

## RESUM

L'emmagatzematge d'energia en parcs eòlics pot ser una solució per millorar la gestió de la demanda d'electricitat, aplanant la corba de la demanda d'energia elèctrica i millorant la disponibilitat de l'energia eòlica. A més a més, pot generar un benefici econòmic als titulars dels parcs eòlics si s'aprofita la variabilitat del preu de l'electricitat al mercat elèctric. Per contra, els sistemes d'emmagatzematge d'energia, requereixen una inversió inicial elevada i introdueixen pèrdues d'energia en el sistema de generació d'electricitat.

Per tal d'analitzar la viabilitat de l'emmagatzematge d'energia s'ha creat una metodologia que permet optimitzar l'operació i el dimensionament de sistemes d'emmagatzematge d'energia a parcs eòlics, amb l'objectiu de maximitzar els beneficis econòmics.

Una vegada plantejat el problema d'optimització de l'operació, s'ha resolt mitjançant la funció linprog del programa MATLAB, que resol problemes d'optimització lineal. D'altra banda, per a resoldre el problema d'optimització del dimensionament s'ha utilitzat un algoritme genètic.

Finalment, s'ha posat en pràctica la metodologia generada per resoldre un cas concret. El resultat obtingut indica la tecnologia que dóna més benefici econòmic, les dimensions que hauria de tenir i el benefici que s'obtidria, donades les següents dades de partida: el període de temps a estudiar, la corba del preu de l'energia elèctrica, la corba de la potència eòlica aprofitable i les característiques dels diferents sistemes d'emmagatzematge d'energia (rendiments de càrrega i descàrrega, costs).





## SUMARI

RESUM.....	1
SUMARI.....	3
1. GLOSSARI.....	5
2. INTRODUCCIÓ.....	7
2.1. Objectius del projecte .....	8
2.2. Abast del projecte .....	8
3. APROFITAMENT DE L'ENERGIA EÒLICA.....	9
4. CARACTERITZACIÓ DELS SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA .....	13
4.1. Bombeig d'aigua .....	14
4.2. CAES (Compressed Air Energy Storage) .....	15
4.3. Volants d'inèrcia.....	17
4.4. Supercondensadors .....	18
4.5. Superconductors magnètics (SMES).....	19
4.6. Producció d'hidrogen .....	19
4.7. Bateries .....	22
4.8. Costos dels sistemes d'emmagatzematge d'energia.....	22
4.9. Comparació dels SEE .....	26
5. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA D'OPTIMITZACIÓ DE L'OPERACIÓ DEL SEE.....	27
5.1. Funció objectiu .....	27
5.2. Restriccions .....	29
5.3. Resolució del problema d'optimització de l'operació per a n=5.....	31
6. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA D'OPTIMITZACIÓ DEL DIMENSIONAMENT DEL SEE.....	39
6.1 L'algoritme genètic.....	39
6.2 Etapes de l'algoritme genètic .....	43
7. RESOLUCIÓ D'UN CAS PRÀCTIC .....	55
7.1. Aplicació de l'algoritme genètic.....	55
7.2. Anàlisi econòmic de la solució obtinguda.....	61
8. ESTUDI DE L'IMPACTE AMBIENTAL.....	65
9. ESTUDI ECONÒMIC .....	69
CONCLUSIONS .....	71
BIBLIOGRAFIA.....	73
ANNEX A. IMPLANTACIÓ DE L'ENERGIA EÒLICA A CATALUNYA .....	75



ANNEX B. RETRIBUCIÓ DE L'ENERGIA EÒLICA A ESPANYA ..... 79



# 1. GLOSSARI

## Acrònims

**OMEL** Operador del Mercado Ibérico de Energía

**REE** Red Eléctrica de España

**SEE** Sistema d'Emmagatzematge d'Energia

## Símbols

**F** és el benefici econòmic de l'operació del parc eòlic [€].

**$C_e$**  és un vector que indica el preu de l'electricitat al mercat elèctric en cada interval de temps [€/MWh].

**n** és el nombre d'interval de temps considerats en la simulació.

**$P_{PE}$**  és un vector que dona la potència eòlica aprofitable en cada interval de temps [MW].

**$P_{SEE}$**  és un vector que indica la potència que el SEE rep del parc eòlic o cedeix a la xarxa de distribució elèctrica en cada interval de temps [MW].

**$P_{SEE+}(i)$**  és la potència que el SEE entrega a la xarxa en l'interval de temps  $i$ .

**$P_{SEE-}(i)$**  és la potència que el SEE rep del parc eòlic en l'interval de temps  $i$ .

**$E(i)$**  és l'energia disponible al SEE al final de l'interval de temps  $i$  [MWh].

**$\eta_C$**  és el rendiment de càrrega del SEE.

**$\eta_D$**  és el rendiment de descàrrega del SEE.

**$E_{max}$**  Capacitat màxima d'emmagatzematge d'energia del SEE [MWh].

**$P_{SEEmax}$**  Potència màxima intercanviable del SEE [MW].

**$C_1$**  és el cost per unitat d'energia del SEE [€/kWh].

**$C_2$**  és el cost per unitat de potència del SEE [€/kW].

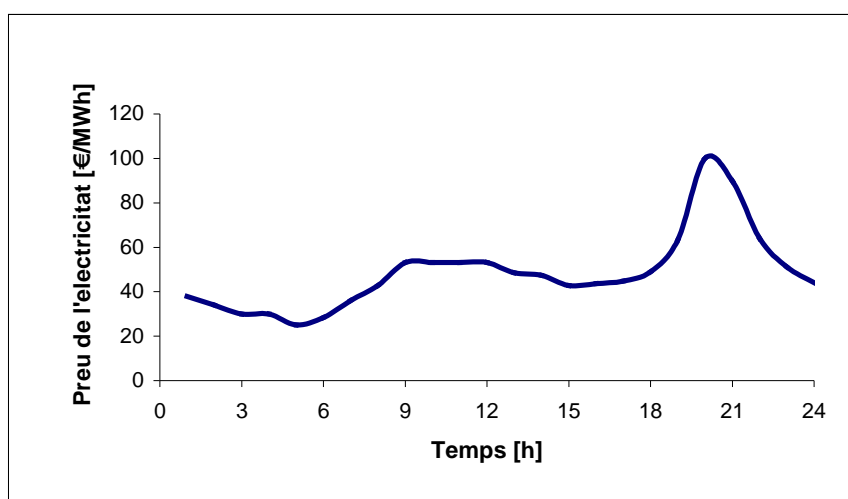




## 2. INTRODUCCIÓ

L'energia eòlica ha experimentat un creixement notable arreu del món en els darrers anys i la previsió segons el Pla de l'Energia de Catalunya 2006-2015 és que segueixi aquesta tendència en el futur, almenys aquí a Catalunya.

A dia 1 de Gener de 2010, a Catalunya hi havia 25 parcs en funcionament, amb una potència total instal·lada de 654 MW (veure Annex A). El pla de l'Energia de Catalunya suposa una forta aposta pel sector i fixa un objectiu de 3.500 MW instal·lats per a l'any 2015. Aquest tipus d'energia, però, pot donar problemes en la gestió de la xarxa de distribució d'electricitat degut a l'intermitència del vent. L'emmagatzematge d'energia en parcs eòlics pot ser una solució per millorar la gestió de la demanda d'electricitat, aplanant la corba de la demanda d'energia elèctrica i millorant la disponibilitat de l'energia eòlica. A més a més, pot generar un benefici econòmic als titulars dels parcs eòlics si s'aprofita la variabilitat del preu de l'electricitat al mercat elèctric.



**Figura 2.1. Variabilitat del preu de l'electricitat al mercat elèctric espanyol, el dia 28 de Gener de l'any 2009 (Font: OMEL i elaboració pròpia).**

Com es pot veure en la Figura 2.1, el preu de l'electricitat en certs moments del dia augmenta (hores punta). Si s'emmagatzema l'energia en les hores on aquest preu és més baix (hores vall) i es ven a la xarxa en hores punta, es pot aconseguir un benefici econòmic.

D'altra banda, cal destacar que darrerament s'han donat casos d'excedent d'energia eòlica. Hi ha determinats moments del dia, sobretot nocturns, en els quals la demanda d'electricitat no és prou elevada per consumir l'energia de base que proporcionen les centrals nuclears, l'energia proporcionada per les centrals de gas o carbó, i l'energia subministrada pels parcs eòlics. En aquests casos, *Red Eléctrica de España* (REE), seguint l'ordre de desconexió



establert, ha arribat a ordenar la desconexió de la xarxa de distribució d'electricitat d'alguns parcs eòlics<sup>1</sup>. Els sistemes d'emmagatzematge d'energia, permetrien gestionar aquest excedent d'energia eòlica i evitar la pèrdua d'energia. Segons l'informe elaborat per REE, “Informe sobre la integració de generación renovable a medio plazo para el periodo 2009-2014”, en un any normal, es llençarà un 2% de l'energia eòlica [1]. Una altra via que s'està estudiant per gestionar aquest excedent d'energia és la càrrega nocturna de vehicles elèctrics.

L'emmagatzematge d'energia, però, requereix una inversió inicial elevada i introdueix pèrdues d'energia en el sistema de generació d'electricitat. En aquest sentit, cal comparar aquests dos elements desfavorables amb els beneficis que se'n pot treure, per poder fer balanç.

## **2.1. Objectius del projecte**

Crear una metodologia que permeti optimitzar l'operació i el dimensionament de sistemes d'emmagatzematge d'energia a parcs eòlics.

Donades unes condicions inicials de vent, del preu de l'electricitat al mercat elèctric i uns paràmetres característics de les diferents tecnologies d'emmagatzematge es determinarà el SEE més adient, les dimensions òptimes i les hores d'operació d'aquest per tal de maximitzar els beneficis econòmics derivats de la venda d'electricitat a la xarxa.

## **2.2. Abast del projecte**

La metodologia generada en aquest projecte ha de servir per avaluar l'incorporació de sistemes d'emmagatzematge d'energia als parcs eòlics.

---

<sup>1</sup> El dia 15 de Novembre de l'any 2009, REE va ordenar l'apagada del 21% dels aerogeneradors en funcionament durant dues hores degut a la baixa demanda [1].





### 3. APROFITAMENT DE L'ENERGIA EÒLICA

En aquest apartat es fa una breu descripció de l'origen de l'energia eòlica i la tecnologia que permet transformar l'energia eòlica en energia elèctrica, els aerogeneradors.

El vent és aire en moviment. Existeix gràcies a la radiació solar, la rotació de la terra, l'acció sobre l'aire de les diferències de pressió atmosfèrica i els diferents tipus de superfície terrestre.

Al voltant d'un 2% de l'energia solar es transforma en energia eòlica, degut a l'escalfament de l'aire. Els gradients de temperatura i densitat de l'aire que es creen produeixen el moviment de masses d'aire.

La **potència eòlica disponible** és la màxima potència que es pot obtenir del vent en el cas que es pogués aprofitar tota l'energia cinètica del vent. L'energia cinètica del vent és l'energia d'una massa d'aire ( $m$ ), que es desplaça a una velocitat ( $v$ ) i es pot calcular segons l'equació (Eq.3.1):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad [J] \quad (\text{Eq. 3.1})$$

L'energia cinètica per unitat de volum s'obté substituint la massa ( $m$ ), de l'equació (Eq. 3.1) per la densitat ( $\rho$ ), tal i com es mostra en l'equació (Eq. 3.2).

$$e = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad [J/m^3] \quad (\text{Eq. 3.2})$$

El cabal d'aire ( $Q$ ) es defineix com la massa d'aire ( $m$ ) que es desplaça a una velocitat ( $v$ ) que travessa una superfície ( $A$ ), perpendicular a la velocitat del vent. Es pot calcular segons l'equació (Eq. 3.3).

$$Q = vA \quad [m^3/s] \quad (\text{Eq. 3.3})$$

La potència eòlica disponible és el resultat del producte de l'energia cinètica per unitat de volum i el cabal d'aire (veure l'equació (Eq. 3.4)).

$$P_d = eQ = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad [W] \quad (\text{Eq. 3.4})$$

De l'equació (Eq.3.4), es pot observar que la potència eòlica disponible és directament



proporcional a la densitat de l'aire, la superfície d'escombrat de les pales de l'aerogenerador i al cub de la velocitat del vent.

Ara bé, els aerogeneradors mai aprofiten tota l'energia cinètica del vent. Això és degut a que la massa d'aire que entra a l'àrea d'escombrat de les pales té una velocitat  $v_1$  i la velocitat d'aquesta massa d'aire a la sortida no és nul·la. Per tant, a la sortida, el vent encara conserva part de l'energia cinètica que tenia a l'entrada del procés de conversió d'energia. D'aquest fet se'n deriva la necessitat de definir la potència eòlica aprofitable.

La **potència eòlica aprofitable** per l'aerogenerador és la diferència entre la potència del vent a l'entrada de l'aerogenerador i a la sortida.

Segons el teorema de Betz, la màxima potència que es pot obtenir d'una massa d'aire en moviment amb un aerogenerador mai superarà el 59,3% de la potència eòlica disponible (veure l'equació (Eq. 3.5)).

És a dir,

$$P_{a_{MAX}} = 0,593P_d \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Generalment la potència eòlica aprofitable s'expressa segons s'indica en l'equació (Eq. 3.6).

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (\text{Eq. 3.6})$$

on  $C_p$  és la fracció entre la potència aprofitada per l'aerogenerador i la potència eòlica disponible. El valor de  $C_p$  sempre és inferior al límit que imposa el teorema de Betz (0,593) i varia segons el tipus d'aerogenerador.

Com ja s'ha vist anteriorment, la potència eòlica disponible depèn de la velocitat del vent al cub i per tant la potència que ens pot proporcionar un aerogenerador també en depèn. Els diferents tipus d'aerogeneradors tenen una corba de potència característica, que defineix la potència que són capaços de donar en funció de la velocitat del vent.

En tots els aerogeneradors hi ha tres paràmetres que cal conèixer. La velocitat d'arrencada, la velocitat de disseny o nominal i la velocitat de desconexió. La velocitat d'arrencada és aquella per sota de la qual l'aerogenerador no és capaç de girar i per tant no produeix energia. La velocitat de disseny o nominal és aquella que fa que l'aerogenerador dongui la màxima potència. La velocitat de desconexió es aquella a partir de la qual s'atura



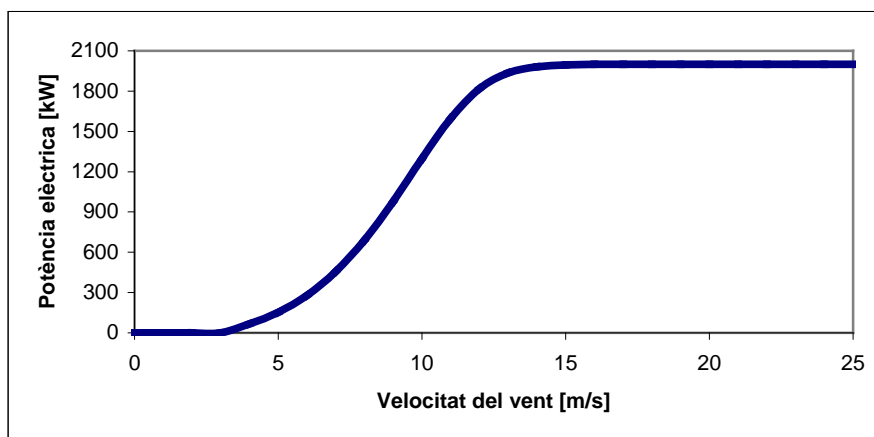
l'aerogenerador per motius de seguretat. I és que a certes velocitats del vent (normalment per a velocitats superiors als 25 m/s) els esforços als quals estan sotmesos els elements de l'aerogenerador són importants i és convenient frenar les pales per tal d'evitar danys a l'aerogenerador.

Els aerogeneradors disposen d'un **sistema de regulació de potència**. Bàsicament, s'utilitzen dos sistemes per regular la potència:

- Regulació de potència mitjançant pales orientables.
- Regulació de potència mitjançant pèrdua aerodinàmica.

El primer dels sistemes esmentats consisteix en dotar a les pales d'un sistema de gir sobre el seu propi eix longitudinal per aconseguir variar l'angle d'atac del vent. Així doncs, quan la potència del generador elèctric arriba al valor nominal i en el cas que la velocitat del vent augmenti, les pales giren per tal de mantenir la potència. D'aquesta manera s'evita produir danys a l'aerogenerador.

En la Figura 3.1 es mostra la corba de potència de l'aerogenerador G-80, de la marca Gamesa, amb una potència nominal de 2 MW. Aquest model disposa de regulació de potència mitjançant pales orientables.



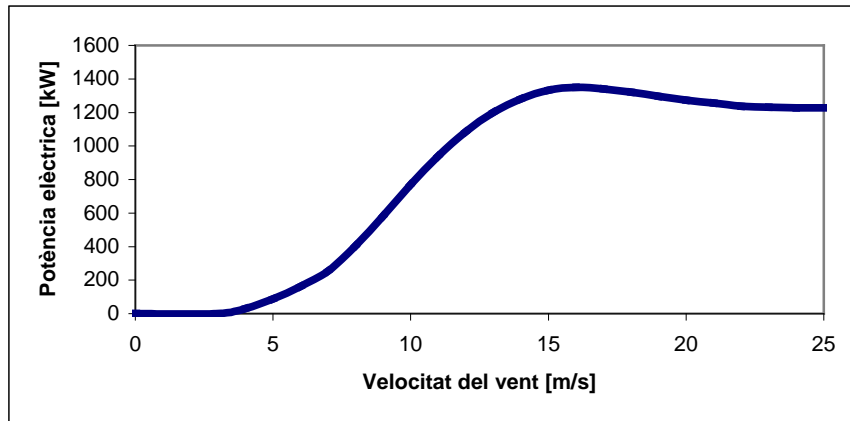
**Figura 3.1. Corba de potència del model G80-2.0 MW (Font: Gamesa i elaboració pròpia).**

La regulació per pèrdua aerodinàmica és un sistema de regulació passiu. Els perfils de les pales es dissenyen de manera que per a velocitats del vent excessives es provoca una pèrdua de sustentació del perfil que redueix el parell generat en el rotor de l'aerogenerador. Un dels inconvenients dels aerogeneradors amb regulació de potència per pèrdua aerodinàmica és que no mantenen la potència nominal un cop superada la velocitat de



disseny, a diferència dels aerogeneradors amb regulació mitjançant pales orientables.

En la Figura 3.2 es mostra la corba de potència de l'aerogenerador AE-61-1320 kW, de la marca Made, amb una potència nominal de 1320 kW. Aquest model disposa de regulació de potència mitjançant pèrdua aerodinàmica.



**Figura 3.2. Corba de potència del model AE-61-1320 kW (Font: Gamesa i elaboració pròpia).**

Els aerogeneradors també disposen d'un **sistema d'orientació** per tal de mantenir el pla que conté les pales de l'aerogenerador perpendicular a la direcció del vent. D'aquesta manera s'aconsegueix captar la màxima energia possible. El sistema d'orientació més utilitzat consisteix en una corona (roda dentada a l'interior de la gòndola) que està engranada amb un pinyó que la fa girar. El pinyó s'acciona mitjançant un motor elèctric. Quan el vent canvia de direcció, l'anemòmetre situat a la part superior de la gòndola envia una senyal al motor per tal que aquest giri les voltes adequades per orientar la caixa.

