

Emmagatzematge d'electricitat: centrals de bombament

Carles Riba Romeva, 22 d'abril de 2020

1. Objectiu:

Aquest text estudia les capacitats d'un sistema d'emmagatzematge d'energia elèctrica basat en centrals hidroelèctriques reversibles de bombament amb doble embassament.

Com a exemple, s'analitza la relació entre la capacitat de l'embassament superior (en hm³) i la potència necessària en la descàrrega (en MW) del sistema de Saus-Susqueda per alimentar una ciutat com Barcelona (1.620.000 habitants) o un país com Catalunya (7.544.000 habitants, incloent Barcelona) durant períodes de temps creixents des d'1 hora.

2. Consideracions Prèvies:

Els factors principals que intervenen en un sistema d'emmagatzematge d'energia són els següents:

- a) **Capacitat i altura de l'embassament** (en hm³ i m). D'aquests valors se'n dedueix l'energia (en GWh) que pot proporcionar en condicions d'omplerta màxima, sempre que no calgui reservar o destinar aigua a altres usos. Cal tenir present que, en baixar el nivell de les aigües, també baixa el salt hidràulic i, per tant, l'energia obtinguda va disminuint per al mateix volums d'aigua.
- b) **Potència de bombament i de generació** (en MW). És la potència nominal de les màquines que actuen com a bomba i com a turbina hidràulica (en general és la mateixa). Té a veure amb les necessitats actuals de regulació d'un sistema energètic encara basat amb recursos d'estoc no renovables (per això es parla de potència) i no en la capacitat dels embassaments, relacionats amb l'emmagatzematge d'energia renovable (en GWh).

Si bé els rendiments a curt termini de les centrals de bombament (bombejar i turbinar aigua) com a magatzem d'energia elèctrica són relativament elevats (de l'ordre de 80%), la capacitat dels embassaments són moderats davant dels requeriments de les xarxes elèctriques de les grans ciutats, països i regions, de forma que tan sols poden proveir electricitat durant unes poques hores o pocs dies.

Si aquestes centrals s'usessin per emmagatzemar energia elèctrica a llarg termini (per exemple l'electricitat sobrant obtinguda durant l'estiu per utilitzar-la a l'hivern) es produirien unes pèrdues addicionals de rendiment molt més significatives a causa de l'evaporació i les filtracions.

Per altre costat, cal tenir en compte que, més enllà dels usos energètics, l'aigua i els embassaments fan moltes altres funcions essencials (algunes prioritàries) ambientals i de sosteniment de la vida i les activitats humanes. Entre d'altres: 1) Els cabals ecològics dels rius; 2) L'aigua per a regadiu; 3) L'aigua de les xarxes urbanes (aigua de boca i industrial); i 4) Esmortiment de les grans riuades.

Tot això fa que, la gestió de l'aigua no gaudeixi de la llibertat de gestió que reclamen les aplicacions hidroelèctriques. En aquest sentit, una central de bombament en un sistema d'embassaments que també realitzen altres funcions és de molt difícil gestió.

Tipus de centrals de bombament:

A continuació s'estudien dos possibles sistemes d'emmagatzematge amb centrals de bombament:

- a) **Grans embassaments amb salts reduïts**. Aquest tipus d'embassaments solen trobar-se en els cursos dels rius i cobreixen part de les seves valls. Els salts solen ser moderats (de 50 a 150 m) on el salt hidràulic i la profunditat de l'embassament pràcticament coincideixen (abans de la sedimentació). Això fa que, per mantenir un rendiment acceptable d'energia/aigua en la generació d'electricitat, es turbinin tan sols les capes superficials de l'embassament a fi de no baixar massa el seu nivell i, per tant, el salt.

- b) **Petits embassament amb salts molt grans.** Se situen en emplaçaments d'alta muntanya o en costes elevades sobre el mar, on el menor volum d'aigua es compensa per un salt molt més elevat (de 200 a 500 o més metres). Sol ser més fàcil dedicar-lo tan sols a l'emmagatzematge, combinat amb les aigües que recull la petita conca superior. L'efectivitat energia/aigua és molt constant, per la qual cosa pràcticament tota l'aigua de l'embassament superior és útil.

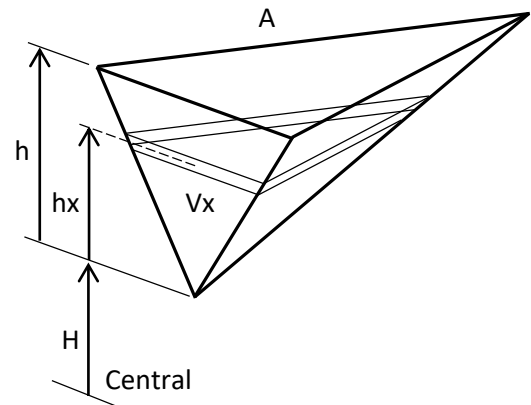
Com es justificarà més endavant, en tot cas és convenient que les centrals de bombament per a emmagatzemar energia elèctrica es dediquin específicament a aquest fi.

