

Energia hidroelèctrica

Els sistemes de generació d'energia basats en l'aprofitament del moviment de grans masses d'aigua i la seva posterior transformació en energia elèctrica representen actualment la sisena part de l'electricitat generada al món, i el 90% respecte del total de les energies renovables.

En aquest capítol desenvoluparem les idees essencials a l'hora d'evaluar els recursos hidroelèctrics naturals de què pot disposar un territori, tant en el cas que l'aprofitament es faci a nivell de l'aigua dels rius (la qual, fonamentalment, prové de les precipitacions atmosfèriques) com en el cas de l'oceà (aprofitant el moviment de les mareas).

3.1 Centrals hidroelèctriques

Les centrals hidroelèctriques, com és ben conegut, aprofiten els salts d'aigua existents en els corrents d'aigua, bé siguin d'origen natural o, en la majoria de casos, artificials creats per l'home mitjançant la construcció de preses. Com que es tracta d'un fenomen associat a la gravetat partirem del fet que que l'energia es troba emmagatzemada a l'aigua en forma d'energia potencial gravitatòria.

Font d'energia

La variació d'energia ΔE associada a una massa d'aigua m que cau per un salt d'alçada h és

$$\Delta E = mgh. \quad (3.1)$$

on $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ és l'acceleració de la gravetat. Com que a l'hora de parlar d'embassament o de cabals de rius és més habitual parlar de volum d'aigua V

que no pas de massa, s'acostuma a substituir aquesta per $m = \rho V$ en la última expressió per tal d'obtenir l'equivalent

$$\Delta E = \rho V g h \quad (3.2)$$

on ρ és la densitat de l'aigua (1000 kg/m^3). L'expressió (3.2) ens indica quanta energia podem treure d'un salt d'aigua, però no ens diu res de la velocitat a la qual ho podem fer. Hem de tenir en compte que a efectes de central energètica el que resulta realment interessant és aquest valor, ja que en última instància ens indica la capacitat d'abastiment d'aquesta. Aquesta la podem obtenir de l'expressió de la potència, o sigui, l'energia per unitat de temps

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{V \rho g h}{\Delta t} = Q \rho g h, \quad (3.3)$$

on hem definit el cabal Q com

$$Q = \frac{V_r}{\Delta t} \quad (3.4)$$

que és l'aigua que cau expressada com a volum per unitat de temps Δt .