La Figura 3.3 mostra la caixa d'un aerogenerador.



**Figura 3.3. Caixa d'un aerogenerador (Font: Gamesa).**



## 4. CARACTERITZACIÓ DELS SISTEMES D'EMMAGATZEMATGE D'ENERGIA

L'energia elèctrica es pot emmagatzemar en forma d'energia mecànica, electroquímica o electromagnètica. En la Taula 4.1, es mostra una classificació de les tecnologies d'emmagatzematge disponibles agrupades segons la forma d'emmagatzematge i diferenciades segons el temps de descàrrega d'energia que les caracteritza.

Emmagatzematge d'energia	Mecànica	Bombeig d'aigua CAES Volant d'inèrcia
	Electromagnètica	Supercondensador Superconductors magnètics
	Electroquímica	Hidrogen Bateries

Taula 4.1. Classificació de les tecnologies d'emmagatzematge disponibles

*Short-term energy storage systems*

*Long-term energy storage systems*

Com ja s'ha comentat en l'introducció del projecte, els SEE poden contribuir a la millora de la gestió de la demanda d'energia elèctrica, aplanant la corba de la demanda (veure Figura 4.1), a augmentar la disponibilitat de l'energia eòlica, i a augmentar els beneficis econòmics dels parcs eòlics.

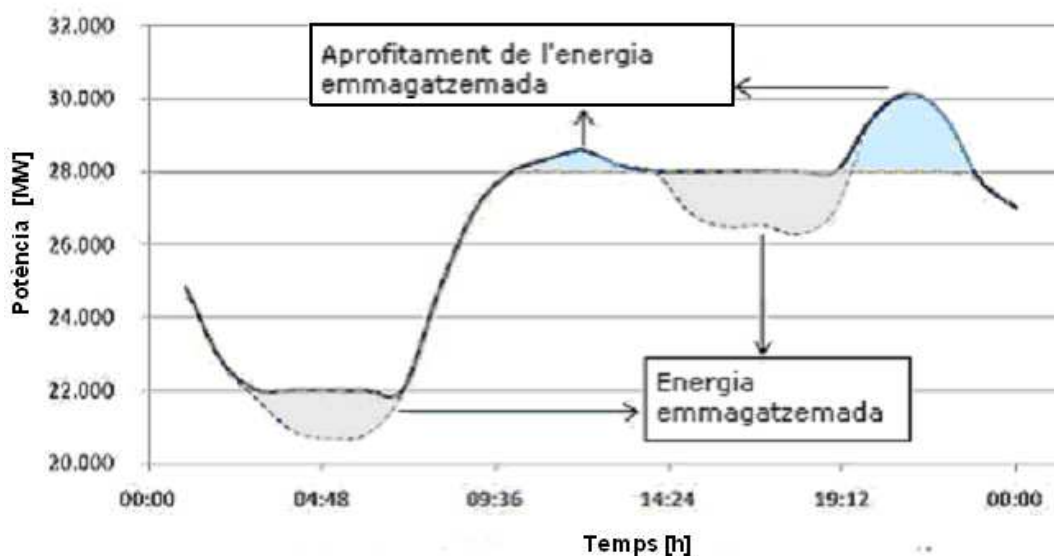


Figura 4.1. Contribució de l'emmagatzematge d'energia a aplanar la corba de demanda d'electricitat (Font: Institut Cerdà i elaboració pròpia).



Cal remarcar, que els SEE més adients per aplanar la corba de la demanda són els anomenats *Long-term energy storage systems*, ja que aquests són capaços de descarregar l'energia acumulada durant hores. Els *Short-term energy storage systems*, són útils per a altres aplicacions, on el temps de descàrrega requerit és inferior a una hora. És el cas de la millora del control de freqüència de la xarxa, la millora en la predicció de la producció d'energia dels parcs eòlics o l'increment de la inèrcia dels parcs eòlics [2].

Tot i que en aquest capítol es descriuen tots els SEE susceptibles de donar suport a una instal·lació eòlica, únicament es tenen en compte els anomenats *Long-term energy storage systems* a l'hora de resoldre el problema d'optimització i dimensionament.

Els diferents sistemes que permeten emmagatzemar energia presenten unes característiques diferents que caldrà tenir en compte a l'hora d'escollir el sistema òptim. Els paràmetres considerats en la metodologia d'aquest projecte són els següents:

- Capacitat màxima d'emmagatzematge d'energia,
- Potència màxima intercanviable,
- Rendiment de càrrega,
- Rendiment de descàrrega,
- Cost per unitat de potència,
- Cost per unitat d'energia,
- Temps de vida útil.

#### **4.1. Bombeig d'aigua**

Aquest sistema consisteix en bombejar aigua fins a una certa altura per tal d'emmagatzemar l'energia elèctrica en forma d'energia potencial. Aquesta energia potencial pot ser aprofitada mitjançant una turbina situada uns metres més avall, que acoblada a un generador, permet obtenir electricitat (veure Figura 4.2).

Els sistemes hidroelèctrics de bombeig d'aigua tenen una eficiència que oscil·la entre el 70 i el 85%, depenent de les característiques dels equips utilitzats [2]. La capacitat d'energia emmagatzemada ( $E$ ) es calcula a partir de l'equació (Eq. 4.1), on es veu clarament que la capacitat d'emmagatzemar energia depèn de la massa d'aigua emmagatzemada ( $m$ ) i de l'alçada del salt d'aigua ( $\Delta h$ ).



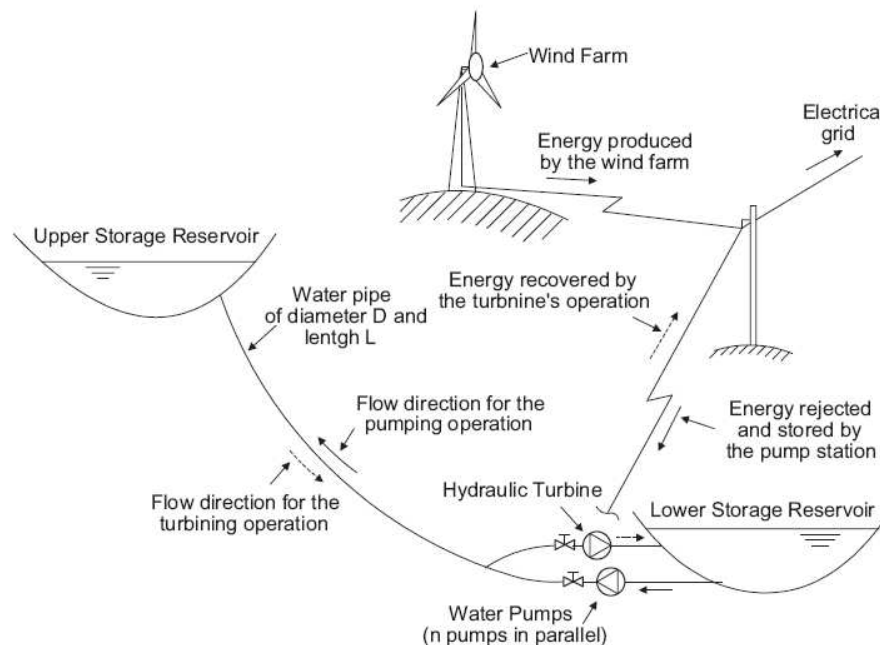
$$E = mg\Delta h \quad (\text{Eq. 4.1})$$

On:

m és la massa d'aigua emmagatzemada [kg].

g és l'acceleració de la força de la gravetat [ $\text{m/s}^2$ ].

$\Delta h$  és l'alçada del salt d'aigua [m].



**Figura 4.2. Esquema de funcionament de l'emmagatzematge d'energia per bombeig d'aigua**  
(Font: [3])

Aquesta tecnologia d'emmagatzematge està ja en una fase madura i està present arreu del món en unes 300 instal·lacions [2]. Aquest avantatge, però, es veu contrarestat per la dificultat de trobar emplaçaments adequats propers als parcs eòlics i per l'impacte ambiental que suposa la seva implantació.

## 4.2. CAES (Compressed Air Energy Storage)

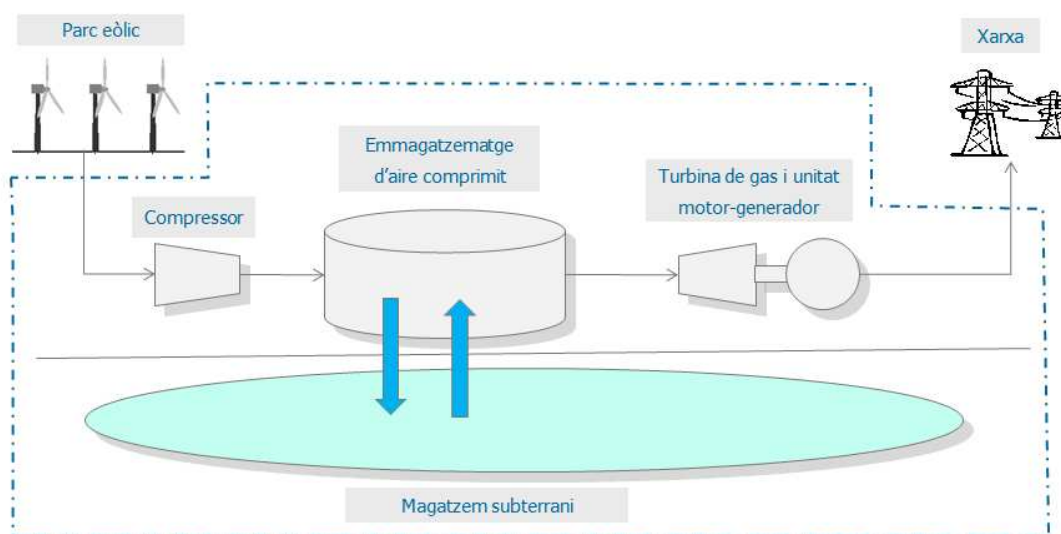
Una planta d'emmagatzematge d'energia en forma d'aire comprimit està formada per un tren compressor, una unitat motor-generador, una turbina de gas i un magatzem subterrani (veure Figura 4.3). Els magatzems subterranis solen ser cavitats naturals, antigues mines o aqüífers.

Durant els períodes d'excés d'energia, on la demanda és inferior a l'oferta, un motor acciona el compressor per tal de comprimir aire en el magatzem. Més tard, durant els períodes on hi ha demanda però no hi ha prou potència eòlica, l'aire comprimit s'utilitza per a la combustió



de gas. Els gasos resultants de la combustió són expandits en una turbina de gas per fer girar el generador, que és solidari a l'eix de la turbina, i produir electricitat.

En els sistemes convencionals de producció d'energia mitjançant la combustió de gas, l'energia requerida per comprimir l'aire s'obté a partir del gas. En canvi, si s'utilitza una combinació d'energia eòlica i emmagatzematge d'energia en forma d'aire comprimit es necessita cremar menys gas, ja que l'energia necessària per a comprimir l'aire s'obté del vent.



**Figura 4.3. Esquema del sistema d'emmagatzematge d'energia en forma d'aire comprimit (Font: Institut Cerdà i elaboració pròpia).**

Actualment hi dues instal·lacions d'aquest tipus arreu del món. Una d'elles està situada a la central termoelèctrica de gas de 290 MW que hi ha a Huntorf, Alemanya. Aquesta instal·lació està en funcionament des de l'any 1978 i és la primera que es va construir al món. Disposa de dos cavitats per emmagatzemar l'aire comprimit, que tenen, en total, un volum aproximat de 300.000 m<sup>3</sup>. Aquestes cavitats es van crear a partir de dos dipòsits subterranis de sal de roca, mitjançant un procés de lixiviació<sup>2</sup>.

A l'any 1991 es va construir la segona instal·lació d'aquest tipus a la central termoelèctrica de gas de 110 MW ubicada a McIntosh, Alabama.

<sup>2</sup> Operació d'extracció en la qual hom separa, per mitjà d'un dissolvent (fase líquida), un o més components d'un material sòlid.



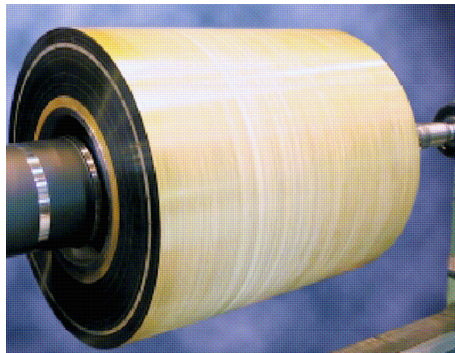


La recerca en CAES està centrada en el desenvolupament de sistemes d'emmagatzematge d'aire comprimit en tancs prefabricats. Aquesta opció permetria reduir, o fins i tot eliminar, la dependència de l'emplaçament geològic actual.

### **4.3. Volants d'inèrcia**

Els volants d'inèrcia són discs pesats que si es fan girar, emmagatzemen energia en forma d'energia cinètica. Per tal de tenir les mínimes pèrdues d'energia a causa de la fricció, s'utilitzen coixinets de bola o coixinets magnètics.

Durant el procés de càrrega, el rotor s'accelera mitjançant un motor/generador elèctric. Mentre que en el procés de descarrega, el volant d'inèrcia cedeix l'energia de rotació al motor/generador elèctric per convertir-la en electricitat.



**Figura 4.4. Rotor d'un volant d'inèrcia, a la Universitat de Texas (Font: [4]).**

En base al material del rotor, hi ha dos tipus de volants d'inèrcia, els de materials compostos (com fibra de carboni o grafit) i els que utilitzen acer com a material principal. Per altra banda, la quantitat d'energia emmagatzemada,  $E$ , és proporcional a la massa del volant i al quadrat de la seva velocitat angular. Es calcula segons l'equació (Eq. 4.2).

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

On:

$I$  és el moment d'inèrcia del volant.

$\omega$  és la velocitat angular.

La màxima densitat energètica (energia per unitat de massa) d'un volant d'inèrcia es pot expressar segons l'equació (Eq. 4.3).



$$E_{específica} = K_s \frac{\sigma_m}{\rho} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

On:

$\sigma_m$  és la resistència a la tracció del material del rotor.

$\rho$  és la densitat del volant.

$K_s$  és el factor de forma (El factor de forma,  $K_s$ , medeix l'eficiència de la forma del volant d'inèrcia i pren valors compresos entre 0,31 i 0,61) [4].

De l'equació (Eq. 4.3) se'n deriva que per tenir una bona densitat energètica cal un material amb una elevada resistència a la tracció i una densitat baixa.

Els volants d'inèrcia són capaços de realitzar entre 10.000 i 100.000 cicles de càrrega i descàrrega durant el seu període de vida, depenent del disseny [5].

#### 4.4. Supercondensadors

Els supercondensadors emmagatzemen energia elèctrica en forma de camp elèctric. El seu funcionament es basa en l'acumulació de càrregues elèctriques a dues plaques conductores o elèctrodes, separades per un aïllant i submergides en un electròlit orgànic, inorgànic o sòlid [6].

L'energia emmagatzemada en un supercondensador, al igual que en un condensador, es calcula segons l'equació (Eq. 4.4).

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

On:

C és la capacítància [F].

V és el voltatge del supercondensador [V].

La capacítància mesura la quantitat de càrrega elèctrica emmagatzemada a cada armadura per a un voltatge donat i es calcula segons l'equació (Eq. 4.5).

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

On:

$\varepsilon$  és la permitivitat del dielèctric utilitza.

A és l'àrea de cada elèctrode.



$d$  és la distància entre elèctrodes.

Els supercondensadors tenen més capacítància que els condensadors convencionals degut a la major superfície dels elèctrodes. És per això que els supercondensadors aconseguixen acumular molta més energia que els condensadors convencionals.

#### **4.5. Superconductors magnètics (SMES)**

En aquest cas, l'energia s'emmagatzema en forma de camp magnètic. Primerament cal convertir el corrent altern (CA), produït en els aerogeneradors, a corrent continu (CC) i fer circular aquest per una bobina superconductora refredada criogenicament. Els cables superconductors que conformen la bobina, tenen una resistència pràcticament nul·la i operen a temperatures extremadament baixes, uns  $-270^{\circ}\text{C}$ . Per mantenir aquestes baixes temperatures s'utilitza heli o nitrogen líquid.

L'energia emmagatzemada es retorna a la xarxa de distribució elèctrica descarregant la bobina i transformant el CC a CA en un inversor/rectificador.

L'energia emmagatzemada en un superconductor magnètic es calcula segons l'equació (Eq. 4.6).

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\text{Eq. 4.6})$$

On

$L$  la inductància equivalent del sistema superconductor.

$I$  és la intensitat de corrent continu que circula pels cables de la bobina.

#### **4.6. Producció d'hidrogen**

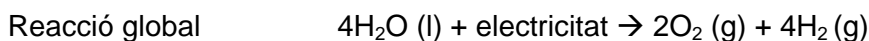
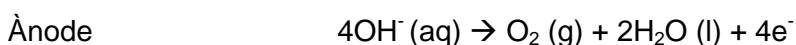
L'hidrogen és un element molt abundant a la naturalesa, però no en estat lliure sinó combinat amb altres elements. Sobretot amb l'oxigen, formant aigua.

De totes les tecnologies que permeten obtenir hidrogen, ens centrarem en l'electròlisi de l'aigua, ja que és l'única que permet produir hidrogen a partir de l'electricitat. L'electròlisi de l'aigua consisteix en separar la molècula de  $\text{H}_2\text{O}$  en hidrogen i oxigen, gràcies a l'aplicació d'energia elèctrica. La reacció que té lloc és la següent:

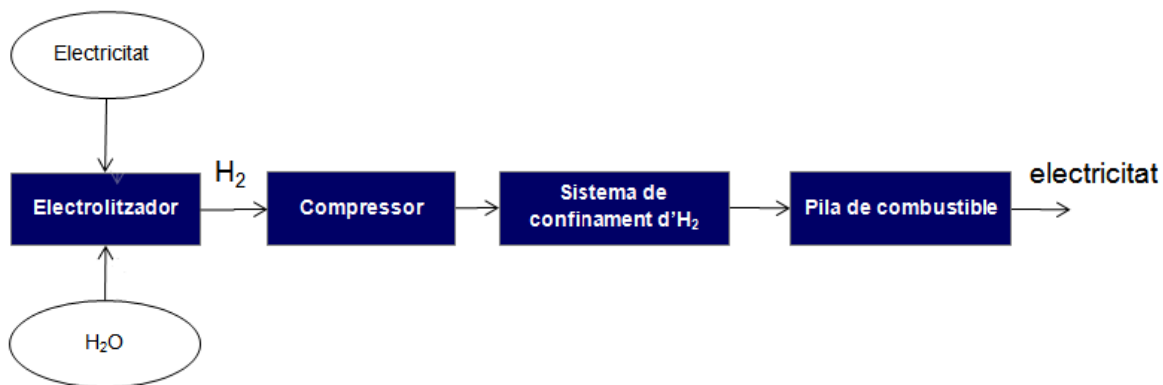




En l'**electròlisi alcalina**, s'aplica corrent a dos elèctrodes (s'anomena ànode a l'elèctrode que es carrega positivament i càtode al que es carrega negativament) que estan submergits en una dissolució conductora (electròlit). Aquesta dissolució aquosa sol estar formada per una dissolució de sosa càustica (KOH). Al establir un camp elèctric entre l'ànode i el càtode, els ions positius ( $\text{H}^+$ ) emigren cap al càtode i els negatius ( $\text{OH}^-$ ) cap a l'ànode. Al arribar als elèctrodes, els ions es descarreguen i es formen àtoms d'oxigen i hidrogen. Al càtode es forma  $\text{H}_2$  i a l'ànode es forma  $\text{O}_2$ . Les reaccions que tenen lloc són les següents:



El sistema d'emmagatzematge d'energia que es proposa per als parcs eòlics està format per quatre elements bàsics: l'electrolitzador, el compressor, el sistema de confinament d'hidrogen, i la pila de combustible (veure Figura 4.5).