3. Energia obtinguda en el buidatge d'un embassament:

A continuació es fa una anàlisi simplificada de l'energia que es pot obtenir en el buidatge d'un embassament. S'han estudiat tres tipus d'embassament amb formes simplifiades:

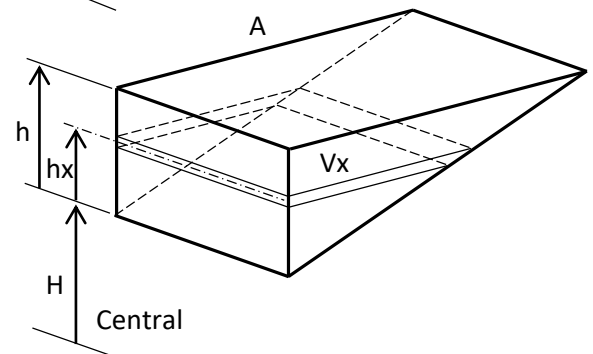
a) **Embassament en forma de tetraedre**

L'erosió clàssica dels rius dóna lloc a valls de secció en forma de V. Alhora, des de la presa, on hi ha la major profunditat fins a l'inici de l'embassament, el riu va pujant fins que la profunditat és nul·la. Això permet modelitzar l'aigua embassada com un tetraedre amb una cara vertical (determinada pel barratge), una cara horitzontal (la làmina superior d'aigua) i dues cares laterals formades pels vessants de les muntanyes.



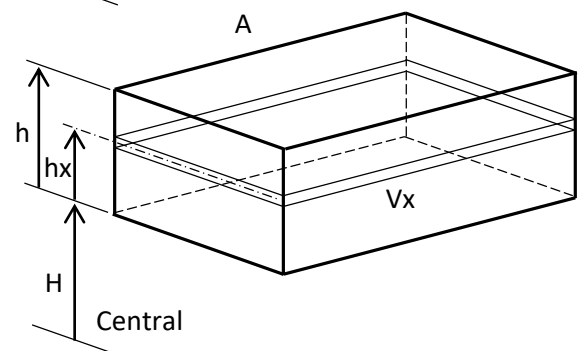
b) **Embassament en forma de prisma**

L'erosió clàssica dels glaciers dóna lloc a valls en forma en forma de U (propera a una secció rectangular) on el fons va pujant des del barratge fins a la capçalera. Això permet modelitzar l'aigua embassada com un prisma amb una cara vertical (barratge), una cara horitzontal (làmina superior d'aigua) un fons inclinat i les dues cares dels vessants de les muntanyes.



c) **Embassament en un dipòsit artificial**

Si no s'aprofita la forma del terreny, l'embassament sol ser un paral·lelepípede, tot i que amb canalitzacions pot adoptar forma prismàtiques o cilíndriques: una cara és la làmina superior de l'aigua, el fons sol ser pla i les parets poden adoptar altres formes.



Es parteix dels següents paràmetres:

| | | |
|----------------------------------|----|------------|
| Àrea de la superfície: | A | (hm^2) |
| Altura del fons a la superfície: | h | (hm^2) |
| Altura de la central al fons: | H | (hm^2) |
| Altura de la làmina de càlcul: | hx | (hm^2) |

En tots els casos es segmenta l'embassament en 20 làmines d'aigua de volum V_x que van de l'altura h_{x-1} a h_x . A partir de definir els paràmetres adimensionals $\rho_{n-1} = h_{n-1}/h$ i $\rho_n = h_n/h$, essent δ la densitat i g l'acceleració de la gravetat, es poden establir les següents expressions:

| | Paral·lelepípede | Prisma | Tetraedre |
|------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Volum | $V = A \cdot h$ | $V = A \cdot h / 2$ | $V = A \cdot h / 3$ |
| Volum làmina x | $V_x = V \cdot (\rho_n - \rho_{n+1})$ | $V_x = V \cdot (\rho_n^2 - \rho_{n+1}^2)$ | $V_x = V \cdot (\rho_n^3 - \rho_{n+1}^3)$ |
| Altura làmina x | $h_x = h \cdot (\rho_n - \rho_{n+1})$ | $h_x = h \cdot (\rho_n - \rho_{n+1})$ | $h_x = h \cdot (\rho_n - \rho_{n+1})$ |
| Energia làmina x | $E_x = \delta \cdot V_x \cdot g \cdot (H + h_x)$ | $E_x = \delta \cdot V_x \cdot g \cdot (H + h_x)$ | $E_x = \delta \cdot V_x \cdot g \cdot (H + h_x)$ |

