

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

USINAS MAREMOTRIZES
(Geração de energia elétrica)

Elaborado por:

Paulo H. Sant'Ana RA: 971383

Luiz R. Tuon RA: 971127

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO

II. MODELAMENTO MATEMÁTICO

III OSCILAÇÕES DAS MARÉS

IV. TURBINAS

V. CONCLUSÃO

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMO

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

Em busca de novas alternativas de produção de energia elétrica, foram simulados em computador dois modelos de usinas maremotrizes.

A área conjunta do golfo de Maine e da Baía de Fundy, foi dividida em células, para facilitar os cálculos. A variação da maré nessa região pode alcançar 17 metros.

O modelamento matemático envolve uma série de teorias, tais como: a lei da conservação das massas, forças de atrito, fluxo de água e a aceleração de Coriolis.

As amplitudes das marés podem sofrer alterações por causa de um efeito chamado ressonância.

A construção dessas usinas envolverá algum impacto ambiental, altos custos de construção, mas ainda assim é uma atraente alternativa de produção de energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Em busca de outras alternativas de produção de energia elétrica, estudaremos o aproveitamento das variações das marés em lugares onde onde a diferença entre as marés alta e baixa é grande. Podemos citar como exemplo, e que servirá de base para o nosso estudo, a Baía de Fundy, nos Estados Unidos da América do Norte. A variação média nessa baía situa-se em 12 metros, podendo chegar a 17 metros entre as marés extremas.

Na citada Baía de Fundy (entre New Brunswich e Nova Escócia), freqüentemente o nível da maré se eleva à razão de 3,1 cm por minuto. Por séculos as marés tem regido a vida do povo que habitava e habita ao longo da costa de Fundy e muitos colonos, já em 1609 construíram moinhos movidos a força das marés.

Neste século, o sonho é o aproveitamento das marés para gerar energia elétrica.

As usinas que aproveitam as variações de nível entre as marés alta e baixa são chamadas de usinas maremotrizes. Para se aproveitar energia das marés constroi-se uma barragem num local mais conveniente, onde

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

seu comprimento seja o menor possível instalando comportas e turbinas apropriadas.

Quando a maré esta subindo abrem-se as comportas e a água é represada com o fechamento das mesmas quando a maré estiver num ponto mais alto. Após o recuo da maré até um determinado nível, solta-se a água represada através das turbinas, gerando energia elétrica.

Calcula-se que o fluxo total das marés através da Baía de Fundy pode teoricamente gerar 400 milhões de kWh os quais seriam equivalentes à produção de 250 grandes usinas nucleares. Utilizando-se somente uma pequena parte do seu potencial, poderá produzir energia suficiente para ajudar significativamente no atendimento da demanda do leste dos EUA.

O governo da Nova Escócia, do Canada, já construiu uma usina de teste, no interior da Baía de Annapolis Royal, que tem a capacidade geradora de 20000 kWh. Na Baía de Fundy, estão sendo examinados três locais para a construção de uma barragem comercialmente viável. No maior desses projetos propostos em Minas Basin, poderão passar através de suas turbinas 55.000 metros cúbicos de água por segundo, ou cerca de 7 vezes o fluxo do rio São Lourenço em Montreal. Ela será capaz de gerar em torno de 5.000 megawatts de energia. Estes projetos somente serão competitivos economicamente quando os preços do petróleo atingirem níveis elevados. Eles poderão se tornar uma opção atrativa num futuro próximo porque, ao contrário da energia das usinas maremotrizes é limpa, segura e renovável.

A construção das barragens das usinas maremotrizes ocasionarão alterações nos níveis das marés, correntes de marés, e no ecossistema dos locais próximos ou mesmo distantes da barragem.

Para estudarmos esses fenômenos e também as potencialidades energéticas das usinas maremotrizes a serem implantadas, lançaremos mão de modelos matemáticos computacionais que facilitarão a obtenção de dados com boa precisão e rapidez.

II. MODELAMENTO MATEMÁTICO

De forma a compreender os fenômenos físicos envolvidos na instalação de uma usina maremotriz, basearemos o nosso trabalho num estudo

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

realizado na Baía de Fundy (EUA / Canada). O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial energético e as alterações ambientais naquela região, proveniente da instalação de uma possível usina.

Para prever os efeitos que a construção de uma barragem em Minas Basin e outra em Shepody, ambas na Baía de Fundy, acarretariam na própria baía e também no golfo de Maine, foi feito um modelo matemático para calcular as alterações nas marés desses lugares (cujas amplitudes alcançam até 17 metros)

No modelo da Baía de Fundy e do golfo de Maine, a preocupação não é com o movimento das moléculas individualmente, mas com o movimento das marés, de grandes volumes de água. A área foi dividida com uma rede nas quais cada malha da rede representa uma célula quadrada de água que se estende do fundo do mar até a superfície. Cada célula obedece a lei física que governa o movimento dos fluídos no mar (pode-se considerar as correntes marítimas a partir de um perfil médio de velocidades, da superfícies até o fundo).