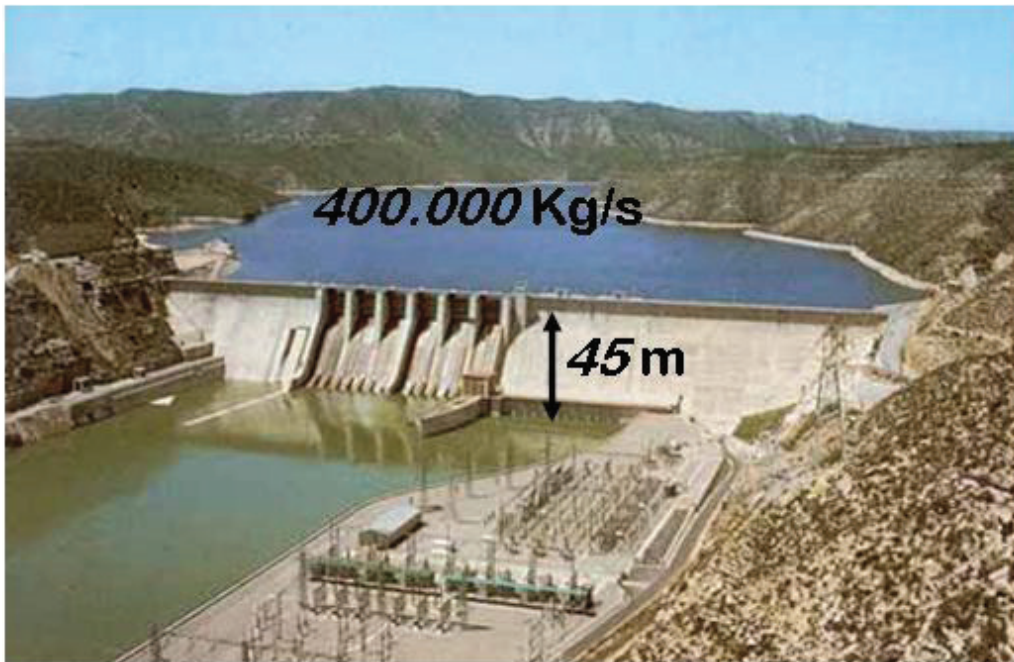


Figura 3.1: Una central hidroelèctrica aprofita la diferència d'alçades de l'aigua abans i després d'un embassament

Veiem doncs a l'equació (3.3) que la potència que podem obtenir d'una central hidroelèctrica depèn de dues variables, el cabal Q que circula per la presa

que serà proporcional al cabal del riu, i l'alçada h de la presa. Les altres dues (ρ i g) són constants i per tant no podem variar-les. Aquesta expressió ens diu que construir centrals serà possible en rius cabalosos i en punts on es pugui construir un gran salt d'aigua. Aquest és el motiu per el qual es situen en les gorges de rius mitjans o grans.

Tipus de centrals hidroelèctriques

Tot i que l'esquema general de les centrals hidroelèctriques és sempre força similar (Figura 3.2), existeix una distinció entre les anomenades centrals *de corrent* i les centrals *d'embassament*. Les centrals de corrent aprofiten l'energia de l'aigua sense que aquesta s'acumuli excessivament en cap moment. Aquest tipus de centrals tenen una instal·lació relativament senzilla i per tant s'utilitzen en llocs on existeix un corrent ràpid d'aigua però on per determinats motius (baix cabal, inaccessibilitat...) no és possible fer instal·lacions més grans. Les centrals d'embassament, per contra, retenen l'aigua en un cert lloc mitjançant preses o murs de contenció i la deixen escapar mica en mica quan la demanda energètica així ho requereix.

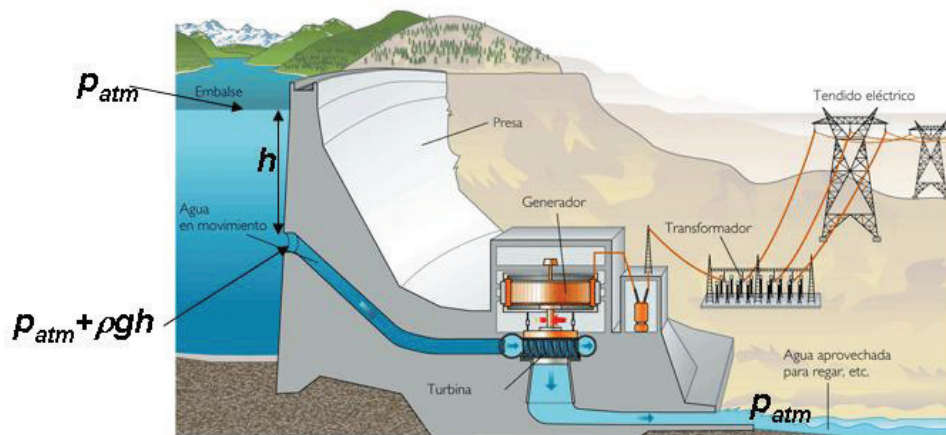


Figura 3.2: Esquema d'una central hidroelèctrica convencional. A la imatge s'indiquen les pressions amb les que la central treballa.