A continuació s'analitza l'energia nominal que proporciona el buidatge de diferents casos d'embassament (sense alimentació d'aigua) :

- A) Embassament de $V = 150 \text{ hm}^3$ de forma de tetraedre, profunditat $h = 80$ metres i sense salt aigües avall ($H = 0$). Podria ser representatiu d'un eventual sistema de bombament aplicat al conjunt d'embassament de Saus-Susqueda.
- B) Embassament de 150 hm^3 de forma prismàtica, profunditat $h = 80$ metres i sense salt aigües avall ($H = 0$). Cas hipotètic representatiu d'un doble embassament de riu en una vall erosionada per un glaciari o molt plana.
- C) Embassament de 150 hm^3 de forma paral·lelepípedica, profunditat $h = 80$ metres i sense salt aigües avall ($H = 0$). Cas hipotètic d'un embassament de profunditat constant..
- D) Embassament de $V = 3,2 \text{ hm}^3$ de secció en forma de prisma (pròxima a les valls glaciars en U), profunditat de $h = 15$ metres i amb un salt aigües avall de $H = 370$ metres. És representatiu de la central de bombament entre l'embassament de Sallente i l'estany de Gento a la capçalera del riu Flamisell a la Vall Fosca (Pallars Jussà).

| Geometria de l'aigua | | A | B | C | D |
|------------------------|---------------|-----------|--------|------------------|--------|
| | | Tetraedre | Prisma | Paral·lelepípede | Prisma |
| Volum d'aigua, V | hm^3 | 150 | 150 | 150 | 3,25 |
| Profunditat, h | m | 80 | 80 | 80 | 15 |
| Salt central a fons, H | m | 0 | 0 | 0 | 370 |

Les simulacions d'aquests tres casos donen els següents resultats:

Cas A

Volum V = 150 hm³ (forma de tetraedre); profunditat h = 80 m; salt: H = 0 m
Resultats generals: A = 562,5 ha; E₀ = 32,67 GWh

| Capa | Altura del salt | Volum làmina | Volum desemb. | | Pes làmina | Energia làmina | Energia acumul. | | Efectivitat |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------|----------------|-----------------|--------|---------------------|
| | hx + H | Vx | ΣVx | | Wx | Ex | ΣEx | | Ex/Vx |
| Nº | m | hm ³ | hm ⁴ | % | GN | GWh | GWh | % | GWh/hm ³ |
| 1 | 78,0 | 21,4 | 21,4 | 14,3% | 209,7 | 4,54 | 4,54 | 18,6% | 0,212 |
| 2 | 74,0 | 19,3 | 40,7 | 27,1% | 188,7 | 3,88 | 8,42 | 34,4% | 0,201 |
| 3 | 70,0 | 17,2 | 57,9 | 38,6% | 168,9 | 3,28 | 11,71 | 47,8% | 0,191 |
| 4 | 66,0 | 15,3 | 73,2 | 48,8% | 150,1 | 2,75 | 14,46 | 59,1% | 0,180 |
| 5 | 62,0 | 13,5 | 86,7 | 57,8% | 132,5 | 2,28 | 16,74 | 68,4% | 0,169 |
| 6 | 58,0 | 11,8 | 98,6 | 65,7% | 115,9 | 1,87 | 18,61 | 76,0% | 0,158 |
| 7 | 54,0 | 10,3 | 108,8 | 72,5% | 100,5 | 1,51 | 20,11 | 82,2% | 0,147 |
| 8 | 50,0 | 8,8 | 117,6 | 78,4% | 86,2 | 1,20 | 21,31 | 87,1% | 0,136 |
| 9 | 46,0 | 7,4 | 125,0 | 83,4% | 72,9 | 0,93 | 22,24 | 90,9% | 0,125 |
| 10 | 42,0 | 6,2 | 131,3 | 87,5% | 60,8 | 0,71 | 22,95 | 93,8% | 0,114 |
| 11 | 38,0 | 5,1 | 136,3 | 90,9% | 49,8 | 0,53 | 23,48 | 95,9% | 0,103 |
| 12 | 34,0 | 4,1 | 140,4 | 93,6% | 39,9 | 0,38 | 23,86 | 97,5% | 0,093 |
| 13 | 30,0 | 3,2 | 143,6 | 95,7% | 31,1 | 0,26 | 24,11 | 98,5% | 0,082 |
| 14 | 26,0 | 2,4 | 146,0 | 97,3% | 23,3 | 0,17 | 24,28 | 99,2% | 0,071 |
| 15 | 22,0 | 1,7 | 147,7 | 98,4% | 16,7 | 0,10 | 24,39 | 99,6% | 0,060 |
| 16 | 18,0 | 1,1 | 148,8 | 99,2% | 11,2 | 0,06 | 24,44 | 99,8% | 0,049 |
| 17 | 14,0 | 0,7 | 149,5 | 99,7% | 6,8 | 0,03 | 24,47 | 100,0% | 0,038 |
| 18 | 10,0 | 0,4 | 149,9 | 99,9% | 3,5 | 0,01 | 24,48 | 100,0% | 0,027 |
| 19 | 6,0 | 0,1 | 150,0 | 100,0% | 1,3 | 0,00 | 24,48 | 100,0% | 0,016 |
| 20 | 2,0 | 0,0 | 150,0 | 100,0% | 0,2 | 0,00 | 24,48 | 100,0% | 0,005 |
| 1-20 | | 150,0 | | | 1.470,0 | | 24,48 | | 0,163 |