**Figura 4.5. Esquema del sistema d'emmagatzematge mitjançant hidrogen i piles de combustible (Font: Elaboració pròpia).**

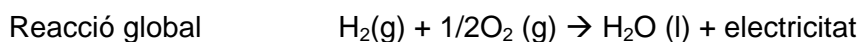
L'electrolitzador aprofita l'electricitat que es vol emmagatzemar per a realitzar el procés de l'electròlisi de l'aigua i generar hidrogen. Un cop generat l'hidrogen, s'utilitza un compressor per tal de disminuir el volum d'hidrogen a emmagatzemar.

Els sistemes de confinament d'hidrogen en estat gasós que existeixen actualment en el mercat permeten tenir-lo a pressions entre 5 i 35 MPa en contenidors. Aquests contenidors (dipòsits o ampolles de forma cilíndrica) estan fets amb metall, generalment acer, i sovint



incorporen capes intermèdies de materials compostos de fibra de vidre o fibra de carboni. Estan dissenyats per tal que els materials compostos suportin els esforços mecànics, i els materials metàl·lics evitin la difusió de l'hidrogen.[6]

Finalment, la pila de combustible s'encarrega de generar electricitat a partir de l'hidrogen generat i l'oxigen present a l'aire. Les piles de combustible estan formades per un conjunt de cel·les elementals. Cada cel·la té dos elèctrodes, càtode i ànode, i un electròlit. Els elèctrodes, estan fabricats amb un material conductor de l'electricitat i normalment dopat amb partícules d'un catalitzador metàl·lic. En l'ànode, l'hidrogen molecular es converteix en ió i cedeix dos electrons. Els ions d'hidrogen arriben al càtode a través de l'electròlit mentre que els electrons circulen per un circuit extern que uneix els dos elèctrodes, generant electricitat. En el càtode, els ions d'hidrogen es combinen amb oxigen i els electrons, formant aigua. Les reaccions que tenen lloc són les següents:



Hi ha diferents tipus de piles de combustible, en funció del tipus d'electròlit utilitzat. Aquestes es poden classificar en: piles de combustible de membrana polimèrica (PEMFC), piles de combustible alcalines (AFC), piles de combustible d'àcid fosfòric (PAFC), piles de combustible de carbonats fosos (MCFC) i piles de combustible d'òxid sòlid (SOFC). La Taula 4.2 resumeix les característiques principals de cada tipus.

Tipus de pila	Electròlit	Temperatura d'operació [°C]	Rendiment [%]	Rang de potència [kW]
PEMFC	Polímer sòlid	60-80	35-45	5-250
AFC	KOH	50-100	40-60	5-150
PAFC	Àcid fosfòric	200-220	40-45	200 -1000
MCFC	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> i K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	600-700	45-60	100 -2000
SOFC	ZrO <sub>2</sub> i Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	800-1000	50-65	100-250

Taula 4.2- Característiques dels diferents tipus de piles de combustible (Font: [7] i [8]).



En el parc eòlic experimental de Sotavento (Galícia) estan duent a terme un projecte de producció d'hidrogen a partir d'energia eòlica. Aquest projecte consta d'una planta d'emmagatzematge d'energia eòlica mitjançant hidrogen, a petita escala, que permetrà obtenir dades extrapolables per al disseny de solucions a gran escala [9].

La planta d'emmagatzematge està formada per un electrolitzador amb una capacitat de 60 Nm<sup>3</sup>/h, alimentat amb electricitat d'origen eòlic. L'electrolitzador produirà hidrogen que després serà comprimit per reduir-ne el seu volum d'emmagatzematge i serà emmagatzemat en cilindres d'acer a una pressió d'uns 200 bar. Posteriorment, es podrà convertir aquest hidrogen en electricitat mitjançant una pila de combustible de 60 kW.

#### 4.7. Bateries

L'energia elèctrica s'emmagatzema en forma d'energia electroquímica. Hi ha varies tecnologies d'emmagatzemament en bateries. A continuació es mostra una taula amb les principals tecnologies i alguna informació rellevant:

Tecnologia	Tipus	$P_{SEEmax}$ [MW]	$E_{max}$ [MWh]	Rendiment [%]	Cost [€/kWh]
Lead acid	flooded type	10	40	72-78	50-150
	valve regulated	0,3	0,58	72-78	50-150
Flow batteries	Vanadium redox	1,5	1,5	85	360-1000
	ZnBr	1	4	75	360-1000
	Regenerative fuel cell	15	120	75	360-1000
NiCd	NiCd	27	6,75	72-78	200-600

Taula 4.3- Característiques de diferents tipus de bateries (Font: [10]).

#### 4.8. Costos dels sistemes d'emmagatzematge d'energia

Els costos a considerar en els SEE són els costos de capital, necessaris per a construir l'instal·lació d'emmagatzematge d'energia, i els costos d'operació i manteniment.

Generalment, els costos de capital d'un sistema d'emmagatzematge es calculen segons l'equació (Eq. 4.7).



$$C = C_1 \cdot E_{\max} + C_2 \cdot P_{SEE \max} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

On  $C_1$  és el cost per unitat d'energia i  $C_2$  és el cost per unitat de potència del SEE corresponent.

Cal tenir present, que en algunes tecnologies, els costos unitaris no es mantenen constants per a tot el rang de potència o energia que és capaç d'emmagatzemar el SEE. És el cas dels superconductors magnètics, on el cost per unitat d'energia augmenta de manera significativa, a mesura que augmenta la capacitat d'emmagatzematge d'energia.

Mentre que els costos d'operació i manteniment, que depenen del temps de vida del SEE, es suposen proporcionals als costos de capital (de l'ordre del 40% del cost de capital en sistemes amb un període de vida útil entorn als 20 anys).[11]

Un factor que està directament relacionat amb el cost és el temps de vida útil del SEE. Per exemple, a priori, podria semblar que les bateries, que tenen un cost unitari més baix que altres SEE són una bona opció per a l'emmagatzematge. Ara bé, tenint en compte que tenen una durabilitat relativament baixa (entre 1.000 i 2.000 cicles de descàrrega), en comparació amb altres sistemes, no podem assegurar que tinguin un cost competitiu degut a la seva poca durabilitat. És per això que **la millor manera d'avaluar el cost d'un SEE és tenir en compte en el cost, el temps de vida del SEE de manera implícita.**

Després de fer una recerca dels costos de capital, s'ha detectat una variabilitat considerable segons la font consultada. En la taula 4.4 es fa una comparació entre les dades obtingudes en les diferents fonts consultades.

Tecnologia	C1 [€/kWh]			C2 [€/kW]		
	A	B	C	A	B	C
Bombeig d'aigua	10	11	54	575	436	714
CAES	10	7	50	550	309	500
Producció i Emmagatzematge d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	-	7	-	-	630	-
Bateries (Lead acid)	160	164	230	110	182	250

**Taula 4.4. Costos de capital unitaris consultats en diferents fonts.**

A."Almacenamiento de energía: Desarrollos tecnológicos y costos", estudi elaborat per la Universidad Católica de Chile.



**B.** "Hydrogen Energy Storage Comparison", estudi elaborat pel departament d'energia dels Estats Units (DOE).

**C.** "Energy storage systems - Characteristics and comparisons", estudi publicat a ELSEVIER.

L'única font que mostra els costos unitaris de l'emmagatzematge mitjançant hidrogen és la B. Aquesta, diferencia entre els costos per unitat d'energia (10 \$/kWh) i de potència de la pila de combustible (500 \$/kW), el cost per unitat de potència de l'electrolitzador (300 \$/kW) i el cost per unitat de cabal capaç de tractar pel pressuritzador (112,5 \$/scfm). Per calcular el cost de capital per unitat de potència, cal sumar el costos unitaris de la pila de combustible, de l'electrolitzador i del pressuritzador. El resultat que s'obté<sup>3</sup>, és un cost unitari de 630 €/kW.

Fent una mitjana dels costos que apareixen en la Taula 4.4 obtenim el valor mig dels costos de capital unitaris (veure Taula 4.5).

Tecnologia	C1 [€/kWh]	C2 [€/kW]
Bombeig d'aigua	25	575
CAES	22	453
Producció i Emmagatzematge d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	7	630
Bateries (Lead acid)	185	181

**Taula 4.5.- Valor mig dels costos de capital unitaris**

Partint de la dada que els costos d'operació i manteniment són de l'ordre del 40% del cost de capital en sistemes amb un període de vida útil entorn als 20 anys, s'ha fet una regressió lineal per poder avaluar aquests costos en aquells casos en els quals el temps de vida útil sigui diferent de 20 anys. L'equació (Eq. 4.8) permet calcular el cost d'operació i manteniment, expressat com a percentatge del cost de capital, en funció del temps de vida útil del SEE:

$$\text{Cost d'operació i manteniment} = 0,02 \cdot (\text{Temps de vida útil del SEE}) \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Aplicant l'equació (Eq. 4.8), s'obté el % que representa el cost d'operació i manteniment respecte al cost de capital per als diferents sistemes d'emmagatzematge. A partir d'aquest

<sup>3</sup> Per arribar a aquest resultat s'han tingut en compte els següents factors de conversió: 1kW = 1 Nm<sup>3</sup>/h; 1€ = 1,3758\$; 1scfm = 1,698 Nm<sup>3</sup>/h.





valor i dels costos de capital unitaris mostrats a la Taula 4.5, s'obtenen els costos d'operació i manteniment unitaris (veure Taula 4.6).

Tecnologia	C1 [€/kWh]	C2 [€/kW]	Temps de vida útil (anys)
Bombeig d'aigua	25	575	50
CAES	18	360	40
Producció i Emmagatzematge d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	5	504	40 (*)
Bateries (Lead acid)	18	18	5 anys (**)

**Taula 4.6. Costos d'operació i manteniment unitaris**

(\*) No hi ha dades sobre el temps de vida útil d'aquest SEE però es considera que pot arribar als 40 anys, amb el manteniment adequat, ja que les tres tecnologies que hi estan implicades (electròlisi, compressió d'hidrogen i piles de combustible) disposen ja d'una maduresa tecnològica.

(\*\*) El temps de vida útil de les bateries es dona expressat en cicles de descàrrega. En el cas de les "lead acid batteries", s'estima una durada d'uns 2.000 cicles. S'ha considerat que en un any es poden arribar a realitzar unes 400 descàrregues completes, que implica un temps de vida útil de 5 anys.

Agrupant els costos de capital i els costos d'operació i manteniment, obtenim els costos unitaris per a les diferents tecnologies d'emmagatzematge d'energia (veure Taula 4.7).

Tecnologia	C1 [€/kWh]	C2 [€/kW]	Temps de vida útil [anys]	C1 [€/kWh-any]	C2 [€/kW-any]
Bombeig d'aigua	50	1150	50	1	23
CAES	40	813	40	1	20
Producció i Emmagatzematge d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	12	1134	40 (*)	0,3	28
Bateries (Lead acid)	203	199	5 (**)	41	40

**Taula 4.7. Costos unitaris totals.**



## 4.9. Comparació dels SEE

En la Taula 4.8 es mostren les característiques d'interès dels principals sistemes d'emmagatzematge d'energia a llarg termini (*Long-term energy storage systems*).

Tecnologia	Potència [MW]	Energia [MWh]	$\eta_c$ [%]	$\eta_d$ [%]	C1 [€/kWh-any]	C2 [€/kW-any]	Temps de vida útil [anys]
Bombeig d'aigua	30-4000	500-8000	80	80	1	23	Fins a 50
CAES	50-300	500-2500	70	70	1	20	Fins a 40
Producció d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	Fins a 2	24	35	35	0,3	28	Fins a 40
Bateries (Lead acid)	1-10	Fins a 40	80	80	53	43	Fins a 5

Taula 4.8.- Comparació dels paràmetres clau de les diferents tecnologies d'emmagatzematge d'energia (Font: [2] i elaboració pròpia).



## 5. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA D'OPTIMITZACIÓ DE L'OPERACIÓ DEL SEE

En aquest apartat es planteja el problema d'optimització per tal d'identificar la millor estratègia per l'operació d'un parc eòlic combinat amb un SEE. La solució del problema d'optimització permetrà determinar les hores d'operació del SEE per tal de maximitzar els beneficis econòmics derivats de la venda d'electricitat a la xarxa durant un període de temps concret.

Els inputs del problema d'optimització són: la corba del preu de l'energia elèctrica al mercat elèctric, la corba de la potència eòlica aprofitable i les característiques del SEE (rendiment de càrrega, rendiment de descàrrega, energia màxima que és capaç d'emmagatzemar i potència màxima intercanviable) . El resultat obtingut per a cada interval temporal de la simulació és la potència intercanviada amb el SEE. Ja sigui potència introduïda al SEE provinent del parc eòlic o bé entregada a la xarxa de distribució elèctrica.

Com tot problema d'optimització, cal definir la funció objectiu i les restriccions a les quals està sotmesa la variable d'estudi.

### 5.1. *Funció objectiu*

La funció objectiu dona el benefici econòmic derivat de l'operació del parc eòlic i el SEE durant un cert període de temps:

$$MAX \left[ F = C_e^T P_{PE} \Delta t + C_e^T P_{SEE} \Delta t \right] \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Si prenem un interval de temps d'una hora ( $\Delta t=1h$ ) ens queda:

$$MAX \left[ F = C_e^T P_{PE} + C_e^T P_{SEE} \right] \quad (\text{Eq. 5.2})$$

**F** és el benefici econòmic de l'operació del parc eòlic [€].

**C<sub>e</sub>** és un vector que indica el preu de l'electricitat al mercat elèctric en cada interval de temps considerat [€/MWh].

$$C_e^T = (C_{e1}, C_{e2}, \dots, C_{ei}, \dots, C_{en})$$

**n** és el nombre d'intervals de temps considerats (per exemple, si es vol optimitzar l'operació



del parc eòlic durant 1 dia, amb intervals d'una hora, n valdrà 24).

$\mathbf{P}_{PE}$  és un vector que dona la potència eòlica disponible en cada interval de temps [MW].

$$P_{PE} = \begin{pmatrix} P_{PE1} \\ P_{PE2} \\ \dots \\ P_{PEi} \\ \dots \\ P_{PE_n} \end{pmatrix}$$

$\mathbf{P}_{SEE}$  és un vector que indica la potència que el sistema d'emmagatzematge d'energia rep del parc eòlic o cedeix a la xarxa de distribució elèctrica en cada interval de temps [MW]. És el vector a optimitzar.

$$P_{SEE} = \begin{pmatrix} P_{SEE1} \\ P_{SEE2} \\ \dots \\ P_{SEEi} \\ \dots \\ P_{SEE_n} \end{pmatrix}$$

$$P_{SEE}(i) = P_{SEE+}(i) + P_{SEE-}(i)$$

$\mathbf{P}_{SEE+}(i)$  és la potència que el SEE entrega a la xarxa ( $P_{SEE+}(i) \geq 0$ ).

$\mathbf{P}_{SEE-}(i)$  és la potència que el SEE rep del parc eòlic ( $P_{SEE-}(i) \leq 0$ ).

Per tal de poder treballar amb les eines d'optimització que ofereix el MATLAB, definim el vector  $\mathbf{P}_{SEE+-}$  i el vector  $\mathbf{C}_{e+-}$ :

$$P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ \dots \\ P_{SEE+}(i) \\ P_{SEE-}(i) \\ \dots \\ \dots \\ P_{SEE+}(n) \\ P_{SEE-}(n) \end{pmatrix}$$



$$C_{e+-}^T = (C_{e1}, C_{e1}, \dots, C_{ei}, C_{ei}, \dots, C_{en}, C_{en})$$

L'optimització en el MATLAB funciona minimitzant la funció objectiu. Així doncs, per maximitzar una funció F cal minimitzar la funció  $-F$ . Observem que el màxim de F és el mateix que el mínim de  $-F$ .

La funció objectiu que entrarem al MATLAB és:

$$MIN[G = -F = -C_e^T P_{PE} - C_{e+-}^T P_{SEE+-}] \quad (\text{Eq. 5.3})$$

El primer terme de la funció objectiu és constant i per tant, a efectes de trobar l'òptim, es pot negligir. Així doncs, la funció a optimitzar serà:

$$MIN[H = -C_{e+-}^T P_{SEE+-}] \quad (\text{Eq. 5.4})$$

## 5.2. Restriccions

La primera restricció és que la potència del SEE ha de ser menor o igual que la potència que pot subministrar. És a dir:

$$P_{SEE+}(i) \leq \frac{E(i-1)}{\Delta t} \eta_D \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{Eq. 5.5})$$

**E(i-1)** és l'energia disponible al SEE al final de l'estat i-1. Equivalentment, E(i-1) és l'energia disponible al SEE al principi de l'estat i-èssim.

Si prenem un interval de temps d'una hora ( $\Delta t=1h$ ), ens queda el següent:

$$P_{SEE+}(i) \leq E(i-1) \eta_D \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{Eq. 5.6})$$

L'energia disponible al SEE, al final de l'estat i-èssim, és:

$$E(i) = E(i-1) - P_{SEE-}(i) \eta_C \Delta t - \frac{P_{SEE+}(i)}{\eta_D} \Delta t \quad (\text{Eq. 5.7})$$

$$P_{SEE-}(i) \leq 0$$

$$P_{SEE+}(i) \geq 0$$

Per a  $\Delta t = 1h$ :



$$E(i) = E(i-1) - P_{SEE-}(i)\eta_C - \frac{P_{SEE+}(i)}{\eta_D} \quad (\text{Eq. 5.8})$$

$E_i$  és l'energia disponible al SEE al final de l'estat  $i$ -èssim [MWh].

$\eta_C$  és el rendiment de càrrega del SEE.

$\eta_D$  és el rendiment de descàrrega del SEE.

Per altra banda, trobem la limitació de l'energia màxima que és capaç d'emmagatzemar el SEE. En tots els intervals de temps, l'energia disponible al SEE ha de ser menor o igual que la capacitat màxima d'emmagatzematge d'energia del sistema ( $E_{\max}$ ). Per exemple, en el cas d'un sistema d'emmagatzematge per bombeig d'aigua, la capacitat d'emmagatzematge està limitada per l'altura del salt d'aigua i per la massa d'aigua de la reserva superior. Aquesta limitació l'expressarem de la següent manera:

$$E(i) \leq E_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{Eq. 5.9})$$

També cal tenir en compte que si no bufa el vent serà impossible emmagatzemar energia:

$$-P_{SEE-}(i) \leq P_{PE}(i) \quad (\text{Eq. 5.10})$$

Finalment, afegim la restricció de la potència màxima que és capaç de rebre o donar el SEE:

$$0 \leq P_{SEE+}(i) \leq P_{SEE_{\max}} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{Eq. 5.11})$$

$$-P_{SEE_{\max}} \leq P_{SEE-}(i) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (\text{Eq. 5.12})$$

On,

$P_{SEE_{\max}}$  és la potència màxima del SEE.