La potència dels dos tipus de centrals pot calcular-se a partir de les fórmules de l'apartat anterior. Hem de diferenciar, però, la quantitat d'energia present en la font en forma d'energia potencial de la que realment obtenim en forma d'energia elèctrica. Per saber quanta energia elèctrica podem generar, hem de multiplicar el valor de l'energia potencial per el rendiment η de la turbina. Aquest té en compte les pèrdues per fregament o altres que es donen a la central. Una

part d'aquesta energia es desapofitarà i es transformarà en calor per acció de les forces de fricció i també hem de considerar que l'aigua després de la turbina segueix retenint una part de l'energia en forma d'energia cinètica. Així doncs, a partir de 3.3 i considerant un rendiment de η , de forma que la potència generada valdrà

$$P = \eta Q \rho g h. \quad (3.5)$$

Esquema d'una central hidroelèctrica

S'acostuma a dir que les centrals hidroelèctriques aprofiten l'energia alliberada per l'aigua en saltar d'una altura determinada. Això però pot portar a creure falsament que l'aigua en una central es deixa anar lliurement des de la part superior fins que arriba al terra. Aquesta no és la forma com un central d'aquest estil genera l'energia. El primer motiu i el més obvi és que si fós així les centrals tan sols podrien generar energia quan el nivell de l'aigua estigués en el punt més alt de la presa. Un segon motiu, de caràcter més tecnològic, és el fet que si es fés així, perdriem una part significativa d'aquesta energia per causa que al arribar a la turbina no tota l'aigua tindria exactament l'angle òptim (perpendicular) amb les pales de la turbina per obtenir el màxim d'energia.

En una central hidroelèctrica real la presa d'aigua s'acostuma a fer per un punt situat prop del fons. No es posa just en el punt més baix perquè els fangs sedimentats farien difícil el seu correcte funcionament embrutant les turbines. El fet que la presa d'aigua es trobi en un punt baix no disminueix l'energia que obtenim de l'aigua, ja que a l'energia provinent de la diferència d'altures entre l'escomesa i l'alliberament de l'aigua li hem de sumar la que prové de l'acció de la pressió hidrostàtica. Com que aquesta pressió és justament el pes de l'aigua que tenim a sobre, la seva expressió és justament la mateixa que la de l'energia potencial gravitatòria. La diferència essencial en ambdós casos prové del fet que en el punt d'entrada, l'aigua, que està per sota del nivell màxim una altura h' , no té pas l'energia cinètica equivalent, sinó que es troba quieta. És tan sols en el moment d'entrar al circuit que guanya aquesta velocitat per efecte de la pressió hidrostàtica.

La turbina

Si ens centrem tan sols en la turbina de la central podem fer un càlcul força descriptiu del procés. Hem d'entendre la turbina com l'equivalent a una resistència elèctrica en un circuit elèctric, per ella hi circula un corrent d'aigua que al xocar amb les pales de la turbina perd part de la seva energia, a l'igual que passa amb els electrons en la resistència elèctrica. El cabal Q i la diferència de pressions sobre la turbina Δp actuen com a equivalents del corrent elèctric i la diferència de

potencial en aquesta comparació. D'aquesta forma podem escriure l'equivalent a la llei d'Ohm (Equació ??) en el cas hidrodinàmic.

$$\Delta p = R_H Q \quad (3.6)$$

on hem expressat per R_H la resistència hidrodinàmica de la turbina. En la Figura 3.2 podem veure que en la part posterior de la turbina la pressió és l'atmosfèrica p_0 mentre que en la part davantera la pressió és igual segons l'equació de Bernoulli a l'atmosfèrica més la hidrostàtica. Això ens dona una diferència de pressions de

$$\Delta p = (p_0 + \rho g h) - p_0 = \rho g h \quad (3.7)$$

La potència d'un dispositiu per el qual hi circula un cabal la trobem a través de la relació

$$P = \Delta p Q = (\rho g h) Q, \quad (3.8)$$

que és la mateixa expressió (3.3) obtinguda anteriorment. La diferència conceptual radica en el fet que la força real que mou les turbines és la pressió hidrostàtica i no l'energia cinètica provinent de la caiguda lliure de l'aigua.

Aquest esquema ajuda a entendre una mica millor les centrals anteriorment anomenades en la secció com *de corrent*. El que fan aquestes centrals no és tan sols posar una turbina dins l'aigua, sinó que forcen aquesta a passar per ella. Això tan sols ho poden fer acumulant una mica l'aigua a la part alta fins que tingui la pressió necessària com per poder passar a través de la turbina de resistència R_H . La diferència essencial en aquest tipus de construccions és que l'embassament és molt petit, arribant a acumular just l'aigua que necessiten per generar la potència desitjada.