Cas B

Volum V = 150 hm³ (forma de prisma); profunditat h = 80 m; salt: H = 0 m
Resultats generals: A = 375 ha; E₀ = 32,67 GWh

| Capa | Altura del salt | Volum làmina | Volum desemb. | | Pes làmina | Energia làmina | Energia acumul. | | Efectivitat |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------|----------------|-----------------|--------|---------------------|
| | hx + H | Vx | ΣVx | | Wx | Ex | ΣEx | | Ex/Vx |
| Nº | m | hm ³ | hm ⁴ | % | GN | GWh | GWh | % | GWh/hm ³ |
| 1 | 78,0 | 14,6 | 14,6 | 9,8% | 143,3 | 3,11 | 3,11 | 14,3% | 0,212 |
| 2 | 74,0 | 13,9 | 28,5 | 19,0% | 136,0 | 2,80 | 5,90 | 27,1% | 0,201 |
| 3 | 70,0 | 13,1 | 41,6 | 27,8% | 128,6 | 2,50 | 8,40 | 38,6% | 0,191 |
| 4 | 66,0 | 12,4 | 54,0 | 36,0% | 121,3 | 2,22 | 10,62 | 48,8% | 0,180 |
| 5 | 62,0 | 11,6 | 65,6 | 43,8% | 113,9 | 1,96 | 12,59 | 57,8% | 0,169 |
| 6 | 58,0 | 10,9 | 76,5 | 51,0% | 106,6 | 1,72 | 14,30 | 65,7% | 0,158 |
| 7 | 54,0 | 10,1 | 86,6 | 57,8% | 99,2 | 1,49 | 15,79 | 72,6% | 0,147 |
| 8 | 50,0 | 9,4 | 96,0 | 64,0% | 91,9 | 1,28 | 17,07 | 78,4% | 0,136 |
| 9 | 46,0 | 8,6 | 104,6 | 69,8% | 84,5 | 1,08 | 18,15 | 83,4% | 0,125 |
| 10 | 42,0 | 7,9 | 112,5 | 75,0% | 77,2 | 0,90 | 19,05 | 87,5% | 0,114 |
| 11 | 38,0 | 7,1 | 119,6 | 79,8% | 69,8 | 0,74 | 19,79 | 90,9% | 0,103 |
| 12 | 34,0 | 6,4 | 126,0 | 84,0% | 62,5 | 0,59 | 20,38 | 93,6% | 0,093 |
| 13 | 30,0 | 5,6 | 131,6 | 87,8% | 55,1 | 0,46 | 20,84 | 95,7% | 0,082 |
| 14 | 26,0 | 4,9 | 136,5 | 91,0% | 47,8 | 0,35 | 21,18 | 97,3% | 0,071 |
| 15 | 22,0 | 4,1 | 140,6 | 93,8% | 40,4 | 0,25 | 21,43 | 98,5% | 0,060 |
| 16 | 18,0 | 3,4 | 144,0 | 96,0% | 33,1 | 0,17 | 21,59 | 99,2% | 0,049 |
| 17 | 14,0 | 2,6 | 146,6 | 97,8% | 25,7 | 0,10 | 21,69 | 99,7% | 0,038 |
| 18 | 10,0 | 1,9 | 148,5 | 99,0% | 18,4 | 0,05 | 21,74 | 99,9% | 0,027 |
| 19 | 6,0 | 1,1 | 149,6 | 99,8% | 11,0 | 0,02 | 21,76 | 100,0% | 0,016 |
| 20 | 2,0 | 0,4 | 150,0 | 100,0% | 3,7 | 0,00 | 21,76 | 100,0% | 0,005 |
| 1-20 | | 150,0 | | | 1.470,0 | | 21,76 | | 0,145 |

