

## Energia mareomotriu

Una altra estratègia que ens permet obtenir energia del moviment de l'aigua és l'aprofitament de les mareas. Tal com hem fet pel cas de les centrals hidroelèctriques, el nostre primer objectiu és el d'establir quin és el valor tèoric màxim d'energia o potència que aquest tipus de recurs ens pot oferir. Per a fer això hem d'utilitzar el fet que l'origen de les mareas es troba en la influència gravitatòria que té Lluna i en menor mesura el Sol sobre la Terra. El fenomen queda gràficament reflexat en la Figura 4.1, on s'aprecia com el nivell de l'aigua dels oceans variarà en funció de la posició de La Lluna degut a aquest fenomen gravitatori.

El càlcul que presentem a continuació no és del tot realista però ens dona la idea de com es podria fer per a arribar a una estimació de l'energia associada a l'efecte de les mareas. Observem el dibuix de la Figura 4.1; el punt on l'alçada del nivell d'aigua és  $h_1$  representa un punt de pleamar (marea alta) i el punt amb una alçada de nivell  $h_2$  representa un punt de marea baixa. El nostre objectiu és arribar a determinar el valor de la diferència  $h_1 - h_2$  per a determinar la diferència d'energia potencial entre els dos punts. Per a fer-ho partirem de la hipòtesi de que el sistema del dibuix està en equilibri, és a dir, les masses d'aigua oceàniques s'han desplaçat ja d'una zona a una altra del planeta i s'ha arribat a una situació on els valors de  $h_1$  i  $h_2$  es mantenen aproximadament constants. D'acord amb això podem suposar que la superfície de l'oceà és una línia equipotencial, la qual cosa vol dir que tots els punts d'aquesta superfície tenen un mateix valor d'energia potencial gravitatòria. Com que l'energia total és la suma de l'energia potencial provocada per la Terra i la provocada per La Lluna tindrem

$$\frac{GM_T m}{R_T + h_1} + \frac{GM_L m}{d - R_T - h_1} = \frac{GM_T m}{R_T + h_2} + \frac{GM_L m}{d + R_T + h_2} \quad (4.1)$$

on la part esquerra de la igualtat és l'energia potencial en el punt on el nivell de l'oceà es  $h_1$ , i i la part dreta és l'energia potencial en el punt on el nivell és

$h_2$ . Com es pot intuir,  $M_T$  i  $M_L$  representen la massa de La Terra i de La Lluna respectivament,  $R_T$  és el radi de La Terra i  $d$  és la distància del centre de La Terra al centre de La Lluna. Si eliminem els factors comuns de l'equació i deixem els termes que depenen de  $M_T$  a un costat i els que depenen de  $M_L$  a l'altre obtenim

$$M_T \left( \frac{1}{R_T + h_1} - \frac{1}{R_T + h_2} \right) = M_L \left( \frac{1}{d + R_T + h_2} - \frac{1}{d - R_T - h_1} \right) \quad (4.2)$$

Ara, fent les sumes de fraccions corresponents s'arriba a

$$M_T \frac{h_2 - h_1}{(R_T + h_1)(R_T + h_2)} = M_L \frac{2R_T - h_2 - h_1}{(d + R_T + h_2)(d - R_T - h_1)} \quad (4.3)$$

Com que sabem que  $h_1 \ll R_T \ll d$  (i el mateix passa per  $h_2$ ) podem simplificar alguns dels termes d'aquesta expressió, per arribar a

$$M_T \frac{h_2 - h_1}{R_T^2} = M_L \frac{2R_T}{d^2} \quad (4.4)$$

i així trobem una expressió aproximada per la diferència entre la marea alta i la baixa:

$$h_2 - h_1 = 2 \frac{M_L R_T^3}{M_T d^2} \quad (4.5)$$

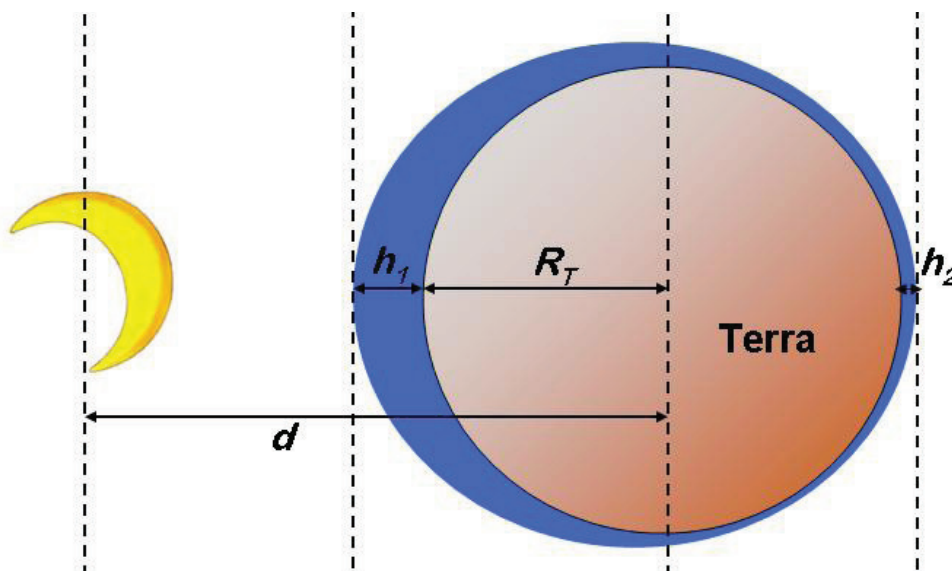


Figura 4.1: Les mareas són l'efecte de la redistribució de la superfície del mar quan s'equilibra entre les energies potencials gravitatòries produïdes per la Terra i la Lluna alhora.

Si substituïm en aquesta expressió els valors corresponents ( $M_T = 6 \cdot 10^{24}$  Kg;  $M_L = 7 \cdot 10^{22}$  Kg;  $R_T = 6.4 \cdot 10^6$  m;  $d = 3.8 \cdot 10^8$  m) obtenim un valor de

$h_2 - h_1 = 42.3$  metres. Per tant, veiem que el valor que surt és significativament més gran que els valors de les mareas reals, que com a màxim solen assolir 10 o 15 metres. El motiu d'això és que en realitat a les mareas no s'acaba d'assolir mai la situació d'equilibri que hem suposat al començament, i a més intervenen altres factors que atenuen l'efecte a la pràctica. No obstant, agafant el nostre valor com a màxim teòric podem calcular l'energia màxima disponible de les mareas. Per a fer això simplement fem servir l'energia potencial gravitatòria de l'oceà, que és  $E = mgh$ . La variació d'energia potencial entre el punt de marea baixa i el de marea alta, doncs, serà

$$\Delta E = mg(h_2 - h_1) \quad (4.6)$$

Podem ara substituir aquí la diferència d'alçades que hem deduit i agafar com a valor de  $m$  la meitat de la massa total d'aigua de l'oceà (això és perquè, tal i com es veu a la Figura 4.1, hi ha punts de l'oceà que no estan directament encarats a La Lluna i on l'efecte és doncs molt més petit, per la qual cosa aquestes masses d'aigua no s'han de comptar; en general considerar que només la meitat de l'oceà es veu afectat és una hipòtesi raonable). Com que la massa total de l'oceà és de  $1.3 \cdot 10^{18}$  Kg, arribem a

$$\Delta E = \frac{1.3 \cdot 10^{18}}{2} \cdot 9.8 \cdot 42.3 = 2.69 \cdot 10^{20} \text{ J} \quad (4.7)$$

i com que aquesta quantitat d'energia pot obtenir-se cada 12 hores (hi ha dues mareas altes cada dia) obtenim la potència corresponent, que és de

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{2.69 \cdot 10^{20}}{12 \cdot 3600} = 6.2 \cdot 10^{15} \text{ W}, \quad (4.8)$$

és a dir, un valor varies vegades superior a la potència consumida a nivell mundial. òbviament, però, aquests números representen només un càlcul teòric; com ja hem dit les mareas a la realitat són força menors i, a més, el seu aprofitament és molt complicat si no és en punts a prop de la costa.