Suposem un riu mitjà amb un cabal d'uns $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Calculem a quina altura s'hauria d'acumular l'aigua per generar una potència de 10 MW. Amb el cabal que tenim, la pressió hauria de ser

$$\Delta p = \frac{P}{Q} = \frac{10 \cdot 10^6}{1 \cdot 1000} = 10000 \text{ Pa.} \quad (3.9)$$

Si aquesta pressió ha de provenir de la pressió hidrostàtica del miniembassament posterior, l'altura que ha de tenir aquest és de

$$h = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{10000}{1000 \cdot 9.8} = 1.02 \text{ m} \quad (3.10)$$

Cabal fix i cabal variable

Tant en el cas d'una central de corrent com en una d'embassament podem utilitzar l'equació (3.5); el càlcul del cabal però, serà diferent en els dos casos. En

una central on teòricament no hi ha embassament d'aigua el cabal que hi passa ve donat pel mateix cabal del riu. En una central d'embassament, en canvi, el cabal es pot controlar a voluntat deixant passar més o menys quantitat d'aigua. El càlcul es pot fer considerant l'equació de continuïtat d'un flux (Equació ??):

$$Q = \rho Av \quad (3.11)$$

on ρ és la densitat de l'aigua, A és la secció del conducte i v la velocitat del fluid en el moment de travessar la turbina. L'aigua es fa passar a través d'un conducte pel qual se la condueix cap a la turbina. Aquest conducte fa accelerar l'aigua degut a una diferència d'alçades h ; aplicant conservació de l'energia i sense tenir en compte els fregaments trobem que

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{2gh} \quad (3.12)$$

Ara podem introduir aquesta expressió dins de l'equació pel cabal Q i de la potència per a acabar obtenint

$$P = \eta \rho A \sqrt{2gh} gh = \eta \rho A \sqrt{2g^3 h^3} \quad (3.13)$$

que és la fórmula que ens permet fer el càlcul de la potència de la central. Podem ara agafar les dades d'una central real per tal de fer el càlcul. Per exemple, pel cas de la central del Pantà de Mequinenza (situat també al curs del riu Ebre) tenim en promig $h = 45$ m (Figura 3.2) i un rendiment del 75% (és a dir, $\eta = 0.75$). De forma aproximada podem suposar que la superfície del conducte de les turbines per on cau l'aigua és de $A = 30$ m². Amb tot això, el valor de la potència que surt és

$$P = 0.75 \cdot 1000 \cdot 30 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.8^3 45^3} = 295 \cdot 10^6 \text{ W} \quad (3.14)$$

valor que és força proper al valor nominal de la central, que està teòricament estipulat en 324 MW.

Si la central no fos d'embassament sinó que fos una central de corrent el càlcul s'hauria de fer considerant el valor del cabal del riu Ebre. En el seu pas per Mequinenza el cabal promig de l'Ebre és aproximadament d'uns 400.000 Kg/s. Amb això trobaríem

$$P = \eta Qgh = 0.75 \cdot 400.000 \cdot 9.8 \cdot 45 = 132 \cdot 10^6 \text{ W} \quad (3.15)$$

que és un valor inferior a l'anterior (menys de la meitat). Hem de tenir en compte que en una central d'embassament la potència és superior perquè podem deixar anar l'aigua de cop quan ens interessa, però l'energia total que es pot obtenir en els dos casos ha de ser evidentment la mateixa (perquè la quantitat d'aigua disponible al llarg de l'any és la mateixa). Per tant, la central d'embassament no

pot funcionar totes les hores de l'any a la seva màxima potència (això voldria dir que deixa anar l'aigua a un ritme més ràpid que el ritme al qual l'aigua li arriba del riu, i hauria un moment en què l'aigua s'exhauriria), però això a la pràctica no és un problema excessiu ja que la demanda energètica no és la mateixa durant tot el dia ni tot l'any.