Cas C

Volum V = 150 hm³ (forma de tetraedre); profunditat h = 80 m; salt: H = 0 m

Resultats generals: A = 187,5 ha; E₀ = 32,67 GWh

| Capa | Altura del salt | Volum làmina | Volum desemb. | | Pes làmina | Energia làmina | Energia acumul. | | Efectivitat |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------|----------------|-----------------|--------|---------------------|
| | hx + H | Vx | ΣVx | | Wx | Ex | ΣEx | | Ex/Vx |
| Nº | m | hm ³ | hm ⁴ | % | GN | GWh | GWh | % | GWh/hm ³ |
| 1 | 78,0 | 7,5 | 7,5 | 5,0% | 73,5 | 1,59 | 1,59 | 9,8% | 0,212 |
| 2 | 74,0 | 7,5 | 15,0 | 10,0% | 73,5 | 1,51 | 3,10 | 19,0% | 0,201 |
| 3 | 70,0 | 7,5 | 22,5 | 15,0% | 73,5 | 1,43 | 4,53 | 27,8% | 0,191 |
| 4 | 66,0 | 7,5 | 30,0 | 20,0% | 73,5 | 1,35 | 5,88 | 36,0% | 0,180 |
| 5 | 62,0 | 7,5 | 37,5 | 25,0% | 73,5 | 1,27 | 7,15 | 43,8% | 0,169 |
| 6 | 58,0 | 7,5 | 45,0 | 30,0% | 73,5 | 1,18 | 8,33 | 51,0% | 0,158 |
| 7 | 54,0 | 7,5 | 52,5 | 35,0% | 73,5 | 1,10 | 9,43 | 57,8% | 0,147 |
| 8 | 50,0 | 7,5 | 60,0 | 40,0% | 73,5 | 1,02 | 10,45 | 64,0% | 0,136 |
| 9 | 46,0 | 7,5 | 67,5 | 45,0% | 73,5 | 0,94 | 11,39 | 69,8% | 0,125 |
| 10 | 42,0 | 7,5 | 75,0 | 50,0% | 73,5 | 0,86 | 12,25 | 75,0% | 0,114 |
| 11 | 38,0 | 7,5 | 82,5 | 55,0% | 73,5 | 0,78 | 13,03 | 79,8% | 0,103 |
| 12 | 34,0 | 7,5 | 90,0 | 60,0% | 73,5 | 0,69 | 13,72 | 84,0% | 0,093 |
| 13 | 30,0 | 7,5 | 97,5 | 65,0% | 73,5 | 0,61 | 14,33 | 87,8% | 0,082 |
| 14 | 26,0 | 7,5 | 105,0 | 70,0% | 73,5 | 0,53 | 14,86 | 91,0% | 0,071 |
| 15 | 22,0 | 7,5 | 112,5 | 75,0% | 73,5 | 0,45 | 15,31 | 93,8% | 0,060 |
| 16 | 18,0 | 7,5 | 120,0 | 80,0% | 73,5 | 0,37 | 15,68 | 96,0% | 0,049 |
| 17 | 14,0 | 7,5 | 127,5 | 85,0% | 73,5 | 0,29 | 15,97 | 97,8% | 0,038 |
| 18 | 10,0 | 7,5 | 135,0 | 90,0% | 73,5 | 0,20 | 16,17 | 99,0% | 0,027 |
| 19 | 6,0 | 7,5 | 142,5 | 95,0% | 73,5 | 0,12 | 16,29 | 99,8% | 0,016 |
| 20 | 2,0 | 7,5 | 150,0 | 100,0% | 73,5 | 0,04 | 16,33 | 100,0% | 0,005 |
| 1-20 | | 150,0 | | | 1.470,0 | | 16,33 | | 0,109 |