### 5.3. Resolució del problema d'optimització de l'operació per a $n=5$

A continuació es desenvolupen totes les restriccions prenent  $n=5$ , amb intervals de temps d'una hora ( $\Delta t = 1h$ ):

De l'equació (Eq. 5.6):

Suposem  $E(0) = 0$ . Inicialment no hi ha energia emmagatzemada.

$$P_{SEE+}(1) \leq E(0)\eta_D = 0 \longrightarrow P_{SEE+}(1) \leq 0;$$

$$P_{SEE+}(2) \leq E(1)\eta_D = E(0) - P_{SEE-}(1)\eta_C\eta_D - P_{SEE+}(1);$$

$$P_{SEE+}(2) + P_{SEE-}(1)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(1) \leq 0;$$

Anàlogament al cas anterior,

$$P_{SEE+}(3) + P_{SEE-}(1)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(1) + P_{SEE-}(2)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(2) \leq 0;$$

$$P_{SEE+}(4) + P_{SEE-}(1)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(1) + P_{SEE-}(2)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(2) + P_{SEE-}(3)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(3) \leq 0;$$

$$P_{SEE+}(5) + P_{SEE-}(1)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(1) + P_{SEE-}(2)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(2) + P_{SEE-}(3)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(3) + P_{SEE-}(4)\eta_C\eta_D + P_{SEE+}(4) \leq 0;$$

El sistema d'inequacions format per aquestes 5 inequacions es pot representar en forma matricial:

$$B \cdot P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_c\eta_d & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & \eta_c\eta_d & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



De l'equació (Eq. 5.9):

$$E(1) \leq E_{\max} \longrightarrow -P_{SEE-}(1)\eta_C - \frac{P_{SEE+}(1)}{\eta_D} \leq E_{\max}$$

$$E(2) \leq E_{\max} \longrightarrow -\eta_C(P_{SEE-}(1) + P_{SEE-}(2)) - \frac{1}{\eta_D}(P_{SEE+}(1) + P_{SEE+}(2)) \leq E_{\max}$$

Els casos per a  $i=3,4$  i  $5$  són anàlegs als anteriors. El sistema d'inequacions representat de forma matricial es mostra a continuació:

$$C \cdot P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c \\ -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c \\ \frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c & -\frac{1}{\eta_d} & -\eta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \end{pmatrix}$$

De l'equació (Eq. 5.10):

$$-P_{SEE-}(1) \leq P_{PE}(1)$$

$$-P_{SEE-}(2) \leq P_{PE}(2)$$

$$-P_{SEE-}(3) \leq P_{PE}(3)$$

$$-P_{SEE-}(4) \leq P_{PE}(4)$$

$$-P_{SEE-}(5) \leq P_{PE}(5)$$

De forma matricial:





$$D \cdot P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} P_{PE}(1) \\ P_{PE}(2) \\ P_{PE}(3) \\ P_{PE}(4) \\ P_{PE}(5) \end{pmatrix}$$

A continuació reescrivim totes les restriccions anteriors de manera que ens quedi de la forma:

$$A \cdot P_{SEE+-} \leq b$$

On,

**A** és una matriu de dimensió 15 x 10 que depèn dels rendiments de càrrega i descàrrega del SEE. Aquests són valors coneguts.

**P<sub>SEE+-</sub>** és un vector de dimensió 10. És el vector a optimitzar.

**b** és un vector de dimensió 15, que generem a partir d'uns paràmetres coneguts: La capacitat màxima d'emmagatzematge d'energia del SEE i la potència eòlica aprofitable pel parc eòlic en cada interval de temps considerat.



$$A \cdot P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_C \eta_D & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & \eta_C \eta_D & 1 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C & -\frac{1}{\eta_D} & -\eta_C \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ E_{\max} \\ P_{PE}(1) \\ P_{PE}(2) \\ P_{PE}(3) \\ P_{PE}(4) \\ P_{PE}(5) \end{pmatrix} = b$$

De l'equació (Eq. 5.11):

$$\begin{aligned}
 0 &\leq P_{SEE+}(1) \leq P_{SEE_{\max}} \\
 0 &\leq P_{SEE+}(2) \leq P_{SEE_{\max}} \\
 0 &\leq P_{SEE+}(3) \leq P_{SEE_{\max}} \\
 0 &\leq P_{SEE+}(4) \leq P_{SEE_{\max}} \\
 0 &\leq P_{SEE+}(5) \leq P_{SEE_{\max}}
 \end{aligned}$$

De l'equació (Eq. 5.12):

$$\begin{aligned}
 -P_{SEE_{\max}} &\leq P_{SEE-}(1) \leq 0 \\
 -P_{SEE_{\max}} &\leq P_{SEE-}(2) \leq 0 \\
 -P_{SEE_{\max}} &\leq P_{SEE-}(3) \leq 0 \\
 -P_{SEE_{\max}} &\leq P_{SEE-}(4) \leq 0 \\
 -P_{SEE_{\max}} &\leq P_{SEE-}(5) \leq 0
 \end{aligned}$$

Per resoldre el problema d'optimització amb el MATLAB, cal generar dos vectors que acoten el vector a optimitzar. En el nostre cas,  $P_{SEE+-}$ .

El vector que acota superiorment l'anomenem  $ub$  i el que acota inferiorment l'anomenem  $lb$ .



$$lb = \begin{pmatrix} 0 \\ -P_{SEE \max} \\ 0 \\ -P_{SEE \max} \\ 0 \\ -P_{SEE \max} \\ 0 \\ -P_{SEE \max} \\ 0 \\ -P_{SEE \max} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} P_{SEE \max} \\ 0 \\ P_{SEE \max} \\ 0 \\ P_{SEE \max} \\ 0 \\ P_{SEE \max} \\ 0 \\ P_{SEE \max} \\ 0 \end{pmatrix} = ub$$

Resolem l'exemple proposat utilitzant la funció linprog del programa MATLAB [12]. La funció linprog resol problemes d'optimització lineals del tipus:

$$\min_x f^T x$$

subjecte a les restriccions:

$$Ax \leq b \quad i / o \quad A_{eq} x = b_{eq}$$

$$lb \leq x \leq ub$$

On  $f$ ,  $x$ ,  $b$ ,  $b_{eq}$ ,  $lb$ ,  $ub$  són vectors i  $A$  i  $A_{eq}$  són matrius.

La sintaxis que cal emprar per resoldre el problema és la següent:

$$x = \text{linprog}(f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub)$$

En el nostre cas, al no tenir una restricció d'igualtat:

$$x = \text{linprog}(f, A, b, [], [], lb, ub)$$

Primerament cal definir els vectors i matrius necessaris. Per resoldre aquest exemple suposarem un SEE amb les següents característiques:

$$E_{\max} = 3 \text{ MWh}$$

$$P_{SEEmax} = 2 \text{ MW}$$

$$\eta_c = 0,75$$

$$\eta_d = 0,9$$



A més a més, hem de suposar la potència eòlica disponible en cada un dels 5 intervals de temps considerats (vector  $P_{PE}$ ) i el preu de l'electricitat al mercat elèctric en cada interval de temps (vector  $C_{e+-}$ ):

$$f^T = -C_{e+-}^T = -(145,145,100,100,75,75,100,100,135,135)$$

$$P_{PE} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \\ 8 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$x = P_{SEE+-} = \begin{pmatrix} P_{SEE+}(1) \\ P_{SEE-}(1) \\ P_{SEE+}(2) \\ P_{SEE-}(2) \\ P_{SEE+}(3) \\ P_{SEE-}(3) \\ P_{SEE+}(4) \\ P_{SEE-}(4) \\ P_{SEE+}(5) \\ P_{SEE-}(5) \end{pmatrix}$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.675 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0.675 & 1 & 0 \\ -1.11 & -0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & 0 & 0 \\ -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 & -1.11 & -0.75 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$



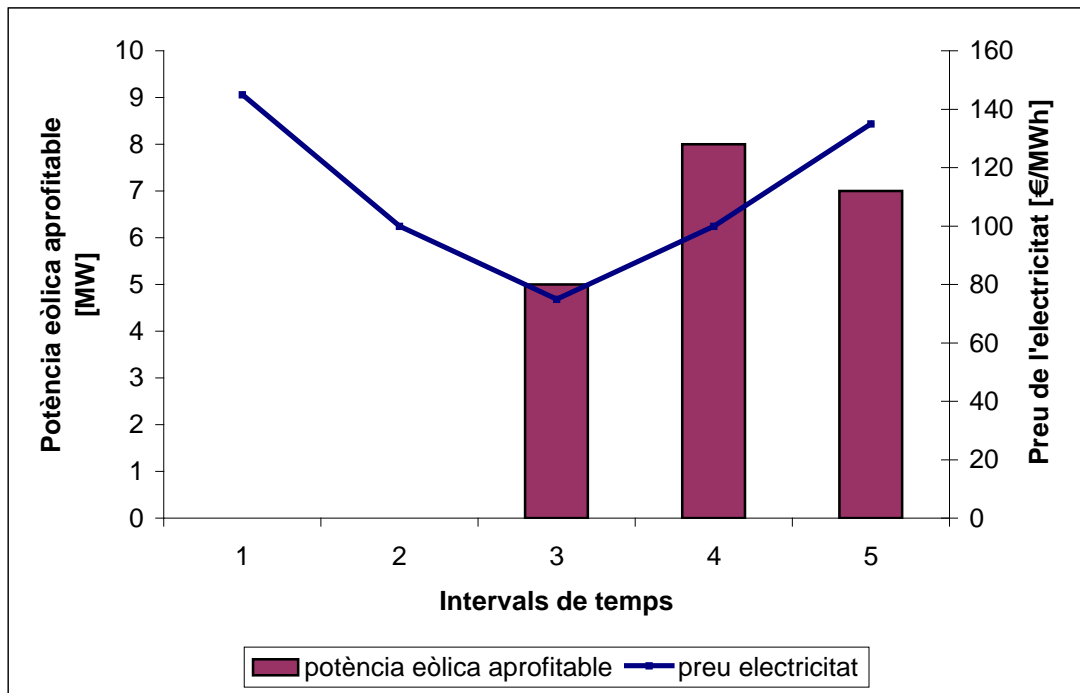
$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 3 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \\ 8 \\ 7 \end{pmatrix} \quad lb = \begin{pmatrix} 0 \\ -2 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ 0 \\ -2 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} \quad ub = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

El resultat de l'optimització és el següent:

i	Ce [€/MWh]	P <sub>PE</sub> [MW]	P <sub>SEE+(i)</sub> [MW]	P <sub>SEE-(i)</sub> [MW]	Energia acumulada al SEE [MWh]
1	145	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0
3	75	5	0	-2	-1,5
4	100	8	0	0	-1,5
5	135	7	1,35	0	0

El resultat de la simulació indica que per aconseguir maximitzar el benefici en aquest cas, el més convenient és emmagatzemar energia en el tercer interval de temps (i=3) i vendre-la al mercat elèctric en el cinquè interval (i=5). Té sentit, doncs en els dos primers intervals no hi ha potència eòlica aprofitable. En canvi, a partir del tercer interval sí que n'hi ha, i a més, la tendència del preu de l'electricitat és creixent (veure Figura 5.1).





**Figura 5.1. Potència eòlica aprofitable i preu de l'electricitat en cada interval de temps de la simulació**

El benefici que s'obtingria sense emmagatzemar energia durant el període de 5 hores és de 2.120 €, mentre que amb emmagatzematge s'obtingria un benefici de 2.152,25 €. Això demostra que tot i la pèrdua d'energia que hi ha hagut durant el procés d'emmagatzematge deguda als rendiments de càrrega i descàrrega del SEE, s'obté un benefici econòmic.



## 6. PLANTEJAMENT DEL PROBLEMA D'OPTIMITZACIÓ DEL DIMENSIONAMENT DEL SEE

Per resoldre el problema d'optimització del dimensionament del SEE s'ha optat per l'aplicació d'un algoritme genètic. Aquest algoritme permet trobar solucions properes a l'òptima. En el nostre cas, la solució obtinguda ens indica les dimensions del SEE ( $E_{\max}$  i  $P_{SEEmax}$ ) i la tecnologia d'emmagatzematge d'energia que permet obtenir millors beneficis.

### 6.1 *L'algoritme genètic*

#### 6.1.1 Introducció

Els algoritmes genètics estan basats en la teoria evolucionista postulada pel naturalista anglès Charles Darwin (1809-1882).

Una espècie d'éssers vius està formada per un grup d'individus amb característiques morfològiques comunes, que fan possible l'identificació d'aquests. Dins de cada espècie, aquells individus que s'adapten millor al medi que els envolta, tenen més probabilitat de sobreviure i per tant, tenen una major probabilitat de reproduir-se i transmetre les seva informació genètica a les noves generacions. Segons Darwin, aquest fenomen anomenat selecció natural, fa que sobrevisquin els més aptes.

Al mateix temps que es gestava la teoria de la selecció natural, el monjo austríac Gregor Mendel (1822-1884), descobria els principis bàsics de la transmissió d'informació d'una generació a una altra.

El codi genètic, imprès a l'ADN dels éssers vius, conté la informació que determina la seva morfologia i el seu funcionament. El mecanisme de reproducció sexual de les espècies garanteix la preservació d'aquesta informació, oferint una certa diversitat en la població gràcies al **creuament** de gens degut a l'aparellament d'individus. Aquesta preservació de l'informació genètica, a vegades es veu afectada pel fenomen de la **mutació**. La mutació d'un gen implica la modificació de l'informació d'aquest gen. En condicions normals (sense cap condicionant extern), la probabilitat de mutació és baixa, però com que el nombre de gens és molt elevat a vegades es pot donar aquest fenomen en algun dels gens. En el cas dels éssers humans la mutació pot ser intranscendent (aparició d'un sisè dit al peu). Tanmateix, pot tenir conseqüències negatives per a la supervivència de l'individu, com és el cas de la síndrome de Down.



### 6.1.2 Descripció

Un algoritme genètic és una tècnica de cerca utilitzada per a trobar solucions a problemes d'optimització.

Inicialment es parteix d'una població de solucions candidates al problema d'optimització anomenades individus. En el cas que ens ocupa, cada individu està definit per tres cromosomes, que contenen l'informació dels paràmetres  $E_{\max}$ ,  $P_{SEEmax}$  i tecnologia del SEE.

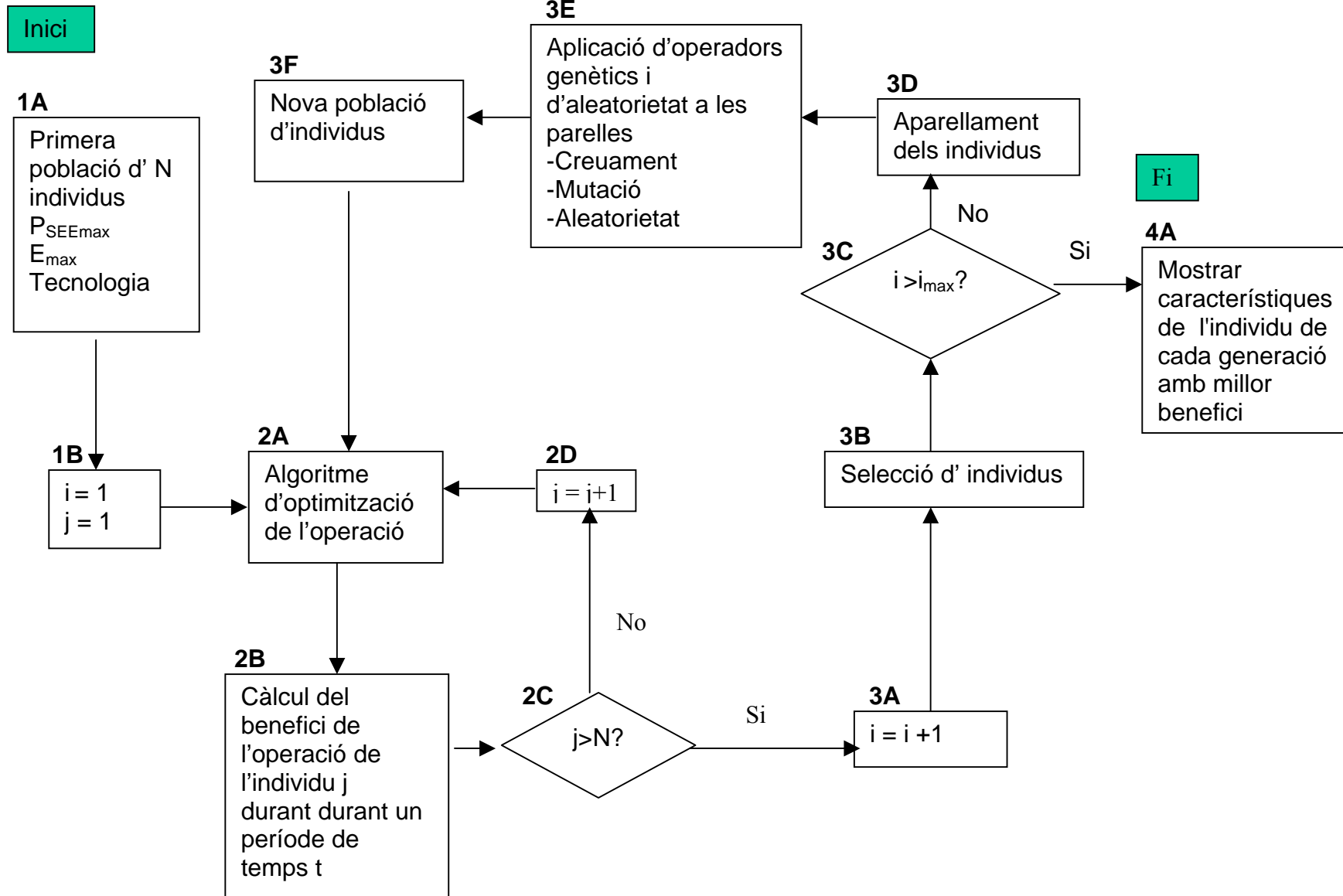
**Cada cromosoma està format per diferents gens i conté l'informació en codi binari.**

Per veure quins individus són els millors s'avalua cada individu en la **funció d'aptitud** (en aquest cas, aquesta funció és el benefici econòmic). Una vegada mesurada l'aptitud de cadascun dels individus d'aquesta primera població, es seleccionen els individus que tenen més bona aptitud i es crea una nova població a partir del creuament i/o la mutació dels individus seleccionats. Aquesta nova població s'utilitza en la següent iteració de l'algoritme. Es realitza un procés iteratiu fins que es compleix la condició d'aturada.

A continuació es mostra un esquema de l'algoritme genètic proposat:







## **BLOC 1: CREACIÓ DE LA PRIMERA POBLACIÓ D'INDIVIDUS**

El primer pas és crear la primera població d'individus (1A) i posar els comptadors de població i d'individu a 1:  $i = 1$  i  $j = 1$  (1B).

## **BLOC 2: CÀLCUL DEL BENEFICI DE CADA INDIVIDU**

Seguidament apliquem l'algoritme d'optimització de l'operació del SEE al primer individu de la primera població (2A). A partir del resultat obtingut calculem el benefici de l'operació durant un període de temps  $t$ , tenint en compte el cost de l'individu en estudi i el benefici que se'n treu (2B). Mentre no superem el nombre d'individus de la població (2C), incrementem el comptador d'individus (2D) i repetim el procés amb el nou individu.