A partir do conhecimento do estado da corrente da maré e dos níveis de água num certo momento, pode-se aplicar o modelo para calcular as correntes e elevações de nível em qualquer tempo futuro.

A lei da conservação das massas diz que o nível da água numa célula da rede sobe se houver mais água entrando do que saindo através dos lados da célula. (vide fig. 1)

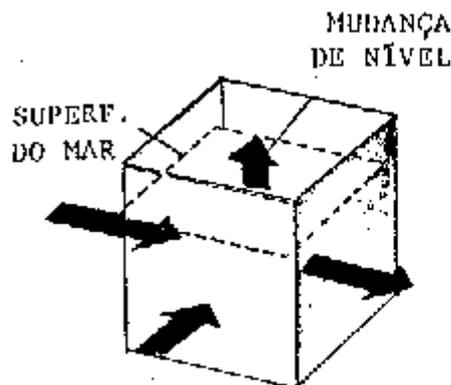


Fig. 1

Lei da conservação das massas

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

Se o nível da água é maior em um célula do que numa adjacente, a água é acelerada na direção da célula em que o nível é mais baixo. (vide fig. 2)

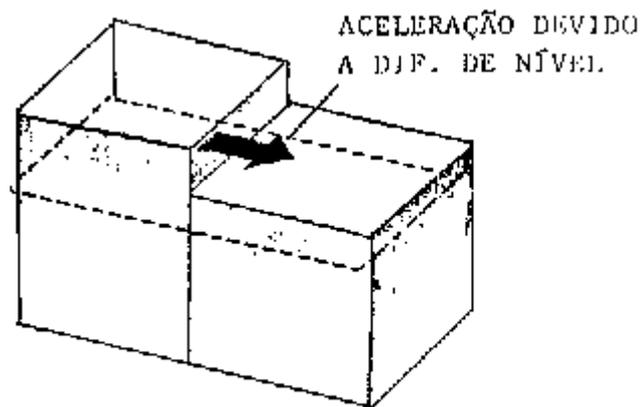


fig. 2

Devido à rotação da Terra, qualquer fluxo entre as células conduz a uma aceleração perpendicular (a direita, no hemisfério norte) ao fluxo num plano paralelo à superfície da água. Isso acarretará num pequeno desvio do escoamento, para o lado perpendicular ao fluxo. Esse fenômeno recebe o nome de aceleração de Coriolis. (vide fig. 3)

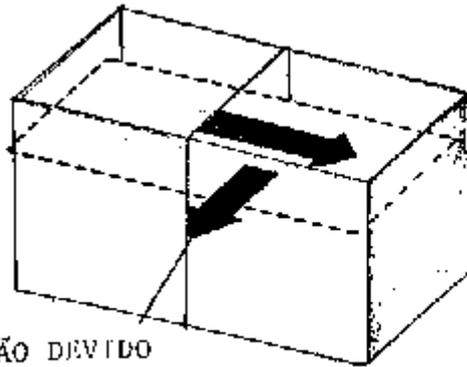


fig. 3

ACELERAÇÃO DEVIDO
A ROT. DA TERRA

Simultaneamente, o fluxo entre as células é dificultado por uma força de atrito que é proporcional ao quadrado da velocidade da corrente. (vide fig. 4)