## Tipus de centrals mareomotrius

En aquest apartat volem mostrar els dos tipus de centrals mareomotrius més esteses, les anomenades de *generació en pleamar* i les d'*inundació*. En el primer dels casos, que és possiblement el més habitual, es deixa que quan la marea puja l'aigua pugui entrar en una zona on posteriorment podrem tancar les comportes i l'aigua quedarà embassada (Figura 5.1). D'aquesta manera quan el nivell del mar baixi, el nivell a la zona tancada serà més elevat i aprofitarem en aquell moment per deixar escapar mica en mica l'aigua i fer-la passar per les turbines, com en les centrals hidroelèctriques, per tal de generar electricitat.

En les centrals per inundació (Figura 5.1), en canvi, el que es fa és aprofitar el període en què el nivell del mar puja i, quan aquest nivell arriba a l'alçada d'una certa comporta, l'aigua hi pot travessar i arriba a la zona on estan situades les turbines, generant-se l'energia en aquell mateix moment.

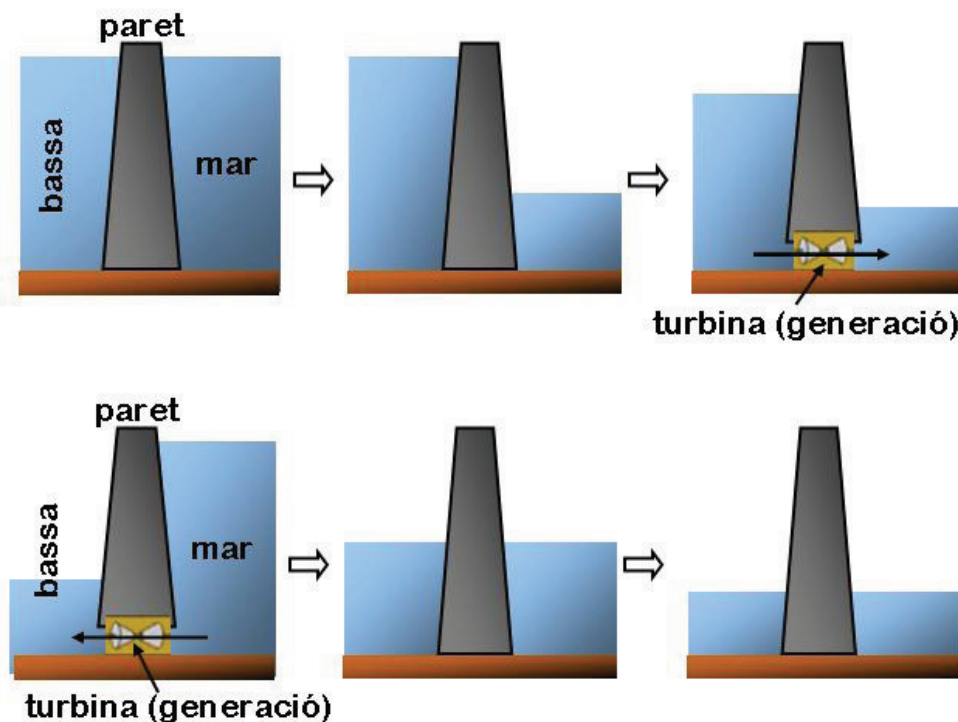


Figura 4.2: Esquema de funcionament d'una central mareomotriu.

L'energia total que poden generar cadascun dels dos tipus de centrals és força senzill de calcular. Pel cas d'una central de generació en pleamar suposem que el recinte on tanquem l'aigua té una superfície de  $200 \text{ Km}^2$  (tot i semblar un valor gran, és força representatiu del tamany que tenen aquestes instal·lacions). Si amb marea alta el nivell del mar puja una alçada de 4 metres, tenim que la massa d'aigua embassada pot arribar a ser de

$$m = \rho V = 1000 \cdot 4 \cdot 200 \cdot 10^6 = 8 \cdot 10^{11} \text{ Kg} \quad (4.9)$$

i d'aquesta manera trobem l'energia que pot generar en cada marea la central, que prové del càlcul de l'energia potencial de l'aigua embassada (afegint el rendiment  $\eta$  per a tenir en compte les possibles pèrdues)

$$E = \eta mgh \quad (4.10)$$

Si agafem un rendiment típic (75%, com en el cas de les hidroelèctriques) i agafem el valor promig de l'alçada (si el nivell màxim era 4 metres, el promig serà  $h = 2$  m) obtenim el valor per l'energia:

$$E = 0.75 \cdot 8 \cdot 10^{11} \cdot 9.8 \cdot 2 = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ J} \quad (4.11)$$

i això suposa una potència promig de

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{1.2 \cdot 10^{13}}{12 \cdot 3600} = 277 \cdot 10^6 \text{ W} \quad (4.12)$$