## **BLOC 3: CREACIÓ D'UNA NOVA POBLACIÓ D'INDIVIDUS**

Un cop hem avaluat tots els individus de la població, incrementem el comptador de població (3A) i seleccionem els individus que formaran part de la següent població (3B). Mentre no es compleixi la condició d'aturar l'algoritme genètic (3C), passem a aparellar individus (3D) i apliquem els operadors genètics (creuament i mutació) i d'aleatorietat a les parelles (3E) per tal de crear una nova població (3F). Aquesta nova població, formada pels individus seleccionats i els seus descendents, es torna a introduir al sistema i es repeteix tot el procés amb la nova població.

## **BLOC 4: MOSTRA DE RESULTATS**

Quan s'assoleix la condició d'aturada de l'algoritme, es mostren les característiques dels millors individus de cada població (4A). Aquí s'acaba l'algoritme.



## 6.2 Etapes de l'algoritme genètic

### 6.2.1 Creació de la primera població

Com ja s'ha comentat en la descripció de l'algoritme genètic, cada individu queda definit pels paràmetres  $E_{\max}$ ,  $P_{SEEmax}$  i la tecnologia del SEE. En la Taula 6.1, es presenta un esquema amb les dades d'una població.

Individu	Cromosoma 1	$E_{\max}$ [MWh]	Cromosoma 2	$P_{SEEmax}$ [MW]	Cromosoma 3	Tecnologia
1	00001100	12	00000100	4	00	1
2	00001110	14	00001000	8	11	4
....	....	....	....	....	....	
N	00010011	19	00000111	7	01	2

Taula 6.1. Dades d'una població d'individus (Font: elaboració pròpia i [13]).

Els cromosomes 1 i 2 estan formats per 8 gens, doncs es considera un tamany suficient per guardar l'informació dels paràmetres  $E_{\max}$  i  $P_{SEEmax}$ . Per altra banda, el cromosoma 3 només conté 2 gens ja que únicament hi ha 4 tecnologies d'emmagatzematge diferents.

L'informació continguda en els tres cromosomes es guarda en un únic vector, de manera que les vuit primeres components representen el cromosoma 1, de la novena a la setzena component representen el cromosoma 2 i les últimes components del vector representen el cromosoma 3 (veure Figura 6.1).

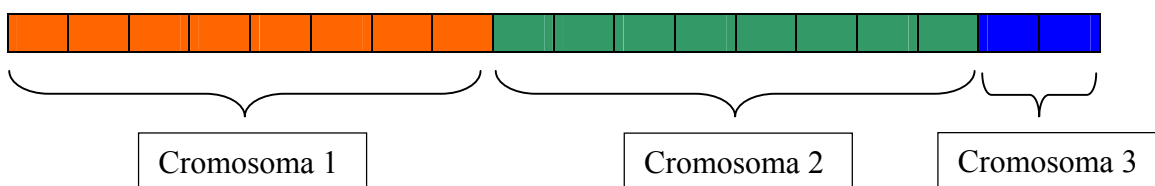


Figura 6.1. Esquema de l'estructura de dades d'un individu.

A l'hora de generar la primera població de l'algoritme genètic, és usual fer-ho aleatòriament. Per crear la primera població de 10 individus aleatòriament, es necessita una funció que generi 10 vectors de 18 components formats per zeros i uns. L'informació continguda en cada gen la genera la funció **ceil**, del MATLAB, que retorna zeros o uns aleatòriament.

El pseudocodi que crea la primera generació d'individus és el següent:



```

i=1; %població

for j=1:1:10;
x1{i,j} = ceil(2.*rand(18,1))'-1;
xx=x1{i,j};%variable auxiliar per accedir als elements del vector x1{i,j}
Emax= 128*xx(1)+64*xx(2)+32*xx(3)+16*xx(4)+8*xx(5)+4*xx(6)+2*xx(7)+xx(8);
Pmax=
128*xx(9)+64*xx(10)+32*xx(11)+16*xx(12)+8*xx(13)+4*xx(14)+2*xx(15)+xx(16);
Tec = 2*xx(17)+1*xx(18)+1;
x2{i,j} = [Emax Pmax Tec];%vector que conté l'informació en codi decimal
end;

```

## 6.2.2 Càlcul del benefici de cada individu

### 6.2.2.1 Algoritme d'optimització de l'operació

El problema d'optimització de l'operació queda definit per una sèrie de paràmetres. Alguns depenen de l'individu, com és el cas del rendiment de càrrega i el rendiment de descàrrega del SEE, la potència màxima intercanviable i la capacitat d'emmagatzematge d'energia. N'hi ha d'altres, com la potència eòlica aprofitable pel parc eòlic i el preu de l'electricitat, que són comuns a tots els individus.

En la Taula 6.2 es mostren els rendiments de càrrega i descàrrega, i els costos unitaris de les diferents tecnologies d'emmagatzematge d'energia candidates a solucionar el problema de dimensionament.

Tecnologia	$\eta_c$ [%]	$\eta_d$ [%]	C1 [€/MWh-any]	C2 [€/MW-any]
1. Bombeig d'aigua	0,8	0,8	1.000	23.000
2. CAES	0,7	0,7	1.000	20.000
3. Producció d'H <sub>2</sub> – Pila de combustible	0,35	0,35	300	28.000
4. Bateries (Lead acid)	0,8	0,8	53.000	43.000

**Taula 6.2 Paràmetres característics de les tecnologies d'emmagatzematge d'energia.**

Les dades de la Taula 6.2 les agrupem en forma de matriu per poder treballar-hi amb el MATLAB. L'anomenem matriu T.



$$T = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,8 & 1000 & 23000 \\ 0,7 & 0,7 & 1000 & 20000 \\ 0,35 & 0,35 & 300 & 28000 \\ 0,8 & 0,8 & 53000 & 43000 \end{pmatrix}$$

Com ja s'ha definit en l'apartat 5, l'algoritme d'optimització de l'operació del SEE requereix uns vectors i unes matrius com a dades de partida. Degut a que aquest algoritme s'aplicarà a diferents individus, amb característiques ben diferents, és necessari crear unes funcions que generin aquests vectors i matrius.

## GENERACIÓ DE LA MATRIU A

La matriu A depèn del nombre d'intervalos temporals a estudiar,  $n$ , i dels rendiments de càrrega i descàrrega del SEE,  $\eta_c$  i  $\eta_d$ , respectivament.

Per generar la matriu A, a partir dels paràmetres esmentats i mitjançant el MATLAB, s'ha creat la funció creaA. Aquesta funció s'encarrega de crear la matriu A, de dimensió  $2n$  columnes i  $3n$  files:

```
function A = creaA(n,nc,nd)

    for ii=1:1:n
        A(ii:1:n,2*ii-1)=1;
        A(ii+1:1:n,2*ii)=nc*nd;
        A(n+ii:1:2*n,2*ii-1)=-1/nd;
        A(n+ii:1:2*n,2*ii)=-nc;
        A(2*n+ii,2*ii)=-1;
    end;
```

## GENERACIÓ DEL VECTOR b

El vector b depèn de la capacitat d'emmagatzematge d'energia del SEE,  $E_{max}$ , i de la potència eòlica disponible en els diferents intervalos de temps,  $P_{PE}(i)$ . Té un total de  $3n$  elements.

Les primeres  $n$  components valen 0. A partir de la component  $n+1$  i fins la  $2n$ , cada element val  $E_{max}$ . Finalment, a partir de l'element  $2n+1$  i fins al  $3n$ , val  $P_{PE}(i)$ .

```
function b = creab(n,Emax,Ppe)

    for i=1:n
        b(i:1:n)=0;
        b(i+n:1:2*n)=Emax;
        b(i+2*n:1:3*n)=Ppe(i);
    end;
```



```
end;
```

## GENERACIÓ DEL VECTOR $ub$

El vector  $ub$ , limita la potència màxima intercanviable del SEE quan aquest cedeix energia a la xarxa. És a dir, limita la variable  $P_{SEE+}(i)$ .

Segons la manera com s'ha definit el problema d'optimització, els elements del vector  $ub$  valen  $P_{max}$  a les posicions senars i 0 a la resta de posicions. La dimensió d'aquest vector és  $2n$ .

```
function ub = vectorub(n,Pmax)
    i=1;
    while i<=2*n,
        if rem(i,2)==0,
            ub(i)=0;
        else
            ub(i)=Pmax;
        end
        i=i+1;
    end
```

## GENERACIÓ DEL VECTOR $lb$

El vector  $lb$ , limita la potència màxima intercanviable del SEE quan aquest rep energia del parc eòlic. És a dir, limita la variable  $P_{SEE-}(i)$ .

Segons la manera com s'ha definit el problema d'optimització, els elements del vector  $lb$  valen  $-P_{max}$  a les posicions senars i 0 a la resta de posicions. La dimensió d'aquest vector és  $2n$ .

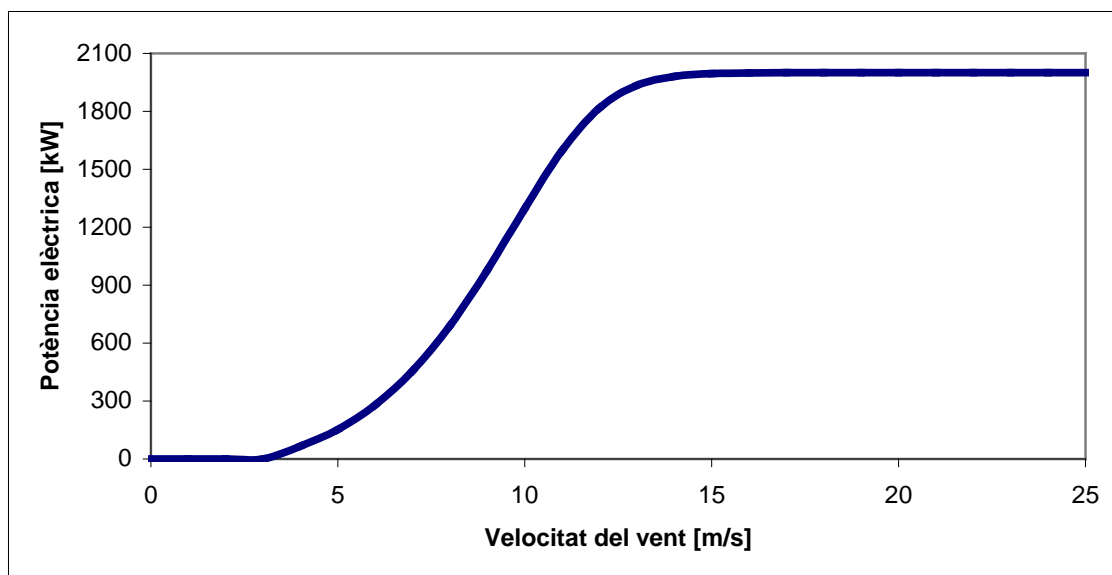
```
function lb = vectorlb(n,Pmax)
    i=1;
    while i<=2*n,
        if rem(i,2)==0,
            lb(i)=-Pmax;
        else
            lb(i)=0;
        end
        i=i+1;
    end
```

## GENERACIÓ DEL VECTOR $P_{PE}$

El vector  $P_{PE}$  indica la potència eòlica aprofitable en cada interval de temps considerat i està



format per  $n$  elements. Per a calcular el valor de cada element d'aquest vector s'ha utilitzat l'equació de la corba de potència d'un aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW (veure Figura 6.2), que dona la potència elèctrica en funció de la velocitat del vent. El valor resultant de l'aplicació d'aquesta equació s'ha multiplicat per 10, ja que es suposa un parc eòlic format per 10 aerogeneradors.



**Figura 6.2.- Corba de Potència aerogenerador Gamesa G80-2.0 MW**

Per generar el vector  $P_{pe}$ , també necessitem dades de la velocitat del vent, a l'alçada de la caixa, en intervals horaris. Degut a la dificultat d'obtenir aquestes dades, que sovint són confidencials, s'ha optat per fer una petició de dades de vent al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC). El SMC, disposa de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques (XEMA) que transmeten la informació al SMC a través de ràdio digital, tecnologia GSM o satèl·lit. Les variables meteorològiques que registren les Estacions Meteorològiques Automàtiques (EMA) són la temperatura, la precipitació, la velocitat del vent, la direcció del vent, la humitat relativa, l'irradiància solar global, la pressió atmosfèrica i el gruix de neu al terra.

L'EMA escollida per a fer la sol·licitud de dades de vent està ubicada al municipi d'El Perelló. El motiu pel qual s'ha escollit aquesta EMA és que als voltants d'aquest municipi hi ha ubicats tres parcs eòlics i per tant, és una zona amb bones característiques eòliques.

Cal saber que l'anemòmetre que mesura la velocitat del vent en l'EMA d'El Perelló, està situat a 10m de terra, i per generar el vector  $P_{PE}$ , cal la velocitat a l'alçada de la caixa. És a dir, a uns 80 m d'alçada. La llei exponencial de Hellman (Eq. 6.1), permet obtenir la velocitat



del vent a una certa alçada, a partir de la velocitat del vent a 10 m d'alçada i un paràmetre relacionat amb la rugositat del terreny (veure Taula 6.3).

$$v(h_2) = v(h_1) \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^a \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Terreny	a
Lloc pla amb gel o herba	0,08-0,12
Lloc pla (mar, costa)	0,14
Terreny poc accidentat	0,13-0,16
Zona rústica	0,2
Terreny accidentat o bosc	0,2-0,26
Terreny molt accidentat i ciutat	0,25-0,4

Taula 6.3.- Paràmetre a, relacionat amb la rugositat del terreny (Font: [14]).

## GENERACIÓ DEL VECTOR $C_{e+}$

El vector  $C_{e+}$  ens indica el preu de l'electricitat en cada interval de temps considerat. Està format per 2n elements.

Fent un anàlisi dels preus de l'electricitat a OMEL s'ha vist que aquest varia en funció de l'hora del dia i de l'època de l'any. Els promotors dels parcs eòlics, però, no venen l'electricitat al preu de mercat. Segons l'article 24 del RD 661/2007, els titulars d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica en règim especial, com és el cas de les instal·lacions eòliques, tenen tres opcions a l'hora de vendre l'electricitat. Totes tres compten amb la subvenció de l'administració (veure Annex B). **Per generar el vector  $C_{e+}$  s'utilitzen els preus del mercat elèctric, sense subvenció de l'administració, ja que es creu que aquest és l'escenari que s'ha de donar en un futur pròxim.**

El pseudocodi que realitza l'optimització de l'operació és el següent:

```
%i és l'índex de la població
%j és l'índex d'individus
for j=1:1:10;    %{10 és el nombre d'individus de la població}
    xxx=x2{i,j};
    A=creaA(n, T(xxx(3),1), T(xxx(3),2));
    Ppe;%Cal introduir aquest vector manualment
    b=creab(n, xxx(1), Ppe);
    ub=vectorub(n, xxx(2));
```





```

lb=vectorlb(n, xxx(2));
Ce+-;%Cal introduir aquest vector manualment
Psee{i,j} = linprog(-Ce, A, b, [], [], lb, ub);

```

end

### 6.2.2.2 Càlcul del benefici de l'operació de l'individu j durant t anys

Per calcular el benefici de l'operació del SEE durant un període de temps t, s'extrapola el benefici obtingut durant la simulació. També es tenen en compte els costos del SEE. El benefici obtingut per a l'individu j de la població i durant un període de temps t, es pot calcular de la següent manera:

$$B\{i,j\} = Ce_{+-} \cdot P_{SEE+-}\{i,j\} \cdot \Delta t \cdot \frac{8760}{n} \cdot t - C_1\{i,j\} \cdot E_{\max}\{i,j\} \cdot t - C_2\{i,j\} \cdot P_{SEE\max}\{i,j\} \cdot t$$

**B{i,j}** és el benefici de l'individu j de la població i, durant un període de temps t.

**Ce<sub>+-</sub>** és un vector que indica el preu de l'electricitat al mercat elèctric en cada interval de temps considerat [€/MWh].

**P<sub>SEE+-</sub>{i,j}** és un vector que indica la potència que el SEE de l'individu j de la població i rep del parc eòlic o cedeix a la xarxa de distribució elèctrica en cada interval de temps [MW].

**Δt** és l'interval de temps de la simulació (Δt = 1h).

**n** és el nombre d'interval de temps considerats en la simulació. Equivalentment, n és el nombre d'hores de la simulació, ja que els intervals de temps duren 1 hora.

**t** és el període de temps sobre el qual es calcula el benefici de l'individu j de la població i.

**C<sub>1</sub>{i,j}** és el cost per unitat d'energia emmagatzemada del SEE de l'individu j de la població i [€/MWh·any].

**E<sub>max</sub>{i,j}** és la capacitat d'emmagatzematge d'energia del SEE de l'individu j de la població i [MWh].

**C<sub>2</sub>{i,j}** és el cost per unitat de potència intercanviable del SEE de l'individu j de la població i [€/MW·any].

**P<sub>SEEmax</sub>{i,j}** és la potència màxima intercanviable del SEE de l'individu j de la població i [MW].

El pseudocodi que calcula el benefici de cada individu és el següent:

```

xxx=x2{i,j};
B{i,j}=Ce'*Psee{i,j}*8760*t/n-T(xxx(3),3)*xxx(1)*t-T(xxx(3),4)*xxx(2)*t
%Cal posar el vector Ce en horitzontal i el vector Psee en vertical

```

Els beneficis de cada individu s'agrupen en un vector per poder treballar amb ells



d'una manera còmoda:

```
while j<=10
  B(j)=B{i,j}
  j=j+1;
end
```

El vector B conté els beneficis de cada individu ordenats per individu.

### 6.2.3 Creació d'una nova població

En la Figura 6.3 es mostra un esquema amb la metodologia seguida per passar de la població j a la població j+1. Els tres individus de la població j que presenten millors beneficis econòmics són seleccionats i aparellats, per tal de formar 6 nous individus a partir del seu creuament. Un dels individus de la nova població es genera de manera aleatòria per tal d'explorar al màxim l'espai de solucions del problema i no estancar-se en òptims locals.