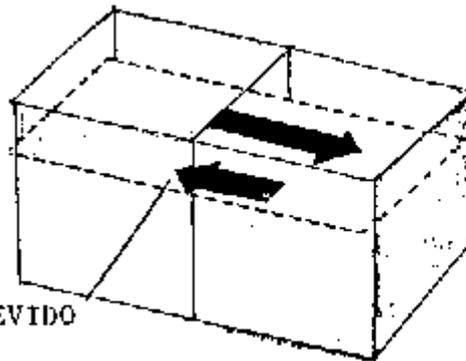


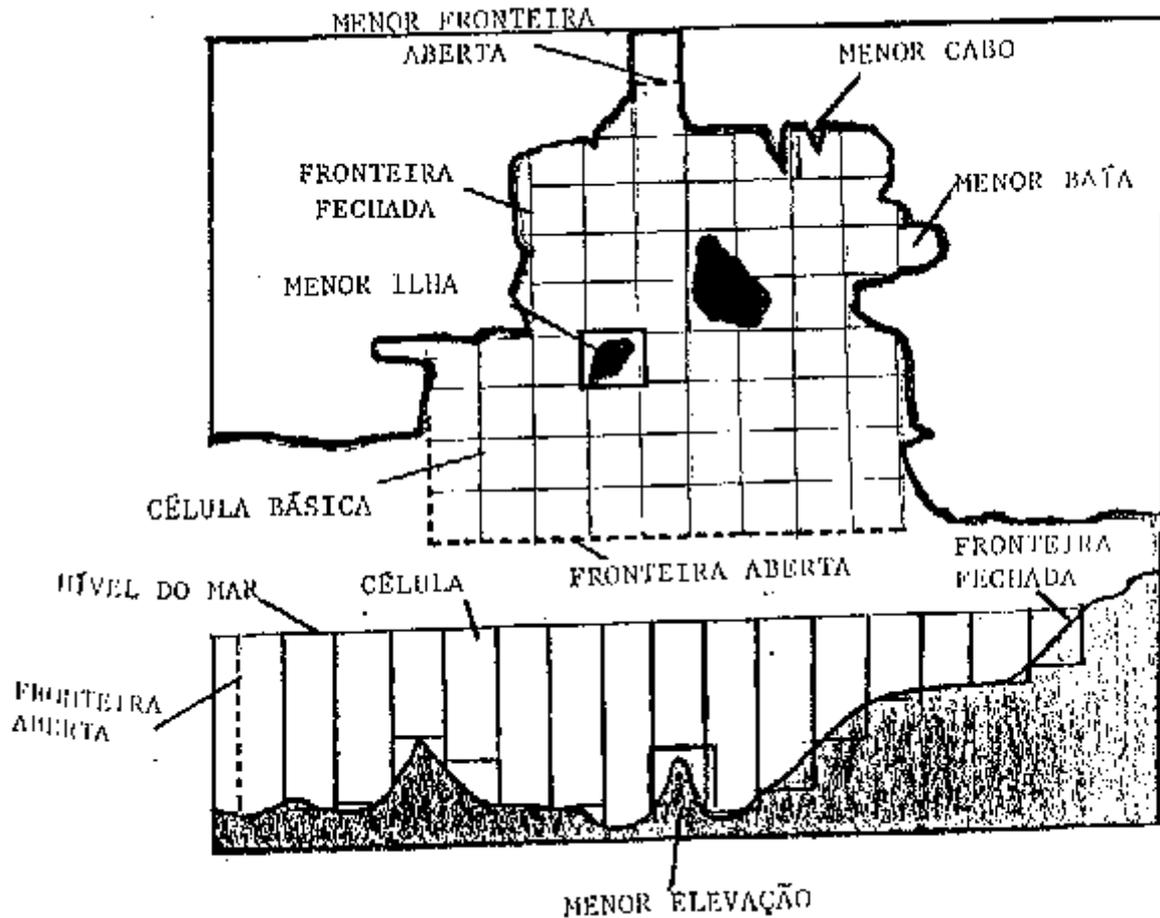
fig. 4

ACELERAÇÃO DEVIDO
AO ATRITO

O tamanho da célula da rede é que determina a resolução do modelo e o volume necessário de cálculos. A menor ilha, baía ou elevações de superfícies, podem ser representadas no modelo como uma medida padrão para uma determinada área.

Em lugares mais próximos do local da construção da barragem, as células terão área menor, aproximadamente 7 km². Em áreas mais distantes onde as alterações forem pequenas (partes mais distantes do Golfo de Maine), o tamanho das células poderá ser maior, aproximadamente 21 km², facilitando os cálculos. - como demonstra a fig. 5 - Scientific American, Set.1987, p.110.

fig. 5 - Divisão em Células



As dimensões de uma célula da rede, determina o tamanho da menor ilha, baía cabo de terra, fronteira aberta ou borda da superfície submarina que pode ser resolvido pelo modelo de marés.

III. OSCILAÇÃO DAS MARÉS

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

A explicação científica para as altas marés na Baía de Fundy tem sido objeto de muita especulação, por décadas. As forças gravitacionais do Sol, Terra e lua, geram as ondas no fundo do mar, as quais são por seu turno, a força motora primária para as ondas nas águas mais rasas da plataforma continental. Mas na plataforma continental, fatores locais próprios, como a forma da linha da costa, a profundidade da água e a largura da plataforma, afetam as marés talvez mais do que as forças astronômicas.

Pensa-se que a maré excepcionalmente alta na Baía de Fundy é devida a peculiaridades físicas do local, as quais dão origem a um fenômeno chamado de ressonância.

A ressonância pode ocorrer em qualquer sistema no qual há uma frequência de oscilação natural. Quando o sistema é movido por uma força externa na mesma frequência que a sua frequência natural, há um súbito e drástico aumento na amplitude das oscilações.

Uma analogia com a Baía de Fundy, seria a oscilação da água numa banheira. Se numa banheira comum, com água até uma profundidade de 20 cm, temos uma onda que vem de um lado para o outro em cerca de uma vez a cada 2 segundos e se alguém ajudar a onda dando um empurrão toda vez que ela vai, a onda pode rapidamente aumentar de tamanho ameaçando transbordar pelo lados da banheira. Podemos pensar que empurrando mais rapidamente teremos um efeito maior ainda, mas isso causará somente leves borrifos, porque o empurrão interferirá com o movimento natural da onda (a medida do tempo que ela leva pra completar uma oscilação completa), é determinado pela profundidade da água e a largura da banheira.