Fixem-nos en el fet que com més gran sigui l'alçada de la marea més gran és la massa d'aigua emmagatzemada, a més del fet que l'alçada ja apareix en la fórmula de l'energia potencial. Això fa que s'acompleixi la llei d'escala

$$E \sim mh \sim h^2 \quad (4.13)$$

de manera que la dependència en el recurs és molt forta (si el nivell de la marea es fa dues vegades més gran, l'energia generada es multiplica per quatre).

Finalment, en el cas d'una central d'inundació tenim l'avantatge de que no necessitem embassar l'aigua (la qual cosa simplifica en part la instal·lació requerida) i a més en aquest cas l'energia no es produirà en els mateixos moment del dia (es generarà quan el nivell del mar sigui alt, al contrari que en les centrals de generació en pleamar). A banda d'aquests detalls tècnics, però, l'energia generada (i per tant la potència promig) es calcularien de la mateixa manera que hem fet pel cas anterior.

## 4.1 Exercicis

**Influència del Sol en les marees** Calculeu l'alçada de les marees  $h_2 - h_1$  que provoca la influència gravitatòria del Sol sobre La Terra, tenint en compte que la massa del Sol és  $2 \cdot 10^{30}$  Kg i la distància del Sol a La Terra és d'uns 150 millions de quilòmetres. (Nota: feu servir la fórmula deduïda en l'Apartat ??) Deduiu quin percentatge de les marees és degut a l'efecte lunar i quin a l'efecte del Sol.

**Central mareomotriu** La central mareomotriu de Incheon (Corea del Sud) té una superfície de  $158 \text{ km}^2$ . L'altura màxima a la que pot arribar la marea en aquella zona és de 7.4 m. Calcula

1. Quanta aigua pot emmagatzemar la construcció just en el punt de marea alta?

2. Quanta energia potencial gravitatòria enmagatzema tota aquesta aigua si considerem que quan la deixem anar aquesta cau des d'una altura mitjana de 3.7 m (just la meitat de l'altura de la marea)?
3. Quina potència màxima podem obtenir si deixem anar aquesta aigua en el període de baixamar (6 hores)?
4. Quanta aigua pot emmagatzemar la marea just en el punt de marea alta?
5. Quanta energia potencial gravitatòria emmagatzema tota aquesta aigua si considerem que quan la deixem anar aquesta cau des d'una altura mitjana de 3.7 m (just la meitat de l'altura de la marea)?
6. Quina potència màxima podem obtenir si deixem anar aquesta aigua en el període de baixamar (6 hores)?

És viable substituir una central nuclear com la de Vandellós II (1.080 MW de potència) amb energia hidroelèctrica o mareomotriu? Fem-ne els càlculs:

1. Suposant un rendiment hidroelèctric del 75%, quin cabal d'aigua necessitariem per a subministrar la mateixa potència de la central de Vandellós II, si tinguéssim un salt d'aigua de 10 metres? I si el salt fos de 20 metres?
2. Féu un gràfic del cabal necessari en funció de l'alçada del salt.
3. L'Ebre, que és el riu més gran proper a Vandellós II, té en aquella zona un cabal mig de 9.000 hm<sup>3</sup>/any. Quina alçada necessitem per a generar la potència desitjada? És això viable?
4. Tenint en compte que les mareas al mediterrani són petites (agafem com a valor de referència 1 metre) i agafant de nou un rendiment del 75%, quin volum d'aigua de mar és necessari tancar per a aconseguir la mateixa potència que la central nuclear?
5. Quants km<sup>2</sup> de superfície del mar representa el volum de l'apartat anterior? Seria, doncs, viable la idea?