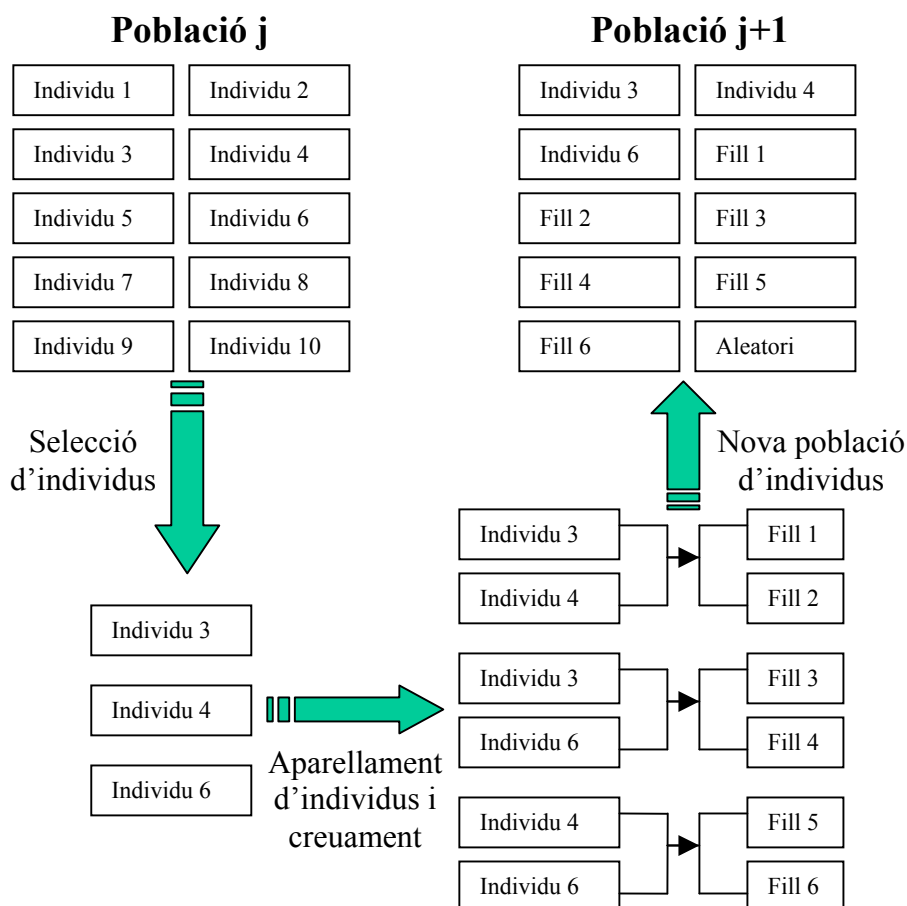


Figura 6.3. Esquema de creació d'una població nova a partir de la població anterior.



### 6.2.3.1 Selecció d'individus

A l'hora de seleccionar els individus que formaran part de la següent generació, hi ha molts criteris diferents per fer la tria d'individus. Un dels més coneguts és el procés de selecció desenvolupat per David E. Goldberg anomenat la ruleta esbiaixada. La fase inicial d'aquest procés consisteix en calcular el pes relatiu que té cada individu respecte el total de la població, segons el benefici que proporciona. Per dur a terme el procés de selecció de l'individu és genera, aleatòriament, un nombre entre 0 i 1. El valor generat s'assigna a un individu de la població, en funció del seu pes relatiu. Aquest procés de selecció dóna més opcions de sobreviure als individus que donen millors beneficis. Tanmateix, no impedeix la selecció dels individus amb resultats no tan bons per tal d'assegurar una certa diversitat genètica en la població següent que permeti explorar al màxim l'espai de solucions possibles.

En aquest projecte, però, s'ha optat per utilitzar un criteri simplificat. **Es seleccionen els tres individus de la població amb un benefici més gran. Després de la selecció i a partir del creuament entre ells, s'obtindran 6 nous individus. Finalment, s'obtindrà el desè individu de forma aleatòria.**

Per seleccionar els tres individus amb un benefici més gran, s'utilitza la funció sort, que ordena de menor a major els elements d'un vector donat.

En aquest cas el vector a ordenar és el vector B i el que ens interessa saber no són els tres millors beneficis, sinó els tres individus que tenen millors beneficis. Utilitzant la següent comanda al MATLAB, obtenim un vector amb els beneficis ordenats de menor a major (Bordenat) i una altre vector amb els individus ordenats de menor a major segons el seu benefici (IX).

```
>> B=[100 2000 0 0 5000 23000 0 0 10 300]
>> [Bordenat,IX]=sort(B)
Bordenat =(0,0,0,0,10,100,300,2000,5000,23000)
IX = (3,4,7,8,9,1,10,2,5,6)
```

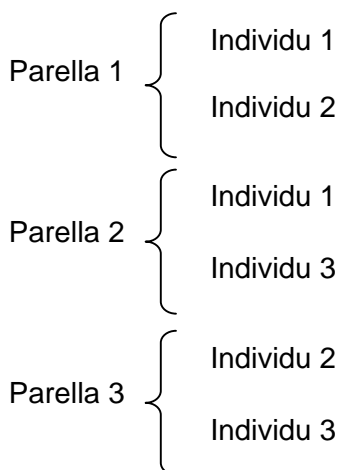
Així doncs, per obtenir els tres individus seleccionats per a formar part de la nova població cal fer el següent:

```
X1{i,1}=X1{i-1,IX(10)}
X1{i,2}=X1{i-1,IX(9)}
X1{i,3}=X1{i-1,IX(8)}
```



### 6.2.3.2 Aparellament

Una vegada seleccionats els individus que sobreviuran a la següent generació, passem a la fase de l'aparellament. Fase prèvia a la reproducció. En aquesta etapa, cal aparellar els 3 individus seleccionats formant 3 parelles :



De cada una de les parelles en sortiran dos descendents.

### 6.2.3.3 Aplicació d'operadors genètics i d'aleatorietat

El sistema de creuament que es fa servir és el creuament simple [15]. Aquest, consisteix en generar aleatòriament un punt de creuament (inferior al nombre de gens del cromosoma) i intercanviar els gens dels dos progenitors a partir del punt de creuament. A continuació es mostra un exemple gràfic del creuament simple (veure Figura 6.4 i Figura 6.5).

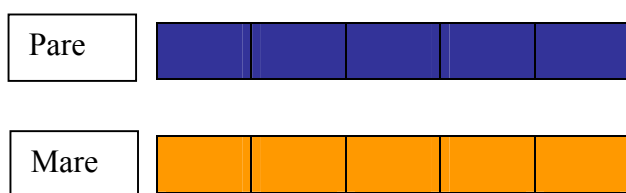


Figura 6.4. Esquema de dos individus formats per 5 gens.

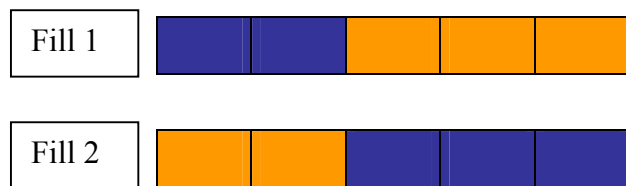


Figura 6.5 Esquema dels dos descendents.



En el nostre cas, cada individu està definit per un cromosoma de divuit gens (Els vuit primers indiquen  $E_{max}$ , del vuitè al setzè, representen  $P_{SEE_{max}}$ , i els dos

últims gens representen la tecnologia del SEE). Caldrà creuar per separat  $E_{max}$ ,  $P_{max}$  i Tec, i per tant es necessiten tres punts de creuament.

A fi i efecte de creuar dos individus s'ha generat la funció Creuament Individus, que donats dos individus, els creua i n'obté dos descendents, aplicant els operadors de creuament i mutació.

```
function [x1,x2,x]=CreuamentIndividus(pare,mare)
Pmutacio=0.1;
jcreuament = 1+ceil(6.*rand(1,1)); %jcreuament és el punt 1 de creuament
del cromosoma
x=jcreuament;
for j=1:jcreuament
    xx(j) = Mutacio(pare(j), Pmutacio);
    yy(j) = Mutacio(mare(j), Pmutacio);
end
k=jcreuament + 1;
for j=k:8
    xx(j)= Mutacio(mare(j), Pmutacio);
    yy(j)= Mutacio(pare(j), Pmutacio);
end

jcreuament = 9+ceil(6.*rand(1,1)); %jcreuament és el punt 2 de creuament
del cromosoma
for j=9:jcreuament
    xx(j) = Mutacio(pare(j), Pmutacio);
    yy(j) = Mutacio(mare(j), Pmutacio);
end
k=jcreuament + 1;
for j=k:16
    xx(j)= Mutacio(mare(j), Pmutacio);
    yy(j)= Mutacio(pare(j), Pmutacio);
end

jcreuament = 16+ceil(1.*rand(1,1)); %jcreuament és el punt 3 de creuament
del cromosoma
for j=17:jcreuament
    xx(j) = Mutacio(pare(j), Pmutacio);
    yy(j) = Mutacio(mare(j), Pmutacio);
end
k=jcreuament + 1;
for j=k:18
    xx(j)= Mutacio(mare(j), Pmutacio);
    yy(j)= Mutacio(pare(j), Pmutacio);
end

x1=xx;
x2=yy;
function Gen=Mutacio(boolea,Pmutacio)
%La funció Mutació canvia els gens de valor en el cas que el nombre
%aleatori generat entre 0 i 1 sigui inferior a la probabilitat de mutació
if rand <=Pmutacio
```



```
Gen=~boolea;%Canvia el bit de valor. Passa de 0 a 1 o a l'inrevés  
else  
Gen=boolea; %No hi ha mutació i per tant no hi ha canvi de bit  
End
```

#### 6.2.3.4 Nova població d'individus

El codi que ens permet guardar l'informació continguda en cadascun dels individus de la nova població és el següent:

```
poblacions{i}=[x1{i,1}; x1{i,2}; x1{i,3}; x1{i,4}; x1{i,5}; x1{i,6};  
x1{i,7}; x1{i,8}; x1{i,9}; x1{i,10}];
```



## 7. RESOLUCIÓ D'UN CAS PRÀCTIC

### 7.1. *Aplicació de l'algoritme genètic*

#### 7.1.1. Introducció

En aquest apartat s'aplica l' algoritme genètic presentat en l'apartat 6, tot fent un anàlisi dels resultats obtinguts. Abans, però, cal tenir en compte les següents consideracions:

- L'interval de temps escollit és d'una hora.
- Degut a limitacions de capacitat de càlcul del MATLAB, s'ha optat per treballar amb vectors i matrius amb dimensions raonables. És per aquest motiu que el nombre d'interval de temps considerats és  $n=72$ . És a dir, 3 dies.
- L'hipotètic parc eòlic en el qual s'hi instal·la un sistema d'emmagatzematge d'energia elèctrica està format per 10 aerogeneradors G80-2.0 MW de la marca Gamesa.

Cal remarcar que per a calcular el benefici de l'operació del SEE, l'algoritme extrapola els resultats obtinguts per al nombre d'interval considerats (3 dies) al llarg de 30 anys. Per generar el vector de potència eòlica disponible durant el període de 3 dies, s'ha intentat que aquest sigui representatiu de la variació de la velocitat del vent que té lloc durant l'any. Dit d'una altra manera, s'ha analitzat la mostra horària de velocitats de vent a l'alçada de la caixa de la qual es disposa i s'han classificat els diferents dies de l'any en funció de les característiques del vent identificant 3 tipologies de dia diferents: Dia amb poc vent (veure Figura 7.1), Dia amb vent moderat (veure Figura 7.2) i Dia molt ventós (veure Figura 7.3).



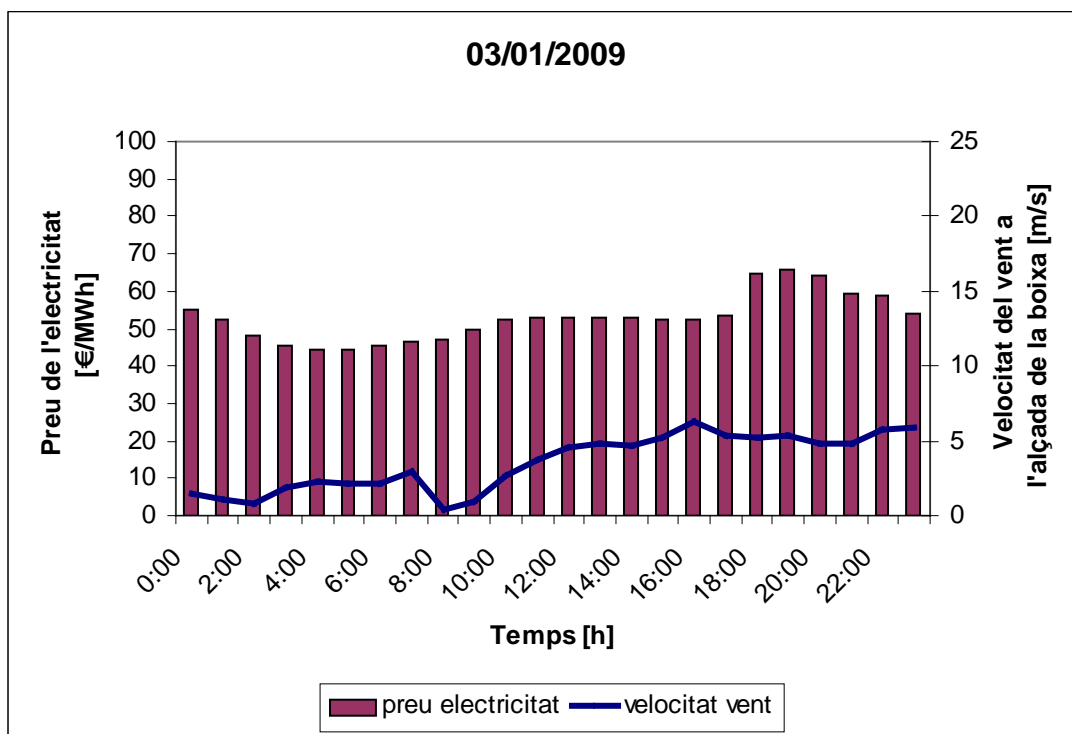


Figura 7.1. Velocitats del vent a l'alçada de la boixa i preu de l'electricitat al mercat elèctric en un dia amb poc vent.

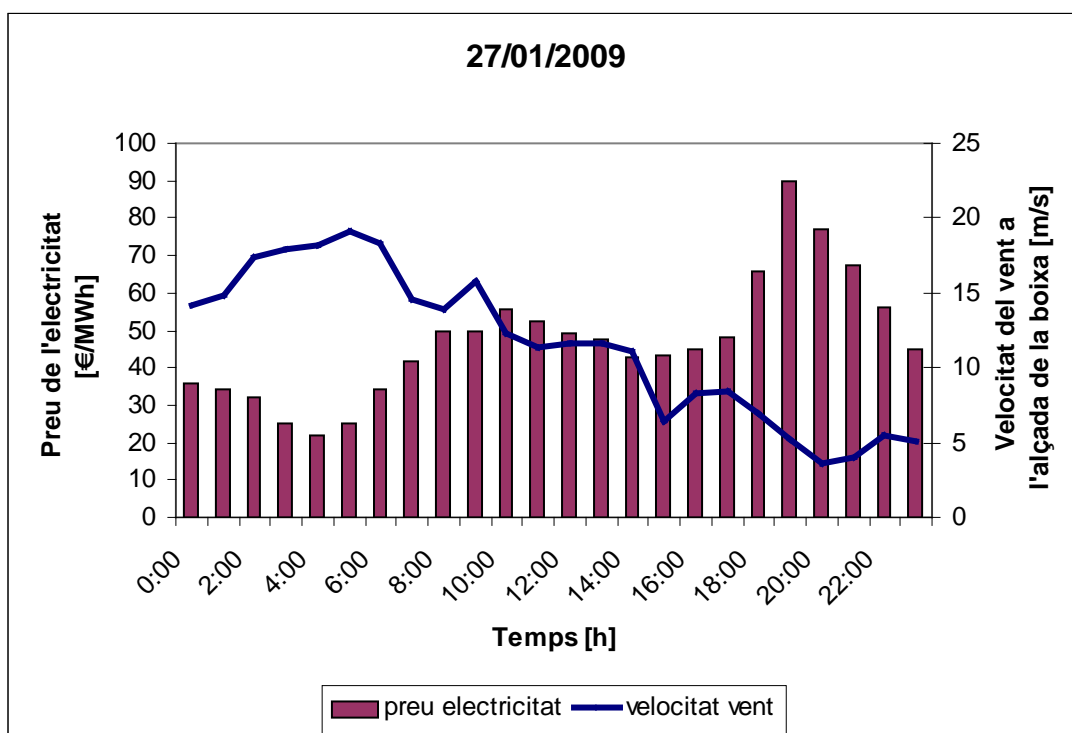
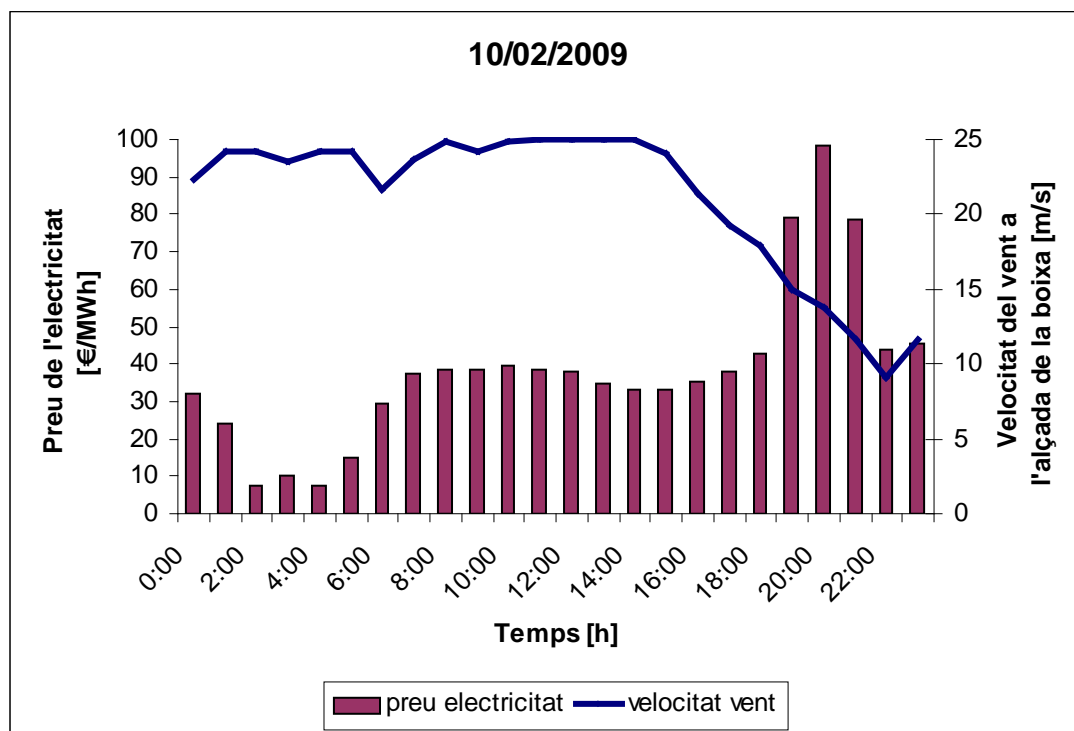


Figura 7.2. Velocitats del vent a l'alçada de la boixa i preu de l'electricitat al mercat elèctric en un dia amb vent moderat.







**Figura 7.3. Velocitats del vent a l'alçada de la boixa i preu de l'electricitat al mercat elèctric en un dia molt ventós.**

Per ser coherents, el vector de costos de l'electricitat al mercat elèctric ( $C_e$ ) conté els valors horaris dels dies 3 i 27 de Gener, i 10 de Febrer de l'any 2009.

### 7.1.2. Resultats

S'han realitzat 5 simulacions diferents, variant el nombre d'iteracions/poblacions de l'algoritme genètic. Això s'ha fet per veure si els resultats obtinguts són gaire diferents en funció del nombre d'iteracions. Com es pot veure a les taules 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 i 7.5, en totes les simulacions, els individus que presenten un benefici més elevat tenen com a tecnologia el bombeig d'aigua i presenten uns paràmetres similars, independentment del nombre d'iteracions realitzades.

El màxim benefici s'ha obtingut en la simulació 3, i aquest és de 7.954.500 €. La tecnologia que permet obtenir aquest resultat és el bombeig d'aigua, amb una capacitat d'emmagatzematge d'energia de 171 MWh i un potència màxima intercanviable amb la xarxa de 21 MW.



