudiosos que desejam entender melhor a evolução do pensamento científico sobre o assunto ao longo do tempo.

A seguir, oferecemos um resumo histórico das principais explicações das marés (quadro 1).

Nome	Resumo de sua contribuição
Aristóteles (384 – 322 a.C.)	Séc. III a.C.: propôs que o Sol movia os ventos, que por sua vez empurravam as águas do mar, e que os grandes rios que fluem para o oceano são vistos como a causa das marés.
Píteia de Massália (380 – 310 a.C.)	Séc. III a.C.: identificou que a amplitude dessas marés variava conforme as fases da Lua.
Seleuco de Selêucia (190 – 150 a.C.)	Séc. II a.C.: explicou que as duas fontes de perturbação – a translação da Lua e a rotação da Terra – atuavam juntas para criar as marés por meio de uma pressão do ar.
Posidônio (135 – 51 a.C.)	Séc. I a.C.: distinguiu os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribuindo-lhe a influência dos astros e, particularmente, a Lua como causa.
Quintus Curcius (século I)	Séc. I d.C.: descreve o primeiro registro de um contato significativo com as marés, sendo fora do ambiente mediterrâneo.
Straborn (63 a.C. – 25 d.C)	23 d.C.: apresentou uma síntese das observações das marés feitas até aquele momento.
Plínio, O Velho (23 – 79 d.C.)	Séc. I d.C.: explica que a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua.
Cláudio Ptolomeu (90 – 168 d.C.)	Séc. II d.C.: ofereceu uma visão astrológica sobre a relação entre o movimento da Lua e as marés.

Sexto Empírico (160 - 210) e Plotino (205 – 270)	Por meio da “simpatia”, explicaram a influência da Lua nas marés.
Beda, O Venerável (673 – 735)	725 d.C.: Explicou que o vento poderia adiantar ou atrasar a maré, e foi o primeiro a se referir ao estabelecimento de um porto, ou seja, o atraso na ocorrência da maré pode ser diferente em portos da mesma costa.
Zakariya al Qazwini (1203 – 1283)	1235: afirma que o fluxo da maré é causado pelo Sol e pela Lua que aquecem as águas, fazendo com que elas se expandam.
Federico Chrisogono (1472 – 1538)	1528: observou que as marés são influenciadas pelos efeitos combinados do Sol e da Lua, sendo somados durante a Lua Cheia e a Lua Nova e subtraídos durante a quadratura. No entanto, ele considerou erroneamente que a influência das marés é cancelada durante a quadratura, o que difere da teoria moderna. Deduziu o ciclo anual das marés, mas deixou de considerar a diferença entre as duas marés diárias.
Federico Delfino (1477 - 1547), Ludovico Boccaferri (1482 - 1545), Girolamo Cardano (1501 - 1576), Annibale Raimondo (1505 - 1591), Claude Duret (1570 - 1611), Giovanni Paolo Galluccio (1538 - 1621) e Florido Ambrosio Patavani	Final do século XVI e início do século XVII: basearam-se explicitamente nas teorias de Chrisogono em suas próprias obras sobre marés. Todos esses autores explicaram os fenômenos das marés com base na posição do Sol e da Lua.
Júlio César Scaliger (1484-1558)	1557: sugeriu que não só a Lua, mas também a oscilação da água do mar entre as costas da América e Europa eram responsáveis pelo fluxo das marés.
Andreas Cesalpino (1519 – 1603)	1571: o fluxo e refluxo do mar seria um movimento libratório causado pela Terra, e não diretamente pelo fluido.

Girolamo Borro (1512 – 1592)	1577: fez relações das marés com a Lua, mas justifica a ação lunar a partir de sua luminosidade, que provocaria o aquecimento das águas causando o fluxo e o refluxo do mar.
Francesco Patrizi (1529 - 1597)	1591: forneceu uma história pormenorizada das teorias sobre as causas das marés; citou a investigação de Chrysogonos sobre a relação temporal entre as marés e o movimento da Lua; desenvolveu uma teoria da simpatia entre a Lua e as águas marinhas, pela qual a Lua provoca a distância, por afinidade, uma febre das águas marinhas que, por isso, se elevam.
Paolo Sarpi (1552 – 1623)	1592: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra como sendo um círculo excêntrico onde o Sol não está em seu centro.
Johannes Kepler (1571 – 1630)	1609: as marés eram causadas por uma força de atração da Lua e do Sol. Kepler acreditava que esta força era algum tipo de magnetismo, influenciado pelas teorias de Gilbert. Veja Gilbert mais a frente.
Francis Bacon (1561 – 1626)	1611: propõe que o movimento do cosmos seja de oriente para ocidente, e que isso explica os fluxos e refluxos das águas oceânicas. Os refluxos ocorrem quando as águas são interrompidas pelos continentes e as marés são uma consequência disso.
Marco Antonio de Dominis (1560 - 1624)	1624: afirma que as marés são causadas pela interação do Sol e da Lua, e destaca características como a variação geográfica na