Por mais de 50 anos pensava-se que a profundidade e extensão da Baía de Fundy era tal que a onda de água profunda poderia adentrar a baía e ser refletida de volta com um período muito próximo do período da maré lunar. O primeiro modulo de ressonância foi estimado entre 10,5 e 12 horas. Atualmente, baseado no primeiro modelo de maré, o período de ressonância da baía foi calculado em cerca de 9 horas. Esse valor é próximo o suficiente para um algum aumento na maré, mas não o suficiente para se Ter a ressonância verdadeira. A tese da ressonância é no entanto aceitável, se o modelo considerar não somente a Baía de Fundy, mas também o Golfo de Maine. A baía e o golfo combinados formam um sistema de marés com um período de ressonância próximo de 13,3 horas.

A tese da ressonância prevê que o tamanho da baía mudaria com a construção de uma barragem de usina maremotriz na sua base superior.

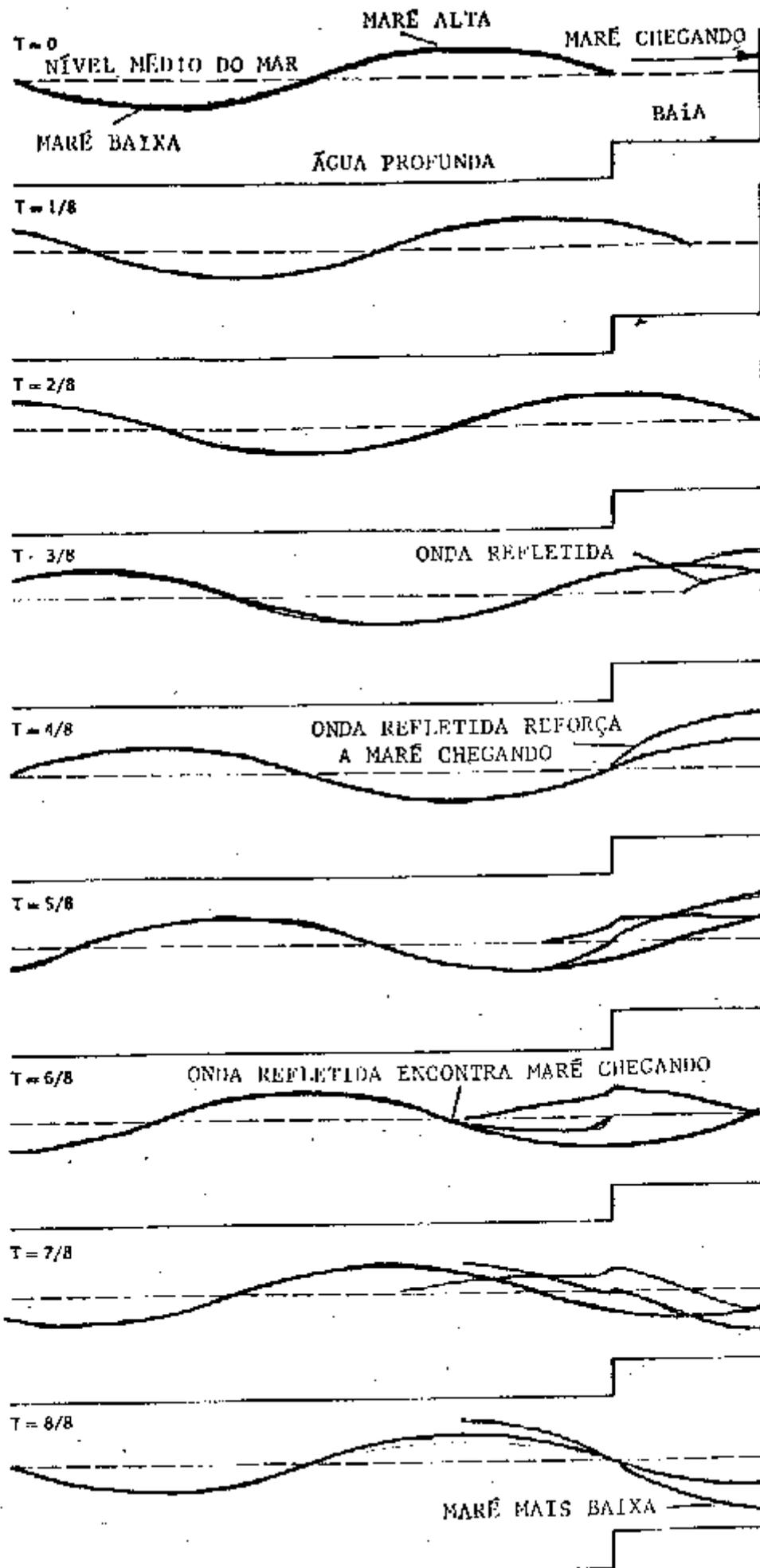
Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

O período de ressonância da baía poderia mudar; como a ressonância da baía esta próxima do ciclo da maré, mesmo pequenas mudanças em seu tamanho poderiam causar significativas mudanças na amplitude das marés. (A fig. 6 demonstra a oscilação das marés - Scientific American, Set. 1987, p. 109).

Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas

fig. 6



Oscilação das marés

Maré de mar profundo - é ampliada pela interação da ressonância com a forma apropriada da baía. A maré entra na baía em $t=0$. Em $t=2/8$ encontra a parte superior da baía e é refletida para trás. As ondas que chegam e voltam se combinam para produzir o nível de água observado. Em $t=4/8$ as ondas se reforçam para dar o pico na amplitude da maré. Ao fim de um ciclo ($t=8/8$), esta combinação resulta numa maré mais baixa; na borda da plataforma continental, a crista da onda de retorno encontra-se com a próxima onda que chega. Na realidade, o fundo do mar é 10 vezes mais profundo que a água da plataforma continental. Quando a onda refletida deixa a baía, sua amplitude cai para um valor inversamente proporcional a mudança de profundidade da água (a amplitude não aumenta quando a maré entra na baía porque alguma quantidade de água foi devolvida para fora da borda da plataforma retornando ao mar profundo).

A seguir trataremos da simulação da construção de barragens de usina maremotriz em determinados locais e suas aplicações.

No caso da Baía de Fundy o método foi aplicado para duas alternativas de localização das barragens: Baía de Shepody e Minas Basin.

A primeira simulação foi da pequena barragem de Shepody. Esta usina poderá Ter uma capacidade de geração de energia de 1600 MW. Na própria barragem, o modelo prevê que a amplitude do nível da maré poderá diminuir em 24 cm (a maré alta 24 cm menor e a maré baixa 24 cm maior). A medida que se distancia da barragem em direção ao Golfo de Maine, se nota a diminuição desse efeito até as proximidades de St. John, onde se dá a inversão, ou seja, a amplitude começa a aumentar até o Cabo Cod em cerca de 4 cm. (vide fig. 7 - Scientific American, Set. 1987 p.112)

Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Estadual de Campinas

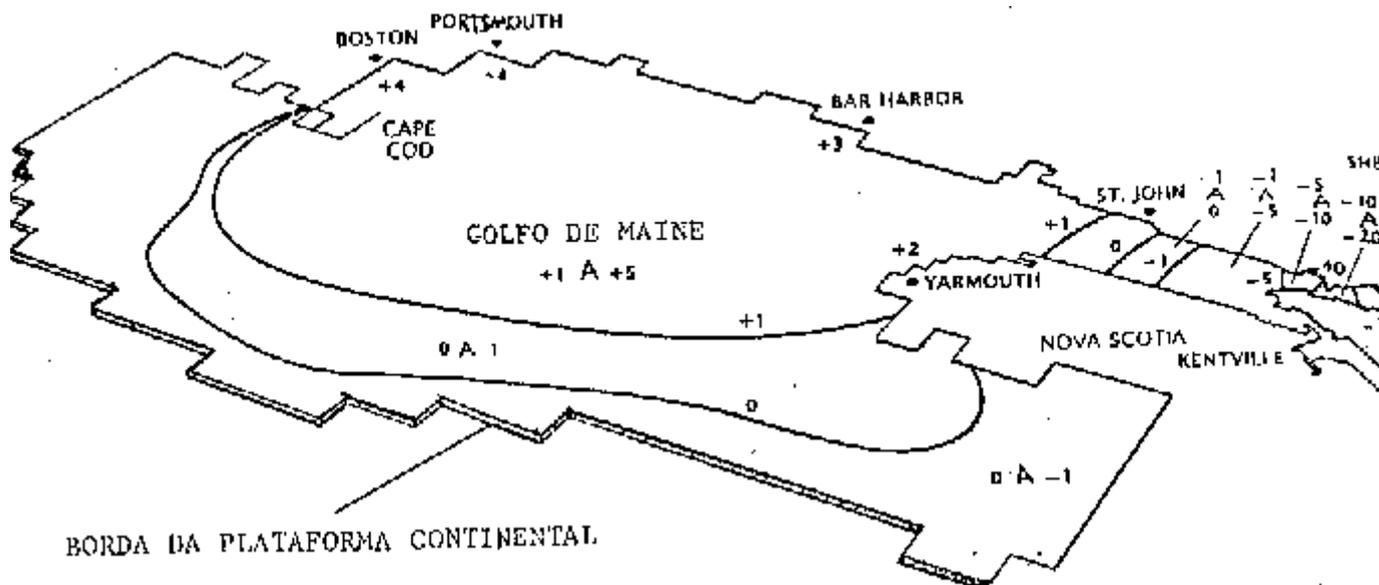


Fig. 7 - A barragem de Shepody poderá diminuir a amplitude da maré até a entrada da Baía de Fundy (perto de St. John) enquanto aumentará a amplitude no Golfo de Maine. (A fig. indica os valores em cm).