3.2 Capacitat hidroelèctrica d'una conca

Amb el conceptes d'energia potencial gravitatòria i pensant una mica com l'aigua de les plujes va a parar finalment al riu, és possible avaluar la capacitat hidroelèctrica teòrica d'un territori. Definim aquesta magnitud com la potència màxima que podríem obtenir de la conca d'un riu si la omplíssim al màxim de centrals hidroelèctriques. Per tal d'entendre el concepte plantejarem un exemple concret. Calcularem quina és la capacitat hidroelèctrica màxima del riu Ebre al llarg de tot el seu recorregut.

Hem vist en l'equació (3.3) com la potència depèn del cabal i l'alçada de la central, així doncs per calcular la capacitat hidroelèctrica necessitarem el cabal i l'alçada mitjana del riu.

Per obtenir el cabal, primer de tot necessitem conèixer l'índex de pluviometria per saber quina quantitat d'aigua de pluja rep el riu. Aquí necessitem fer una primera hipòtesi per diversos motius ja que no a totes les zones per on passa l'Ebre la pluviometria és la mateixa i a més la variació estacional també és important. Nosaltres, per obtenir un valor aproximat de referència, considerarem el valor mitjà de pluviometria anual per a la zona Nord d'Espanya, que és de $p = 600 \text{ l/m}^2$. La conca de l'Ebre (és a dir, la superfície total del territori que aporta aigua a nivell de terra o del subsòl a l'Ebre) és d'uns 86.000 Km^2 . Això ens dona un volum anual d'aigua de pluja caiguda de

$$V_p = \rho p A = 1 \cdot 600 \cdot 86.000 \cdot 10^6 = 5.16 \cdot 10^{16} \text{ l} \quad (3.16)$$

Hem de tenir en compte que no tota aquesta aigua acabarà en el riu. Part d'aquesta serà absorbida pel subsòl i la vegetació, part s'evaporarà i tan sols una fracció de la pluja inicial finalment arribarà al riu. Al valor que indica la fracció de l'aigua que acaba formant el riu se l'anomena índex d'escortrentia i pel cas de l'Ebre una assumptió raonable és suposar que aquest valor és de $e = 0.30$. Amb tot això tenim que l'Ebre anualment rep un aport mitjà de

$$V_r = V_p \cdot e = 5.16 \cdot 10^{16} \cdot 0.3 = 1.55 \cdot 10^{16} \text{ l} \quad (3.17)$$

que és la quantitat d'aigua que circula pel riu, disponible per a obtenir energia. Si volem saber el cabal, hem de dividir aquesta quantitat entre el temps en el

qual circula, que en el nostre cas és un any

$$Q = \frac{V_r}{\Delta t} = \frac{5.16 \cdot 10^{13}}{365 \cdot 24 \cdot 3600} = 1.55 \cdot 10^6 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 477 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.18)$$

A efectes del càlcul ens trobem amb el problema que no tot aquest cabal entra a formar part del riu en el mateix lloc, sinó que ho va fent al llarg de tot el seu recorregut. Per tal de solucionar-ho farem la hipòtesi que l'aigua entra al riu al principi i el seu cabal és el mateix en qualsevol punt del seu recorregut.

En segon terme necessitem el valor de l'alçada a la qual aquesta aigua s'incorpora al riu per tal de determinar la seva energia potencial. El valor mig de l'alçada $\langle h \rangle$ es pot estimar de forma molt simplificada com el promig entre l'alçada al naixement del riu (en el cas de l'Ebre aquest neix a Cantàbria, a una alçada de 880 metres per sobre del nivell del mar) i l'alçada en la desembocadura (nivell del mar). Per tant trobem que $\langle h \rangle = 440$ m. Així doncs, la potència promig resulta ser

$$\langle P \rangle = 477 \cdot 1000 \cdot 9.8 \cdot 440 = 2.1 \cdot 10^9 \text{ W} = 2.1 \text{ GW} \quad (3.19)$$

Tot i tractar-se d'un càlcul molt aproximat, aquest valor no és tan diferent del valor de $4.6 \cdot 10^9$ W estimat mitjançant estudis sofisticats per part del IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía de España). Aquesta potència equival a la potència de sis grans centrals tèrmiques, o més o menys a la potència mitjana del consum elèctric de tota Catalunya.