	altura e as correntes de maré horizontais. Ele também tenta conciliar teoria e observação, apresentando duas teorias de maré diferentes.
Galileu Galilei (1564 – 1642)	1632: baseia-se na descrição copernicana da órbita da Terra considerada como um círculo com o Sol em seu centro. Negou a ação da Lua e do Sol sobre as marés. Sua teoria das marés foi “criada” para tentar provar que a Terra se movia. Compare com a teoria de Paolo Sarpi.
Jeremiah Horrocks (1618 – 1641)	1640: realizou as primeiras observações sistemáticas das marés para fins científicos no Reino Unido.
René Descartes (1596 – 1650)	1644: explica que o movimento da Lua pressiona a matéria entre ela e a Terra, afetando as águas do planeta. Cada astro tem seu próprio céu, e o terrestre é oval. A influência da Lua é maior nas extremidades do céu da Terra, resultando em marés altas durante as fases de Lua Cheia e Nova. A influência lunar é mais forte nos equinócios, causando marés altas, e mais fraca nos solstícios, que têm marés baixas.
Nicolás Mascardi (1625 – 1673)	1650 – 1674: aproximava-se mais da proposição de influência lunar formulada por Descartes, embora também não tenha caracterizado as marés quanto a sua intensidade, como propôs Galileu Galilei. Referiu-se à interferência de especificidades locais em suas observações.
William Gilbert (1544 – 1603)	1651: obra publicada postumamente. Sugeriu explicitamente que havia uma atração entre a Lua e a água. Sua teoria magnética

	<p>influenciou fortemente as próximas teorias, em especial Johannes Kepler.</p>
<p>Giambattista Baliani (1582 - 1666)</p>	<p>1651: tentou resolver a limitação da explicação galileana das marés adicionando um terceiro movimento da Terra em torno da Lua. Foi uma teoria considerada estranha à época, mas John Wallis aproveitou sabiamente essa ideia e a adotou, mais tarde, em sua teoria das marés. Veja John Wallis mais a frente.</p>
<p>Athanasius Kircher (1602 – 1680)</p>	<p>1655: sugeriu que as marés eram causadas pelo efeito da Lua sobre a luz do Sol. A luz pura do Sol seria infectada com uma “qualidade nitrosa” ao ser refletida na Lua e, passando para a Terra, causa turbulência e elevação do nível do mar. Assim, os “eflúvios nitrosos da Lua” fazem com que a água seja empurrada e puxada através de uma rede global de “passagens ocultas e ocultas”.</p>
<p>John Wallis (1616 – 1703)</p>	<p>1666: estende a versão da teoria de Galileu, sugerindo que as oscilações das marés resultam da rotação da Terra combinada, não apenas com o movimento da Terra ao redor do Sol, mas também com seu movimento ao redor do centro de gravidade do sistema Terra-Lua.</p>
<p>Henry Philips (?)</p>	<p>1668: fez uma modificação na previsão do momento das marés altas em Londres através do ciclo de sizígia e quadratura.</p>
<p>Thomas Philipot (falecido em 1682)</p>	<p>1673: desenvolve uma teoria química das marés: o “fluxo da maré” (sua subida) era devido a sais voláteis “sal ou espírito amoniacal, que é envolto nas entranhas do</p>

	<p>mar” que foram liberados pelas “impressões do sol e da lua”.</p>
<p>John Flamsteed (1646 – 1719)</p>	<p>1661: utilizou medições dos horários das marés altas em Tower-Wharfe.</p> <p>1682: o mesmo em Tower-Wharfe e Greenwich no verão desse ano.</p> <p>Tais observações, juntamente com seus conhecimentos astronômicos sobre as órbitas da Lua e do Sol, permitiram a produção de uma tabela de marés para os horários das marés de Londres para 1683-88 e, por meio de ajustes simples, horários (um tanto imprecisos) das marés em outros lugares.</p>
<p>Isaac Newton (1642 – 1727)</p>	<p>1687: formulou a teoria estática das marés com base na lei da gravitação universal.</p>
<p>Jacques Cassini (1677 – 1756)</p>	<p>1711 – 1716: analisou os tempos e alturas das águas altas e baixas que foram registrados em Brest. Cassini interpretou esses dados como suporte para a teoria das marés de Descartes.</p>
<p>Colin Maclaurin (1698 – 1746)</p>	<p>1740: provou o que Newton presumiu intuitivamente, que a forma de um oceano esférico em equilíbrio estático com a força das marés induzida por um corpo perturbador (ou seja, a Lua ou o Sol) é um esferoide prolato (uma forma como uma bola de rúgbi com um eixo de simetria alongado), cujo eixo principal aponta para o corpo.</p>
<p>Leonhard Euler (1707 – 1783)</p>	<p>1741: mostrou que era a componente horizontal, e não vertical, do campo de força que levava ao movimento das marés.</p>