A Segunda simulação foi do maior projeto considerado até agora, oito km de barragens cruzando parte de Minas Basin, uma capacidade instalada de cerca de 5000 MW. O modelo prevê que poderia haver uma diminuição de 34 cm na amplitude da maré na barragem, com o efeito se propagando rapidamente para fora da baía. Ainda relativamente perto da barragem (Cabo Split) a variação da amplitude cai a zero e passa a aumentar seu valor na Baía de Fundy e grande parte do Golfo de Maine. O aumento da amplitude iria de 20cm na parte superior da Baía de Chignecto e até 15 cm na Baía de Massachussets. (vide fig. 8, Scientific American, Set. 1987, p. 113).

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

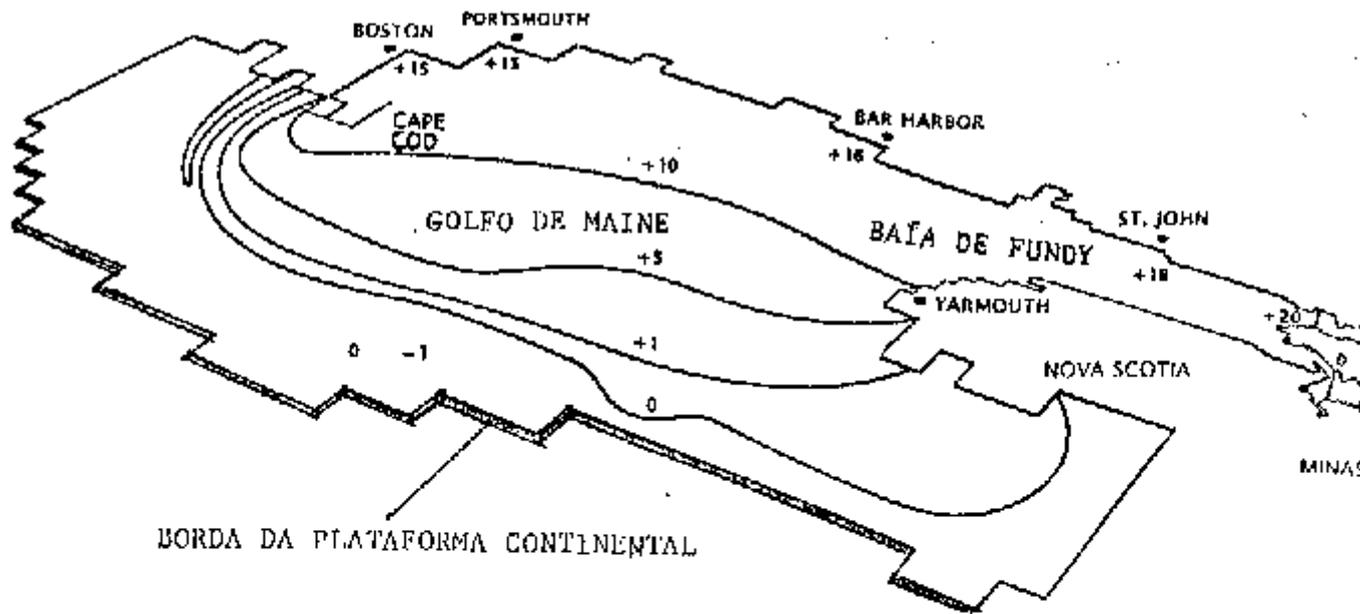


Fig. B - A barragem de Minas Basin apresenta diferentes efeitos: as amplitudes das marés podem cair perto da barragem e aumentar de 10 a 20cm no Golfo de Maine.

Essas alterações nas amplitudes das marés em ambas as simulações podem ser explicadas pela teoria da ressonância.

Colocando na Baía de Fundy uma pequena barragem, o período de ressonância da baía que originalmente é de nove horas, iria sofrer uma redução, ficando mais distante do período da maré lunar de 12,4 horas; isto ocasionaria uma diminuição nas amplitudes das maré da barragem até a desembocadura da baía. Em contrapartida a redução do período de ressonância do conjunto da Baía de Fundy e Golfo de Maine de 13,3 horas em cerca de 10 minutos leva a aproximar-se mais do período da maré (12,4 horas) e portanto causando marés maiores.

No caso do projeto de Shepody, os aumentos de amplitudes acontecem no Golfo de Maine e na entrada da Baía de Fundy. Na parte superior da baía até a barragem acontecem as diminuições nas amplitudes. Na parte central da baía (perto de St. John) os efeitos se cancelam, sem alterações nas amplitudes.

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

A simulação de Minas Basin é complicada pelos efeitos do atrito nos estreitos de Cabo Split, onde grande quantidade de energia é dissipada (proporcional ao quadro da velocidade da água). Como a barragem diminui, o fluxo através desse canal, a maré move-se mais lentamente e menos energia é dissipada. Com isto, no Cabo Split, a massa de água contém mais energia "armazenada", ocasionando marés mais altas. A combinação da dissipação pelo atrito reduzida e a mudança do período de ressonância padrão causam aumentos nas amplitudes das marés, exceto perto da barragem onde há diminuições na amplitude, até Cabo Split, onde os efeitos se anulam.