Òbviament la quantitat d'energia hidroelèctrica que a la pràctica es pot obtenir és força inferior a aquest valor màxim teòric. Hem de tenir en compte que no podem col·locar preses o altres sistemes per a l'aprofitament de l'energia en qualsevol punt del riu. Per exemple, en el tram inicial del riu la quantitat d'aigua que porta és petita i a més passa per zones muntanyoses, de manera que no seria eficient aprofitar aquesta energia; això ens dóna una part de les pèrdues. També acostuma a ser complicat instal·lar centrals hidroelèctriques massa a prop de la desembocadura, on el desnivell acostuma a ser petit, de manera que l'últim tram del recorregut on el cabal és molt gran també es perd. Per tal de fer-nos una idea, hem de pensar que pel cas de l'Ebre hi ha estudis que diuen que la potència realment aprofitable des d'un punt de vista tecnològic, ja tenint en compte aquestes pèrdues i altres similars és només el 40% respecte del màxim teòric.

3.3 Sistemes d'integració en la demanda energètica

Un dels grans desavantatges de la majoria de sistemes de generació d'energia a gran escala (centrals tèrmiques, centrals nuclears...) és la dificultat que aquests

tenen per tal d'adaptar-se a la demanda energètica de la societat. Els consums augmenten molt durant el dia i baixen durant la nit, però en molts casos les centrals es veuen obligades a continuar treballant a potències elevades fins i tot en moments de demanda baixa ja que tecnològicament no estan pensades per poder treballar a qualsevol potència o poder variar el seu règim de funcionament de manera ràpida. Les centrals hidroelèctriques són una de les solucions més habituals a aquest problema, ja que permeten un emmagatzematge senzill i ràpid de l'energia sobrant.

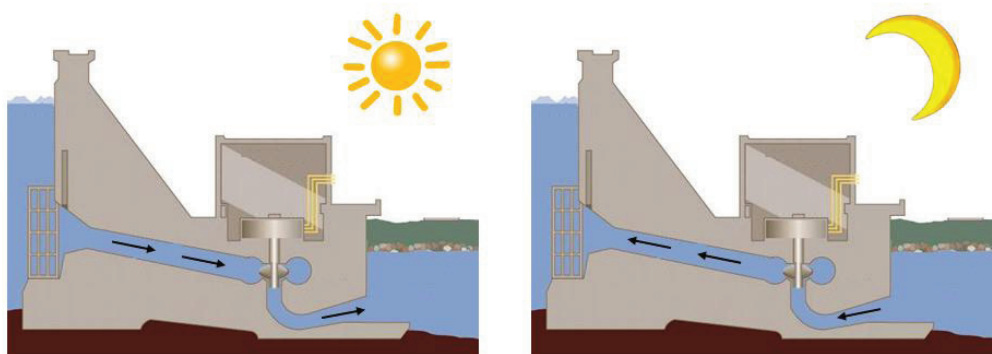


Figura 3.3: Esquema d'una central hidroelèctrica de bombeig. A l'esquerra es representa el funcionament normal, a la dreta, el funcionament invers que algunes centrals utilitzen per estalviar l'energia excendent d'algunes centrals tèrmiques.

Aquest és el principi de funcionament de les anomenades *centrals de bombeig*. Durant el dia aquestes centrals poden generar energia com qualsevol altra central, però durant la nit consumeixen l'energia sobrant d'altres centrals bombejant aigua de nou cap a l'embassament. D'aquesta manera se li pot donar una 'sortida' a l'energia excendent i aquesta s'aprofita per a generar nova energia a posteriori en la central hidroelèctrica. Evidentment, l'únic aspect negatiu d'això és que durant tot el procés de transport de l'energia i de bombeig es produeixen també pèrdues, i per tant la recuperació de l'energia no és completa.