Resultats Simulació 1 (n=72; t=30; i=15)

Individu	$E_{\max}$ [MWh]	$P_{SEEmax}$ [MW]	Tecnologia	Benefici [€]
1	146	20	Bombeig d'aigua	7.576.300
2	130	20	Bombeig d'aigua	7.469.600
3	130	20	Bombeig d'aigua	7.469.600
4	146	4	CAES	-3.566.300
5	2	20	Bombeig d'aigua	-13.027.000
6	130	152	Bombeig d'aigua	-67.248.000
7	146	20	CAES	-332.680
8	145	18	Bombeig d'aigua	6.873.600
9	198	20	Bombeig d'aigua	7.196.300
10	90	68	Bombeig d'aigua	-57.070.000

**Taula 7.1. Característiques i resultats de l'última població de la simulació 1.**Resultats Simulació 2 (n=72; t=30; i=30)

Individu	$E_{\max}$ [MWh]	$P_{SEEmax}$ [MW]	Tecnologia	Benefici [€]
1	127	21	Bombeig d'aigua	7.717.000
2	123	21	Bombeig d'aigua	7.671.700
3	123	21	Bombeig d'aigua	7.671.700
4	127	5	CAES	-2.792.800
5	91	17	Bombeig d'aigua	6.153.000
6	127	19	Bombeig d'aigua	7.145.600
7	115	21	Bombeig d'aigua	7.572.800
8	96	21	Bombeig d'aigua	7.223.800
9	63	54	Bombeig d'aigua	-14.672.000
10	249	256	Producció d'H2 – Pila de combustible	-216.420.000

**Taula 7.2. Característiques i resultats de l'última població de la simulació 2.**

Resultats Simulació 3 (n=72; t=30; i=40)

Individu	$E_{max}$ [MWh]	$P_{SEEmax}$ [MW]	Tecnologia	Benefici [€]
1	171	21	Bombeig d'aigua	7.954.500
2	171	21	Bombeig d'aigua	7.954.500
3	171	21	Bombeig d'aigua	7.954.500
4	171	22	Bombeig d'aigua	7.772.200
5	171	85	Bombeig d'aigua	-20.315.000
6	235	85	Bombeig d'aigua	-18.098.000
7	171	213	Bombeig d'aigua	-102.620.000
8	171	21	Bombeig d'aigua	7.954.500
9	171	85	Producció d'H2 – Pila de combustible	-72.079.000
10	117	232	Bateries (Lead acid)	-446.510.000

**Taula 7.3. Característiques i resultats de l'última població de la simulació 3.**Resultats Simulació 4 (n=72; t=30; i=50)

Individu	$E_{max}$ [MWh]	$P_{SEEmax}$ [MW]	Tecnologia	Benefici [€]
1	167	22	Bombeig d'aigua	7.778.800
2	167	22	Bombeig d'aigua	7.778.800
3	167	22	Bombeig d'aigua	7.778.800
4	183	86	Bombeig d'aigua	-20.283.000
5	167	54	Producció d'H2 – Pila de combustible	-46.003.000
6	168	22	Bombeig d'aigua	7.777.100
7	167	22	Bombeig d'aigua	7.778.800
8	167	22	Bombeig d'aigua	7.778.800
9	175	21	Bombeig d'aigua	7.947.900
10	118	172	Producció d'H2 – Pila de combustible	-144.680.000

**Taula 7.4. Característiques i resultats de l'última població de la simulació 4.**

Resultats Simulació 5 (n=72; t=30; i=1000)

Individu	$E_{\max}$ [MWh]	$P_{SEEmax}$ [MW]	Tecnologia	Benefici [€]
1	98	21	Bombeig d'aigua	6.846.193
2	98	21	Bombeig d'aigua	6.846.193
3	98	21	Bombeig d'aigua	6.846.193
4	106	85	Bombeig d'aigua	-25.581.306
5	99	21	Bombeig d'aigua	6.845.231
6	98	23	Bombeig d'aigua	6.612.665
7	98	149	Bombeig d'aigua	-71.457.516
8	98	22	Bombeig d'aigua	6.730.630
9	114	101	Bombeig d'aigua	-34.946.838
10	35	49	CAES	-19.367.432

**Taula 7.5 Característiques i resultats de l'última població de la simulació 5.**

Els millors resultats obtinguts en les cinc simulacions són força similars. En totes elles, l'individu que presenta un benefici econòmic més elevat té les següents característiques:

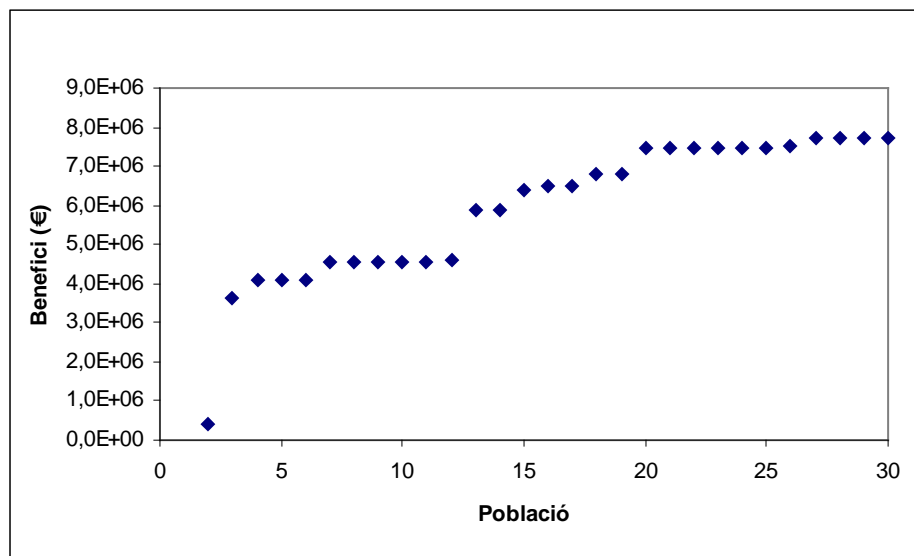
- $98 \text{ MWh} < E_{\max} < 171 \text{ MWh}$
- $20 \text{ MW} < P_{\max} < 22 \text{ MW}$
- Tecnologia: Bombeig d'aigua
- $6,84 \text{ M€} < \text{Benefici} < 7,95 \text{ M€}$

El resultat obtingut és coherent amb les dades de partida del problema, ja que el sistema d'emmagatzematge a llarg termini que té millors rendiments de càrrega i descàrrega, i presenta uns costos més reduïts és, precisament, el bombeig d'aigua. Tot i ser un resultat coherent, cal remarcar que no té perquè ser representatiu. Això és degut a que s'ha resolt el problema d'optimització i dimensionament per a un període de 72 hores i s'ha extrapolat el resultat a 30 anys, degut a les limitacions del programa de càlcul utilitzat. Per obtenir un resultat més representatiu, caldria resoldre el problema per a un període més llarg i amb valors de velocitats de vent mesurades a l'alçada de la boixa i no en una estació meteorològica (on es mesura a una alçada de 10m).

En la figura 7.4 es mostra l'evolució del benefici obtingut pel primer individu de totes les poblacions generades en la simulació 2. La tendència de millora que es pot apreciar serveix



per veure que la metodologia creada per a dimensionar i optimitzar l'operació d'un sistema d'emmagatzematge d'energia integrat en un parc eòlic funciona.



**Figura 7.4. Evolució del benefici obtingut pel primer individu de les 30 poblacions generades en la simulació 2.**

## **7.2. Anàlisi econòmic de la solució obtinguda**

En aquest apartat s'analitza la viabilitat econòmica de la millor solució obtinguda en les 5 simulacions realitzades. És a dir, s'estudia la viabilitat d'invertir en un sistema d'emmagatzematge d'energia mitjançant bombeig d'aigua amb una capacitat d'emmagatzematge d'energia de 171 MWh i una potència màxima intercanviable de 21 MW, en un període de 30 anys. Per fer-ho, es calcula el valor actualitzat net (VAN) i la taxa interna de rendibilitat (TIR).

El VAN és la suma actualitzada dels fluxos de caixa al llarg de l'horitzó temporal d'un projecte i es calcula segons l'equació (Eq. 7.1).

$$VAN = -S_0 + \sum_{t=1}^T \frac{S_t}{(1+i)^t} \quad (\text{Eq. 7.1})$$

On,

$S_0$  és el valor de l'inversió inicial [€].

T és el nombre d'anys de l'inversió (T=30 anys).



$S_i$  és el flux de caixa generat en l'any  $i$  [€].

$i$  és la taxa d'interès real.

En aquest cas l'inversió inicial correspon al cost de capital i es pot calcular mitjançant l'equació (Eq. 7.2).

$$S_0 = (C_1[\text{euros} / \text{MWh} \cdot \text{any}] \cdot E_{\max} + C_2[\text{euros} / \text{MW} \cdot \text{any}] \cdot P_{SEE_{\max}}) \cdot T \quad (\text{Eq. 7.2})$$

$C_1$  i  $C_2$  són els costos de capital unitaris mostrats a la Taula 4.5, tenint en compte el temps de vida útil d'una instal·lació de bombeig d'aigua.

$E_{\max}$  Capacitat d'emmagatzematge d'energia del SEE [MWh].

$P_{SEE_{\max}}$  Potència màxima intercanviable del SEE [MW].

De l'aplicació de l'equació (Eq. 7.2) en resulta una inversió inicial de 9,81 M€.<sup>4</sup>

El flux de caixa de cada any del període d'estudi es pot obtenir fent la diferència entre el benefici econòmic degut a l'operació del sistema d'emmagatzematge d'energia i els costos d'operació i manteniment, segons s'indica en l'equació (Eq. 7.3).

$$S_i = \text{Benefici}_i - \text{Costos O\&M}_i \quad (\text{Eq. 7.3})$$

Per a calcular el benefici de l'operació del sistema d'emmagatzematge durant un any, s'extrapola el benefici obtingut durant el nombre d'interval de temps considerats. En aquest cas, s'han considerat 72 interval de temps d'una hora cadascun (veure l'equació (Eq. 7.4)).

$$\text{Benefici}_i = \frac{C_{e+-} \cdot P_{SEE+-} \cdot \Delta t}{n} \cdot 8760h / \text{any} \quad (\text{Eq. 7.4})$$

On,

$C_{e+-}$  és el vector que indica el preu de l'electricitat al mercat elèctric en cada interval de temps [€/MWh].

$P_{SEE+-}$  és el vector que indica la potència que el SEE rep del parc eòlic ( $P_{SEE-} (i) \leq 0$ ) o cedeix a la xarxa de distribució elèctrica ( $P_{SEE+} (i) \geq 0$ ) en cada interval de temps [MW].

$n$  és el nombre d'interval de temps considerats. En aquest cas  $n=72$ , amb interval de temps d'una hora ( $\Delta t=1h$ ).

De l'aplicació de l'equació (Eq. 7.4) en resulta un benefici de 0,91915 M€/any

<sup>4</sup>  $S_0 = [500\text{€}/(\text{MWh} \cdot \text{any}) \cdot 171\text{MWh} + 11.500\text{€}/(\text{MW} \cdot \text{any}) \cdot 21\text{MW}] \cdot 30\text{anys} = 9,81 \text{ M€}$ .



En el bombeig d'aigua, els costos d'operació i manteniment representen el 100% dels costos de capital. Això és degut a l'elevat temps de vida útil d'aquesta tecnologia. Així doncs, els costos d'operació i manteniment al llarg de tot el període d'estudi són 9,81 M€.

Tenint en compte que el període d'estudi és de 30 anys s'obtenen uns costos d'operació i manteniment de 0,327 M€/any.

Aplicant l'equació (Eq. 7.3) s'obté que el flux de caixa anual és de 0,59215 M€.

El VAN que s'obté per a diferents taxes d'interès real es mostra a la Taula 7.5.

Taxa d'interès real, i [%]	4	4,35	5	6	7	8
VAN [€]	429.189	0	-707.459	-1.659.385	-2.462.193	-3.143.891

**Taula 7.5. VAN en funció de la taxa d'interès real aplicada.**

La TIR del projecte es defineix com la taxa d'interès que anul·la el VAN. És el màxim tipus d'interès exigible a una inversió per tal de complir les expectatives. Es calcula segons l'equació (Eq. 7.5).

$$S_0 = \sum_{t=1}^T \frac{S_t}{(1 + TIR)^t} \quad (\text{Eq. 7.5})$$

La TIR d'aquest projecte és de 4,35%.

La millor solució obtinguda de les 5 simulacions realitzades únicament seria viable econòmicament per a tipus d'interès inferiors al 4,35%.

En el cas que l'inversor hagués de demanar un préstec per aconseguir els diners necessaris per a realitzar el projecte, caldria comparar el tipus d'interès del préstec amb la TIR per determinar la viabilitat del projecte. En el cas que l'inversor disposés dels diners necessaris per tirar endavant el projecte, caldria comparar la TIR amb el tipus d'interès d'alguna altra inversió.







## 8. ESTUDI DE L'IMPACTE AMBIENTAL

En aquest apartat és pretén determinar l'impacte ambiental de l'implantació de sistemes d'emmagatzematge d'energia a parcs eòlics.

Concretament, els sistemes d'emmagatzematge que es proposen en aquest projecte són els anomenats *Long-term energy storage systems*, ja que aquests són capaços de descarregar l'energia acumulada durant hores i són els més adients per a aplanar la corba de la demanda d'energia elèctrica.

L'emmagatzematge d'energia eòlica pot solucionar el problema de l'excedent d'energia eòlica que ja s'està donant actualment i que, degut a la planificació en matèria d'energia que preveu l'instal·lació de més potència eòlica, s'intensificarà en el futur. L'excedent d'energia eòlica es dona quan l'oferta supera la demanda d'electricitat. En aquests casos, *Red Eléctrica de España* (REE), seguint l'ordre de desconexió establert, ordena la desconexió de la xarxa de distribució d'electricitat d'alguns parcs eòlics i tota aquesta energia no s'aprofita. Mitjançant l'emmagatzematge es podria aprofitar part d'aquesta energia i contribuir així a l'aportació de més energia renovable al mix elèctric espanyol en detriment d'altres sistemes de generació d'electricitat més contaminants, com per exemple les centrals tèrmiques o les centrals de cycle combinat. D'aquesta manera s'estalviaria l'emissió de gasos amb efecte d'hivernacle.

### **8.1. *Avaluació de l'impacte durant les fases de construcció i explotació dels sistemes d'emmagatzematge d'energia***

#### **8.1.1. Bombeig d'aigua**

Els sistemes d'emmagatzematge per bombeig d'aigua estan formats, fonamentalment, per dos embassaments d'aigua (embassament superior i embassament inferior), un conjunt de turbines acoblades a generadors d'electricitat, bombes d'aigua, canonades per transportar l'aigua de l'embassament superior a l'inferior, una estació de transformadors i la connexió a la xarxa de distribució d'electricitat.

Els possibles impactes en el medi físic i social que pot generar una instal·lació d'emmagatzematge per bombeig d'aigua són els següents:

- Destrucció de la vegetació deguda als corredors o traçats nous que s'han generat



per donar accés a la instal·lació.

- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle associades a la generació dels materials de construcció emprats.
- Generació de pols deguda al moviment de terres.
- Increment de les infiltracions d'aigua en el subsòl degut als embasaments.
- Pèrdua de terrenys fèrtils en ser coberts d'aigua.
- Alteració del cabal del riu.
- Modificació de la fauna i de la flora de la zona afectada.
- Disminució de l'aportació de sediments a la costa.
- Afectació a les activitats agrícoles aigües avall de la presa.
- Creació de nous llocs de treball per a l'operació i el manteniment de l'instal·lació.

### **8.1.2. CAES (Compressed Air Energy Storage)**

Aquests sistemes utilitzen l'energia per a comprimir i emmagatzemar aire en dipòsits naturals o artificials. Posteriorment, l'aire comprimit s'escalfa, mitjançant la combustió de gas natural i s'expandeix en una turbina per a generar energia elèctrica. L'impacte d'aquest sistema no serà el mateix en el cas que s'aprofiti una formació geològica natural per a l'emmagatzemament (cavernes, mines) que en el cas que s'hagi de crear artificialment.

Els possibles impactes en el medi físic i social que pot generar una instal·lació d'aquest tipus són els següents:

- Destrucció de la vegetació deguda a l'excavació de terres per a transportar el gas natural en canalitzacions fins a l'instal·lació d'emmagatzematge d'aire comprimit.
- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle associades a la generació dels materials de construcció emprats.
- Alteracions en el paisatge degudes a la construcció de l'edifici que conté el compressor d'aire i les turbines acoblades al motor-generador.



- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle degudes al consum de gas natural necessari per al funcionament de l'instal·lació.
- Creació de nous llocs de treball per a l'operació i el manteniment de l'instal·lació.

### **8.1.3. Producció d'hidrogen**

Aquesta opció d'emmagatzematge d'energia planteja la generació d'hidrogen, a partir de l'electròlisi de l'aigua, i el seu posterior emmagatzematge en estat gasós. També inclou la part de generació d'electricitat mitjançant una pila de combustible.

Els possibles impactes en el medi físic i social que pot generar una instal·lació d'aquest tipus són els següents:

- Destrucció de la vegetació deguda a les obres d'acondicionament del terreny i d'accés (Formació d'una esplanada, nous corredors per accedir a l'instal·lació i excavació de terres per a la col·locació de conductes per a transportar aigua i electricitat).
- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle associades a la generació dels materials de construcció emprats.
- Creació de llocs de treball per a l'operació i el manteniment de l'instal·lació.

### **8.1.4. Bateries**

Les bateries permeten emmagatzemar l'electricitat en forma d'energia electroquímica. Entre les diferents tipologies de bateries, en aquest projecte s'han escollit les bateries de plom i àcid (*Lead acid batteries*). Aquestes estan formades per un dipòsit d'àcid sulfúric i dins d'aquest hi ha una sèrie de plaques de plom (elèctrodes).

Els possibles impactes en el medi físic i social que pot generar una instal·lació d'aquest tipus són els següents:

- Destrucció de la vegetació deguda a les obres d'acondicionament del terreny i d'accés (Formació d'una esplanada, nous corredors per accedir a l'instal·lació i excavació de terres per a la col·locació de conductes per a transportar electricitat).
- Generació de residus contaminants (plom i àcid sulfúric) un cop acabada la vida útil



de la bateria, que han de ser tractats degudament.

- Emissions de gasos amb efecte d'hivernacle associades a la generació dels materials de construcció emprats.
- Creació de llocs de treball per a l'operació i el manteniment de l'instal·lació.



## 9. ESTUDI ECONÒMIC

En aquest capítol s'analitza el cost econòmic degut la realització del projecte. Aquest cost es pot classificar en diferents conceptes: Recursos humans, despeses amortitzables en equips, despeses de material d'oficina i altres despeses (consum d'energia elèctrica i desplaçament en autobús). En la Taula 9.1 es quantifiquen aquestes despeses per als diferents conceptes.

CONCEPTE	COST UNITARI [€]	UNITATS	MESURA	COST TOTAL [€]
<b>1. Recursos humans</b>				
Hores d'enginyeria	20	h	840	16.800
<b>2. Despeses amortitzables</b>				
Ordinador Toshiba	0,23	h	500	115
Impressora HP	0,2	h	4	0,8
<b>3. Material d'oficina</b>				
Paper	3	unitat	2	6
Tinta impressora (negra)	20	unitat	1	20
Tinta impressora (color)	25	unitat	1	25
Compact Discs	1	unitat	6	6
<b>4. Altres</b>				
Viatges amb autobús	1,5	unitat	4	6
Electricitat (ordinador + llum artificial)	0,2	kWh	68	13,6
<b>COST TOTAL DE REALITZACIÓ DEL PROJECTE [€]</b>				<b>16.992</b>

Taula 9.1. Valoració econòmica de la realització del projecte (Font: elaboració pròpia).