IV - Turbinas

Serão descritas neste tópico as principais características das turbinas hidráulicas utilizadas em usinas maremotrizes. Estas turbinas hidráulicas se caracterizam por seu grande tamanho (diâmetro por volta de 7 m ou mais) e baixas rotações, devido ao pequeno desnível existentes nestas barragens. Como a água do mar, devido a sua salinidade, provoca corrosão nos materiais usuais, estas turbinas terão de ser construídas com aço inoxidável, o que aumentará em muito o seu custo.

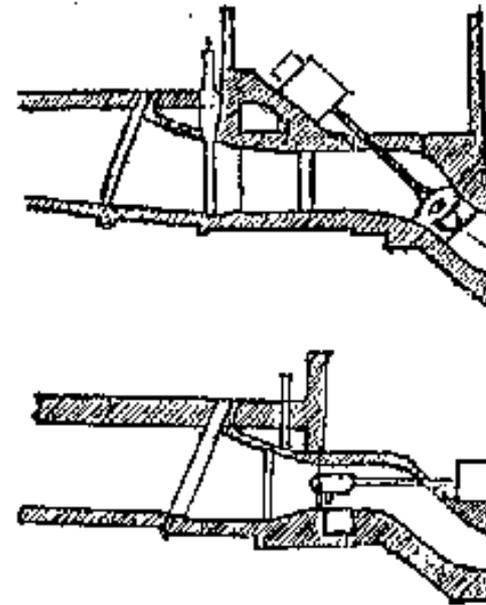
O princípio da geração de energia elétrica a partir do aproveitamento das marés, não difere fundamentalmente daquele utilizado nas usinas hidrelétricas, que exploram o potencial de geração dos rios.

A diferença de energia potencial da água a montante de barragem em relação ao seu nível jzante promove o escoamento da água através das turbinas. A rotação impressa nas turbinas proveniente da passagem de água por suas pás, move o gerador elétrico, produzindo energia que é então distribuída na rede.

Turbinas Tubulares

O rotor de pás fixas ou orientáveis, é colocado num tubo por onde a água se escoar, e o eixo, horizontal ou inclinado, aciona um alternador colocado externamente ao tubo.

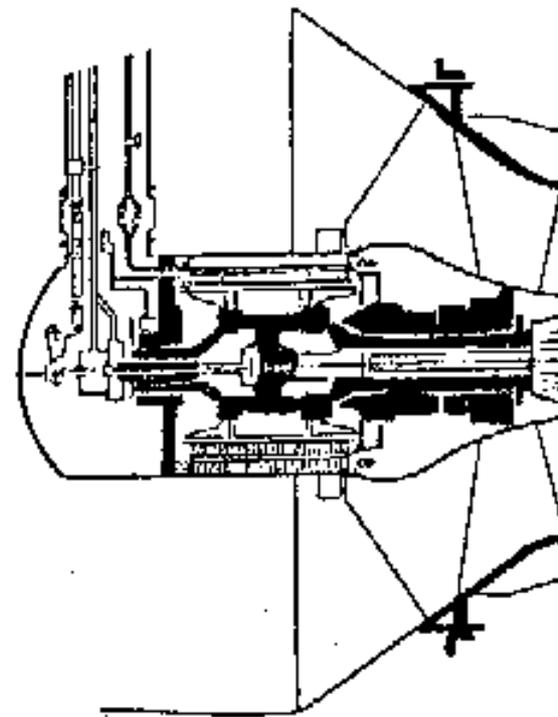
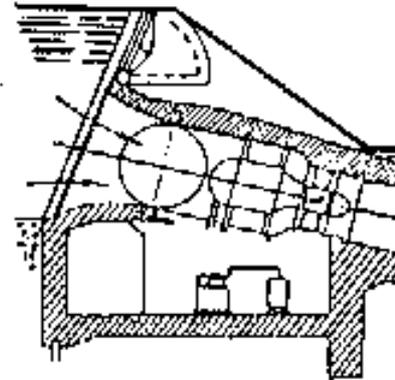
Fig.9- Turbinas tubula-
com eixo inclina-
do e horizontal



Turbinas Bulbo

O rotor possui pás orientáveis e existe uma espécie de bulbo, que é colocado no interior do tubo adutor da água. No interior do bulbo, que é uma câmara blindada, pode existir meramente um sistema de transmissão por engrenagens, para transmitir o movimento do eixo da hélice ao alternador, ou como acontece nos tipos mais aperfeiçoados, no interior do bulbo fica o próprio gerador elétrico.