Cas D

Volum: 3,2 hm³; forma de prisma; profunditat hf = 15 m; salt: H = 370 m

Resultats generals: A = 43,3 ha; E₀ = 3,41 GWh

| Capa | Altura del salt | Volum làmina | Volum desemb. | | Pes làmina | Energia làmina | Energia acumul. | | Efectivitat |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|------------|----------------|-----------------|--------|---------------------|
| | hx + H | Vx | ΣVx | | Wx | Ex | ΣEx | | Ex/Vx |
| Nº | m | hm ³ | hm ⁴ | % | GN | GWh | GWh | % | GWh/hm ³ |
| 1 | 384,6 | 0,3 | 0,3 | 9,8% | 3,1 | 0,33 | 0,33 | 9,9% | 1,047 |
| 2 | 383,9 | 0,3 | 0,6 | 19,0% | 2,9 | 0,31 | 0,65 | 19,2% | 1,045 |
| 3 | 383,1 | 0,3 | 0,9 | 27,8% | 2,8 | 0,30 | 0,94 | 28,0% | 1,043 |
| 4 | 382,4 | 0,3 | 1,2 | 36,0% | 2,6 | 0,28 | 1,22 | 36,3% | 1,041 |
| 5 | 381,6 | 0,3 | 1,4 | 43,8% | 2,5 | 0,26 | 1,48 | 44,1% | 1,039 |
| 6 | 380,9 | 0,2 | 1,7 | 51,0% | 2,3 | 0,24 | 1,73 | 51,4% | 1,037 |
| 7 | 380,1 | 0,2 | 1,9 | 57,8% | 2,1 | 0,23 | 1,95 | 58,1% | 1,035 |
| 8 | 379,4 | 0,2 | 2,1 | 64,0% | 2,0 | 0,21 | 2,16 | 64,4% | 1,033 |
| 9 | 378,6 | 0,2 | 2,3 | 69,8% | 1,8 | 0,19 | 2,36 | 70,1% | 1,031 |
| 10 | 377,9 | 0,2 | 2,4 | 75,0% | 1,7 | 0,18 | 2,53 | 75,3% | 1,029 |
| 11 | 377,1 | 0,2 | 2,6 | 79,8% | 1,5 | 0,16 | 2,69 | 80,0% | 1,027 |
| 12 | 376,4 | 0,1 | 2,7 | 84,0% | 1,4 | 0,14 | 2,83 | 84,3% | 1,025 |
| 13 | 375,6 | 0,1 | 2,9 | 87,8% | 1,2 | 0,12 | 2,96 | 88,0% | 1,023 |
| 14 | 374,9 | 0,1 | 3,0 | 91,0% | 1,0 | 0,11 | 3,06 | 91,2% | 1,020 |
| 15 | 374,1 | 0,1 | 3,0 | 93,8% | 0,9 | 0,09 | 3,16 | 93,9% | 1,018 |
| 16 | 373,4 | 0,1 | 3,1 | 96,0% | 0,7 | 0,07 | 3,23 | 96,1% | 1,016 |
| 17 | 372,6 | 0,1 | 3,2 | 97,8% | 0,6 | 0,06 | 3,29 | 97,8% | 1,014 |
| 18 | 371,9 | 0,0 | 3,2 | 99,0% | 0,4 | 0,04 | 3,33 | 99,0% | 1,012 |
| 19 | 371,1 | 0,0 | 3,2 | 99,8% | 0,2 | 0,02 | 3,35 | 99,8% | 1,010 |
| 20 | 370,4 | 0,0 | 3,3 | 100,0% | 0,1 | 0,01 | 3,36 | 100,0% | 1,008 |
| 1-20 | | 3,3 | | | 31,9 | | 3,36 | | 1,034 |

En els tres primers casos, s'observa que l'energia que s'obtingria amb el desembassament dels 150 hm³ a cota constant (32,67 GWh), circumstància que se sol donar quan hi ha un riu que alimenta l'embassament, és sensiblement més gran que la que es pot obtenir en condicions òptimes (24,48 GWh en el cas A, el més favorable, 66,7%). Això és degut a la disminució de la cota de la làmina superior amb la progressió del desembassament.

L'energia potencial obtinguda valor també depèn de la forma de l'embassament. L'embassament en forma de tetraedre és el que situa més aigua en les capes altes (i per tant, és el més efectiu en relació al volum d'aigua, 0,163 GWh/hm³), però també és el que la làmina superior requereix més superfície (1.125 ha).

En aquests tres primers casos, quan l'altura de buidatge arriba vers la meitat de la profunditat, l'energia suplementària que s'obté és molt petita i amb efectivitats energia/volum d'aigua minvants. Per exemple, en el cas A, quan la làmina superior baixa a la meitat d'altura, s'ha desembassat el 87,5% de l'aigua i s'ha obtingut el 93,8% de l'energia.

El darrer cas D difereix clarament dels tres anteriors pel fet d'existir un important salt entre el fons de l'embassament i la central ($H = 370$ m) molt superior a la profunditat (15 m). En disposar d'un gran salt (H) aigües avall fa que la forma de l'embassament tingui una incidència molt petita en l'energia obtinguda i que aquesta (3,36 GWh) sigui molt propera (98,7%) a la que s'obtingria mantenint l'altura de la làmina superior constant (3,41 GWh). Alhora, cal assenyalar que en aquest cas l'efectivitat global energia/volum (E/V) és molt més elevada (1,038 GWh/hm³) que en els casos anteriors (de 0,109 a 0,163 GWh/hm³); o sigui, s'obté molta més energia per un mateix volum d'aigua i, alhora, les superfícies i profunditats són menors.