Per exemple, imaginem una central tèrmica de 800 MW que durant la nit només pot reduir el seu ritme de treball al 50% (per tant, a una potència de 400 MW). En canvi, la demanda energètica que té aquesta central (del consum domèstic, industrial, etc) durant la nit és només de 250 MW. Si aprofitem el sobrant (150 MW) per a bombejar aigua a la central hidroelèctrica, quants litres podem recuperar? Com que el que volem és elevar l'alçada d'una massa d'aigua necessitem donar-li energia (amb les bombes) per tal de concedir-li energia potencial gravitatòria. és a dir

$$mgh = \eta E \quad \Rightarrow \quad m = \frac{\eta E}{gh} \quad (3.20)$$

on E és l'energia sobrant de la cantral i η és el rendiment de les bombes (que ens dóna la fracció de E que finalment es convertirà en energia potencial). Si suposem que hi ha 8 hores de nit on estem reaprofitant l'energia, el valor d'aquesta serà

$$E = P\Delta t = 150 \cdot 10^6 \cdot 8 \cdot 3600 = 4.32 \cdot 10^{12} \text{ J.} \quad (3.21)$$

Això ens porta a que la massa d'aigua que podem bombejar (imaginem que el rendiment de les bombes és del 60% i que l'alçada per tal de portar l'aigua de nou a l'embassament són $h = 30$ metres) durant la nit és

$$m = \frac{0.6 \cdot 4.32 \cdot 10^{12}}{9.8 \cdot 30} = 8.8 \cdot 10^9 \text{ Kg,} \quad (3.22)$$

que són uns 8.8 hm^3 d'aigua. També podem calcular l'energia reaprofitada (la que tornarà a la xarxa elèctrica). Aquesta és igual a l'energia E que ens arriba de la tèrmica, descomptant les pèrdues a les bombes (que són el 40%) i les pèrdues a la central hidroelèctrica en el moment de generar energia una altra vegada (si el rendiment de la central és del 75%, les pèrdues són del 25%). Per tant ens queda

$$E_{aprof} = 0.6 \cdot 0.75 \cdot 4.32 \cdot 10^{12} = 1.94 \cdot 10^{12} \text{ J} \quad (3.23)$$

3.4 Efectes ambientals de les centrals hidroelèctriques

Tot i que en general s'associen les energies renovables amb el concepte d'energia neta, és a dir, amb sistemes que no perjudiquen el medi ambient, aquesta idea dista molt de ser certa a la pràctica. En el cas de les centrals hidroelèctriques, en particular, la seva instal·lació representa uns certs riscos ambientals que no són en absolut menyspreables. En primer lloc, la construcció de grans presses i pantans fa necessari alterar fortament el curs dels rius i la dinàmica habitual dels ecosistemes de la zona, amb el subseqüent desplaçament o desaparició de moltes espècies biològiques. A més, existeix un altre fenomen força menys conegut però sobre el qual han alertat ja en els darrers anys diferents organitzacions internacionals. Es tracta del fet que, degut a la inundació de moltes zones riques en matèria orgànica, els organismes deixen de poder realitzar molts dels processos aeròbics (amb presència d'oxigen) que portarien a terme en condicions normals. Enlloc d'això, es produeixen degradacions de tipus anaeròbic, la qual cosa comporta l'emissió de metà (CH_4) que és un dels gasos més perjudicials pel que fa a l'efecte hivernacle. La quantitat d'aquestes emissions depen de diferents factors (sobretot del tipus de vegetació i els paràmetres climàtics), sense que es coneguin encara els detalls dels mecanismes corresponents. Fins i

tot s'han arribat a detectar casos on les emissions per metà d'una central hidroelèctrica superen l'efecte hivernacle que tindria una central tèrmica que produís la mateixa quantitat d'energia, tot i que aquests són casos extrems i en promig les emissions acostumen a ser força inferiors.