Fig. 10- Turbina Bulbo com gerador colocado no bulbo e corte longitudinal da mesma



Turbinas Straflow

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

A Escher-Wyss desenvolveu uma turbina de escoamento retilíneo, de volume reduzido e que conduz a uma considerável economia no custo das obras civis.

Na turbina Straflow, o indutor do alternador é colocado na periferia do rotor da turbina formando um anel articulado nas pontas das pás da hélice, as quais podem ser de passo variável.

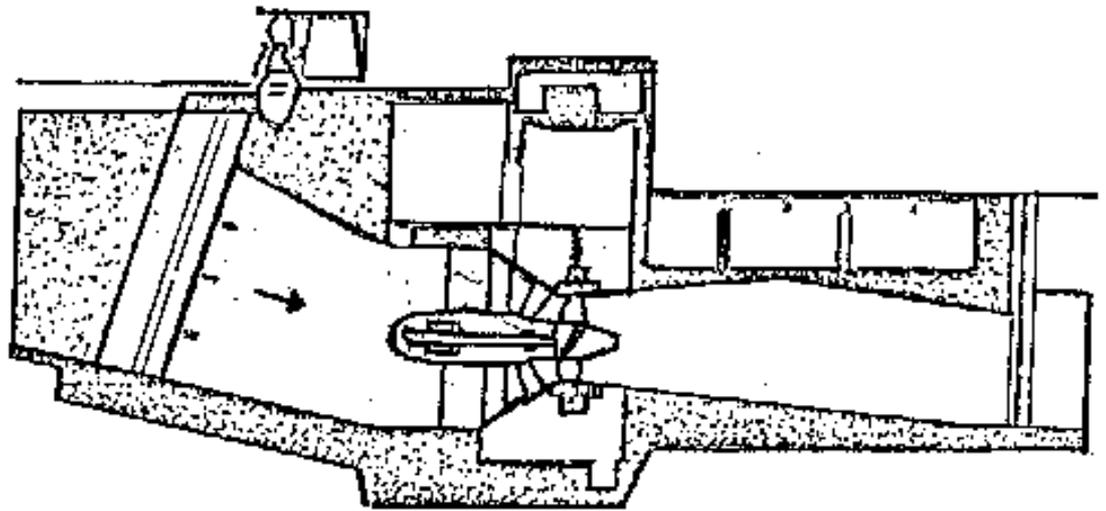


Fig. 11 - Turbina Straflow

CONCLUSÃO

A construção de usina maremotrizes poderá ser uma opção para um futuro próximo, quando o preço do barril de petróleo atingir níveis mais elevados.

Deve-se levar em conta também o impacto ambiental que a construção dessas usinas poderá causar.

Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual de Campinas

As alterações das amplitudes das marés previstas pelo modelo em todo o conjunto Baía de Fundy e Golfo de Maine são menores quando comparadas com as variações provocadas por fenômenos naturais, tais como, ventos fortes, tempestades, etc... Estes fenômenos as vezes causam ondas com mais de 2 metros, o que é muito maior do que os 15 cm de alteração previsto pelo nosso modelo. Na região de Boston, o movimento da crosta terrestre, indica um afundamento da crosta a razão de 15 a 20cm por século.

Em áreas mais sensíveis às variações das marés, as consequências podem ser danosas com o aumento das inundações.

As correntes marítimas também se alterarão com a variação dos níveis da maré, que com o seu aumento, causariam variações nas temperaturas das águas superficiais e profundas. Com o aumento dos níveis de maré a velocidade da corrente aumentaria e isto provocaria uma agitação maior, misturando as águas superficiais e profundas, igualando sua temperatura que normalmente possuía um diferencial maior (no verão as águas superficiais são mais quentes que as profundas). Correntes mais rápidas podem também causar mais erosão ao longo da costa, além de atrapalhar a navegação marítima em locais onde já existia certa dificuldade.

Zonas entre marés(aquelas que são alternadamente inundadas pelas marés), como os mangues, abrigam ecossistemas complexos que podem ou não se adaptarem às mudanças nas zonas de limite de marés. Se por ventura forem construídos diques para deter as inundações, os mangues podem ser destruídos totalmente.

Além disso a construção dessas barragens podem cruzar a migração de algumas espécies de peixes e não se conhece se eles podem ser redirecionados para passagens especiais, para evitar as turbinas

Os efeitos das usinas meremotrizas podem ser menos problemáticos do que outros tipos de usinas geradoras de energia; por isso o aproveitamento das marés é um atrativo recurso de energia renovável e não poluente.

O trabalho mostrou que os modelos de marés são agora corretos o suficiente para prever os efeitos das barragens das usinas no comportamento das marés.

VI - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) BERNSHTEIN, L.B. - Tidal Energy for Electric Power Plants. 1965, Jerusalem, Ed. Israel Program for Scientific Translation Ltd.
- (2) GREENBERG, D. A. - Modeling Tidal Power. Scientific American. USA, Set. 1987, p. 106 - 11
- (3) Notas de aula do Curso de Sistemas Fluidos Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.