Totes les energies obtingudes en els càlculs anteriors són teòriques, sense comptar el rendiment de les màquines ni les pèrdues en el transport i distribució. Per ajustar-se a la realitat, caldria afectar els anteriors valors d'energia per un rendiment d'entre 70 i 80%.

Conclusions tècniques

1. Les centrals de bombament entre embassaments en el curs d'un riu (amb salts H propers a zero) presenten poca efectivitat energia/volum (E/V), i la seva gestió esdevé molt complexa per la dificultat de compatibilitzar-la amb les altres funcions de l'aigua, generalment prioritàries.
2. Les centrals de bombament amb un gran salt entre embassament i central ($H \gg h$), tenen efectivitats E/V molt més elevades; si l'embassament superior es destina exclusivament a bombament, la gestió de l'emmagatzematge se simplifica, especialment si el dipòsit inferior (embassament, llac o mar) és molt més gran. Cal avaluar, però, els impactes ambientals de la construcció dels embassaments, especialment els superiors (en l'exemple C, la superfície és de 130 ha).
3. En tot cas, l'emmagatzematge a llarg termini (entre les estacions de l'any) queda molt afectat per la disminució del rendiment a causa de l'evaporació i les filtracions.
4. Les quantitats d'energia elèctrica que permeten emmagatzemar les centrals de bombament amb doble embassament són relativament petites en comparació a les necessitats de la xarxa elèctrica d'una ciutat, una regió o un país, aspecte que s'analitza en el punt següent.

Aquests resultats estan en consonància amb el fet que les forces gravitatòries (base de l'energia hidroelèctrica) tenen densitats energètiques (energia/massa i energia/volum) molt més baixes davant les electromagnètiques i les nuclears; tan sols en indrets i circumstàncies on la naturalesa proporciona ingents quantitats d'aigua a cotes altes, l'aprofitament d'aquesta energia adquireix el seu sentit. Tradicionalment, les masses de neu i gel en les muntanyes han estat els magatzems d'aigua més importants a cotes altes que, amb el desgel, alimenten els rius durant les èpoques de sequera.

4. Les centrals de bombament i els usos elèctrics de ciutats i països

Ja s'ha vist que, per la seva pròpia naturalesa, l'emmagatzematge d'energia elèctrica en base a sistemes hidroelèctrics de doble embassament amb centrals de bombament no és adequat per a llargs terminis de temps, a causa de l'evaporació i eventuais filtracions.

En aquest apartat s'analitzen els consums elèctrics de la ciutat de Barcelona i de Catalunya i es comparen amb les capacitats d'emmagatzematge dels sistemes hidroelèctric de doble embassament amb centrals de bombament.

La següent taula proporciona les dades de referència i de consum d'electricitat de la ciutat de Barcelona i de Catalunya l'any 2017.

https://energia.barcelona/sites/default/files/documents/balanc_energia_2020-portatil1320.pdf
http://icaen.gencat.cat/ca/energia/estadistiques/resultats/anuals/balanc_energetic/.

Consum d'electricitat

| Electricitat 2017 | Unitats | Barcelona | Catalunya |
|--------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| Població | habitants | 1.620.000 | 7.496.276 |
| Consum total anual | GWh/any | 6.900 | 42.954 |
| Consum total diari | GWh/dia | 18,9 | 117,7 |
| Consum anual per habitant | kWh/hab/any | 4.259 | 5.730 |
| Consum diari per habitant | kWh/hab/dia | 11,7 | 15,7 |
| Potència mitjana del dia | MW | 787,7 | 4.903,5 |
| Potència màxima (20% superior) | MW | 945,2 | 5.884,1 |

En la taula següent es comparen la capacitat de la hipotètica central de bombament del sistema de Saus-Susqueda i de la central de bombament en funcionament de l sistema l'Estany Gento-Sallente per cobrir les necessitats de la ciutat de Barcelona i de Catalunya.

A les energies d'acumulació calculades per als embassaments superiors de les centrals de bombament cal aplicar un rendiment (per pèrdues en les turbines i per transport i distribució) que es xifra en 75%. Així, doncs, els valors d'energia elèctrica operativa (E_{op}) d'aquests dos sistemes són:

$$\text{Cas A)} \quad \text{Desembassament de 10 làmines d'aigua} \quad E_{op} = 22,95 \cdot 0,75 = 17,21 \text{ GWh}$$

$$\text{Cas D)} \quad \text{Desembassament total 10 làmines d'aigua} \quad E_{op} = 3,37 \cdot 0,75 = 2,53 \text{ GWh}$$

Les centrals de bombament i els requeriments energètics de la ciutat de Barcelona i Catalunya:

La següent taula mostra els requeriments mitjans d'electricitat de la ciutat de Barcelona i de Catalunya amb el pas del temps junt amb les capacitats de subministrament d'energia de les centrals de bombament A i D analitzades:

| | Catalunya | Barcelona | Central A | Central D |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Hores | GWh | GWh | GWh | GWh |
| 1 | 4,903 | 0,788 | 17,21 | 2,53 |
| 2 | 7,725 | 1,575 | 17,21 | 2,53 |
| 3 | 11,587 | 2,363 | 17,21 | 2,53 |
| 4 | 15,449 | 3,151 | 17,21 | 2,53 |
| 5 | 19,312 | 3,938 | 17,21 | 2,53 |
| 6 | 23,174 | 4,726 | 17,21 | 2,53 |

Aquest quadre posa de manifest l'escassetat de la capacitat d'acumulació de les centrals de bombament davant dels usos globals de les societats. La central de bombament D podria cobrir tan sols ½ hora de les necessitats de Catalunya i poc més de 4 hores de la ciutat de Barcelona, i la central de

bombament A més gran (hipotètica i problemàtica) podria cobrir quasi 5 hores de consum de Catalunya i unes 22 hores de consum de Barcelona (fora de la taula).

Es podria pensar que això ja és molt. Certament, ho és per al sistema energètic actual suportat bàsicament per energia nuclear, centrals de carbó i de gas, on centrals de bombament com les de Sallente-Estany Gento fan funcions de regulació puntual. Però, quan el futur sistema elèctric es basi fonamentalment en fonts de flux intermitents i/o aleatòries (fonamentalment, fotovoltaica i eòlica), caldrà cobrir lapses de temps molt més grans amb acumulació.

Encara una altra observació: la potència de la central de Saus (56 MW), proporcionada al cabal del Ter (i no amb la capacitat de l'embassament, 151,3 hm³) és molt petita comparada amb la potència del consum mitjà de Barcelona (787,7 MW) i, encara més, de Catalunya (4.903,5 MW); en canvi, la central hidroelèctrica de Sallente que s'alimenta de l'Estany Gento (3,24 Hm³) té una potència de 446 MW (la cinquena en potència de Catalunya i quasi ½ d'una central nuclear) ja que està concebuda per a regulacions puntuals..

La central de bombament de Sallente-Estany Gento no s'orienta a l'emmagatzematge del futur sistema energètic renovable sinó per absorbir els excedents nocturns de les actuals centrals nuclears. Destinar (i regular) una potència d'aquest ordre amb fonts renovables durant el dia és un contrasentit.

A tot l'anterior, cal reiterar que l'emmagatzematge hidràulic no és adequat en temps prolongats (entre estacions de l'any) a causa de les pèrdues de rendiment per evaporació i filtracions.

5. Conclusions

De l'estudi anterior se'n deriven les següents conclusions:

1. La capacitat d'emmagatzematge de les centrals de bombament són escasses davant les necessitats futures de les grans ciutats, regions i països, especialment a mesura que s'avanci en un sistema elèctric basat en fonts renovables.
2. El rendiment de les centrals de bombament és relativament elevat si el temps transcorregut és breu, però es deteriora ràpidament quan l'emmagatzematge és més prolongat (per exemple, entre estacions de l'any) a causa de l'evaporació i de les filtracions.
3. A mesura que avanci la transició energètica, la capacitat d'emmagatzematge (en GWh) anirà adquirint més relleu, però les centrals de bombament difícilment podran ser-ne la solució.
4. El nombre d'indrets adequats tècnicament per a la instal·lació de centrals de bombament (possibilitats de preses, diferències d'altura) és escàs i, en la major part dels casos, ja són utilitzats.
5. Les centrals de bombament tècnicament més eficaces (relació entre l'energia emmagatzemada i la potència obtenible en relació a la dimensió de les instal·lacions i l'aigua involucrada) són les que disposen d'un gran salt H aigües avall de l'embassament superior.
6. Els embassaments successius en els cursos dels rius (com és el cas de Saus-Susqueda), a més de l'inconvenient dels salts reduïts, solen exercir funcions (cabals ecològics, aigua de boca, per a l'agricultura, per a la indústria, amortiment de grans avingudes), moltes d'elles prioritàries que, pràcticament fan inviable la seva implantació com a central de bombament.
7. Finalment, i no menys important, les instal·lacions hidràuliques (i, entre elles les centrals de bombament) donen lloc a importants impactes ambientals i territorials que cal avaluar curosament abans de cada nova actuació. En el nostre país ja s'han explotat les principals localitzacions amb potencials hidràulics i, en tot cas, es tracta d'aprofitar-les millor.