Antoine Cavalleri (1698 – 1765)	1741: baseou-se na obra de Descartes, embora ele discordasse da teoria anterior devido à falta de uma contribuição importante das marés solares. Ele também discordou da teoria da gravitação de Newton e, em vez disso, perseverou em um desenvolvimento infrutífero da teoria cartesiana dos vórtices.
Murdoch Mackenzie (1712 - 1797)	1749: realizou observações sobre as marés em Órcades.
Immanuel Kant (1724 – 1804)	1754: introduziu o aspecto da fricção das marés.
Nevil Maskelyne (1732 – 1811)	1767: publicação do <i>Nautical Almanac</i> sob sua direção.
William Hutchinson (1715 - 1801)	1764 – 1767: quatro anos de observações do porto de Liverpool.
Richard (1718 - 1775) e George Holden (1723 - 1793)	1770: primeira tabela de marés confiável e de acesso público sendo produzida para o porto de Liverpool, ajustada a partir do método genérico de Bernoulli.
James Ferguson (1797 – 1867)	1775: propôs um “exercício” para a construção de um relógio de maré.
Pierre de Laplace (1749 – 1827)	1775: introduziu o potencial das marés (“fórmula das marés de Laplace”), expressando o potencial de maré em função da latitude, declinação e ângulo horário.

Daniel Bernoulli (1700 – 1782)	<p>1781: seu ensaio introduziu a chamada Teoria do Equilíbrio, que descreve a estrutura temporal e espacial da maré de equilíbrio devido à combinação da Lua e do Sol.</p> <p>Combinou os dois esferoides prolatos individuais em uma forma geral e introduziu as órbitas lunar e solar e a rotação da Terra na discussão, de modo que a dependência temporal da maré de equilíbrio em qualquer ponto da superfície da Terra pudesse ser parametrizada.</p>
Jérôme Lalande (1732 – 1807)	<p>1781: registrou em sua tabela sobre o estabelecimento – o atraso entre o trânsito da Lua pelo meridiano e a próxima maré alta durante a sizígia.</p>
Thomas Young (1773 - 1829)	<p>1821: teoria baseada na fórmula integral das <u>oscilações forçadas</u>.</p>
William Whewell (1794 – 1866)	<p>1833: sistematizou dados disponíveis sobre marés em diferentes portos num mapa de linhas cotidais.</p>
George Biddell Airy (1801 - 1892)	<p>1842: teoria das marés com base numa bacia oceânica de morfologia simples e com uma <u>profundidade uniforme</u>.</p>
William Ferrel (1817 – 1891)	<p>1853: apontou que a fricção das marés causando um alongamento do dia levaria a uma aparente aceleração nos movimentos dos corpos celestes.</p>
Charles Delaunay (1816-1872)	<p>1865: retomou o desenvolvimento da teoria da perturbação lunar e chegou a uma conclusão semelhante à de Ferrel. A questão da fricção das marés se tornou amplamente conhecida nos círculos científicos.</p>

George Airy (1801-1892)	1866: descobriu que o atrito das marés, além de alongar o dia, deveria causar uma distância crescente da Lua da Terra.
William Thomson – Lord Kelvin (1824-1907)	1863: desenvolveu uma teoria que defendia que a Terra era um sólido elástico (marés terrestres). Thomson introduziu a poderosa ferramenta de análise harmônica na teoria das marés. 1868: inventou a primeira máquina de previsão de marés.
George Darwin (1845 – 1912)	1882: realizou 33 observações nos portos de Inglaterra, França e Índia. Encontrou a razão entre a altura da maré oceânica na Terra elástica e na Terra rígida, provando assim a existência das marés terrestres (publicação na revista <i>Nature</i>).
Rollin Harris (1863 – 1918)	1904: descobriu e explicou o caráter anfidrômico geral das marés oceânicas.
Poincaré (1854-1912)	1910: apresentou análises bem convincentes e sistematizadas sustentando a teoria de Harris.
Oskar Hecker (1864 – 1938)	1907: observou a inclinação de maré, concordando com o resultado de Darwin.
Augustus Love (1863 – 1940)	1909: descreveu as deformações elásticas da Terra.
Wilhelm Schweydar (1877 – 1959)	1914: observou as marés terrestres com um gravímetro.
Gustav Herglotz (1881 – 1953) e Leander Miller Hoskins (1860 – 1937)	Desenvolveram uma teoria para deformações elásticas da Terra não homogênea em 1905 e 1920, respectivamente. Resultou em uma equação diferencial de sexta ordem que estava, naquela época, além da capacidade de qualquer pessoa resolver.