3.5 Exercicis

1. Disposem d'un dipòsit d'aigua cilíndric de 5 m d'alçada i 1 m de radi ple d'aigua situat dalt d'un edifici de 150 m d'alçada
 - a) Calcula l'energia potencial gravitatòria que té l'aigua del dipòsit respecte de la base de l'edifici
 - b) Si deixem anar l'aigua a un ritme de 1 l/s, quina potència obtindriem
 - c) Durant quanta estona podriem generar electricitat a través d'aquest mecanisme

2. Per tal de comprovar l'equació de Bernoulli resulta força descriptiu realitzar el següent experiment. Agafeu una ampolla d'aigua i realitzeu una perforació a prop de la seva base. Ompliu-la d'aigua intentant que l'aigua no s'escapi pel forat posant-hi el dit. Calculeu l'alçada del nivell d'aigua respecte del forat practicat. Poseu l'ampolla a sobre d'una taula.
 - a) A quina velocitat sortirà del forat l'aigua?
 - b) A quina distància de la taula haurem de posar un got per tal de recollir l'aigua que surti del forat?

3. **Central hidroelèctrica.** El pantà de Mequinensa, amb una capacitat de 1533 hm^3 , és el pantà més gran de Catalunya amb capacitat de generació hidroelèctrica. La presa té una altura de 81 m. El caudal mitjà del riu Ebre és de $450 \text{ m}^3/\text{s}$. Amb aquestes dades calcula.
 - a) Si partim de l'embassament buit, quants dies trigariem en omplir-lo si no deixéssim passar gens d'aigua deprés de l'embassament?
 - b) Quanta energia potencial gravitatòria podem tenir enmagatzemada en el pantà com a màxim?
 - c) Si fem servir tan sols aquest embassament per donar servei elèctric a la ciutat de Barcelona, amb una demanda de potència de 0.5 MW, quant de temps d'autonomia tindriem i quin cabal d'aigua hauriem d'alliberar?

- d) Si deixem passar el cabal mitjà, quina potència podem obtenir? En aquest cas, què passaria amb el nivell d'aigua?
 - e) Fem servir aquest pantà per emmagatzemar l'energia provinent de la central nuclear de Vandellós II, amb una potència elèctrica de 1GW. Si el rendiment dels motors de bombeig és del 50%, durant quants dies podríem bombejar aigua per tal d'emmagatzemar tota aquesta energia?
4. **Potència de la pluja.** Imaginem que a algú se li acudís posar en marxa un sistema de generació d'energia hidroelèctrica que aprofités no el salt d'aigua d'un riu sinó l'aigua que directament cau de la pluja. Òbviament el sistema seria poc rendible perquè la disponibilitat de pluja al llarg de l'any és petita, però potser en moment de pluja intensa el sistema podria donar nivells acceptables d'energia.
- a) Si les gotes de pluja es troben inicialment a l'atmosfera a 1.500 metres d'alçada, quanta energia potencial gravitatòria té disponible cada litre d'aigua?
 - b) Si les gotes caiguessin des de l'alçada de l'apartat anterior sense fregament, l'energia potencial s'aniria transformant en cinètica durant la caiguda. Quina velocitat tindrien les gotes en arribar a terra?
 - c) Si fem el càlcul realista i tenim en compte el fregament de la gota amb l'aire, aquesta assolirà de seguida una velocitat de caiguda constant. En aquesta situació voldrà dir que hi ha un equilibri entre les forces que empenyen cap avall (pes) i les que actuen cap a dalt (força d'Arquímedes i fregament). Calculeu així el valor de la força de fregament corresponent a una gota de 0,5 cm de radi.
 - d) Si la força de fregament de la gota amb l'aire segueix l'expressió $F = 5v^2$, trobeu el valor de la velocitat v de la gota i compareu amb el resultat obtingut abans sense fregament.
 - e) Determineu amb les dades anteriors el cabal d'aigua que cau sobre la turbina, si aquesta té un àrea de 10 m^2 vista des d'adalt i en cada metre quadrat cauen 10 gotes cada segon.
 - f) Quina potència generarem a la turbina si el seu rendiment en aquestes condicions és del 20% (el rendiment d'una turbina oberta és força menor que el de les turbines tancades, en les quals l'aigua omple tot el conducte).
 - g) Si aconseguíssim, mitjançant un sistema de canalitzacions, fer caure sobre la turbina tota l'aigua de pluja corresponent a 100 m^2 , quina seria ara la potència que obtindríem?