Per al càlcul del cost de personal, s'ha considerat un cost unitari de 20 €/h i una dedicació de 7 hores per dia laborable, durant 6 mesos.

Per al càlcul del cost unitari de les despeses amortitzables s'ha considerat que l'ordinador utilitzat té un cost de 1.400 € i una vida útil de 6.000h, i que l'impressora té un cost de 300 € i una vida útil de 1.500 h.





## CONCLUSIONS

L'energia eòlica està adquirint un protagonisme destacat en el mix de generació d'electricitat, tant a nivell mundial, com nacional. El seu origen renovable i l'esgotament progressiu dels combustibles fòssils, fan que la planificació energètica tingui molt en compte aquesta tecnologia a l'hora de traçar escenaris futurs.

L'augment de la potència eòlica instal·lada previst farà que en certs moments, quan la demanda d'energia elèctrica és baixa, es generi un excedent de producció d'electricitat d'origen eòlic. Una possible solució per gestionar aquest excedent d'energia és el seu emmagatzematge.

L'emmagatzematge d'energia, però, requereix una inversió inicial elevada i introdueix pèrdues d'energia en els sistema de generació d'electricitat. És per aquest motiu que s'ha creat una metodologia per optimitzar l'operació i el dimensionament de sistemes d'emmagatzematge d'energia a parcs eòlics, amb l'objectiu de poder analitzar-ne la viabilitat.

Tot i que el millor resultat obtingut en les simulacions realitzades resulta econòmicament viable per a tipus d'interès inferiors al 4,35%, cal destacar que aquest resultat no té perquè ser representatiu. Això és degut a que s'ha resolt el problema d'optimització i dimensionament per a un període de temps curt, degut a les limitacions del programa de càlcul utilitzat, i s'ha extrapolat el resultat obtingut. Per obtenir un resultat més representatiu, caldria resoldre el problema per a un període de temps més llarg. Altres factors que afecten al resultat són les dades de vent i els costos dels SEE. Si aquestes dades fossin més precises, el resultat canviaria.

D'altra banda, els resultats obtinguts en les simulacions realitzades mostren que la tecnologia que permet obtenir més beneficis econòmics és el bombeig d'aigua. La tecnologia CAES també permet obtenir beneficis, mentre que l'emmagatzematge mitjançant la producció d'hidrogen i les bateries, no presenten beneficis en cap de les simulacions.

El fet que actualment no hi hagi cap instal·lació d'emmagatzematge d'energia treballant amb un parc eòlic denota que econòmicament és poc viable. No obstant, si que existeixen projectes a petita escala, com és el cas del parc eòlic de Sotavento (Galícia) i l'interès de la comunitat científica és notable, com ho demostren els nombrosos estudis realitzats en aquest camp.

L'actual política de subvencions envers les energies renovables contribueix a que



l'emmagatzematge d'energia no sigui viable, ja que les subvencions fan que la variabilitat del preu de l'electricitat sigui molt més petita i per tant el marge de guany es redueix. Per tal d'afavorir l'emmagatzematge d'energia en parcs eòlics, els agents interessats en aplanar la corba de la demanda d'electricitat (principalment REE), haurien d'incentivar aquesta pràctica.





## BIBLIOGRAFIA

### Referències bibliogràfiques

- [1] EL PAÍS. Article referent a l'excés d'energia eòlica publicat el dia 28/11/2009. [[http://www.elpais.com/articulo/sociedad/Espana/podra/asumir/partir/2014/toda/renovable/pr oduce/elpepisoc/20091128elpepisoc\\_3/Tes](http://www.elpais.com/articulo/sociedad/Espana/podra/asumir/partir/2014/toda/renovable/pr oduce/elpepisoc/20091128elpepisoc_3/Tes)]\* \*[URL, 29 de Maig del 2010]
- [2] AALBORG UNIVERSITY. Storage Possibilities for Enabling Higher Wind Energy Penetration.
- [3] ANAGNOSTOPOULOS, J.S., PAPANTONIS, D.E. Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy. Renewable Energy. Vol. 33, 2008, p.1685-1694.
- [4] LIU, H., JIANG, J. Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability. Energy and buildings. Vol. 39, 2007, p. 599-604.
- [5] IBRAHIMA, H., ILINCAA, A., PERRON, J. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, 2008, p. 1221-1250.
- [6] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DEPARTAMENT D'ENGINYERIA ELÈCTRICA. La pila de combustible en el sector del transport.
- [7] SALLA, J.M. Tecnologías del hidrógeno. Apunts del Màster en desenvolupament sostenible de la UPC, p. 13-15.
- [8] CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES y TECNOLÓGICAS (CIEMAT). Utilización de biogás en pilas de combustible. [[http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas\\_Actividad/Prospectiva\\_Tecnologica/476900838\\_21120091174.pdf](http://www.ciemat.es/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/476900838_21120091174.pdf)]\*. \*[URL, 25 de Maig del 2010].
- [9] PARQUE EÓLICO DE SOTAVENTO. *Proyecto experimental de construcción de una planta de almacenaje de energía mediante hidrogeno.* [[http://www.sotaventogalicia.com/area\\_tecnica/py\\_produccion\\_hidrogeno.php](http://www.sotaventogalicia.com/area_tecnica/py_produccion_hidrogeno.php)]\* \*[URL, 29 de Maig del 2010]
- [10] DIVYA, K.C., OSTERGAARD, J. Battery energy storage technology for power systems-



An overview. Electric Power Systems Research. Vol. 79, 2009, p. 511-520.

[11] BREEZE, P. Power generation technologies.

[12] PÉREZ, C., MATLAB y sus aplicaciones en las ciencias y la ingeniería. Madrid, Pearson Educacion, S.A., 2002, p. 576-578.

[13] GOLDBERG, D. E., Genetic algorithms in search, optimization & machine learning. Addison-Wesley Publishing Company, inc., p. 59-61.

[14] BIBLIOTECA SOBRE INGENIERÍA ENERGÉTICA. Libros Redsauce: Energía eólica. Any 2007. Autor: Pedro Fernández Díez.

[<http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=16>]\*. \*[URL, 26 de Maig del 2010].

[15] TURON, X., Aplicació d'algoritmes genètics en l'optimització dels processos de fabricació del paper, Tesi doctoral, Universitat de Girona.

### **Altres referències bibliogràfiques**

CASTRONUOVO, E., PEÇAS, J., Optimal operation and hydro storage sizing of a wind-hydro power plant. Electrical Power and Energy Systems. Vol. 26, 2004, p. 771-778.

KORPAAS, M., HOLEN, A., HILDRUM, R., Operation and sizing of energy storage for wind power plants in a market system. Electrical Power and Energy Systems. Vol. 25, 2003, p. 599-606.

LUND, P.D., PAATERO, J.V., Energy storage options for improving wind power quality. Nordic wind power conference, 2006, Espoo (Finlàndia).

PEZZINI, P., [et. al.], FACTS location using genetic algorithm to increase energy efficiency in distribution networks. Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC).



## ANNEX A. IMPLANTACIÓ DE L'ENERGIA EÒLICA A CATALUNYA

Després de consultar diferents fonts oficials i associacions eòliques, s'ha considerat que EolicCat, l'Associació Eòlica de Catalunya, té les dades més actualitzades. Segons aquesta associació, a 1 de Gener de 2010, Catalunya disposa de 25 parcs eòlics en funcionament, distribuïts en les províncies de Lleida, Tarragona i Barcelona. Un cop desmantellat el parc eòlic de Roses, ja no n'hi ha cap en operació a la província de Girona.

La potència eòlica total instal·lada a Catalunya, obtinguda a partir dels 25 parcs en funcionament, és de 654,51 MW.

S'ha fet una estimació de la producció anual d'energia de cada parc, suposant per a cada parc un funcionament de 2000 hores equivalents anuals. És a dir, amb un factor de càrrega del 22,83%.

	Parc eòlic	Municipi	Comarca	Potència total parc [MW]	Producció anual d'energia [MWh/any]
1	<b>Serra Voltorera</b>	Cabra del Camp	Alt Camp	16	32.000
2	<b>Mudefer II</b>	Caseres, Bot	Terra Alta	12,6	25.200
3	<b>Conesa-1</b>	Conesa	Anoia	28	56.000
4	<b>Collet dels Feixos</b>	Duesaigües	Baix Camp	7,92	15.840
5	<b>Les Calobres</b>	El Perelló	Baix Ebre	12,75	25.500
6	<b>Les Colladetes</b>	El Perelló	Baix Ebre	36,63	73.260
7	<b>La Collada</b>	El Perelló	Baix Ebre	3	6.000
8	<b>Les Forques</b>	Forés, Passanant i Belltall	Conca de Barberà	30	60.000
9	<b>Serra de Vilobí</b>	Fulleda, Tarrés	Garrigues	40,5	81.000
10	<b>Mas de la Potra</b>	Pradell de la Teixeta, Duesaigües	Baix Camp	2,6	5.200
11	<b>Trucafort</b>	Pradell de la Teixeta, Torre de Fontaubella, Coldejou, L'Argentera	Priorat, Baix Camp	30,85	61.700
12	<b>Turó del Magre</b>	Pujalt, Veciana, Copons, Argençola, Sant Guim de Freixenet	Anoia	28	56.000

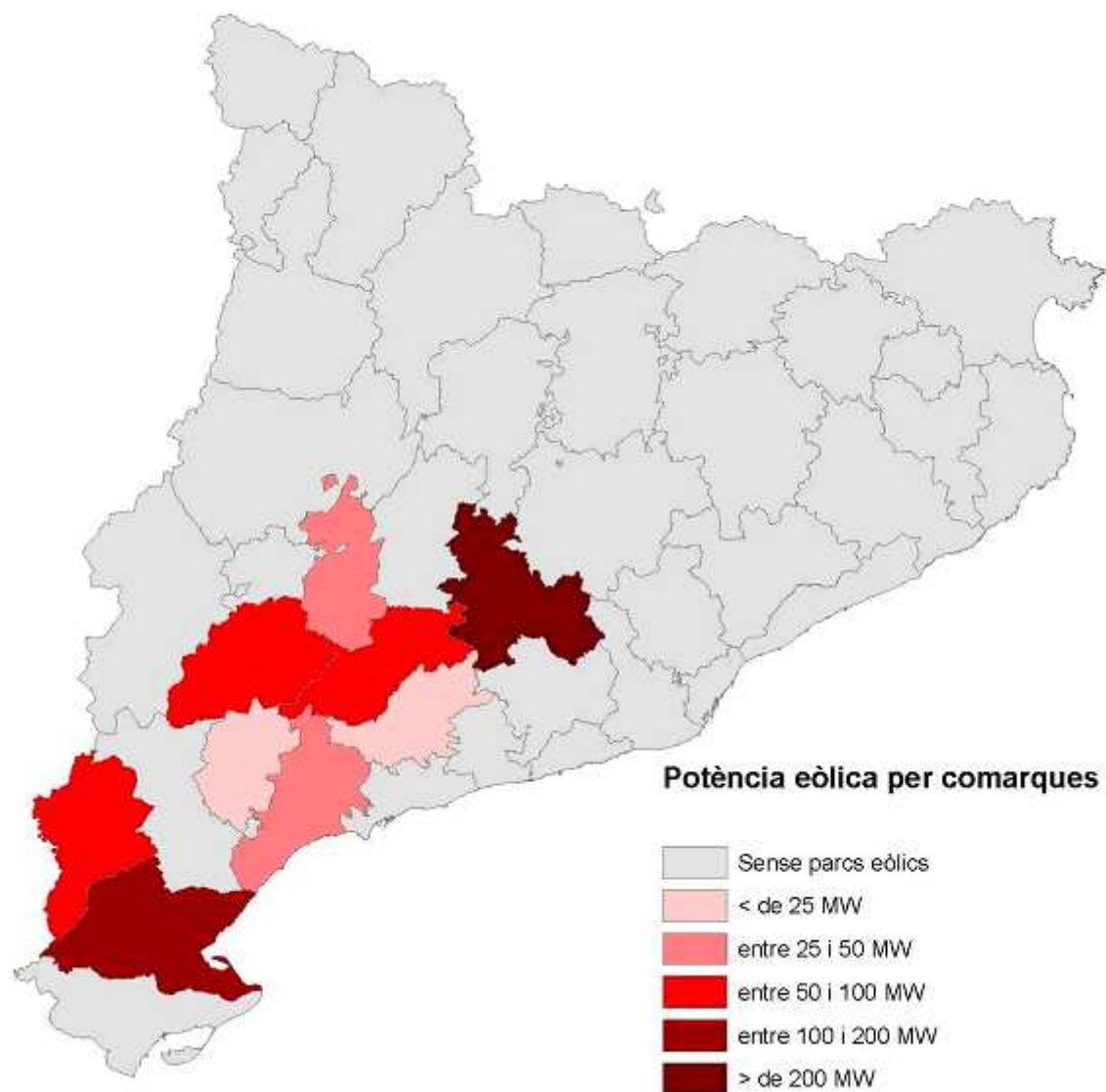


13	<b>Pujalt</b>	Pujalt, Veciana, Prats de Rei	Anoia	42	84.000
14	<b>Alta Anoia</b>	Pujalt, Veciana, Prats de Rei, Calonge de Segarra	Anoia	28	56.000
15	<b>Serra de Rubió II</b>	Rubió, Òdena	Anoia	25,5	51.000
16	<b>Serra de Rubió</b>	Rubió, Òdena, Castellfollit del Boix	Anoia	49,5	99.000
17	<b>Montargull</b>	Talavera, Llorac	Les Garrigues, C. de Barberà	44	88.000
18	<b>Baix Ebre</b>	Tortosa	Baix Ebre	4,05	8.100
19	<b>Ecovent</b>	Tortosa	Baix Ebre	48,1	96.200
20	<b>Tortosa</b>	Tortosa	Baix Ebre	29,9	59.800
21	<b>Serra del Tallat</b>	Vallbona de les Monges, Passanant i Belltall	Urgell, C. de Barberà	49,5	99.000
22	<b>El Motarro</b>	Vandellòs i l'Hospitalet de l'Infant	Baix Ebre	2,64	5.280
23	<b>Veciana</b>	Veciana	Anoia	33,4	59.340
24	<b>Les Comes</b>	Vilalba dels Arcs	Terra Alta	3	6.000
25	<b>Vilalba</b>	Vilalba dels Arcs	Terra Alta	49,8	99.600

**Ubicació, potència instal·lada i estimació d'energia produïda anualment dels parcs en funcionament a Catalunya a 1 de Gener de 2010. (Font: EolicCat i elaboració pròpia).**

Pel que fa a la distribució de la potència eòlica, la comarca que té més potència eòlica instal·lada és l'Anoia (234,4 MW), seguida pel Baix Ebre (137,07 MW).





Distribució comarcal de la potència eòlica instal·lada a Catalunya a 1 de Gener de 2010 (Font: EolicCat i elaboració pròpia).





## **ANNEX B. RETRIBUCIÓ DE L'ENERGIA EÒLICA A ESPANYA**

Per tal d'afavorir aquelles tecnologies que permeten reduir la dependència energètica exterior, aprofitant els recursos energètics disponibles, i millorar l'eficiència en la generació d'electricitat, es va crear un règim especial de generació elèctrica.

Des del punt de vista de la retribució econòmica, la producció d'energia elèctrica en règim especial es caracteritza per la possibilitat de rebre primes. Per determinar aquestes primes, es tenen en compte factors com el nivell de tensió de lliurament de l'energia a la xarxa, la contribució a la millora del medi ambient, l'estalvi d'energia primària, l'eficiència energètica i els costos d'inversió.

El RD 661/2007, regula l'activitat de producció d'energia elèctrica en règim especial. En l'article 2 de l'esmentat decret, s'indiquen totes aquelles instal·lacions de producció d'electricitat que es poden acollir a la categoria de règim especial. És el cas de les instal·lacions eòliques, entre d'altres.

Segons l'article 24 d'aquest decret, els titulars d'instal·lacions de producció d'energia elèctrica en règim especial, tenen tres opcions a l'hora de vendre l'electricitat:

1. Cedir l'electricitat al sistema a través de la xarxa de transport o distribució, i percebre'n una tarifa regulada, única per a tots els períodes de programació.
2. Vendre l'electricitat al mercat de producció d'energia elèctrica. En aquest cas, el preu de venda de l'electricitat és el preu que resulti al mercat organitzat o el preu lliurement negociat pel titular o el representant de la instal·lació, complementat, si s'escau, per una prima.
3. Vendre, part o la totalitat de l'energia a través d'una línia directa, sense que a aquesta energia li sigui d'aplicació el règim econòmic que regula el RD 661/2007.

Els titulars d'instal·lacions eòliques que opten per la primera opció (tarifa regulada), reben una quantitat fixa, única per a tots els períodes de programació, expressada en cèntims d'euro per quilowatt-hora. Durant els primers 20 anys de vida de l'instal·lació, la tarifa és de 7,3228 c€/kWh. A partir d'aleshores la tarifa es redueix a 6,12 c€/kWh.

Els titulars d'instal·lacions eòliques que opten per la segona opció (venda d'energia al



mercat de producció d'energia elèctrica), reben una quantitat addicional al preu que resulta del mercat. Aquesta prima, és variable, en funció del preu del mercat. S'estableix una prima de referència de 2,9291 c€/kWh i uns límits superior i inferior per a la suma del preu del mercat i la prima de referència. Aquests límits són, respectivament, 8,4944 c€/kWh i 7,1275 c€/kWh.

La prima a percebre a cada hora es calcula de la manera següent:

- i. Per a valors del preu del mercat més la prima de referència compresos entre el límit superior i inferior, el valor a percebre és la prima de referència.
- ii. Per a valors del preu del mercat més la prima de referència inferiors o iguals al límit inferior, el valor de la prima a percebre és la diferència entre el límit inferior i el preu horari del mercat diari en aquesta hora.
- iii. Per a valors del preu del mercat compresos entre el límit superior menys la prima de referència i el límit superior, el valor de la prima a percebre és la diferència entre el límit superior i el preu del mercat de referència en aquesta hora.
- iv. Per a valors del preu del mercat de referència superiors o iguals al límit superior, el valor de la prima a percebre és zero en aquesta hora.

Tabla 3

Grupo	Subgrupo	Potencia	Plazo	Tarifa regulada c€/kWh	Prima de referencia c€/kWh	Límite Superior c€/kWh	Límite Inferior c€/kWh
b.1	b.1.1	P≤100 kW	primeros 25 años	44,0381			
			a partir de entonces	35,2305			
		100 kW<P≤10 MW	primeros 25 años	41,7500			
			a partir de entonces	33,4000			
	10<P≤50 MW	primeros 25 años	22,9764				
		a partir de entonces	18,3811				
b.1.2		primeros 25 años	26,9375	25,4000	34,3976	25,4038	
		a partir de entonces	21,5498	20,3200			
b.2	b.2.1		primeros 20 años	7,3228	2,9291	8,4944	7,1275
			a partir de entonces	6,1200	0,0000		