Arthur Doodson (1890 – 1968)	1921: fez uma expansão harmônica do potencial das marés, a qual consistia em 386 componentes de diferentes períodos e amplitudes determinantes para a análise de marés numa determinada região.
Harold Jeffreys (1891 – 1989)	1920: apresentou evidências do retardo secular da rotação da Terra causado pelo atrito das marés em mares rasos. 1928: introduziu um efeito de maré diferente na rotação da Terra.
Chaim Leib Pekeris (1908 – 1993)	1940: resolveu o problema das marés nos poços.
Hitoshi Takeuchi (1920 – 2004)	1950: resolveu numericamente o problema em três equações diferenciais de segunda ordem de Herglotz e Hoskins.

Quadro 1. Resumo histórico do conhecimento das marés. Fonte: autor, 2023.

Referências Bibliográficas

- _____. A guide to Newton's Principia. In: NEWTON, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999, p. 1-370.
- _____. De fluxu et refluxu maris. On the ebb and flow of the sea. In: Rees, G. (Ed.). *Philosophical studies c 1611-c. 1619*. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. p. 63-93. (The Oxford Francis Bacon, vi).
- _____. *Dialogo dei massimi sistemi*. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. V. 4, 3.
- _____. *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*. Tradução, introdução e notas A. B. Marí. Madrid: Alianza Editorial, 1994.
- _____. Introduction: Galileo, man of science. In: McMULLIN, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988a. p. 3-51.
- _____. Nota sulla marea. In: PAGNINI, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. v. 3, p. 296-301.
- Aiton, E.J., 1954. Galileo's theory of the tides. *Ann. Sci.* 10, 44–57. <https://doi.org/10.1080/00033795400200054>.
- Aiton, E.J., 1955a. Descartes's theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 337–348. <https://doi.org/10.1080/00033795500200335>.
- Aiton, E.J., 1955b. The contributions of Newton, Bernoulli and Euler to the theory of the tides. *Ann. Sci.* 11, 206–223. <https://doi.org/10.1080/00033795500200215>.
- Aiton, E.J., 1957. The vortex theory of the planetary motions—I. *Ann. Sci.* 13, 249–264. <https://doi.org/10.1080/00033795700200131>.
- Aiton, E.J., 1958a. The vortex theory of the planetary motions—II. *Ann. Sci.* 14, 132–147. <https://doi.org/10.1080/00033795800200047>.
- Aiton, E.J., 1958b. The vortex theory of the planetary motions—III. *Ann. Sci.* 14, 157–172. <https://doi.org/10.1080/00033795800200087>.

- Aiton, E.J., 1963. On Galileo and the earth-moon system. *Isis* 54, 265–266.
<https://www.jstor.org/stable/228546>.
- Aiton, E.J., 1969. Newton's aether-stream hypothesis and the inverse square law of gravitation. *Ann. Sci.* 25, 255–260. <https://doi.org/10.1080/00033796900200151>.
- Aiton, E.J., Burstyn, H.L., 1965. Galileo and the theory of the tides. *Isis* 56, 56–63.
<https://www.jstor.org/stable/228458>.
- Arbic, B. K., 2022. *Incorporating tides and internal gravity waves within global ocean general circulation models: a review*. **Prog. Oceanogr.**, 102824.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102824>.
- Aston, N., 2008. Hutchinsonians. *Oxford Dictionary of National Biography*, <https://doi.org/10.1093/ref:odnb/59223>
- Bacon, *Do fluxo e refluxo do mar, scientiæ studia*, São Paulo, v.5, n.4, p.520-48, 2007, p.521
- Bacon, *Novo Organum*, tradução - José Aluysio Reis de Andrade, 2002
- Baldwin, M.R., 1985. Magnetism and the anti-Copernican polemic. *J. Hist. Astron.* 16, 155–174. <https://doi.org/10.1177/002182868501600301>.
- Benison, L. *Early medieval science: the evidence of Bede*. **Endeavour**, v. 24, n. 3, p. 111-116, 2000.
- Bonelli, F.; Russo, L. *The origin of modern astronomical theories of tides: Chrisogono, de Dominis and their sources*. **The British Journal for the History of Science**, v. 29, n. 4, p. 385-401, 1996.
- Brauen, F., 1982. Athanasius Kircher (1602-1680). *J. Hist. Ideas* 43, 129–134.
<https://www.jstor.org/stable/2709164>.
- Burstyn, H. L. Galileo's attempt to prove that the earth moves. *Isis*, 53, p. 161-85, 1964.
- Camargo, R.; Harari, J. Marés. In: Castelo, J. P.; Krug, L. C. (Org.). *Introdução às Ciências do Mar*. **Pelotas: Editora Textos**, 2015. p. 226-255.
- Cartwright, D. E. *Tides - a scientific history*. **Cambridge University Press, Cambridge, UK**, 1999.

Case, J. (março de 2000). «*Understanding Tides — From Ancient Beliefs to Present-day Solutions to the Laplace Equations*». **SIAM News**. **33** (2)

Casotto, S.; Biscani, F. *A fully analytical approach to the harmonic development of the tide-generating potential accounting for precession, nutation, and perturbations due to figure and planetary terms*. In: **AAS/Division of Dynamical Astronomy Meeting# 35**. 2004, p. 08.05.

CDSB, 2008. *Johannes Kepler. Complete Dictionary of Scientific Biography*, first ed. Charles Scribner's Sons, New York (ebook).

Cesalpino, A. *Quaestionum peripateticarum libri V*, Venice: Iuntas, 1571, 70r–71v.

Childrey, J., 1670. A letter of Mr. Joseph Childrey to the Right Reverend Seth Lord Bishop of Sarum, containing some animaversions upon the Reverend Dr. John Wallis's hypothesis about the flux and reflux of the sea, publish't No. 16. of these tracts. *Philos. Trans. R. Soc.* 5, 2061–2068. <https://doi.org/10.1098/rstl.1670.0050>

Clavelin, M. Galilée et le refus de l' équivalence des hypotheses. In: V.V.A.A. *Galilée. Aspects de sa vie et de son oeuvre*. Paris: PUF, 1968. p. 147-54.

Cohen, I. B. Galileo, Newton and the divine order of the solar system. In: McMullin, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988. p. 407-31.

Cohen, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976.

Craik, A. D. D. *Thomas Young on fluid mechanics*. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 67, p. 95-113, 2010.

Curcio, R., Quinto et al. *De la vida y acciones de Alexandro el grande* - traducido de la lengua latina en la española por D. Matheo Ibañez de Segovia y Orellana. 1974. Tese de Doutorado.

Dantas, J. H. S. *Um material para professores de Física sobre o ensino de marés na Educação Básica*. 2020. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Deacon, M., 1971. *Scientists and the Sea, 1650–1900: A Study of Marine Science*. Academic Press, London. 445pp.

- Descartes, R. *Le monde ou Traité de la Lumière*. In: Adam, C. & Tannery, P. (Ed.). *Œuvres de Descartes*. Paris: Vrin, 1996. v. 11, p. 3- 118.
- Dondi, J. (dall'Orologio): *De fluxu et refluxu maris*. Editado em 1912 por P. Revelli.
- Durand-Richard Marie-José. De la prédiction des marées: entre calcul, observations et mécanisation (1831-1876). **Cahiers François Viète**, n. II-8/9, p. 105-135, 2016.
- Einstein, A., 1954. Ideas and Opinions. (Translated by S. Bargmann). Crown Publishers, London, ISBN: 978-0-285-64724-4.
- Ekman, M. *A concise history of the theories of tides, precession-nutation and polar motion (from antiquity to 1950)*. **Surveys in Geophysics**, v. 14, n. 6, p. 585-617, 1993 (e suas referências).
- Fara, P., 1996. Sympathetic Attractions: Magnetic Practices, Beliefs, and Symbolism in Eighteenth-Century England. Princeton University Press, New Jersey. 326 pp.
- Ferguson, J., 1773. Select Mechanical Exercises Shewing How to Construct Clocks, Orreries and Sun Dials on Plain and Easy Principles. Strahan and Cadell, London. 272 pp.
- Finocchiaro, M. A. Commentary: dialectical aspects of the copernican revolution: conceptual elucidations and historiographical problems. In: WESTMAN, R. S. (Ed.). *The copernican achievement*. Berkeley: University of California Press, 1975. p. 404-14.
- Fleck, E. C. D.; Biehl, M.. *Sobre os céus e as marés do Pacífico: as observações astronômicas do jesuíta Nicolás Mascardi (Chile, século XVII)*. **Revista Brasileira de História & Ciências Sociais**, v. 6, n. 12, 2014.
- Findlen, P. (Ed.), 2004. Athanasius Kircher: The Last Man Who Knew Everything. Routledge, New York. 464 pp
- Furlong, Guillermo, S.J. *Entre los Tehuelches da Patagonia*. Buenos Aires: San Pablo, 1943
- Galilei, G. *Diálogo Sobre Os Dois Máximos Sistemas Do Mundo Ptolomaico e Copernicano*. Tradução de Pablo Ruben Mariconda. 3a. ed. Editora 34, 2011.
- Glassie, J., 2012. A Man of Misconceptions: The Life of an Eccentric in an Age of Change. Riverhead Books, New York. 333 pp.

Haigh, I. D. et al. *The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications*. **Reviews of Geophysics**, v. 58, n. 1, p. e2018RG000636, 2020.

Harper, W.L., 2011. *Isaac Newton's Scientific Method: Turning Data into Evidence about Gravity and Cosmology*. Oxford University Press, Oxford. 444 pp.

Harris, R.A., 1898. *Manual of Tides, Part 1*. (Appendix No. 8 of US Coast and Geodetic Survey Report for 1897). Government Printing Office, Washington, D.C. Available from Google Books Härtel, H. *The tides-a neglected topic*. **Physics Education**, v. 35, n. 1, p. 40, 2000.

Hecht, E., 2019. *Kepler and the origins of the theory of gravity*. **Am. J. Phys.** 87, 176–185. <https://doi.org/10.1119/1.5089751>.

Hicks, S. D. *Understanding tides*. **US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service**, 2006

Hutchinson, W., 1777. *A Treatise on Practical Seamanship*. Reprinted 1787 and available at British library. Reprinted 1979 by Scholar Press, London, p. viii. xiv, 213, pl.10, map. 27 cm.

Hutchinsonianos – Fonte: <https://www.britishmuseum.org/collection/object/P_Cc-2-255>. Acesso em 04/04/2023.

Influência dos ventos nas marés – Fonte: <https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=diversas-influencias-sobre-as-mares>. Acesso em 04/04/2023.

Intergovernmental Oceanographic Commission- IOC. 2002. *Manual on sea level measurement and interpretation*. Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. IOC – **Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides** No. 14, UNESCO 2002. 49p. Stewart 2004.

Irby-Massie, G. L.; Keyser, P. T. *Greek Science of the Hellenistic Era: A Sourcebook*. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=-SA2uJ21epQC&pg=PA146&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Jänicke, L. et al. Assessment of tidal range changes in the North Sea from 1958 to 2014. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 126, n. 1, p. e2020JC016456, 2021.

Jammer, Max; Ribeiro, Vera. **Conceitos de força: Um estudo sobre os fundamentos da dinâmica**. Contraponto Editora, 2021.

Koestler, A. *The sleepwalkers: A history of man's changing vision of the universe*. Penguin UK, 2017.

Kvale. Tidal constituents of modern and ancient tidal rhythmites: criteria for recognition and analyses. In: **Principles of tidal sedimentology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. p.1-17

Lalande, J. J., 1781. *Traité du flux et du reflux de la mer*. In: Astronomie. Tome 4. Chez la veuve Desaint, Paris. 348pp.

Laplace, P.S., 1775. *Recherches sur plusieurs points du système du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 88, 75–182 (Reprinted in Oeuvres Complètes de Laplace, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Laplace, P.S., 1776. *Recherches sur plusieurs points du système du monde*. Mem. Acad. R. Sci. Paris 89, 177–264 (Reprinted in Oeuvres Complètes de Laplace, Gauthier-Villars, Paris, 9 (1893)).

Lefevre; le Provost; Lyard. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and the East China Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v.105, n.C4, p.8707-8725, 2000.

Mackenzie, M., 1749. The state of the tides in Orkney. Philos. Trans. R. Soc. 46, 149–160. <https://doi.org/10.1098/rstl.1749.0029>

Mariconda, P. R. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo Ptolomaico e Copernicano*. 2011.

Mariconda, P. R. *Francis Bacon e as marés: a concepção da natureza e o mecanicismo*. **Scientiae Studia**, v. 5, p. 501-519, 2007.

Mariconda, P. R. *Galileu e a teoria das marés*. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 9, n. 1-2, p. 33-71, 1999.

Mariconda, P. R. *O alcance cosmológico e mecânico da carta de G. Galilei a F. Ingoli*. **Scientiae Studia**, v. 3, p. 443-466, 2005.

Marmer, H. A. *On cotidal maps*. **Geographical Review**, v. 18, n. 1, p. 129-143, 1928.

- Marmer, H. A. *Problems of Tides*. **The Scientific Monthly**, Vol. 14, No. 3 (Mar., 1922), pp. 209-222.
- Marmer, H. A. *Tides in the Bay of Fundy*. **Geographical Review**, v. 12, n. 2, p. 195-205, 1922.
- Martins, L. A. C. P. *História da ciência: objetos, métodos e problemas*. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 02, p. 305-317, 2005.
- Martins, R. A. *Galileo e a rotação da Terra*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 11, n. 3, p. 196-211, 1994.
- Maury, J. P. *Marées*. In: Lecourt, D. (Ed.). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris: PUF, 1999. p. 608-11
- McCully, J. G. *Beyond the moon: A conversational common sense guide to understanding the tides*. World Scientific, 2006.
- McGee, C. Jean Le Rond d'Alembert biography of a mathematician, philosopher, and man of. 2008.
- McMullin, E. The fertility of theory and the unit of appraisal in science. In: COHEN, R. S. et al. (Ed.). *Essays in memory of Imre Lakatos*. Dordrecht: Reidel, 1976. p. 395-43~.
- McTighe, T. P. Galileo's 'platonism': a reconsideration. In: McMULLIN, E. (Ed.). *Galileo. Man of science*. New Jersey: Scholar's Bookshelf, 1988, p. 365-87.
- Millburn, J.R., 1988. *Wheelwright of the Heavens. The Life and Work of James Ferguson, FRS*. Vade-Mecum Press, London. 339pp.
- Mitchell, H., 1948. *Glossary of Geodesy* (US Government Printing Office)
- Moray, R., 1665. A relation of some extraordinary tides in the West-Isles of Scotland, as it was communicated by Sr. Robert Moray. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 53–55. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0026>.
- Moray, R., 1666. Considerations and enquiries concerning tides; likewise for a further search into Dr. Wallis's newly published hypothesis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1, 298–301. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0113>
- National Geodetic Survey (US); United States. National Ocean Service. Office of Charting; Geodetic Services. **Geodetic glossary**. US Department of Commerce,

National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Charting and Geodetic Services, 1986.

Naylor, R. *Paolo Sarpi and the first Copernican tidal theory*. **The British Journal for the History of Science**, v. 47, n. 4, p. 661-675, 2014.

Newton, I. *The principia - Mathematical principles of natural philosophy*. Tradução I. B. Cohen & A. Whitman. Berkeley: University of California Press, 1999.

Newton, I. *Principia, Livros II e III—Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. 2020. Tradução de André Koch Torres Assis e Fábio Duarte Joly.

Open University Course Team 2002. *Waves, tides and shallow-water process*. 2th ed. England. 227p.

Pagnini, P. (Ed.). *Opere di Galileo Galilei*. Firenze: Adriano Salani, 1935. 4v.

Palmerino. *The Reception of the Galilean Science of Motion in Seventeenth-Century Europe*, pp. 200 op books.google.nl

Philips, H. *A letter written to Dr. John Wallis by Mr. Henry Philips, containing his observations about true time of the tides*. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 3, n. 34, p. 656-659

Popper, K. R. *Objective knowledge*. Oxford: Clarendon Press, 1974.

Ptolemeu com Frank E. Robbins, trans., *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Book 1, chapter 2.

Pugh, D.T., Woodworth, P.L., 2014. *Sea-Level Science: Understanding Tides, Surges, Tsunamis and Mean Sea-Level Changes*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN: 9781107028197. 408 pp.

Reilly, C., 1974. Athanasius Kircher S.J.: Master of a Hundred Arts, 1602–1680. Edizioni del Mondo, Wiesbaden and Rome. 207 pp.

Rees, G (Ed.). *Philosophical studies* c. 1611-c. 1619. Oxford: Oxford Clarendon Press, 1996. (The Oxford Francis Bacon, vi).

Robbins, F. E. Tradução de *Tetrabiblos* (Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1940), Livro 1, Cap. 2.

- Rosa, C. A. P. *História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico*.
In: **História da ciência: da antiguidade ao renascimento científico**. 2012. p. 469-469.
- Rosmorduc, J.; Fernandes, C. *De Tales a Einstein: história da Física e da química*.
1983.
- Roos, A.M., 2001. Thomas Philipot and chemical theories of the tides in seventeenth century England. *Ambix* 48, 125–136. <https://doi.org/10.1179/amb.2001.48.3.125>.
- Rossi, P. *La scienza e la filosofia dei moderni*. Torino: Bolati Boringuieri, 1989.
- Rossiter, J.R., 1971. The history of tidal predictions in the United Kingdom before the twentieth century. *Proc. R. Soc. Edinb. B* 73, 13–23. <https://doi.org/10.1017/S0080455X00002071>
- Russo, L. *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*. Übersetzt aus dem Italienischen von Bärbel Deninger, Springer 2005, [ISBN 978-3-540-20938-6](https://doi.org/10.1007/978-3-540-20938-6), <http://books.google.com.br/books?id=iIsfBAAAQBAJ&pg=PA351&f=false>. Acesso em 04/04/2023.
- Saraiva, M. F. O. **Astronomia & Astrofísica**. Editora Livraria da Física, 2004.
- Shea, N. M. *Estimating the power in the tides*. **The Physics Teacher**, v. 25, n. 7, p. 426-426, 1987.
- Shea, W. *Descartes as critic of Galileo*. In: BuTTS, R. E. & PITT, J. C. (Ed.). *New perspectives on Galileo*. Dordrecht: Reidel, 1978. p. 139-59.
- Shum, C. K. et al. *Accuracy assessment of recent ocean tide models*. **Journal of geophysical research: oceans**, v. 102, n. C11, p. 25173-25194, 1997.
- Soares, R. G.; de Amorim, H. S. *Um marégrafo ultrassônico baseado na placa Arduino para investigação do fenômeno das marés*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 37, n. 2, p. 925-943, 2020.
- Sosio, L. Galileo e la cosmologia. In: Galileu Galilei. *Dialogo soprai due massimi sistemi del mondo*. Introdução e notas L. Sosio. Torino: Giulio Einaudi Editore, 1970. p. ix-lxxxvii.
- Stevin, S.; Crone, E. **Principal works**. CV Swets & Zeitlinger, 1955.

Teoria de marés da Galileu - Fonte: <<https://cref.if.ufrgs.br>>. Acesso em: 04/04/2023.

Thomson, W. (Lord Kelvin), 1882. *The Tides: Evening lecture to the British Association at the Southampton meeting*. Disponível em: <https://sourcebooks.fordham.edu/mod/1882kelvin-tides.asp>

Tidal heating – Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_heating>. Acesso em 04/04/2023.

Todorov, I. *Galileo (1564-1642) and Kepler (1571-1630): the modern scientist and the mystic*. **arXiv preprint arXiv:1610.05749**, 2016.

Tolmacheva, M. (27 de janeiro de 2014). Glick, Thomas F., ed. *Geography, Chorography. Medieval Science, Technology, and Medicine: An Encyclopedia*. [S.l.]: Routledge. p. 188. [ISBN 9781135459321](https://doi.org/10.1080/07647259.2014.881135)

Tonel, A. P.; Marranghello, G. F. *O movimento aparente da Lua*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, 2013.

Tradução comentada dos três primeiros capítulos do *Tetrabiblos* de Ptolomeu, Marcus Reis Pinheiro, Cristina de Amorim Machado, Cad. Hist. Fil. Ci., Campinas, Série 4, v. 1, n. 2, p. 301-332, jul.-dez. 2015, p.312.

Tyson, P., 2002. *Galileo's Big Mistake*. NOVA Science Trust. <https://www.pbs.org/wgbh/nova/article/galileo-big-mistake/>.

Udías, A., 2020. *Athanasius Kircher and terrestrial magnetism: the magnetic map*. J. Jesuit Stud. 7, 166–184. <https://doi.org/10.1163/22141332-00702002>.

Unesco 1985. *Manual de medição e interpretação do nível do mar*. Comissão Oceanográfica Internacional. 82p.

van Lunteren, F., 1993. Eighteenth-century conceptions of gravitation. In: Petry, M.J. (Ed.), *Hegel and Newtonianism*. Archives Internationales D'Histoire des Idées/International Archives of the History of Ideas, vol. 136. Springer, Dordrecht, https://doi.org/10.1007/978-94-011-1662-6_24.

Voelkel, J. R. *The composition of Kepler's Astronomia nova*. Princeton University Press, 2002.

Wallis, F. *Bede, the Reckoning of Time* (Translated Texts for Historians; V.29). Liverpool University Press, 1999.

Wallis, J., 1666. *An essay of Dr. John Wallis, exhibiting his hypothesis about the flux and reflux of the sea*. **Phil. Trans. R. Soc. London** 1, 263–281. <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0108>. 281-289, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0109> and 297-298, <https://doi.org/10.1098/rstl.1665.0112>.

Wilde, C.B., 1980. Hutchinsonianism, natural philosophy and religious controversy in eighteenth century Britain. *Hist. Sci.* 18, 1–24. <https://doi.org/10.1177/007327538001800101>.

Wolfschmidt, G. *Navigare necesse est – Geschichte der Navigation: Begleitbuch zur Ausstellung 2008/09 in Hamburg und Nürnberg*. Norderstedt, 2008. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=BYyLsHineFAC&pg=PA25&f=false>. Acesso em 04/04/2023.

Woodworth, P. L. (2010). *A survey of recent changes in the main components of the ocean tide*. *Continental Shelf Research*, 30(15), 1680–1691. doi:10.1016/j.csr.2010.07.002.

Woodworth, P.L., 2002. *Three Georges and one Richard Holden: the Liverpool tide table makers*. **Trans. Hist. Soc.** Lancashire Cheshire 151, 19–51.

Woodworth, P.L., Rowe, G.H., 2018. *The tidal measurements of James cook during the voyage of the Endeavour*. **Hist. Geo Space Sci.** 9, 85–103. <https://doi.org/10.5194/hgss-9-85-2018>.

Woodworth, P. L. *Tidal science before and after Newton*. In: **A Journey Through Tides**. Elsevier, 2023. p. 3-36 (e suas referências).

Woppelmann, G., Pouvreau, N., Simon, B., 2006. Brest Sea level record: a time series construction back to the early eighteenth century. *Ocean Dyn.* 56, 487–497. <https://doi.org/10.1007/s10236-005-0044-z>

Young T = “A.L.” (1823). *Tides*, **Supplement** to the 4th, 5th and 6th edns of *Encyclopaedia Britannica*, 6 vols (1815–1824), Napier M (ed), vol 6, pp 658–675. Constable, Edinburgh. Also in [8], 2:291–335

Young T = "E.F.G.H." (1813). *A theory of tides, including the consideration of resistance*. Nicholson's J 35:145–159, 217–227. Also in [8], 2:262–290